Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP



Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos

Misturas betuminosas densas a frio

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Porto no âmbito do protocolo de cooperação entre a FEUP e o LNEC

Porto, 2004

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos

Misturas betuminosas densas a frio

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Porto no âmbito do protocolo de cooperação entre a FEUP e o LNEC

Porto, 2004

625(043) BAT 2/ NOV
UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA M
N.º 78310
CDU 625(043)
Data 10 / 11 / 2004

Trabalho apoiado financeiramente pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia
e pelo Fundo Social Europeu no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio

Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos

Misturas Betuminosas Densas a Frio

RESUMO

O presente trabalho visa contribuir para promover a utilização de novas técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários que proporcionem a melhoria das condições de serviço dos referidos pavimentos, com um mínimo de dispêndio de recursos, quer económicos, quer ambientais.

Tendo em vista esse objectivo, passam-se em revista as técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis, quer as de uso corrente no nosso país, quer as de aplicação mais recente, discutindo-se as principais vantagens e inconvenientes inerentes a cada uma das referidas técnicas.

De entre as diversas técnicas de reabilitação de pavimentos abordadas, é dado um especial enfoque às misturas betuminosas densas a frio, consideradas de particular interesse atendendo à possibilidade de utilização quer em camadas novas, quer em reciclagem. As misturas betuminosas densas a frio são descritas, referindo-se os materiais que entram na sua composição e analisando-se os factores que afectam o seu comportamento. São discutidos e analisados comparativamente os métodos de formulação empregues nos diversos países. Finalmente referem-se os processos de fabrico das misturas e da sua aplicação em camadas de reforço e em camadas recicladas *in situ*.

São apresentados sete casos de obras no nosso país, onde foram aplicadas técnicas de reabilitação de pavimentos flexíveis utilizando este tipo de materiais. As referidas obras foram acompanhadas no âmbito do presente projecto de investigação, quer durante a sua realização, quer após a entrada em serviço do pavimento reabilitado. Para cada um dos casos é apresentada a caracterização dos materiais, o método empregue para a formulação das misturas, o processo construtivo, a caracterização da camada resultante, sendo igualmente discutidos os aspectos mais relevantes ligados à experiência adquirida através do acompanhamento da obra.

No que respeita à caracterização em laboratório deste tipo de materiais são estudados, de entre os diversos métodos possíveis para a preparação de provetes, aqueles que mais se adequam para a obtenção de provetes representativos das condições de obra. Para além deste aspecto é avaliada a influência das condições de cura em laboratório em comparação com as condições de cura reais, em obra.

Para a caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas densas a frio, foi estabelecido um vasto programa de ensaios laboratoriais de vários tipos, tendo em vista a avaliação das características relacionadas com o desempenho dos pavimentos onde estes se inserem. Assim, os ensaios realizados permitiram caracterizar as misturas do ponto de vista da sua deformabilidade, resistência à fadiga e às deformações permanentes. É estudada em pormenor a influência do processo de cura na evolução das características mecânicas. Os resultados obtidos nestes ensaios são analisados tendo em vista contribuir para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento de pavimentos incorporando misturas a frio, baseados na análise estrutural.

Finalmente são passados em revista os aspectos mais relevantes decorrentes do trabalho desenvolvido e estabelecem-se linhas de desenvolvimento futuro no domínio da utilização de misturas a frio na reabilitação de pavimentos.

Pavement Rehabilitation using New Techniques

Dense Graded Asphalt Cold Mixtures

ABSTRACT

The main purpose of this work is to contribute to promote the use of new road pavement rehabilitation techniques aimed at improving the service conditions of pavements, with the least possible use of both economic and environmental resources.

In order to accomplish this objective, the structural rehabilitation techniques of flexible pavements are reviewed, both those of current use in Portugal and those of more recent application. Furthermore, the main advantages and disadvantages of each technique mentioned are discussed.

Among the pavement rehabilitation techniques mentioned, special reference is made to dense graded asphalt cold mixtures, which are considered to be particularly relevant in view of their possibility of use in new layers and in recycling systems. These mixtures are described by referring to the materials in their composition and by analysing the main factors affecting their performance. The mix design methods used in different countries are comparatively analysed and discussed. Lastly, reference is made to the procedures used in the mixtures production and in their application either as overlays or as in situ recycled layers.

The document presents seven case studies in Portugal, concerning flexible pavement rehabilitation techniques using this type of materials. The works mentioned were followed up within the framework of the present research project, both during their execution and after trafficking has started. For each case, the material characteristics, the mix design method, the construction method, as well as the characterization of the resulting layers are presented. The most relevant aspects related with the experience gained with these activities are also discussed.

With respect to laboratory characterization of these materials, taking into account the possible methods for specimen preparation, a study was performed about the most appropriate methods for representation of the *in situ* conditions. Furthermore, the influence of the curing conditions in laboratory was assessed by comparison with the effective curing conditions, on site.

For mechanical characterization of dense graded asphalt cold mixtures, a comprehensive laboratory test programme was established, with the purpose of assessing pavement performance related properties. The tests performed made it possible to characterize the

mixtures from the point of view of their stiffness, fatigue and permanent deformation. A detailed study was performed concerning the influence of the curing procedure in the evolution of mechanical characteristics. The results obtained were analyzed with a view to contribute for the development of analytical pavement design methods for structures incorporating asphalt cold mixtures.

Lastly, the most relevant aspects resulting from the work developed are highlighted and future needs in the field of pavement rehabilitation using asphalt cold mixtures are identified.

Nouvelles Techniques de Réhabilitation des Chaussées

Enrobés Hydrocarbonés à Froid

RÉSUMÉ

L'objectif essentiel de ce travail est celui de contribuer à la promotion de l'utilisation de nouvelles techniques de réhabilitation des chaussées capables d'améliorer les conditions de service de ces revêtements, tout en faisant un usage des ressources économiques et environnementales le plus réduit que possible.

Pour atteindre cet objectif, les techniques de réhabilitation structurelle des revêtements flexibles sont révisées, soit celles d'usage courant au Portugal, soit celles d'application récente, tout en discutant les avantages et les inconvénients les plus importants de chacune des techniques mentionnées.

Parmi les plusieurs techniques de réhabilitation de chaussées abordées, on mentionne particulièrement les enrobés hydrocarbonés à froid, qui ont été considérés particulièrement relevants vis-à-vis de la possibilité d'usage, soit en couches de renforcement soit pour effets de recyclage des chaussées en place. Les mélanges bitumineux denses à froid sont décrits, tout en mentionnant les matériaux intégrés dans sa composition et tout en analysant les facteurs qui affectent leur comportement. Les méthodes de formulation utilisées dans plusieurs pays sont discutées et analysées. Finalement, les procédés de fabrication des mélanges et d'exécution des couches de renforcement et des couches recyclées in situ sont mentionnés.

Ce travail présente sept cas d'ouvrages au Portugal où des techniques de réhabilitation de chaussées souple avec ce type de matériaux ont été utilisées. Ces ouvrages ont été suivis dans le domaine de ce projet de recherche, soit pendant leur exécution, soit après la mise en service de la chaussée réhabilitée. Pour chacun des cas, les caractéristiques des matériaux, la méthode utilisée pour la formulation des mélanges, ainsi que le procédure de construction et les caractéristiques de la couche résultante sont présentés. Les aspects les plus relevants liés à l'expérience acquise pendant le suivi de l'ouvrage sont aussi discutés.

En ce qui concerne la caractérisation en laboratoire, parmi les plusieurs méthodes possibles pour la préparation d'éprouvettes, on a étudié les plus adéquates pour obtenir des échantillons représentatifs des conditions d'ouvrage. Au delà de cet aspect, on a évalué l'influence des conditions de mûrissement en laboratoire, en comparaison avec les conditions de mûrissement réelles sur le site.

Pour la caractérisation du comportement mécanique des mélanges bitumineux denses à froid, on a établi un vaste programme d'essais en laboratoire de plusieurs types, visant à évaluer les caractéristiques liées à la performance des chaussées où ils sont intégrés. Ainsi, les essais effectués ont permis de caractériser les mélanges du point de vue de leur déformabilité, de leur résistance à la fatigue et aux déformations permanentes. L'influence du procédé de mûrissement sur l'évolution des caractéristiques mécaniques a été analysée en détail. Les résultats obtenus dans ces essais ont été analysés afin de contribuer au développement des méthodes de dimensionnement de chaussées intégrant des mélanges à froid, basés sur l'analyse structurale.

Finalement, les aspects les plus relevants qui en résultent du travail développé sont révisés et des lignes de développement futur, dans le domaine de l'utilisation de mélanges à froid dans la réhabilitation de revêtements, sont identifiés.

Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos

Misturas Betuminosas Densas a Frio

PALAVRAS CHAVE

Pavimentos rodoviários

Reabilitação de pavimentos

Reciclagem de pavimentos

Misturas betuminosas

Misturas betuminosas densas a frio

Formulação de misturas betuminosas

Módulo de deformabilidade

Comportamento à fadiga

Comportamento às deformações permanentes

Comportamento estrutural de pavimentos

Pavement Rehabilitation using New Techniques

Dense Graded Asphalt Cold Mixtures

KEY-WORDS

Road pavements

Pavement rehabilitation

Pavement recycling

Asphalt mixtures

Dense graded asphalt cold mixtures

Asphalt mixtures design

Stiffness modulus

Fatigue resistance

Resistance to permanent deformation

Structural pavement performance

MOTS CLÉ

Chaussées

Réhabilitation de chaussées

Recyclage de chaussées

Enrobés hydrocarbonés

Enrobés hydrocarbonés denses à froid

Formulation de enrobés hydrocarbonés

Module élastique

Résistance à la fatigue

Résistance à la déformation permanente

Comportement structurel des chaussées

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de tese foi elaborado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), sob orientação da Doutora Engenheira Maria de Lurdes Antunes, Chefe do Núcleo de Infra-estruturas do Departamento de Transportes e Investigadora Principal do LNEC, e do Professor Doutor Arnaldo de Sousa Melo, Professor Catedrático e responsável pela Secção de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A autora deseja expressar a sua gratidão a todas as pessoas e entidades que contribuíram directa ou indirectamente para a realização deste trabalho.

Um primeiro agradecimento deve-se ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, como Instituição de Acolhimento, em particular à sua Direcção, por todos os meios e facilidades postos à disposição. Agradece igualmente à Direcção do Departamento de Transportes, na pessoa do Investigador Coordenador Engenheiro António Lemonde de Macedo.

A autora manifesta igualmente o seu agradecimento à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Instituição que Confere o Grau, pelo apoio institucional prestado.

Deseja também expressar um agradecimento à Fundação para a Ciência e a Tecnologia que, no âmbito do programa PRAXIS XXI, apoiou financeiramente os presentes estudos de investigação.

Deseja expressar um agradecimento especial à Doutora Engenheira Maria de Lurdes Antunes pela oportunidade de trabalhar numa área tão aliciante, pela formação e ensinamentos valiosos, bem como pela amizade manifestada, precioso apoio e estímulo recebidos. Agradece ainda a oportuna orientação científica do presente trabalho.

Uma palavra muito especial ao Professor Doutor Arnaldo de Sousa Melo, pela orientação, pelo inestimável apoio sempre recebido, pelo interesse e permanente disponibilidade.

Deseja prestar um agradecimento especial ao Investigador Coordenador Eng.º António Pinelo, ex-Director do Departamento de Transportes, pelo apoio desde sempre prestado, pela amizade e interesse manifestados, disponibilidade para troca de impressões, bem como pela leitura crítica do trabalho. Mesmo presentemente, que foi designado para outras funções, mantém o espírito de colaboração e orientação científica.

A autora gostaria ainda de agradecer:

Ao Instituto das Estradas de Portugal (IEP), em especial à Direcção de Estradas de Beja e à

Direcção de Estradas de Portalegre, em primeiro lugar pela possibilidade de utilizar resultados relativos ao acompanhamento das obras, pela colaboração prestada, nomeadamente através do fornecimento de elementos relativos às obras e na recolha de amostras.

Ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, e em particular ao Doutor Engenheiro Jaime Santos e Doutor Engenheiro José Neves, pelas facilidades concedidas na utilização do equipamento de ensaio *Nothingham Asphalt Tester* do Laboratório de Geotecnia.

À Probisa, em particular ao Engenheiro Hugo Guimarães, pelo fornecimento da maioria dos materiais usados nos ensaios laboratoriais.

Ao Engenheiro José Acácio Marques, ex-Director de Produção de Pavimentos Rodoviários da Monte & Monte, pela permanente disponibilidade para troca de impressões, bem como pelo fornecimento de elementos relativos às obras.

À Gabriel Couto pelo apoio na execução de alguns trabalhos de amostragem incluídos neste trabalho.

Ao Engenheiro Valverde Miranda, então pertencente à Direcção de Serviços Regionais de Estradas do Norte, pelo apoio prestado no início do presente trabalho, designadamente no estabelecimento de contactos com a FEUP.

Aos colegas do Núcleo de Materiais Plásticos e Compósitos do Departamento de Materiais pela realização dos ensaios relativos às emulsões betuminosas.

Ao colega Doutor Engenheiro João Marcelino pelo apoio prestado na utilização de um dos programas de cálculo automático utilizado no presente trabalho.

Aos colegas do Núcleo de Infra-estruturas do Departamento de Transportes, nomeadamente ao Técnico Experimentador Carlos Pimentel e à Engenheira Técnica Graziela Gato, e em especial ao Auxiliar Técnico de Ensaios Nuno Nunes que com empenho e espírito crítico, realizou a maioria dos ensaios do presente trabalho.

Aos restantes colegas do LNEC pela amizade e interesse manifestados e que, de diversas formas, me auxiliaram.

Ao Sector de Edições e Artes Gráficas do LNEC pela colaboração prestada na realização da capa.

Finalmente, mas não em último, um agradecimento especial aos meus amigos e, em particular, à minha família, pela compreensão que sempre tiveram e pelo apoio que sabiamente sempre me souberam transmitir.

LISTAS DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLOS

O significado dos símbolos usados é explicitado ao longo do texto, devidamente enquadrado nas matérias expostas. No entanto, julga-se ser conveniente apresentar a lista dos símbolos mais importantes.

Atendendo a que se procurou identificar as grandezas através dos símbolos habituais na bibliografia de cada uma das especialidades abordadas podem, por vezes, surgir símbolos com significados múltiplos.

Letras romanas

Símbolo	Significado
CBR	California Bearing Ratio
d/D	Fracção granulométrica em que se admite que até 10% em massa do material fique retido no peneiro de maior dimensão (D) e que até 10% em massa do material passe no peneiro de menor dimensão (d); sem que, no entanto, a soma daquelas duas percentagens seja superior a 15%
E	Módulo de deformabilidade; Módulo de elasticidade
EA	Equivalente de areia
f	Frequência de carregamento
h	Altura do provete ou altura da camada
M	Valor médio das deflexões num ensaio de carga com o deflectómetro de impacto
N	Número de aplicações de carga
p	Pressão de compactação
P	Carga do eixo padrão
P_{85}	Deflexão correspondente ao percentil 85
Pen	Penetração do betume
pH	Medida da acidez de uma substância
$R_{im.água}$	Resistência à compressão simples, depois de imersão em água do provete
R_{seco}	Resistência à compressão simples, sem imersão em água do provete
S_b	Módulo de rigidez do betume
t	Tempo
T_b	Teor em betume
TE	Taxa de expansão
TE_{max}	Taxa de expansão máxima
$TE_{máx.R}$	Taxa de expansão máxima real

TMD_p	Tráfego médio diário de veículos pesados
T	Temperatura
T_{AB}	Temperatura de amolecimento de anel e bola do betume
T_{pav}	Temperatura do pavimento
v	Velocidade de deformação
V_a	Percentagem volumétrica de agregados
V_b	Percentagem volumétrica de betume
V_v	Porosidade

Letras gregas

Símbolo	**Significado**
ε	Extensão; Deformação
ϕ_{int}	Diâmetro interno do molde
γ	Peso volúmico
γ_{betume}	Baridade do betume
γ_d	Baridade seca
$\gamma_{máx}$	Baridade máxima
$\gamma_{máx.t.}$	Baridade máxima teórica
$\gamma_{ref.}$	Baridade de referência
γ_w	Baridade húmida
μ	Viscosidade
ν	Coeficiente de Poisson
σ	Tensão
σ	Desvio padrão
$\sigma^{máx}$	Tensão de cedência
σ_y	Tensão de rotura por tracção em flexão, em ensaio de carregamento único
$\tau_{1/2}$	Meia vida da espuma
ω_0	Teor em água in situ
ω_{opt}	Teor óptimo em líquidos (ou em água)
ε_{adm}	Extensão de tracção admissível
Z	Potencial Zeta

Funções matemáticas

Símbolo	**Significado**
d f	Derivada de f
e^x	Exponencial de x
ln(x)	Logaritmo natural de x
log(x)	Logaritmo decimal de x

SIGLAS

Sigla	Significado
AASHO	American Association of State Highways Officials (ver AASHTO)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (anteriormente designada por AASHO)
ABGE	Agregados britados de granulometria extensa
ABGETE	Agregado britado de granulometria extensa, tratado com emulsão betuminosa
AFNOR	Association Française de Normalisation
AGC	The Associated General Contractors of America
AIPCR	Associação Internacional Permanente dos Congressos de Estrada
APORBET	Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association
ARTBA	American Road & Transportation Builders Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
BSI	British Standard Institution
CE	Comissão Europeia
CFTR	Comité Français pour les Techniques Routières
COST 333	Acção COST 333 – Development of New Bituminous Pavemennt Design Method
COST 343	Acção COST 343 – Reduction in Road Closures by Improved Maintenance Procedures
DGC	Dirección General de Carreteras (Espanha)
DOT	Department of Transportation (EUA)
DR	Diário da República
DSAT	Direcção de Serviços de Apoio Técnico da JAE, actual IEP
DSREN	Direcção de Serviços Regionais de Estradas do Norte da JAE
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EENN	Estradas Nacionais
ELSYM 5	Programa de cálculo
EM	Estrada Municipal
EN	Estrada Nacional
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
FLAC3D	Fast Lagrangian Analysis of Continua (tridimensional)
FORMAT	Fully Optimised Road Maintenance - Projecto Europeu
GE_E	Grava-emulsión (Espanha)
GE_F	Grave-émulsion (França)
ICERR	Instituto para a Conservação e Exploração da Rede Rodoviária
IC	Itinerário Complementar
IEP	Instituto de Estradas de Portugal
IP	Itinerário Principal
JAE	Junta Autónoma das Estradas, actual IEP
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEC E	Especificação do LNEC
NCAT	National Center for Asphalt Tecnology (EUA)

NF	Norme Française
NLT	Normas de ensayo (Espanholas)
NP EN	Norma Portuguesa baseada em Norma Europeia
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
PG	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (Espanha)
PRN	Plano Rodoviário Nacional
SABITA	Southern African Bitumen and Tar Association (África do Sul)
SGP	Sistema de Gestão da Conservação de Pavimentos

Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos

Misturas Betuminosas Densas a Frio

ÍNDICE GERAL

1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 - Enquadramento 1

1.2 - Objectivos 7

1.3 - Organização do trabalho 8

2 - CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS 11

2.1 - Generalidades sobre conservação de pavimentos 11

2.2 - Reabilitação estrutural de pavimentos 14

2.3 - Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis 15

2.3.1 - Introdução 15

2.3.2 - Reforço de pavimentos 18

2.3.2.1 - Misturas betuminosas a quente "convencionais" 20

2.3.2.2 - Misturas betuminosas de alto módulo 24

2.3.2.3 - Misturas com betumes modificados com polímeros 27

2.3.2.4 - Misturas betuminosas com borracha 30

2.3.2.5 - Misturas betuminosas a frio (com emulsão betuminosa) 38

2.3.2.6 - Técnicas anti-reflexão de fendas 45

2.3.3 - Reciclagem de pavimentos 54

2.3.3.1 - Misturas betuminosas recicladas a quente em central 56

2.3.3.2 - Misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio com emulsão betuminosa 64

2.3.3.3 - Misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio com espuma de betume 73

2.3.3.4 - Misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio com cimento 80

2.3.3.5 - Outras técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis 90

2.3.3.6 - Apreciação sucinta das técnicas de reciclagem *in situ* a frio 92

3 - MISTURAS BETUMINOSAS DENSAS A FRIO 95

3.1 - Introdução 95

3.2 - Tipos de misturas e suas aplicações 97

3.3 - Materiais empregues em misturas a frio 109

3.3.1 - Emulsões betuminosas 109

3.3.2 - Água 121

3.3.3 - Agregados 122

3.3.4 - A emulsão como ligante das misturas betuminosas para pavimentação 131

3.4 - Formulação de misturas a frio 137

3.4.1 - Aspectos gerais 137

3.4.2 - Descrição sumária de métodos de formulação utilizados em vários Países 139

3.4.3 - Análise comparativa de diferentes métodos de formulação 145

3.5 - Fabrico e aplicação em obra 147

3.5.1 - Misturas fabricadas em central 147

3.5.2 - Reciclagem a frio *in situ* 150

3.6 - Síntese das principais vantagens relacionadas com a aplicação de misturas a frio 156

4 - CASOS DE OBRA 163

4.1 - Introdução 163

4.2 - Obra de Reabilitação do Pavimento da EN 260 (IP8), entre Serpa e Vila Verde de Ficalho 164

4.2.1 - Descrição da obra 164

4.2.2 - Reciclagem do pavimento *in situ* a frio (km 40,200 a km 58,000) 167

4.2.2.1 - Generalidades 167

4.2.2.2 - Caracterização dos materiais empregues na reciclagem 168

4.2.2.3 - Formulação da mistura reciclada 172

4.2.2.4 - Processo construtivo 173

4.2.2.5 - Caracterização da camada reciclada 176
4.2.2.6 - Compacidade da camada de mistura reciclada 178
4.2.2.7 - Breve apreciação dos resultados 178
4.2.3 - Reforço com camada em macadame betuminoso a frio (km 31,000 a km 40,200) 180
4.2.3.1 - Generalidades 180
4.2.3.2 - Caracterização dos materiais empregues no fabrico do macadame betuminoso a frio 180
4.2.3.3 - Formulação da mistura do tipo macadame betuminoso a frio 181
4.2.3.4 - Processo construtivo 183
4.2.4 - Reforço com camada em mistura tipo ABGETE (km 40,200 a km 58,000) 187
4.2.4.1 - Generalidades 187
4.2.4.2 - Processo construtivo 188
4.2.5 - Caracterização estrutural e superficial do pavimento 189
4.3 - Obra de reabilitação do pavimento da EN108 entre o Porto e Entre-os-Rios 193
4.3.1 - Descrição da obra 193
4.3.2 - Caracterização dos materiais empregues na reciclagem 196
4.3.3 - Processo construtivo 196
4.3.4 - Caracterização estrutural do pavimento 199
4.3.4.1 - Selecção de secções piloto 199
4.3.4.2 - Modelos de comportamento estrutural do pavimentos 199
4.4 - Obra de reabilitação do pavimento da EN120 entre Aljezur e Bensafrim 201
4.4.1 - Breve descrição da obra 201
4.4.2 - Caracterização dos materiais empregues 201
4.4.3 - Estudo de formulação 203
4.4.4 - Processo construtivo 204
4.4.5 - Características da mistura betuminosa a frio 207
4.5 - Obra de Reabilitação do Pavimento da EN 120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro 209

4.5.1 - Descrição da obra 209

4.5.2 - Caracterização dos materiais empregues no fabrico da mistura de macadame betuminoso a frio 210

4.5.3 - Processo construtivo 212

4.5.4 - Composição da mistura aplicada 213

4.5.5 - Ensaios de "imersão-compressão" 215

4.5.6 - Compacidade da camada 216

4.5.7 - Evolução do processo de cura da camada 220

4.5.8 - Caracterização estrutural do pavimento 223

4.6 - Obra de reabilitação do pavimento do IP2 entre a Barragem do Fratel e a EN 118 225

4.6.1 - Descrição da obra 225

4.6.2 - Caracterização dos materiais empregues na reciclagem 228

4.6.3 - Estudo de formulação 230

4.6.4 - Processo construtivo 231

4.6.5 - Características da mistura reciclada 233

4.6.5.1 - Trecho experimental 233

4.6.6 - Aspectos particulares relativos ao controlo da qualidade 236

4.6.6.1 - Quantidade de betume residual da mistura reciclada a frio 237

4.6.6.2 - Granulometria da mistura reciclada 237

4.6.6.3 - Compacidade da camada reciclada 239

4.6.6.4 - Ensaios de imersão/compressão 240

4.6.7 - Evolução do processo de cura das misturas recicladas 242

4.7 - Apreciação sucinta dos resultados obtidos durante o acompanhamento das obras 244

4.7.1 - Viabilidade 245

4.7.2 - Estudos laboratoriais 246

4.7.2.1 - Caracterização dos materiais 246

4.7.2.2 - Estudos de formulação 246

4.7.3 - Trecho experimental 247
4.7.4 - Compacidade das misturas 247
4.7.5 - Cura das misturas 248
4.7.6 - Evolução do módulo de deformabilidade das misturas 249
4.7.7 - Controlo da qualidade 251

5 - REPRODUÇÃO EM LABORATÓRIO DA COMPACTAÇÃO E CURA DAS MISTURAS 253

5.1 - Introdução 253

5.2 - Fabrico das misturas 254

5.2.1 - Materiais empregues no fabrico das misturas 254
5.2.2 - Amassadura da mistura 259

5.3 - Compactação das misturas 261

5.3.1 - Generalidades 261
5.3.2 - Estudos preliminares relativos à compactação de misturas betuminosas densas a frio 263
5.3.3 - Breve descrição dos métodos de compactação seleccionados 270
5.3.3.1 - Compactação estática de duplo efeito 271
5.3.3.2 - Compactação *Proctor* 274
5.3.3.3 - Compactação *kneading* 277

5.4 - Evolução do processo de cura das misturas 282

5.4.1 - Generalidades 282
5.4.2 - Estudos preliminares relativos à cura de misturas betuminosas densas a frio 282

5.5 - Estudos relativos aos diversos tipos de compactação e condições de cura dos provetes 285

5.5.1 - Descrição da metodologia adoptada 285
5.5.2 - Compactação das misturas 288
5.5.3 - Cura das misturas 293
5.5.4 - Ensaios de "imersão-compressão" 297

5.6 - Síntese das principais conclusões alcançadas 301

6 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS BETUMINOSAS A FRIO 303

6.1 - Introdução 303

6.2 - Aspectos relativos ao comportamento estrutural de pavimentos incorporando misturas betuminosas a frio 305

6.2.1 - Modelos reológicos de comportamento dos materiais 305

6.2.2 - Mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis 309

6.2.3 - Consideração da cura das misturas 312

6.2.4 - Consideração do comportamento das misturas betuminosas a frio "novas" e recicladas relativamente ao das misturas betuminosas a quente 314

6.3 - Caracterização do comportamento das misturas betuminosas a frio 316

6.3.1 - Métodos de ensaio para caracterização do comportamento às deformações permanentes 316

6.3.2 - Métodos de ensaio para caracterização do módulo de deformabilidade e do comportamento à fadiga 319

6.3.3 - Condições de serviço das camadas betuminosas em pavimentos 321

6.3.4 - Programa de ensaios 324

6.4 - Caracterização do comportamento às deformações permanentes 327

6.4.1 - Generalidades 327

6.4.2 - Ensaios de compressão uniaxial com o *Nottingham Asphalt Tester* 331

6.4.2.1 - Descrição do método de ensaio 331

6.4.2.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios 338

6.4.3 - Ensaios de simulação em pista de laboratório 350

6.4.3.1 - Descrição do equipamento 350

6.4.3.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios 354

6.5 - Determinação do módulo de deformabilidade 361

6.5.1 - Generalidades 361

6.5.2 - Ensaios de compressão diametral com o *Nottingham Asphalt Tester* 362

6.5.2.1 - Descrição dos métodos de ensaio 362
6.5.2.2 - Evolução do módulo de deformabilidade ao longo do processo de cura da mistura 371
6.5.2.3 - Influência da temperatura no módulo de deformabilidade das misturas 376
6.5.3 - Ensaios de flexão 382
6.5.3.1 - Descrição dos métodos de ensaio 382
6.5.3.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios de flexão com o equipamento servo-hidraúlico do LNEC 385
6.6 - Caracterização do comportamento à fadiga 388
6.6.1 - Generalidades 388
6.6.2 - Ensaios de compressão diametral com o *Nottingham Asphalt Tester* 394
6.6.2.1 - Descrição do método de ensaio 394
6.6.2.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios 394
6.7 - Aspectos relativos ao dimensionamento de pavimentos por via analítica 399
6.7.1 - Generalidades 399
6.7.2 - Dimensionamento de estruturas de pavimentos incorporando misturas a frio 399
6.8 - Síntese das principais conclusões alcançadas 400

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS 403
7.1 – Considerações sobre as técnicas de reabilitação de pavimentos 403
7.2 – Síntese das principais conclusões alcançadas 405
7.3 – Desenvolvimentos futuros 408

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 411

ACERVO NORMATIVO 429

ANEXOS 433

ANEXO I.....435

ANEXO II.....443

ANEXO III.....455

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Principais características das misturas betuminosas a quente "tradicionais" que constam do Caderno de Encargos da JAE 23

Quadro 2.2 – Principais características das misturas betuminosas de alto módulo que constam do Caderno de Encargos Tipo da JAE 27

Quadro 2.3 – Principais características das misturas com betumes modificados com polímeros que constam do Caderno de Encargos Tipo da JAE e na publicação da APORBET 29

Quadro 2.4 – Especificações adoptadas para as misturas com betume modificado com borracha recentemente aplicadas em Portugal 37

Quadro 2.5 – Percentagens de ligante em misturas com betume modificado com borracha recentemente aplicadas em Portugal 38

Quadro 2.6 – Principais características das misturas betuminosas a frio que constam do Caderno de Encargos Tipo da JAE 44

Quadro 3.1 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (Santana, 1992) 100

Quadro 3.2 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (Azevedo, 1987) 100

Quadro 3.3 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (SETRA; AIPCR, 1990) ... 101

Quadro 3.4 – Tipo de emulsão betuminosa catiónica a empregar no fabrico de "*grave-emulsión*", segundo as especificações espanholas 116

Quadro 3.5 – Emulsões betuminosas segundo as especificações ASTM e AASHTO 118

Quadro 3.6 – Potencial Z de diferentes agregados (Paranhos, 1990) 124

Quadro 3.7 – Propriedades mais usuais para classificação dos agregados grossos e finos a utilizar em misturas betuminosas 125

Quadro 3.8 – Propriedades mais usuais para classificação do filer 126

Quadro 3.9 - Fusos granulométricos especificados nos documentos de referência portugueses e norte-americanos para misturas betuminosas a frio 127

Quadro 3.10 - Fusos granulométricos especificados nos documentos de referência espanhóis e franceses para misturas betuminosas a frio 128

Quadro 3.11 – Fusos granulométricos especificados nos documentos de referência para misturas recicladas com emulsão 129

Quadro 3.12 – Métodos de ensaio de "imersão-compressão" utilizados na formulação de misturas a frio 142

Quadro 3.13 – Critérios de formulação de misturas a frio - Método da Universidade de *Illinois*, EUA 142

Quadro 3.14 – Critérios de formulação de misturas a frio - Método "Espanhol" 143

Quadro 3.15 – Critérios de formulação de misturas a frio - Método AFNOR (França) 143

Quadro 3.16 – Resultados obtidos através de diferentes métodos de formulação (Gonçalves, 2000) 146

Quadro 4.1 – Características da emulsão betuminosa catiónica utilizada na reciclagem (EN 260) 171

Quadro 4.2 – Características da emulsão betuminosa catiónica utilizada no macadame betuminoso a frio (EN 260) 181

Quadro 4.3 – Características de misturas betuminosas a frio com diferentes percentagens de emulsão (EN 120 – A/B) 203

Quadro 4.4 – Características da mistura betuminosa a frio recolhida à saída da Central (EN 120 – A/B) 208

Quadro 4.5 – Características da mistura de agregados (EN 120 – O/LDF) 211

Quadro 4.6 – Características da emulsão betuminosa (EN 120 – O/LDF) 212

Quadro 4.7 – Teor em água e teor em betume residual da mistura produzida em obra (EN 120 – O/LDF) 214

Quadro 4.8 – Compacidade da camada de ABGETE. Ensaios com garrafa de areia (EN 120 – O/LDF) 218

Quadro 4.9 – Características do betume recuperado da mistura betuminosa a reciclar, da emulsão betuminosa adoptada e da mistura betuminosa reciclada (IP2) 231

Quadro 4.10 – Resultados obtidos no Trecho Experimental (IP2) 233

Quadro 4.11 – Extracção de betume de amostras da mistura reciclada (IP2) 237

Quadro 4.12 – Compacidade da camada reciclada (IP2) 240

Quadro 4.13 – Ensaios de imersão-compressão (IP2) 241

Quadro 5.1 – Características da emulsão betuminosa utilizada nos ensaios 257

Quadro 5.2 – Características da mistura de agregados (EN 120 – O/LDF)..... 259

Quadro 5.3 – Ensaios de "imersão-compressão" realizados com base no método "Espanhol", com variação da pressão de compactação dos provetes..... 265

Quadro 5.4 – Níveis de energia de compactação aplicados na moldagem de provetes prismáticos no equipamento *kneading*..... 281

Quadro 5.5 – Provetes moldados para efeitos de "imersão-compressão", submetidos a cura acelerada e a condicionamento segundo o Procedimento 1 da NLT162/84..... 286

Quadro 5.6 – Provetes moldados para efeitos de "imersão-compressão", submetidos a cura acelerada e a condicionamento segundo o Procedimento 2 da NLT162/84..... 287

Quadro 5.7 – Provetes moldados para efeitos de "imersão-compressão", submetidos a cura de 21 dias à temperatura ambiente e a condicionamento segundo o Procedimento 1 da NLT162/84..... 287

Quadro 5.8 – Baridade dos provetes moldados (g/cm^3) 289

Quadro 5.9 – Características do betume residual das misturas 297

Quadro 5.10 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação estática, à pressão de 21 MPa..... 298

Quadro 5.11 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação estática, à pressão de 8 MPa..... 298

Quadro 5.12 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação *Proctor* modificado..... 299

Quadro 5.13 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação *kneading*..... 299

Quadro 5.14 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação *kneading* com nivelamento 300

Quadro 6.1 – Condições de cura dos provetes..... 313

Quadro 6.2 – Ensaios "fundamentais" para avaliação do comportamento à deformação permanente dos materiais betuminosos..... 318

Quadro 6.3 – Ensaios para avaliação do comportamento dos materiais..... 320

Quadro 6.4 – Modelos de comportamento estrutural do pavimento da EN 120-O/LDF reforçado com uma camada em macadame betuminoso a frio..... 323

Quadro 6.5 – Modelos de comportamento estrutural do pavimento da EN 120-O/LDF reforçado com uma camada em macadame betuminoso a frio e uma camada de desgaste em betão betuminoso 323

Quadro 6.6 – Nomenclatura utilizada na programação dos ensaios para determinação da resistência às deformações permanentes das misturas 326

Quadro 6.7 – Nomenclatura utilizada na programação dos ensaios para determinação do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga das misturas 327

Quadro 6.8 – Temperaturas de ensaios para avaliação da resistência às deformações permanentes de misturas betuminosas 331

Quadro 6.9 – Valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas 349

Quadro 6.10 – Tipos de ensaios de simulação em pista de laboratório previstos na pré-norma europeia prEN 12697-22 351

Quadro 6.11 – Velocidade máxima de deformação (μm/min.) no intervalo de 105 a 120 min. (NLT 173/84) 353

Quadro 6.12 – Ensaios de simulação em pista de laboratório realizados sobre provetes preparados em laboratório: baridades dos provetes e resumo dos resultados obtidos 355

Quadro 6.13 – Ensaios de simulação em pista de laboratório realizados sobre provetes recolhidos em obra: baridades dos provetes e resumo dos resultados obtidos 360

Quadro 6.14 – Módulos de deformabilidade previstos através da aplicação das leis da Shell 377

Quadro 6.15 – Dimensões relativas ao equipamento servo-hidráulico do LNEC 383

Quadro 6.16 – Módulos de deformabilidade da mistura de *grave-bitume* (MPa) a 25ºC 387

Quadro 6.17 – Número de aplicações de carga admissíveis deduzidos a partir das leis de fadiga da Universidade de Nottingham (N_f^{UN}), da Shell (N_f^{Shell}) e do Asphalt Institute (N_f^{AI}) 393

Quadro 6.18 – Parâmetros (a e b) das leis de fadiga obtidas em ensaios de compressão diametral em tensão controlada 397

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Evolução do Tráfego Médio Diário em Portugal (dados do IEP) 2

Fig. 1.2 – Critérios a considerar na construção/reabilitação de pavimentos..... 4

Fig. 2.1 – Evolução do estado de um pavimento ao longo do tempo..... 15

Fig. 2.2 – Trabalhos de fresagem de um pavimento..... 19

Fig. 2.3 – Trecho de um pavimento (EN 104) em que se procedeu à fresagem das camadas betuminosas existentes 19

Fig. 2.4 – Viscosidade de um betume em função da temperatura (NCAT, 1999)..... 20

Fig. 2.5 – Configuração tradicional de uma central contínua de fabrico de misturas betuminosas a quente (EAPA, 1998) 22

Fig. 2.6 – Configuração tradicional de uma central descontínua de fabrico de misturas betuminosas a quente (EAPA, 1998) 22

Fig. 2.7 – Estrutura de pavimento reabilitado com uma camada de reforço em betão betuminoso tradicional ou com uma camada de reforço em mistura betuminosa de alto módulo..... 25

Fig. 2.8 – Borracha moída reciclada de pneus 31

Fig. 2.9 – Configuração de uma central contínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas com borracha reciclada de pneus (adaptado de EAPA, 1998) 33

Fig. 2.10 – Produção em central do betume modificado com borracha..... 33

Fig. 2.11 – Aspecto final da camada em mistura com betume modificado com borracha..... 36

Fig. 2.12 – Constituição de uma emulsão betuminosa..... 39

Fig. 2.13 – Organigrama para a formulação de misturas betuminosas densas fabricadas a frio com emulsão betuminosa..... 40

Fig. 2.14 – Configuração de uma central de fabrico de misturas betuminosas a frio (EAPA, 1998)..... 42

Fig.2.15 – Esquema da formação de fendas na camada de reforço por reflexão das fendas existentes no pavimento antigo 46

Fig. 2.16 – Mecanismos de reflexão de fendas (adaptado de Nunn, 1989) 47

Fig. 2.17 – Deslocamentos relativos das faces de uma fenda 48

Fig. 2.18 – Exemplos de deslocamentos relativos das faces das fendas, induzidos por diferentes tipos de solicitações 49

Fig. 2.19 – Esquema de um pavimento reabilitado com a aplicação de uma camada de reforço em que foram adoptadas medidas retardadoras da propagação de fendas 51

Fig. 2.20 – Soluções de reabilitação adoptadas num troço da EN 118 52

Fig. 2.21 – Aplicação de geotêxtil impregnado com emulsão betuminosa 53

Fig. 2.22 – Aplicação de grelha metálica com *slurry seal* 53

Fig. 2.23 – Configuração de uma central contínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados (adaptado de EAPA, 1998) 57

Fig. 2.24 – Configuração de uma central descontínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados (EAPA, 1998) 58

Fig. 2.25 – Outra configuração de uma central descontínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados (EAPA, 1998) 59

Fig. 2.26 – Organigrama para a formulação de misturas betuminosas fabricadas a quente, incorporando materiais fresados 62

Fig. 2.27 – Panorâmica de uma central contínua adaptada ao fabrico de misturas betuminosas incorporando materiais fresados de pavimentos 63

Fig. 2.28 – Pormenor do anel localizado na zona central do tambor secador-misturador para introdução do material a reciclar 64

Fig. 2.29 – Esquema das operações de reciclagem do pavimento (Wirtgen, 1997) 66

Fig. 2.30 – Trabalhos de reciclagem do pavimento 67

Fig. 2.31 – Esquema de produção de espuma de betume (Wirtgen, 2001c) 74

Fig. 2.32 – Diagrama típico de variação da taxa de expansão e da meia-vida da espuma de betume, com a percentagem de água e com a temperatura do betume 75

Fig. 2.33 – Curva teórica do decréscimo da taxa de expansão 76

Fig. 2.34 – Unidade laboratorial de produção de espuma de betume (Wirtgen, 2001a) 77

Fig. 2.35 – Fuso granulométrico adequado para a reciclagem com espuma de betume (Wirtgen, 2001c) 78

Fig. 2.36 – Sistema de adição de cimento à frente da máquina recicladora (Neussner, 2001) 81

Fig. 2.37 – Unidade de produção de calda de cimento e água a empregar como ligante na reciclagem *in situ* de pavimentos (adaptado de Wirtgen, 1998) 82

Fig. 2.38 – Organigrama para a formulação de misturas recicladas com cimento 86

Fig. 2.39 – Resistências e módulos de deformabilidade de misturas recicladas com cimento obtidos em diversas obras realizadas em França 87

Fig. 2.40 – Reciclagem a quente *in situ* de pavimentos flexíveis (EAPA, 1998) 91

Fig. 3.1 – Textura de diferentes tipos de misturas betuminosas a frio (adaptado de Serfass, 2002) 98

Fig. 3.2 – Histograma da distribuição de vazios numa mistura a quente (Serfass, 2002) 102

Fig. 3.3 – Histograma da distribuição de vazios numa mistura a frio (Serfass, 2002) 103

Fig. 3.4 – Estudo comparativo entre os fusos granulométricos das misturas de agregados a empregar no fabrico de camadas em ABGE, ABGETE e de MB 105

Fig. 3.5 – Sistema constituído por dois líquidos não miscíveis, ao qual é temporariamente fornecida energia mecânica (adaptado de Miranda, 1979) 109

Fig. 3.6 – Sistema constituído por dois líquidos não miscíveis, ao qual é adicionado um emulsionante e é temporariamente fornecida energia mecânica (adaptado de Miranda, 1979) 110

Fig. 3.7 – Emulsão betuminosa aniónica 111

Fig. 3.8 – Emulsão betuminosa catiónica 111

Fig. 3.9 – Esquema do processo de fabrico de uma emulsão betuminosa (Catálogo da Shell Betumes) 112

Fig. 3.10 – Dimensões e distribuição dos glóbulos de betume numa emulsão (Asphalt Institute MS-19) 113

Fig. 3.11 – Quantidade de sílica dos agregados de diversas naturezas (adaptado de Arcé Jiménez, 2001) 123

Fig. 3.12 – Esquema da rotura da emulsão e processo de cura da mistura betuminosa a frio (adaptado de Austroads, 2002) 132

Fig. 3.13 – Rotura por adsorção de uma emulsão catiónica na presença de um agregado calcário (adaptado de Serfass, 2002) 133

Fig. 3.14 – Rotura por adsorção de uma emulsão catiónica na presença de um agregado silicioso (adaptado de Serfass, 2002) 133

Fig. 3.15 – Ensaios de envolvimento de uma mistura de agregados para três tipos diferentes de emulsão betuminosa 136

Fig. 3.16 – Panorâmica geral de uma central para o fabrico de misturas betuminosas a frio 148

Fig. 3.17 – Pormenor da chegada do camião de transporte da mistura de ABGETE ao local da obra e descarga da mistura para a pavimentadora para o seu espalhamento 149

Fig. 3.18 – Aspecto das operações de compactação de uma camada em ABGETE 150

Fig. 3.19 – Esquema de reciclagem do pavimento *in situ* a frio com emulsão betuminosa (EAPA, 1995) 151

Fig. 3.20 – Pormenor da ligação da cisterna de emulsão à máquina recicladora 152

Fig. 3.21 – Pormenor da substituição dos "dentes" do rolo de fresagem da máquina recicladora 153

Fig. 3.22 – Rolo sem-fim de uma máquina recicladora 154

Fig. 3.23 – Pormenor do espalhamento de uma mistura reciclada *in situ* a frio 154

Fig. 3.24 – Trabalhos de reciclagem de um pavimento *in situ* a frio 155

Fig. 3.25 – Equipamento utilizado na compactação de uma camada reciclada *in situ* a frio 156

Fig. 4.1 – Aspecto da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (EN 260) 165

Fig. 4.2 – Esquema dos trabalhos de pavimentação realizados na plena via da EN 260, entre os km 40+200 e 58+000 168

Fig. 4.3 – Amostra de material fresado do pavimento existente (EN 260) 169

Fig. 4.4 – Equipamento de reciclagem utilizado (EN 260) 174

Fig. 4.5 – Compactação da camada reciclada (EN 260) 175

Fig. 4.6 – Pormenor da camada reciclada (EN 260) 176

Fig. 4.7 – Curvas granulométricas obtidas sobre amostras de mistura reciclada após extracção do betume (EN 260) 177

Fig. 4.8 – Compacidade das amostras da mistura reciclada (EN 260) 178

Fig. 4.9 – Refluimentos de betume à superfície do pavimento reciclado (EN 260) 179

Fig. 4.10 – Panorâmica geral da central para o fabrico de misturas betuminosas a frio (EN 260) 183

Fig. 4.11 – Pormenor da central de fabrico das misturas betuminosas a frio (EN 260) 184

Fig. 4.12 – Pormenor da descarga da mistura betuminosa a frio fabricada (EN 260) 185

Fig. 4.13 – Execução da camada de macadame betuminoso a frio (EN 260) 186

Fig. 4.14 – Aspecto da camada de macadame betuminoso a frio executada (EN 260) 187

Fig. 4.15 – Aspecto de tarolos recolhidos na EN 260, após a conclusão da segunda fase da obra de reabilitação 191

Fig. 4.16 – Módulos de deformabilidade das camada de macadame betuminoso a frio (EN 260) 192

Fig. 4.17 – Módulos de deformabilidade das camada recicladas (EN 260) 192

Fig. 4.18 – Aspecto da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (EN 108) 194

Fig. 4.19 – Esquema dos trabalhos de pavimentação realizados na plena via da EN 108 195

Fig. 4.20 – Envolvente das curvas granulométricas obtidas sobre amostras de material reciclado (EN 108) 196

Fig. 4.21 – Fresagem do pavimento existente previamente à passagem da máquina recicladora (EN 108) 197

Fig. 4.22 – Aspecto da mistura à saída da máquina recicladora (EN 108) 197

Fig. 4.23 – Aspecto das operações de compactação do pavimento reciclado (EN 108) 198

Fig. 4.24 – Pormenor da camada reciclada (EN 108) 198

Fig. 4.25 – Módulos de deformabilidade das camada recicladas (EN 108) 200

Fig. 4.26 – Granulometria da mistura de agregados (EN 120 – A/B) 202

Fig. 4.27 – Panorâmica geral da central para o fabrico de misturas betuminosas a frio (EN 120 – A/B) 204

Fig. 4.28 – Quadro de controlo das operações da central de fabrico das misturas betuminosas a frio (EN 120 – A/B) 205

Fig. 4.29 – Execução da camada de reforço em macadame betuminoso a frio (EN 120 – A/B) 206

Fig. 4.30 – Trabalhos de compactação da camada em macadame betuminoso a frio (EN 120 – A/B) 206

Fig. 4.31 – Aspecto da camada em macadame betuminoso a frio executada (EN 120 – A/B) 207

Fig. 4.32 – Curva granulométrica da mistura de agregados, fórmula de trabalho e fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos tipo da JAE (EN 120 – O/LDF) 211

Fig. 4.33 – Execução da camada de macadame betuminoso a frio (EN 120 – O/LDF) 213

Fig. 4.34 – Ensaios de "imersão-compressão", realizados sobre provetes moldados com mistura recolhida em obra (EN 120 – O/LDF) 215

Fig. 4.35 – Ensaio Proctor modificado (EN 120 – O/LDF) 217

Fig. 4.36 – Compacidade das amostras de macadame betuminoso a frio (EN 120 – O/LDF) ... 219

Fig. 4.37 – Evolução do teor em água da mistura com a idade da camada (EN 120 – O/LDF) 221

Fig. 4.38 – Tarolos extraídos à rotação da camada de ABGETE (EN 120 – O/LDF) 222

Fig. 4.39 – Evolução da altura dos tarolos extraídos através de sondagens à rotação, com a idade da camada (EN 120 – O/LDF) 222

Fig. 4.40 – Módulos de deformabilidade da camada de macadame betuminoso a frio (EN 120 – O/LDF) 224

Fig. 4.41 – Aspecto da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (IP2) 226

Fig. 4.42 – Pormenor da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (IP2) 227

Fig. 4.43 – Curvas granulométricas de amostras do material desagregado do pavimento existente através da acção de uma máquina fresadora (IP2) 229

Fig. 4.44 – Trabalhos de reciclagem do pavimento (IP2) 232

Fig. 4.45 – Trabalhos de compactação da camada reciclada (IP2) 232

Fig. 4.46 – Curvas granulométricas de amostras de material desagregado do pavimento existente através da acção da máquina recicladora e de uma amostra de mistura reciclada (IP2) 235

Fig. 4.47 – Curvas granulométricas de amostras de mistura reciclada (IP2)..... 238

Fig. 4.48 – Baridades secas medidas "*in situ*" pelo método do núcleo-densímetro (Troxler 3450) e "garrafa de areia" (IP2) 239

Fig. 4.49 – Evolução do teor em água da mistura reciclada com a idade da camada (IP2)..... 243

Fig. 4.50 – Evolução da altura dos tarolos extraídos com a idade da camada reciclada (IP2) 244

Fig. 4.51 – Módulos de deformabilidade das camada de macadame betuminoso a frio 250

Fig. 4.52 – Módulos de deformabilidade das camada recicladas..... 250

Fig. 5.1 – Curvas granulométricas das fracções de agregados utilizados em laboratório (A1 e A2) e na obra (EF) 256

Fig. 5.2 – Curvas granulométricas das misturas de agregados utilizadas no fabrico das misturas betuminosas a frio..... 258

Fig. 5.3 – Homogeneização da emulsão betuminosa a utilizar na amassadura 260

Fig. 5.4 – Misturadora mecânica utilizada no fabrico das misturas em laboratório 261

Fig. 5.5 - Baridade seca de misturas compactadas segundo diferentes processos de compactação..... 264

Fig. 5.6 – Ensaios de "imersão-compressão" (método "Espanhol"), realizados sobre provetes moldados a diferentes pressões, com misturas recolhidas em obra 266

Fig. 5.7 – Compacidades obtidas na obra da EN 120 – O/LDF imediatamente após a entrada em serviço e após 1,5 anos, nas proximidades do km 113,530 267

Fig. 5.8 – Compacidades obtidas na obra da EN 120 – O/LDF imediatamente após a entrada em serviço e após 1,5 anos, nas proximidades do km 119,100 268

Fig. 5.9 – Compacidades obtidas na obra da EN 120 – O/LDF imediatamente após a entrada em serviço e após 1,5 anos, nas proximidades do km 112,180 269

Fig. 5.10 – Moldagem de provetes em misturas a frio através de compactação estática de duplo 274

Fig. 5.11 – Equipamento de compactação *Proctor* do LNEC 276

Fig. 5.12 – Compactação de provetes cilíndricos com o equipamento *kneading* 279

Fig. 5.13 – Compactação de provetes prismáticos no equipamento *kneading* 281

Fig. 5.14 – Condições de cura dos provetes 283

Fig. 5.15 – Evolução do teor em água da mistura reciclada na obra do IP2 com a idade da camada 284

Fig. 5.16 – Condicionamento à temperatura ambiente de provetes moldados em laboratório 288

Fig. 5.17 – Baridade seca de misturas compactadas segundo diferentes processos de compactação 289

Fig. 5.18 – Baridade seca de cada um dos terços de provetes moldados segundo diferentes processos de compactação 291

Fig. 5.19 – Curvas granulométricas de provetes moldados com diferentes tipos de compactação, após extracção do betume 292

Fig. 5.20 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação estática a 21 MPa) 294

Fig. 5.21 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação estática a 8 MPa) 294

Fig. 5.22 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação *Proctor* modificado) 295

Fig. 5.23 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação *kneading*) 295

Fig. 5.24 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação *kneading* com nivelamento/compactação estática) 296

Fig. 6.1 – Deformações permanentes à superfície do pavimento 304

Fig. 6.2 – Modelos reológicos de *Hook*, *Newton* e *Saint-Venant* 306

Fig. 6.3 – Modelo de *Kelvin-Voigt* e diagrama de deformação/tempo 308

Fig. 6.4 – Modelo de *Maxwell* e diagrama de tensão-tempo 308

Fig. 6.5 – Modelo de *Burgers* e diagrama de tensão-tempo 308

Fig. 6.6 – Comportamento viscoelástico das misturas betuminosas (adaptado de Eckmann, 1999) 309

Fig. 6.7 – Principais mecanismos de degradação associados ao comportamento das misturas betuminosas (adaptado de Eckmann, 1999) 311

Fig. 6.8 – Curvas granulométricas das composições da mistura *grave-bitume* (GB) e do macadame betuminoso a frio (MBF) 315

Fig. 6.9 – Estrutura do pavimento reabilitado da EN 120-O/LDF em duas fases distintas 322

Fig. 6.10 – Relação entre a extensão permanente vertical acumulada e o número de ciclos em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas 329

Fig. 6.11 – Zonas climáticas em Portugal Continental (adaptado de A. M. Baptista, 1999) 330

Fig. 6.12 – Provete cilíndrico submetido a ciclos de cargas de compressão uniaxial 332

Fig. 6.13 – Ensaio de compressão uniaxial no equipamento NAT do IST 334

Fig. 6.14 – Esquematização do efeito de "embarrilamento" dos provetes quando não lubrificação das placas 334

Fig. 6.15 – Representação gráfica das funções de aplicação de carga tipo *haversine* e *onda quadrática* 336

Fig. 6.16 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 1 dia de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente 338

Fig. 6.17 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 2 dias de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente 339

Fig. 6.18 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 7 dias de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente 339

Fig. 6.19 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 14 dias de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente 340

Fig. 6.20 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 1 mês de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente 340

Fig. 6.21 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 2 meses de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente 341

Fig. 6.22 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 2 meses de idade curados à temperatura ambiente sem película 341

Fig. 6.23 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 4 meses de idade curados à temperatura ambiente, 2 meses com película e 2 sem película 342

Fig. 6.24 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 4 meses de idade curados à temperatura ambiente sem película envolvente 342

Fig. 6.25 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 4 dias de idade com cura acelerada (1 dia à temperatura ambiente e 3 dias a 60°C).... 343

Fig. 6.26 – Extracção de tarolos na obra da EN 120 – O/LDF 344

Fig. 6.27 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes de campo (EN120–O/LDF) com dois anos de idade..... 345

Fig. 6.28 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes de campo (IP2) com seis meses de idade..... 346

Fig. 6.29 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes de campo em mistura betuminosa a quente tipo *"grave-bitume"* 347

Fig. 6.30 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes fabricados e curados em diferentes condições 348

Fig. 6.31 – Extensão permanente acumulada em função do número de carregamentos aplicados, num ensaio com 3600 ciclos 349

Fig. 6.32- Ensaio de simulação em pista de laboratório com o equipamento do LNEC..... 352

Fig. 6.33 – Provetes prismáticos para ensaios em pista de laboratório..... 354

Fig. 6.34 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 1 dia 356

Fig. 6.35 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 1 semana..... 356

Fig. 6.36 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 1 mês 357

Fig. 6.37 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 2 meses 357

Fig. 6.38 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 4 meses 358

Fig. 6.39 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com cura acelerada.... 358

Fig. 6.40 – Extração de lajetas na obra da EN 120 – O/LDF 359

Fig. 6.41 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes recolhidos em obra (EN120-O/LDF)..... 360

Fig. 6.42 – Ensaio de compressão diametral no NAT..... 363

Fig. 6.43 – Equipamento de ensaio NAT 364

Fig. 6.44 – Localização da secção diametral horizontal do provete cilíndrico 367

Fig. 6.45 – Modelo geométrico do provete 368

Fig. 6.46 – Distribuição de tensões no provete 369

Fig. 6.47 – Distribuição de tensões horizontais (σ_{xx}) ao nível da secção diametral horizontal do provete 370

Fig. 6.48 – Módulos de deformabilidade de provetes de macadame betuminoso a frio moldados em laboratório, determinados em ensaios com o NAT 371

Fig. 6.49 – Comparação entre os módulos dos provetes moldados em laboratório e os de provetes recolhidos na obra para vários tipos de misturas (ensaios com o NAT) 373

Fig. 6.50 – Variação do módulo de deformabilidade com a temperatura de provetes em macadame betuminoso a frio, submetidos a diferentes condições de cura 378

Fig. 6.51 – Variação do módulo de deformabilidade com a temperatura de provetes de mistura reciclada a frio (IP2) 379

Fig. 6.52 – Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios para avaliação da influência da temperatura no módulo de deformabilidade e as leis da Shell (f=2,5Hz) 380

Fig. 6.53 – Comparação entre os resultados da influência da temperatura do módulo de deformabilidade obtidos e as leis da Shell (f=2,5Hz) 381

Fig. 6.54 – Esquema do dispositivo utilizado nos ensaios de flexão simples 383

Fig. 6.55 – Ensaio de flexão simples realizado no equipamento servo-hidráulico do LNEC 385

Fig. 6.56 – Provetes prismáticos para ensaio no equipamento servo-hidráulico do LNEC 386

Fig. 6.57 – Módulo de deformabilidade de provetes prismáticos de macadame betuminoso a frio totalmente curados 386

Fig. 6.58 – Módulo de deformabilidade de provetes prismáticos de *grave-bitume* 387

Fig. 6.59 – Comportamento à fadiga (NAT) de provetes moldados em laboratório 395

Fig. 6.60 – Comportamento à fadiga (NAT) de provetes de misturas betuminosas a frio e a quente 396

Fig. 6.61 – Comparação do comportamento à fadiga de provetes ensaiados no NAT com as leis de fadiga da Shell, do Asphalt Institute e com as obtidas para o GB em ensaios de flexão 398

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Enquadramento

Antes da publicação, em 1985, do Plano Rodoviário Nacional, a rede rodoviária nacional compreendia cerca de 18 000 km de Estradas Nacionais. A partir dessa data, com a desclassificação de uma parte da rede de Estradas Nacionais então existente, a rede nacional passou a compreender uma extensão da ordem de 10 000 km, que incluia a construção de cerca de 5 000 km de novos Itinerários Principais (IP) e Itinerários Complementares (IC). Assistiu-se desde então então a uma importante modernização da rede rodoviária nacional, a par de um notável crescimento do tráfego e de um aumento das exigências de qualidade, bem como uma crescente preocupação com as questões ambientais, nas quais se destacam aspectos ligados à sinistralidade e à necessidade de reciclar materiais para preservar os recursos.

No Plano Rodoviário Nacional de 2000, algumas estradas anteriormente desclassificadas foram reclassificadas, passando a rede nacional a compreender, para além de 10 000 km de Itinerários Principais (IP), Itinerários Complementares (IC) e Estradas Nacionais (EN), cerca de 5 000 km de estradas pertencentes a redes regionais. De entre estas estradas, mais de 90% possuem pavimentos do tipo flexível, isto é, pavimentos constituídos por camadas de materiais granulares e de misturas betuminosas.

Em Portugal, sente-se também cada vez mais a necessidade de estender as preocupações com a preservação do património e com a qualidade das estradas, às redes que não estão incluídas na Rede Rodoviária Nacional, que, se estima, compreendem mais de 80 000 km de estradas e caminhos Municipais.

No Livro Branco da Comissão Europeia estimava-se em 2000 (C.E., 2000) que o aumento de tráfego rodoviário de passageiros e de mercadorias (50% de tráfego pesado) entre 2000 e 2010 se situaria à volta de 24 e 38%, respectivamente.

Em Portugal, tem-se registado igualmente, um grande aumento do tráfego, conforme se ilustra na Fig. 1.1.

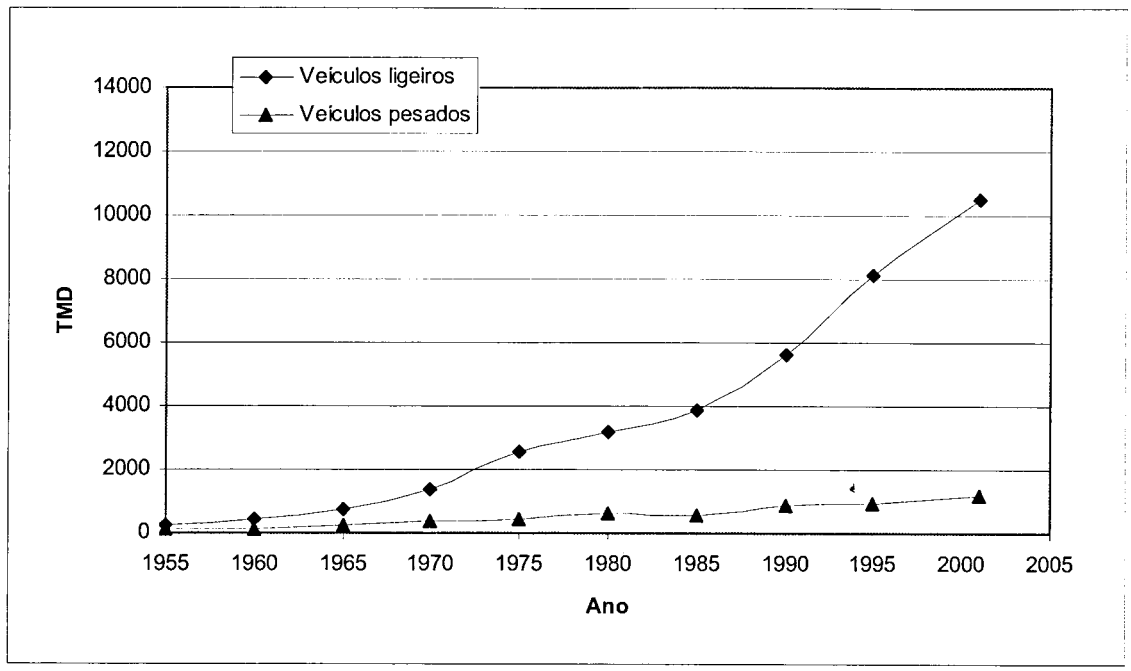


Fig. 1.1 – Evolução do Tráfego Médio Diário em Portugal (dados do IEP)

As Administrações Rodoviárias deparam-se, hoje em dia, com o grande objectivo de conservar e reabilitar o património construído, cingindo-se aos orçamentos disponíveis, bem como o de prosseguir com a modernização da rede, de acordo com os novos níveis de tráfego e com as crescentes exigências de qualidade.

Por outro lado, é imperativo que a conservação e reabilitação de pavimentos atenda às questões ambientais, favorecendo a economia de matérias primas a utilizar na construção rodoviária e o aproveitamento de materiais alternativos.

Para a concretização destes objectivos, não é possível continuar a aplicar única e exclusivamente as técnicas tradicionais na conservação e reabilitação de pavimentos. O orçamento limitado disponibilizado para estas actividades, a necessidade de diminuir os impactes ambientais e também os custos suportados pelos utentes, motivados pelo mau estado dos pavimentos, ou pelo fecho frequente da via para obras, justificam plenamente o estudo de novas soluções, nomeadamente daquelas que têm vindo a ser implementadas no nosso país, a título experimental.

Com efeito, as acções de reabilitação de pavimentos na rede rodoviária nacional, têm vindo a privilegiar a adopção de reforços estruturais, o que se justifica plenamente em casos de estradas de maior importância e de auto-estradas, das quais se exige uma elevada fiabilidade. Este tipo de solução nem sempre se adequa, porém, a estradas de menor importância, para cuja reabilitação se dispõe de orçamentos mais reduzidos.

Por outro lado, as crescentes preocupações ambientais têm levado a um incentivo, por parte de diversos organismos internacionais, no sentido da adopção de técnicas que possibilitem a economia de matérias primas e a reutilização ou reciclagem dos materiais já existentes nas estradas a reabilitar (OCDE, 1997).

A percepção de que os recursos da natureza são escassos e devem ser preservados para as gerações futuras e de que qualquer forma de desenvolvimento só será sustentável se promover o equilíbrio entre as necessidades económicas e sociais das populações e a protecção do meio ambiente, sendo relativamente recente, tem levado a que os impactos ambientais tenham peso crescente também nas decisões relacionadas com a construção e a exploração/conservação das estradas.

Sabe-se que os pavimentos rodoviários são projectados para um dado período de vida, durante o qual deverão ser alvo de medidas de conservação e findo o qual se procederá à sua reabilitação de acordo com as condições e critérios da altura. Este facto, obriga, ainda, a que actualmente, quando da tomada de decisão da sua construção e/ou reabilitação, sejam utilizadas técnicas e materiais que não comprometam a sua reabilitação de forma sustentável no futuro, ou seja, que os materiais utilizados sejam "economicamente" recicláveis.

A noção de desenvolvimento sustentável, implícita em vários documentos produzidos pela Comunidade Europeia (Acto Único Europeu, 4º Programa de Acção Comunitário no Domínio do Ambiente, Tratado de Maastricht), adquire maior relevo em 1992, no V Programa Comunitário em Matéria de Ambiente e Desenvolvimento Sustentável marcado pela Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano, realizada no Rio de Janeiro, e pela Agenda 21 (1992). O V Programa tem como objectivo conjugar o princípio da subsidiariedade com uma noção mais vasta de partilha das responsabilidades entre os diferentes agentes. Para a obtenção de resultados tangíveis, a Comissão Europeia fixa prioridades em seis domínios de acção:

- A gestão durável dos recursos naturais;
- A luta integrada contra a poluição e a gestão de resíduos;
- A redução do consumo da energia proveniente de recursos não renováveis;
- A gestão melhorada da mobilidade;
- A melhoria da qualidade no meio urbano;
- A melhoria da saúde e da segurança.

Para além dos dois critérios clássicos de exequibilidade técnica e económica, os projectos de construção ou reabilitação de estradas têm já nos dias de hoje que satisfazer a um terceiro e particularmente exigente critério, que é o da minimização dos impactes ambientais negativos (*vd* Fig. 1.2).

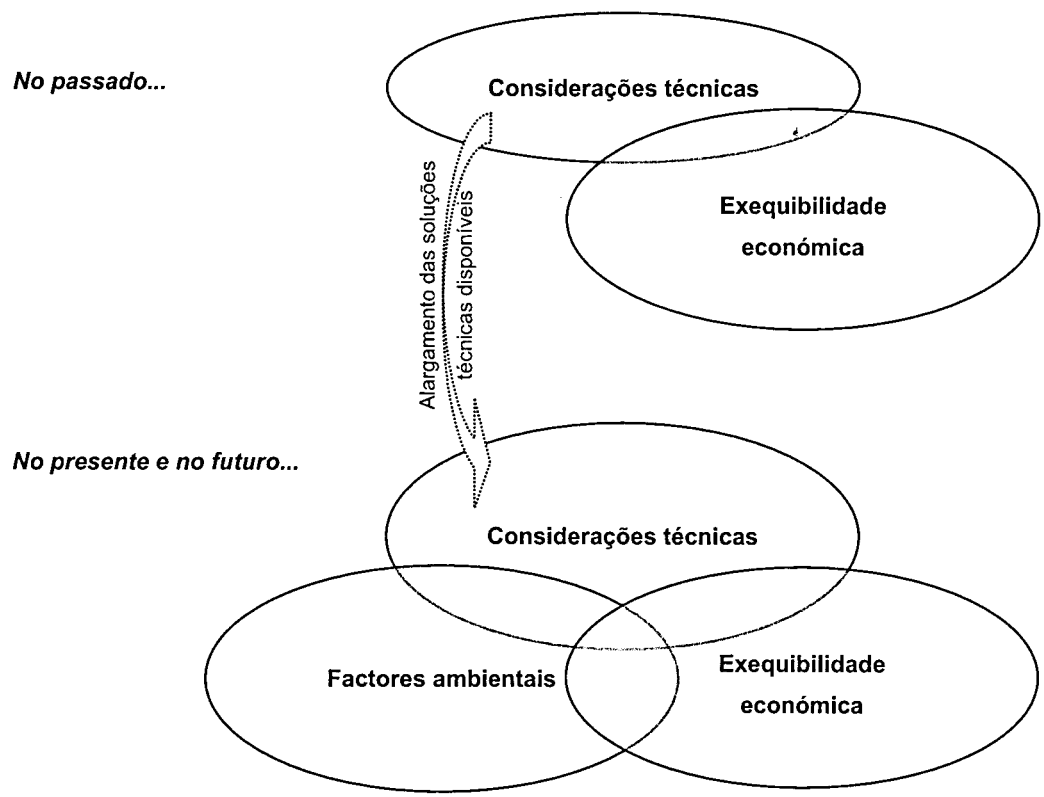


Fig. 1.2 – Critérios a considerar na construção/reabilitação de pavimentos

A conjugação destes factores sócio-económicos e ambientais, tem conduzido ao aparecimento de novas técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários que tendem a responder aos actuais níveis de exigência.

À utilização de materiais alternativos e de novas técnicas para a conservação e reabilitação de pavimentos são, no entanto, levantadas algumas objecções, dado que os referidos materiais nem sempre obedecem às especificações de uso corrente, não sendo também conhecido o desempenho, a médio e longo prazo, das novas soluções de pavimentação. Tal desempenho depende, não só dos materiais e técnicas construtivas adoptadas, mas

também de outros aspectos, tais como o estado do pavimento, a sua constituição, o tráfego utente, condições climatéricas, etc.

Nos últimos anos tem, pois, surgido a necessidade de se desenvolverem estudos de novas técnicas e de novos materiais que proporcionem uma relação custo/benefício das intervenções mais favorável, e uma diminuição dos custos ambientais e dos custos dos utentes, sem prejuízo do seu desempenho face às características que se pretendem reabilitar ou conservar.

É neste contexto que se insere o presente trabalho, no qual são abordadas diferentes técnicas de reabilitação de pavimentos de utilização recente em Portugal.

Sendo diversas as técnicas não tradicionais que têm vindo a ser utilizadas no nosso país, houve, após uma fase inicial do trabalho, necessidade de focalizar os estudos apenas num tipo de técnica de reabilitação de pavimentos - a execução de camadas em misturas betuminosas densas a frio.

As misturas betuminosas densas a frio a que se refere, são misturas fabricadas com emulsão betuminosa (emulsão de betume com água), e podem ser fabricadas com agregados novos, sendo este o caso das "misturas de agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa", ou podem ser misturas fabricadas com material proveniente da fresagem das camadas do pavimento existente até determinadas profundidades, ao qual são eventualmente adicionados materiais novos, ou seja, "misturas recicladas a frio".

Nos últimos anos tem-se verificado um interesse crescente na utilização de misturas fabricadas com emulsão betuminosa, devido por um lado a uma indiscutível melhoria da tecnologia associada a este tipo de materiais e, por outro, às vantagens ambientais e económicas relacionadas com a poupança de energia que deriva do emprego destes ligantes. Em finais dos anos 90, já uma importante parte do consumo de betumes (cerca de 30%) utilizados em Espanha e em França, se realizava sob a forma de emulsão (Fernández del Campo,1998).

Às misturas a frio com emulsão betuminosa são reconhecidos inegáveis benefícios económicos e ambientais, existindo ainda, no entanto, algumas lacunas de conhecimentos importantes no que concerne à sua formulação, à sua correcta aplicação em obra, e ao seu controlo da qualidade. Não existem também, conhecimentos suficientemente consolidados relativamente ao processo de "cura" das misturas betuminosas a frio, que constitui um dos aspectos que condiciona o sucesso deste tipo de obras, ou relativamente ao comportamento a longo prazo de pavimentos nos quais se utilizou este tipo de materiais.

Em resumo, face aos conhecimentos actuais no domínio das misturas a frio, e, em particular, das misturas recicladas *in situ* com emulsão betuminosa, sente-se a necessidade de aprofundar os conhecimentos relativos ao seu comportamento mecânico por forma a poder quantificar adequadamente o contributo das camadas em misturas betuminosas densas a frio no comportamento estrutural do pavimento; como e quando devem ser empregues por forma a obterem-se resultados satisfatórios e; quais são as vantagens e inconvenientes que apresentam em relação a outras técnicas de reabilitação.

Actualmente, existem diversos projectos de investigação europeus em curso acerca deste tema. Nos projectos em curso há que distinguir diferentes linhas de investigação que traduzem a problemática desta técnica, com as suas vantagens, carências e limitações, como seguidamente se sintetiza (Pérez Jiménez, 2003):

- Materiais

  A investigação, neste domínio, a cargo essencialmente da indústria, tem-se centrado no desenvolvimento de novas emulsões betuminosas, que permitam um melhor envolvimento dos agregados e que proporcionem uma maior coesão da mistura.

- Formulação das misturas betuminosas / estudo das misturas em laboratório

  As misturas fabricadas a frio têm um comportamento diferente das misturas a quente, factor que deve ser tido em conta no seu estudo e formulação. Estas misturas deverão ser estudadas e caracterizadas em laboratório em condições de fabrico e de acções impostas, o mais semelhantes possíveis às de obra.

  Nas misturas a frio há que considerar uma questão adicional comparativamente às misturas a quente, que é o período de cura inicial. Após a execução da camada, a mistura vai ganhando coesão e a água ainda presente vai sendo eliminada. Este período de cura e as características finais da mistura variam consoante as condições de aplicação em obra e as condições climatéricas da zona. Assim, para um estudo completo destas misturas tem que se ter em linha de conta o efeito deste período de cura e caracterizar a mistura nas suas diferentes fases.

- Processo de execução das camadas

  No caso particular das misturas recicladas *in situ* a frio, um dos campos que tem sido alvo de investigações relaciona-se com o equipamento de reciclagem, ou seja, com o processo de escarificação do pavimento, com a homogeneidade e granulometria dos materiais reciclados.

  No caso geral das misturas a frio, quer novas, quer recicladas, um dos aspectos a que se tem prestado especial atenção diz respeito à sua compactação em obra. Na

execução de camadas em misturas a frio tem-se verificado com alguma frequência que existem dificuldades na compactação, e que as compacidades relativamente reduzidas que se obtêm influem negativamente o comportamento das misturas aplicadas.

- 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 misturas a frio, tem-se verificado um aumento progressivo dos módulos de deformabilidade das camadas à medida que o processo de cura se desenvolve. Considera-se que não existem ainda conhecimentos suficientemente consolidados relativamente à evolução do comportamento das camadas com misturas a frio ao longo do processo de cura. Os mecanismos de degradação associados aos pavimentos com misturas a frio carecem igualmente de mais estudos, por forma a dispor-se de ferramentas adequadas para o dimensionamento deste tipo de pavimentos.

Conforme se descreverá na secção que se segue, com o presente trabalho pretende-se responder a algumas das questões acima colocadas.

1.2 - Objectivos

Do exposto anteriormente ressalta a importância de, quando da decisão de reabilitar um pavimento, se conhecerem as técnicas - convencionais e inovadoras - passíveis de serem utilizadas em cada caso, bem como as respectivas vantagens e desvantagens, por forma a optimizar-se a escolha da solução a implementar.

Neste sentido, o objectivo geral deste trabalho é o de contribuir para o melhor conhecimento de técnicas não tradicionais de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis, quanto à respectiva eficácia, aos materiais e processos construtivos utilizados, e ao comportamento dos pavimentos onde tais técnicas são aplicadas.

Conforme foi anteriormente referido, os estudos levados a cabo no âmbito do presente trabalho foram mais aprofundados no que diz respeito à utilização de misturas betuminosas densas a frio – reforço e reciclagem de pavimentos – na reabilitação de pavimentos.

As misturas "a frio" a que se refere, quer novas (misturas fabricadas com agregados novos), quer recicladas (misturas fabricadas com material fresado de pavimentos), têm em comum o facto de terem na sua composição emulsão betuminosa. Esta circunstância confere a estas

misturas características e comportamentos semelhantes, muito embora as misturas recicladas apresentem algumas especificidades resultantes do facto de serem fabricadas com materiais fresados de pavimentos. A maioria das conclusões deduzidas de estudos realizados sobre misturas novas, poderá pois, em certa medida, ser estendida para as misturas recicladas.

O presente trabalho tem como principal objectivo específico o de contribuir para consolidar conhecimentos relativos às misturas betuminosas densas a frio (novas ou recicladas), em particular, no que concerne ao comportamento mecânico deste tipo de misturas, e à sua consideração no dimensionamento de estruturas do pavimento, tendo em atenção o seu processo de cura.

1.3 - Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em 8 capítulos. Neste primeiro capítulo tecem-se algumas considerações gerais relativamente ao tema, e apresentam-se os objectivos do trabalho.

No capítulo 2 abordam-se aspectos relativos à conservação e reabilitação de pavimentos, sendo expostos alguns conceitos e referidos diferentes tipos de técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos. No âmbito das técnicas de reabilitação de pavimentos, descrevem-se sucintamente os processos básicos envolvidos na produção das misturas betuminosas usualmente utilizadas em Portugal. Posteriormente, abordam-se neste capítulo, algumas técnicas não tradicionais de reabilitação estrutural de pavimentos que têm vindo a ser implementadas no nosso país, sendo descritos alguns casos de obra em que foram utilizadas estas técnicas de pavimentação.

O capítulo 3 é dedicado às misturas betuminosas densas a frio. São apresentados aspectos relativos à caracterização dos materiais a empregar e aos estudos de formulação das misturas, ao seu fabrico, aplicação em obra e controlo da qualidade, bem como à evolução no tempo das propriedades das misturas aplicadas. Conclui-se o capítulo sintetizando-se as principais vantagens e desvantagens decorrentes do uso deste tipo de materiais.

No capítulo 4 apresenta-se a experiência adquirida em diversas obras de reabilitação de pavimentos rodoviários em que foram aplicadas técnicas construtivas utilizando misturas betuminosas a frio, tais como, a reciclagem *in situ* a frio de pavimentos e a utilização de misturas betuminosas densas a frio fabricadas em central. Relativamente a este último tipo de técnicas, abordam-se em particular as misturas constituídas por agregados britados de

granulometria extensa tratados com emulsão betuminosa (ABGETE). Para cada uma das obras referidas descreve-se o acompanhamento levado a cabo e que incidiu, em geral, não só sobre os estudos de caracterização dos materiais a empregar e de formulação das misturas, e sobre o seu fabrico e aplicação em obra, como também sobre o desempenho dos pavimentos reabilitados após entrada em serviço.

O capítulo 5 diz respeito à simulação em laboratório das condições de obra. Apresentam-se estudos desenvolvidos para a preparação em laboratório de provetes representativos das condições de obra, com o objectivo de contribuir não só para uma melhoria dos estudos de formulação do tipo de misturas betuminosas em apreço, mas também para a obtenção de provetes para os ensaios de caracterização do comportamento mecânico das misturas.

O capítulo 6 é dedicado à caracterização mecânica das misturas betuminosas a frio, tendo em vista contribuir para o aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento, através de um melhor conhecimento da resposta destes materiais à repetida acção das cargas do tráfego pesado. No que concerne ao comportamento mecânico das misturas são abordados os seguintes aspectos:

- Módulos de deformabilidade de misturas com diferentes idades e condições de cura; avaliação da influência da temperatura;
- Resistência à fadiga;
- Resistência às deformações permanentes.

No capítulo 7 apresenta-se uma síntese das principais conclusões decorrentes da realização deste trabalho, e são sugeridos alguns aspectos a desenvolver que se consideram relevantes para o prosseguimento dos estudos relativos à utilização das "técnicas a frio" na reabilitação de pavimentos.

2 - CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS

2.1 - Generalidades sobre conservação de pavimentos

Os pavimentos rodoviários devem ser projectados, construídos e conservados por forma a proporcionar ao utente, uma superfície de rolamento livre e desempenada, que permita a circulação dos veículos em adequadas condições de segurança, conforto e economia. Com o passar do tempo, sob a acção do tráfego e dos agentes atmosféricos, o estado do pavimento vai-se alterando, o que poderá resultar no aparecimento de degradações, tais como, irregularidade superficial (longitudinal ou cavados de rodeira) e fendilhamento.

O estado de um pavimento em determinado período da sua vida de projecto, pode ser descrito através de diversos indicadores, que se agrupam em dois conjuntos principais: as características funcionais e as características estruturais.

Designam-se por **características funcionais** aquelas que se relacionam directamente com as condições de circulação dos veículos, tais como, a regularidade geométrica da superfície (longitudinal e transversal), a sua capacidade de proporcionar aderência entre o pneu e o pavimento e a capacidade de drenagem das águas superficiais. Tem-se pois que as características funcionais compreendem essencialmente características da superfície da camada de desgaste.

As **características estruturais** de um pavimento correspondem à sua capacidade de carga (Antunes, 1993), ou seja, à capacidade desse pavimento para suportar as acções devidas ao tráfego futuro (OCDE, 1987), sob determinadas condições atmosféricas.

Convém aqui salientar que os dois tipos de características, funcionais e estruturais, estão intrinsecamente interligados. Assim, tem-se por exemplo, que a existência de fendilhamento à superfície do pavimento provocado por diferenças de temperatura, proporciona a entrada de água para o interior da estrutura, o que conduz, como é sabido, à degradação do comportamento estrutural dos materiais das camadas, em espécial as constituídas por solos e materiais granulares. Por outro lado, a capacidade de carga de um pavimento vai diminuindo sob a acção repetida da passagem dos rodados dos veículos, estando associados a esta redução, fenómenos de degradação, tais como, deformações permanentes excessivas e formação de ninhos e peladas (que podem ser consequência do

fendilhamento das camadas betuminosas) que afectam directamente as características de regularidade de um pavimento.

As acções de conservação e de reabilitação têm por fim a preservação ou a correcção das características funcionais e estruturais de um pavimento após a sua construção.

Uma ausência de conservação ou uma conservação tardia de um pavimento acarreta custos de diferentes naturezas. Têm-se, por exemplo, custos sócio-económicos associados à destruição de património existente, custos económicos e ambientais associados ao desgaste dos veículos e ao consumo de combustível, e ainda, custos económicos e humanos associados à ocorrência de acidentes motivados pela degradação das condições de serviço da via.

Existem diversas formas de classificar as acções de conservação. Assim, por exemplo, quanto aos seus objectivos, as actividades de conservação podem dividir-se em:

- **Conservação funcional**, quando visam a manutenção ou a correcção de características superficiais ou geométricas;
- **Conservação estrutural**, quando visam a preservação, o aumento ou a reposição da capacidade de carga de um pavimento.

Quanto ao nível das intervenções, distinguem-se três tipos de acções de conservação: conservação corrente, conservação preventiva e reabilitação (Asphalt Institute IS-178, 1987; FHWA, 1999).

A **conservação corrente**, também designada por alguns autores por "conservação ordinária" (AIPCR, 1990), engloba as acções de conservação que são efectuadas de uma forma rotineira, tendo em vista manter um determinado nível de serviço mínimo durante a vida útil da via. São geralmente acções dispersas e de pequena escala, como por exemplo, tapagem de covas e desobstrução de valetas.

Enquadram-se na **conservação preventiva**, as acções de conservação que têm em vista retardar o desenvolvimento de degradações no pavimento, sem no entanto, aumentar significativamente a sua capacidade de carga. São exemplos deste tipo de intervenção, a selagem de fendas e a impermeabilização da superfície através da execução de camadas betuminosas finas.

Na **reabilitação** de pavimentos agrupam-se as acções de conservação que têm em vista repor ou aumentar o nível de serviço do pavimento. No caso particular da conservação "estrutural", trata-se essencialmente de medidas de reforço do pavimento ou de reconstrução.

Naturalmente que algumas das acções de conservação "funcional", ao melhorarem o estado superficial do pavimento, têm também uma acção "preventiva" nos factores que contribuem para a degradação do pavimento do ponto de vista estrutural; no entanto, a sua capacidade de carga não é melhorada.

Por outro lado, quando o tráfego aumenta relativamente ao projectado, deve adaptar-se a estrutura do pavimento às novas condições, assegurando que a sua capacidade de carga seja suficiente, ou seja, este facto conduz à necessidade de, mais cedo ou mais tarde, se adoptarem medidas de reabilitação do pavimento em causa.

A adopção de uma estratégia adequada de conservação dos pavimentos, por forma a que não seja atingida uma condição "crítica" a partir da qual a degradação do pavimento aumenta significativamente, permite evitar o agravamento dos custos suportados pelas várias entidades envolvidas (administração e utentes) (Powell *et al.*, 1984).

Em síntese, os principais objectivos da conservação de pavimentos rodoviários são os seguintes:

- Preservar o capital constituído pela rede rodoviária;
- Assegurar um nível de serviço correcto aos utentes oferecendo uma superfície adequada à circulação com custos mínimos e com condições de segurança e de conforto.

De forma a atingir os objectivos atrás enunciados podem adoptar-se diferentes estratégias de intervenção a nível do pavimento, levando em linha de conta a hierarquização de rede, a importância do tráfego e os recursos financeiros disponíveis para se atingirem os objectivos pretendidos.

Para apoio à decisão de se intervir num dado troço de estrada pertencente a uma determinada rede, recorre-se a Sistemas de Gestão da Conservação de Pavimentos (SGP) utilizando modelos de programação das acções de conservação e reabilitação, baseados em modelos de previsão da evolução do estado dos pavimentos.

A qualidade dos pavimentos é avaliada através de um índice indicador do estado do pavimento, determinado em função de um ou mais parâmetros indicadores de estado, como sejam, fendilhamento, cavados de rodeira, irregularidade longitudinal, deflexões, etc (HRB/AASHO Test, 1962; PARIS, 1999; Ferreira *et al.*, 1999; Santos *et al.*, 2002).

Uma vez tomada a decisão de intervir num dado pavimento, os principais critérios a ter em linha de conta para a selecção de técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos a adoptar são de natureza técnica, económica e ambiental, conforme se sintetiza seguidamente (COST 343, 2003a e 2003b):

- Considerações técnicas:
  - Eficácia na resolução dos problemas existentes;
  - Desempenho a longo prazo (exigências de qualidade futuras);
- Factores económicos:
  - Minimização dos custos suportados pelos utentes, durante a aplicação (rapidez de execução) e após entrada em serviço (longevidade);
  - Minimização dos custos da obra (construção e conservação);
- Factores ambientais:
  - Minimização dos impactes ambientais.

Relativamente aos diferentes tipos de acções de conservação de pavimentos, a reabilitação estrutural é, geralmente, a medida que exige mais meios, sendo também aquela que permite responder simultaneamente aos problemas relacionados com as características funcionais e estruturais.

Seguidamente abordar-se-ão aspectos relativos à reabilitação estrutural de pavimentos.

2.2 - Reabilitação estrutural de pavimentos

Conforme referido anteriormente, um pavimento rodoviário tem no início da sua "vida" um determinado "nível de serviço", traduzido pelas condições de segurança, conforto e economia que proporciona ao utente. No entanto, sob a acção do tráfego e dos agentes atmosféricos, o pavimento vai-se degradando ao longo do tempo, até atingir um estado que já não satisfaz a critérios mínimos de funcionalidade e/ou estruturais. A este período dá-se o nome de "vida útil" ou "vida de serviço" do pavimento. A duração da vida útil do pavimento é função de diversos factores, entre os quais, o tipo de estratégia de conservação adoptado.

Durante a sua vida útil, o pavimento deverá ser alvo de medidas de conservação; findo este período torna-se necessário proceder à sua reabilitação, por forma a restabelecerem-se as desejadas características de funcionalidade e estruturais do pavimento. Na Fig. 2.1 representa-se graficamente a evolução do estado de um pavimento ao longo do tempo e os efeitos resultantes da adopção de medidas de conservação e/ou de reabilitação.

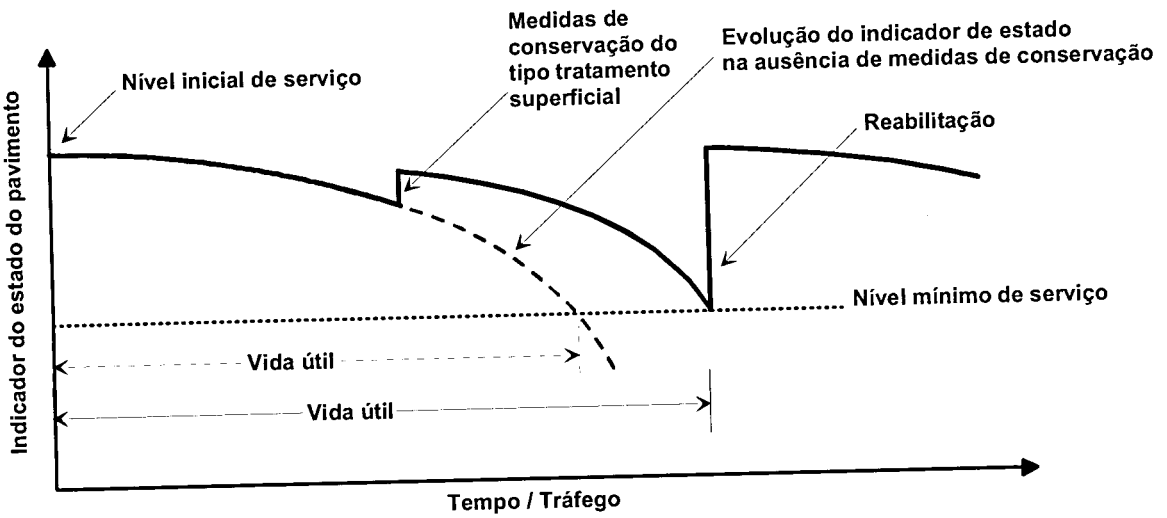


Fig. 2.1 – Evolução do estado de um pavimento ao longo do tempo

As medidas de reabilitação da estrutura de um pavimento são normalmente tidas como soluções de longo prazo. Em estradas, a vida útil considerada nos projectos de reabilitação de pavimentos situa-se, em geral, entre 10 a 20 anos.

A escolha de uma solução de reabilitação deverá ser feita de modo a minimizar os custos directos e indirectos, incluindo os custos ambientais, e maximizar os benefícios dessa intervenção no pavimento. Deve pois, ser suportada por uma análise custo-benefício na qual se tenham em consideração, da melhor forma possível, as consequências da adopção de determinadas opções, quer em termos de técnica de reabilitação, quer em termos de vida útil a considerar para o pavimento reabilitado.

2.3 - Técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis

2.3.1 - Introdução

A partir do início do século XX, observou-se nos países desenvolvidos, uma tendência para a crescente utilização de misturas betuminosas na pavimentação de estradas. A aplicação deste tipo de materiais em camadas de desgaste de pavimentos, apresenta diversas vantagens, tal como, a sua capacidade de proporcionar uma superfície livre, desempenada e impermeável, para que os pavimentos possam suportar as acções do tráfego em quaisquer condições climatéricas, aliada a uma maior facilidade de colocação em obra, sobretudo quando comparada com outras alternativas, nomeadamente, com o betão de cimento. Nos últimos anos, a aplicação de misturas betuminosas tem-se estendido a outras

camadas de pavimento, em particular, às camadas de base (Azevedo, 1993). Tal, deve-se essencialmente, à necessidade de as estruturas de pavimento fazerem face às novas solicitações, resultantes por um lado de um maior volume de tráfego rodoviário, e por outro, de um aumento significativo das cargas transportadas pelos veículos.

Em Portugal, os pavimentos flexíveis, ou seja, pavimentos com a camada de desgaste em mistura betuminosa e com as camadas subjacentes em material granular e/ou misturas betuminosas, representam mais de 90% da extensão da rede rodoviária.

Por esta razão, neste estudo, decidiu-se focar a atenção nas técnicas de reabilitação de pavimentos flexíveis.

Embora a técnica utilizada mais frequentemente na reabilitação de pavimentos flexíveis seja a execução de reforços com misturas betuminosas a quente, diversos factores, como sejam os aspectos económicos, as crescentes exigências de qualidade e as cada vez maiores preocupações ambientais, têm conduzido ao aparecimento de novas técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários, que poderão nalguns casos, constituir alternativas interessantes às técnicas "tradicionais". Torna-se pois indispensável conhecer, em cada caso, quais as técnicas de reabilitação (correntes/inovadoras) passíveis de serem utilizadas, bem como as respectivas vantagens e desvantagens, por forma a optimizar-se a escolha da solução a implementar.

A nível Europeu têm-se desenvolvido projectos no sentido de contribuir para um melhor conhecimento das técnicas de conservação/reabilitação de pavimentos utilizadas na Europa, em particular a Acção COST 343 – "*Reduction in Road Closures by Improved Maintenance Procedures*" (COST 343, 2001, 2003a e 2003b) e o Projecto FORMAT – "*Fully Optimised Road Maintenance*" (FORMAT, 2003 e 2004). A Acção COST 343 teve início em Abril de 1999, com uma duração de 4 anos, tendo como principal objectivo o de estabelecer critérios de optimização na selecção das alternativas de conservação e dos procedimentos para a sua implementação, através de um melhor equilíbrio entre a solução técnica de conservação dos pavimentos e os custos suportados pelos utentes, nomeadamente aqueles que decorrem de atrasos e eventuais acidentes resultantes da execução das obras. O Projecto FORMAT, iniciado em 2002, tem como objectivo contribuir para uma melhor eficiência das actividades relacionadas com a conservação de pavimentos, em quatro áreas principais: técnicas de conservação, aspectos económicos (análise custos-benefícios), aspectos ligados à segurança rodoviária (condicionamentos do tráfego durante as obras de conservação); e técnicas de auscultação de pavimentos, em especial, as de alto rendimento.

Verifica-se que as técnicas "inovadoras" que têm vindo a ser recentemente utilizadas em Portugal no âmbito da reabilitação estrutural de pavimentos, são também consideradas

inovadoras noutros países europeus (Cost 343, 2001; FORMAT, 2003 e 2004), podendo-se referir as seguintes:

- Reforço de pavimentos com misturas betuminosas de alto módulo;
- Reforço de pavimentos com misturas com betumes modificados com polímeros;
- Reforço de pavimentos com misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus;
- Reforço de pavimentos com misturas betuminosas a frio;
- Reciclagem de pavimentos flexíveis:
  - Reciclagem a frio *in situ*;
  - Reciclagem a quente em central;
  - Outras técnicas (reciclagem a quente *in situ*; reciclagem semi-quente, etc).
- Reforço de pavimentos adoptando técnicas anti-reflexão de fendas.

Por serem inovadoras, estas técnicas apresentam evidentemente, alguns aspectos que requerem desenvolvimento, em particular, no que concerne a:

- Materiais, métodos de formulação e processos construtivos,
- Dimensionamento;
- Características relacionadas com o desempenho:
  - Em laboratório (Deformabilidade, resistência à fadiga e às deformações permanentes);
  - Em obra (Comportamento estrutural, regularidade superficial, etc);

No campo das misturas betuminosas, distinguem-se dois grandes grupos: as **misturas betuminosas "a quente"** e as **misturas betuminosas "a frio"**. As misturas betuminosas a quente são aquelas em que se usa betume (puro ou modificado) como ligante, produto praticamente sólido à temperatura ambiente, recorrendo-se ao seu aquecimento para o fabrico, espalhamento, e compactação da mistura. 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, podendo ser misturadas, espalhadas e compactadas à temperatura ambiente. Recentemente, tem também vindo a ter maior divulgação outro tipo de misturas betuminosas a frio, utilizando espuma de betume.

Por serem as mais frequentemente utilizadas, das quais se dispõe de mais experiência, far-se-á seguidamente uma descrição sumária das misturas betuminosas a quente que são habitualmente utilizadas em Portugal na reabilitação estrutural de pavimentos. Posteriormente, enumerar-se-ão algumas técnicas inovadoras que nos últimos anos têm

vindo a ser implementadas no nosso país, sendo apresentados alguns casos de obra em que este tipo de técnicas foram utilizadas.

O LNEC tem estado envolvido no acompanhamento de muitas destas obras, sendo que os estudos levados a cabo no decurso das referidas obras, compreenderam, entre outras, as seguintes actividades:

- Análise das práticas utilizadas noutros países relativamente às técnicas estudadas;
- Realização de estudos laboratoriais para a caracterização dos materiais empregues nas obras;
- Apoio às equipas responsáveis pelo respectivo controlo da Qualidade;
- Realização de estudos laboratoriais para a caracterização das misturas;
- Inspecção visual dos pavimentos;
- Caracterização estrutural dos pavimentos antes e após a reabilitação;
- Colaboração no estabelecimento de especificações;
- Colaboração no estabelecimento do sistema de gestão da qualidade.

2.3.2 - Reforço de pavimentos

As operações de reabilitação de um pavimento flexível por processos tradicionais compreendem a execução de camadas de reforço em misturas betuminosas fabricadas a quente, em central, geralmente acompanhadas da fresagem das misturas betuminosas mais degradadas e do seu transporte a depósito.

O equipamento geralmente utilizado para a remoção das camadas betuminosas são máquinas fresadoras, conforme se ilustra na Fig. 2.2.

Na Fig. 2.3 pode-se observar uma zona de um pavimento de uma Estrada Nacional, em que devido ao estado degradado do pavimento se procedeu à fresagem das misturas betuminosas antigas e à sua substituição por mistura betuminosa para camada de regularização.

Segundo os processos tradicionais, uma vez fresadas as zonas mais degradadas do pavimento a reabilitar e efectuada a reposição, na espessura fresada, com misturas betuminosas novas, procede-se à execução da camada de reforço em misturas betuminosas fabricadas a quente, em central.



Fig. 2.2 – Trabalhos de fresagem de um pavimento



Fig. 2.3 – Trecho de um pavimento (EN 104) em que se procedeu à fresagem das camadas betuminosas existentes

2.3.2.1 - Misturas betuminosas a quente "convencionais"

No caso das misturas betuminosas a quente "convencionais", o ligante betuminoso utilizado no fabrico da mistura é betume puro, proveniente da destilação directa do petróleo. No entanto, o betume, à temperatura ambiente, apresenta uma elevada viscosidade, tornando-se pois necessário aquecê-lo a temperaturas da ordem dos 150 a 160°C por forma a obter-se a "consistência" adequada para o fabrico da mistura. Uma vez produzida a mistura betuminosa, continua a ser necessário mantê-la dentro de uma gama de temperaturas pré-determinadas, por forma a apresentar a consistência adequada ao seu espalhamento e compactação em obra.

As temperaturas apropriadas para o fabrico e aplicação em obra de uma determinada mistura betuminosa são determinadas pela viscosidade do betume, podendo ser estimadas recorrendo a um gráfico que relacione a viscosidade do betume a utilizar em função da temperatura, conforme se exemplifica na Fig. 2.4. Determinando a viscosidade do betume a duas temperaturas diferentes, normalmente a 135°C e a 165°C, representando os respectivos valores no gráfico e unindo os dois pontos, estima-se a temperatura a que esse betume tem a viscosidade adequada para o fabrico da mistura ou para a sua compactação. Segundo a experiência adquirida, a viscosidade absoluta ideal do betume no fabrico de uma mistura betuminosa é de 0,17±0,02 Pa.s, e para a sua compactação é de 0,28±0,03 Pa.s (NCAT, 1999).

Por forma a não diminuir a temperatura do betume quando da sua mistura com os restantes componentes (agregados), torna-se igualmente necessário proceder ao aquecimento prévio destes materiais.

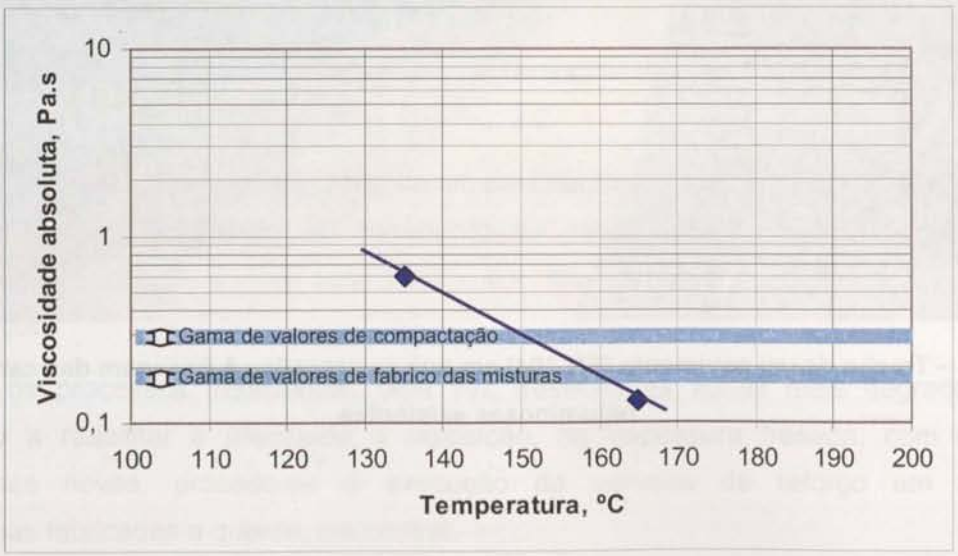


Fig. 2.4 – Viscosidade de um betume em função da temperatura (NCAT, 1999)

Neste processo de aquecimento a temperaturas tão elevadas, quer do betume, quer dos agregados, resulta, para além de um elevado consumo de energia, a libertação de poeiras e outros poluentes para a atmosfera.

Para além dos aspectos ambientais relacionados com o fabrico e utilização do tipo de misturas betuminosas em apreço, o manuseamento destes materiais a temperaturas elevadas obriga também a cuidados especiais de saúde e segurança de todos os que estejam ligados à sua produção e colocação em obra.

As misturas betuminosas a quente são fabricadas em centrais betuminosas específicas para esse efeito, relativamente complexas, designadas habitualmente por centrais fixas. Existem presentemente, dois processos de produção principais, em particular, as centrais de produção contínua e as centrais de produção descontínua, predominando actualmente na Europa estas últimas (EAPA, 1998).

As centrais contínuas são também frequentemente designadas por centrais de tambor secador-misturador, devido ao facto de, no caso mais geral, as operações de mistura entre os agregados, o filer, o betume e eventuais aditivos se desenvolverem no tambor destinado à secagem e aquecimento dos agregados. Na Fig. 2.5 apresenta-se um esquema do funcionamento deste tipo de centrais.

Em contraponto com as centrais contínuas, nas centrais descontínuas, a mistura dos diversos componentes ocorre numa unidade específica para esse efeito, ou seja, no misturador. Na Fig. 2.6 pode-se observar o modelo de funcionamento de uma central descontínua.

No que concerne às misturas betuminosas a quente "tradicionais" habitualmente utilizadas em Portugal nas obras de pavimentação, têm-se, em termos genéricos e de acordo com o Caderno de Encargos Tipo da então Junta Autónoma de Estradas[1] (JAE, 1998), as seguintes: "*macadame betuminoso*" para camadas com características de base ou regularização, "*mistura betuminosa densa*" para camadas com características de regularização, "*betão betuminoso* subjacente a camadas de desgaste drenante ou delgada" para camadas com características de regularização, e "*betão betuminoso*" para camadas com características de desgaste, na faixa de rodagem. Estas misturas, são em regra, misturas betuminosas densas, sendo recomendado no referido Caderno de Encargos que sejam empregues no seu fabrico, betumes com penetração nominal 35/50 ou 50/70 ($x10^{-1}$mm).

[1] Actual Instituto das Estradas de Portugal

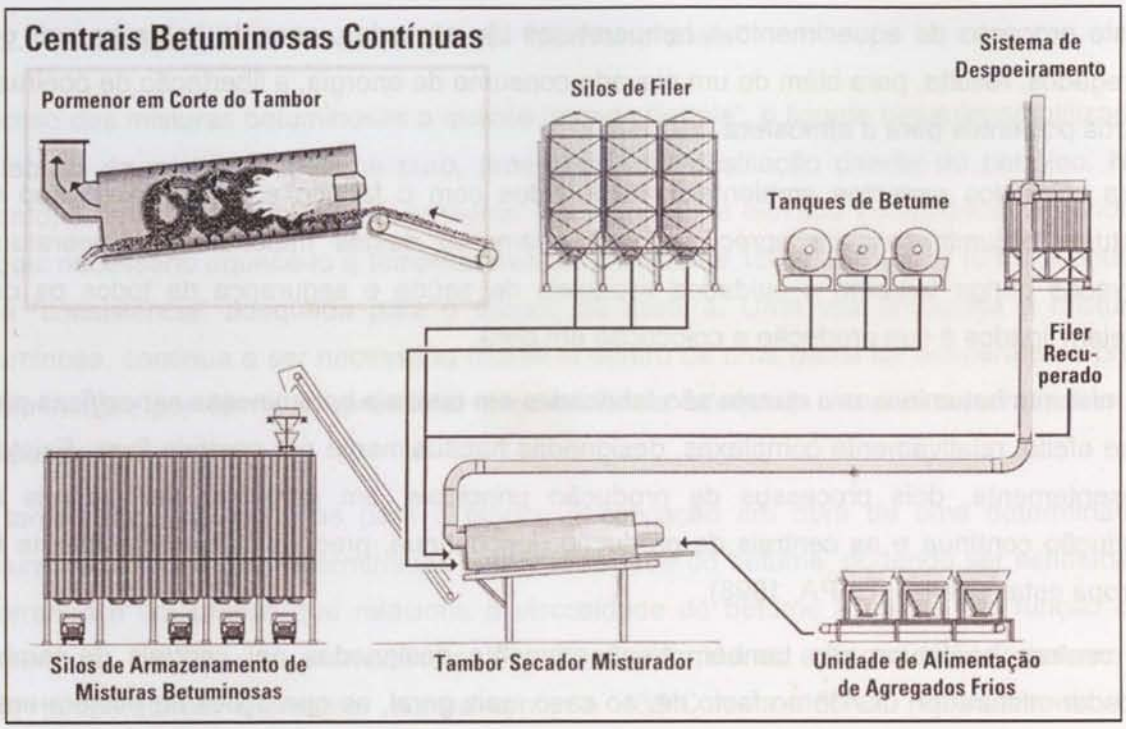


Fig. 2.5 – Configuração tradicional de uma central contínua de fabrico de misturas betuminosas a quente (EAPA, 1998)

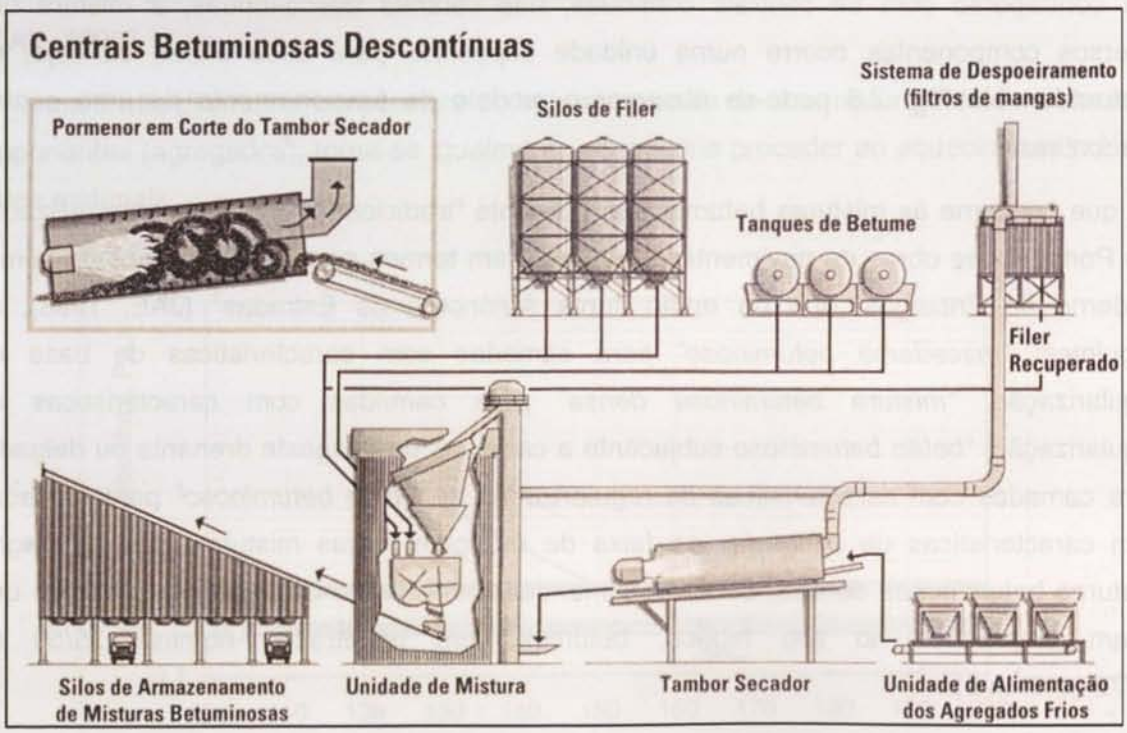


Fig. 2.6 – Configuração tradicional de uma central descontínua de fabrico de misturas betuminosas a quente (EAPA, 1998)

No Quadro 2.1 sintetizam-se as principais características das misturas betuminosas fabricadas a quente, de uso corrente, que constam no Caderno de Encargos Tipo da JAE (1998).

Quadro 2.1 – Principais características das misturas betuminosas a quente "tradicionais" que constam do Caderno de Encargos da JAE

		Macadame betuminoso		Mistura betuminosa densa [1]	Betão betuminoso subjacente a c. desgaste drenante ou delgada	Betão betuminoso
		Fuso A	Fuso B			
Tipo de betume (LNEC E80-1997)		35/50 50/70	35/50 50/70	35/50 50/70	35/50 50/70	35/50 50/70
Fracções granulométricas dos agregados (dimensões nominais em mm)		0/4, 4/10, 10/20	0/4, 4/20, 20/40 ou 0/6, 6/20, 20/40	0/4, 4/10, 10/20	0/4, 4/10, 10/14	0/4, 4/10, 10/14
Fuso granulométrico da mistura de agregados (percentagem acumulada do material que passa) – Abertura das malhas de peneiros ASTM	37,5 mm (1 ½")	-	100	-	-	-
	25,0 mm (1")	100	87 – 100	100	-	-
	19,0 mm (3/4")	95 – 100	68 – 92	85 – 100	-	-
	16,0 mm (5/8")	-	-	-	100	100
	12,5 mm (1/2")	60 – 91	60 – 80	73 – 87	80 – 90	80 – 88
	9,51 mm (3/8")	51 – 71	50 – 70	-	66 – 82	66 – 76
	4,75 mm (nº4)	36 – 51	37 – 53	45 – 60	45 – 65	43 – 55
	2,00 mm (nº10)	26 – 41	26 – 41	32 – 46	30 – 42	25 – 40
	0,850 mm (nº20)	17 – 32	17 – 32	-	-	-
	0,425 mm (nº40)	11 – 25	11 – 25	16 – 27	12 – 20	10 – 18
	0,180 mm (nº80)	5 – 17	5 – 17	9 – 18	8 – 15	7 – 13
	0,075 mm (nº200)	2 – 8	2 – 8	5 – 10	5 – 10	5 – 9
Porosidade (%)		4 – 6	4 – 8	3 – 6	4 – 6	4 – 6
Percentagem de betume (%)		(2)	≥ 4,3	(2)	(2)	(2)

(1) Esta mistura só pode ser utilizada em pavimentos da rede secundária e para tráfegos da classe T6 e T7

(2) Valor determinado com recurso a ensaios conduzidos pelo método *Marshall*

De acordo com a experiência do LNEC (Antunes, 1993; Azevedo, 1993) e de outros Países, as camadas realizadas em betão betuminoso ou em camada de regularização exibem, no início da sua vida em serviço, módulos de deformabilidade da ordem de 4 000 a 8 000 MPa, para temperaturas e tempos de carga considerados representativos das condições de serviço em Portugal. Recorrendo às fórmulas previsionais (Shell, 1998) para o cálculo do módulo de deformabilidade das misturas com base na sua composição granulométrica, e no tipo de betume, também se obtêm valores da mesma ordem de grandeza.

Cabe aqui referir que, seguidamente, sempre e quando se apresentarem vantagens e desvantagens das "novas técnicas" de reabilitação de pavimentos, se estão a estabelecer comparações entre essas técnicas e a "técnica tradicional", ou seja, a execução de camadas de reforço em misturas betuminosas fabricadas a quente com betume puro (destilação directa) de penetração nominal 35/50 ou 50/70 ($x10^{-1}$mm).

2.3.2.2 - Misturas betuminosas de alto módulo

As misturas betuminosas de alto módulo não são mais do que misturas em que se utiliza como ligante, um betume mais duro (penetração nominal 10/20 x 10^{-1}mm) do que é habitualmente utilizado nas misturas tradicionais, resultando assim, misturas betuminosas com maiores módulos de deformabilidade do que os que se obtêm em geral para aquelas misturas.

Para o fabrico das misturas betuminosas de alto módulo utiliza-se o mesmo tipo de centrais betuminosas que para o fabrico das misturas betuminosas tradicionais. No entanto, e dada a maior viscosidade própria dos betumes mais duros empregues no fabrico das misturas betuminosas de alto módulo, há que recorrer a temperaturas mais elevadas quer para o aquecimento do betume e dos agregados, quer para a mistura dos diversos materiais. Assim, a temperatura de fabrico destas misturas está compreendida, em geral, entre 170 e 190ºC (Potti, 2002).

No que concerne à compactação das misturas, a gama de temperaturas adequada para esse efeito, situa-se geralmente entre 145 e 175ºC (Potti, 2002).

O facto de o módulo de deformabilidade das camadas em misturas betuminosas de alto módulo ser superior ao das camadas em misturas tradicionais, permite que a espessura do reforço a colocar num dado pavimento a reabilitar, utilizando o primeiro tipo de mistura, possa ser inferior à que seria necessária se se utilizasse o segundo tipo, obtendo-se a mesma capacidade de carga (*vd* Fig. 2.7).

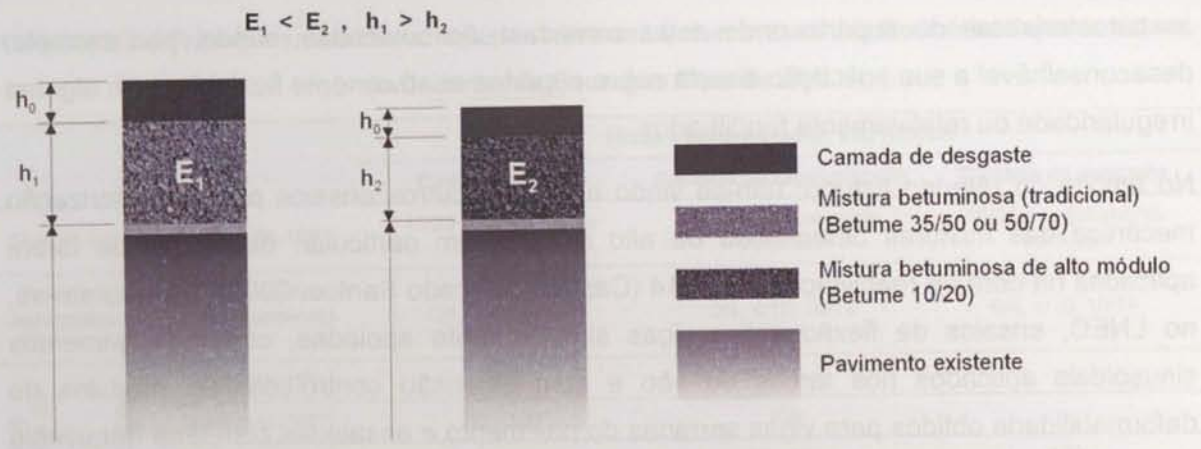


Fig. 2.7 – Estrutura de pavimento reabilitado com uma camada de reforço em betão betuminoso tradicional ou com uma camada de reforço em mistura betuminosa de alto módulo

Ao possibilitar uma redução da espessura da camada de reforço, a aplicação deste tipo de misturas pode ser especialmente vantajosa em pavimentos de estradas que atravessem centros urbanos, onde os condicionalismos de subida de cotas são muito frequentes.

Outras vantagens que decorrem da diminuição da espessura da camada de reforço são as seguintes:

- Redução da utilização dos recursos naturais (agregados e betume);
- Redução dos volumes de transporte dos materiais e, consequentemente, redução dos custos de transporte;
- Redução dos tempos de execução da camada, e consequentemente, redução dos custos suportados pelos utentes durante as obras (resultantes de atrasos e/ou acidentes).

Às camadas em misturas betuminosas de alto módulo, por serem mais rígidas, são também geralmente atribuídos melhores comportamentos no que concerne à resistência às deformações permanentes (CFTR, 2002; FORMAT, 2004).

No entanto, a utilização deste tipo de misturas apresenta também algumas desvantagens. Assim, por exemplo, o facto de ser necessária uma temperatura mais elevada quer para o fabrico da mistura, quer para a sua aplicação da mistura em obra, obriga a maiores gastos energéticos e coloca maiores problemas de compactação, sobretudo em tempo frio.

Por outro lado, e uma vez que as camadas em mistura betuminosa de alto módulo são camadas mais rígidas, um aspecto a que se deve prestar especial atenção prende-se com

as características do suporte onde estas camadas são colocadas, sendo, por exemplo, desaconselhável a sua aplicação directa sobre suportes relativamente flexíveis, com alguma irregularidade ou relativamente fendilhados.

No âmbito do referido estudo, têm-se vindo a realizar outros ensaios para caracterização mecânica das misturas betuminosa de alto módulo, em particular, daquelas que foram aplicadas na obra de reabilitação da EN14 (Capitão & Picado Santos, 2002). Realizaram-se, no LNEC, ensaios de flexão sobre vigas simplesmente apoiadas, com carregamentos sinusoidais aplicados nos terços do vão e com extensão controlada. Os módulos de deformabilidade obtidos para vigas serradas do pavimento e ensaiadas com uma frequência de carregamento de 10 Hz, à temperatura de 25ºC e para um nível de extensão de $120x10^{-6}$m/m, situaram-se aproximadamente entre 10 000 e 15 000 MPa, respectivamente para misturas mais ricas em betume (5,8%) e para misturas mais pobres (4,8%).

Noutra obra realizada em Portugal (Antunes *et al.*, 2001c), o LNEC levou a cabo campanhas de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto, em zonas onde havia sido executada uma camada de base em mistura betuminosa de alto módulo (com cerca de 6% de betume). Através da interpretação dos resultados dos ensaios efectuados, deduziram-se valores dos módulos de deformabilidade da camada de base de alto módulo correspondentes a uma temperatura de 22ºC (temperatura de projecto da camada) da ordem de 10 000 MPa.

Em França, País impulsionador da técnica em apreço, a Norma NF P 98-141 preconiza dois tipos de misturas de alto módulo, fixando um valor mínimo para o módulo de deformabilidade de 14 000 MPa determinado em ensaios de flexão, sobre provetes trapezoidais, com um ponto de apoio e outro de aplicação do carregamento e conduzidos a deformação controlada, a uma temperatura de 15ºC e com uma frequência de 10 Hz.

Acrescenta-se que em Espanha, as misturas betuminosas de alto módulo foram incluídas na nova redacção do Caderno de Encargos Tipo dedicado às misturas betuminosas a quente, realizada em Julho de 2001 (PG3 – Art. 542, 2001), tendo, então, sido preconizado para este tipo de misturas aplicadas em camada de base ou de regularização, um módulo dinâmico a 20ºC, determinado segundo a Norma NLT-349 (ensaio à compressão simples dinâmica, sobre provetes cilíndricos, submetidos a carregamentos axiais cíclicos do tipo sinusoidal), superior a 11 000 MPa.

As misturas betuminosas de alto módulo contempladas no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) têm composições do tipo das que se apresentam no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Principais características das misturas betuminosas de alto módulo que constam do Caderno de Encargos Tipo da JAE

		Mistura betuminosa de alto módulo		
		Camada de base	Camada de regularização	Camada de desgaste
Tipo de betume (LNEC E80-1997)		10/20 eventualmente aditivado	10/20 eventualmente aditivado	10/20 eventualmente aditivado
Fracções granulométricas dos agregados (dimensões nominais em mm)		0/4, 4/10, 10/20	0/4, 4/10, 10/14	0/4, 4/10, 10/14
Fuso granulométrico da mistura de agregados (percentagem acumulada do material que passa)	Abertura das malhas de peneiros ASTM			
	25,0 mm (1")	100	-	-
	19,0 mm (3/4")	90 - 100	100	-
	16,0 mm (5/8")	-	90 - 100	100
	12,5 mm (1/2")	70 - 90	80 - 95	90 - 100
	9,51 mm (3/8")	60 - 80	62 - 82	70 - 85
	4,75 mm (nº4)	44 - 62	42 - 60	44 - 62
	2,36 mm (nº8)	30 - 44	30 - 44	30 - 44
	0,850 mm (nº20)	16 - 30	16 - 30	16 - 30
	0,425 mm (nº40)	10 - 21	10 - 21	10 - 21
	0,180 mm (nº80)	7 - 14	7 - 14	7 - 14
	0,075 mm (nº200)	6 - 10	6 - 10	6 - 10
Porosidade (%)		2 - 6	2 - 6	2 - 6
Percentagem de betume (%)		≥ 5,3 (1)	≥ 5,3 (1)	≥ 5,3 (1)

(1) Valor determinado com recurso a ensaios conduzidos pelo método *Marshall*

2.3.2.3 - Misturas com betumes modificados com polímeros

As crescentes exigências de qualidade, conforto e segurança dos pavimentos, a par dos traçados rodoviários existentes no nosso País têm conduzido à necessidade de melhorar as características funcionais dos pavimentos, nomeadamente a regularidade superficial, a profundidade de textura e a aderência. Se a regularidade superficial é obtida através de processos construtivos correctos, quer na pavimentação, quer na terraplenagem, tem-se vindo a recorrer cada vez mais a novas misturas betuminosas resultantes de novas técnicas, com vista a obter melhores características de profundidade de textura e aderência.

Por forma a responder às novas solicitações exigidas aos pavimentos rodoviários, melhorando o comportamento das misturas betuminosas, têm-se desenvolvido misturas em que se utiliza como ligante, betume modificado.

Hoje em dia, é já comum o recurso a betumes modificados com polímeros no fabrico de misturas betuminosas para aplicação na construção ou na reabilitação de pavimentos rodoviários, em particular, em camadas de desgaste. Entre os polímeros utilizados

actualmente na modificação dos betumes, distinguem-se duas grandes famílias: os **polímeros termoplásticos** e os **elastómeros**.

A família dos polímeros termoplásticos engloba, entre outros, o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e os copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA).

Na família dos elastómeros encontram-se, entre os mais comuns, os copolímeros de estireno-butadieno (SB) e de estireno-butadieno-estireno (SBS).

De uma forma geral, a modificação do betume por um polímero, traduz-se num aumento da sua viscosidade, diminuição da penetração, aumento da temperatura de amolecimento, melhor resistência ao envelhecimento e numa melhoria das características de adesividade (Páez *et al.*, 2000).

Em virtude da maior viscosidade do betume modificado em relação ao betume base, a temperatura de fabrico destas misturas deverá ser mais elevada que a das misturas tradicionais, sendo, em geral, da ordem de 160 a 180°C (JAE, 1998). Neste tipo de misturas há, no entanto, que ter especiais cuidados em evitar que a temperatura exceda os 190°C, não só por forma a minimizar a oxidação do betume, mas também a prevenir a degradação do próprio polímero.

A modificação do betume com polímeros é efectuada em fábrica, sendo fornecido, ao fabricante da mistura betuminosa, o ligante final. Assim, o processo de fabrico das misturas com betume modificado com polímeros é essencialmente o mesmo que o das misturas betuminosas tradicionais, havendo apenas que assegurar que a cisterna de armazenamento do ligante está equipada com um sistema de agitação adequado à manutenção da sua homogeneidade.

A temperatura de compactação das misturas com betume modificado é, geralmente, da ordem de 140°C a 160°C.

Na última actualização do Caderno de Encargos Tipo da JAE, em 1998, foram introduzidos dois tipos de misturas com betumes modificados com polímeros – as *misturas betuminosas drenantes* e as *misturas betuminosas rugosas*, para camadas de desgaste. Este tipo de misturas aplicadas em camadas desgaste, proporcionam ao utente melhores características funcionais, através de uma melhoria da rugosidade e da aderência (especialmente sob tempo chuvoso), e têm uma maior durabilidade, apresentando menor susceptibilidade térmica e maior flexibilidade.

No caso das misturas drenantes, para além de proporcionarem uma melhoria significativa das condições de circulação em tempo de chuva, é de referir ainda a diminuição do ruído de rolamento, o que se reveste de grande interesse, sobretudo em vias situadas em zonas

urbanas. No entanto, estas misturas apresentam alguns problemas de manutenção, uma vez que com a passagem do tráfego e sob as acções atmosféricas vai-se dando a colmatação dos poros, até que a mistura apresenta no final, características superficiais semelhantes às de uma mistura rugosa.

Às camadas de pavimentos em misturas fabricadas com betumes modificados com polímeros são reconhecidos, em geral, melhores comportamentos à fadiga e/ou melhores resistências às deformações permanentes, sendo actualmente também aplicadas com estes objectivos.

Para além das duas misturas com betumes modificados com polímeros especificadas no Caderno de Encargos Tipo da JAE (1998) para camadas de desgaste, a APORBET (1998) inclui também uma mistura betuminosa rugosa para camadas de maiores espessuras, conforme se resume no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Principais características das misturas com betumes modificados com polímeros que constam do Caderno de Encargos Tipo da JAE e na publicação da APORBET

			Misturas betuminosas rugosas	
		Betão betuminoso drenante	Microbetão betuminoso rugoso	Betão betuminoso rugoso (APORBET)
Penetração do betume modificado, a 25°C, 100g, 5s ($x10^{-1}$mm)		55 - 70	55 - 100	55 - 100
Fracções granulométricas dos agregados (dimensões nominais em mm)		0/2, 6/10, 10/14 e eventualmente 2/6	0/2, 6/10 e eventualmente 2/6	0/2, 6/10, 10/14 e eventualmente 2/6
Fuso granulométrico da mistura de agregados (percentagem acumulada do material que passa) – Abertura das malhas de peneiros ASTM	19,0 mm (3/4")	100	-	100
	12,5 mm (1/2")	80 - 100	100	70 - 90
	9,51 mm (3/8")	50 - 80	80 - 100	60 - 75
	4,75 mm (nº4)	15 - 30	30 - 42	32 - 42
	2,00 mm (nº10)	10 - 22	22 - 32	22 - 30
	0,850 mm (nº20)	6 - 13	15 - 26	-
	0,425 mm (nº40)	-	12 - 24	11 - 20
	0,180 mm (nº80)	-	9 - 18	-
	0,075 mm (nº200)	3 - 6	7 - 12	6 - 10
Porosidade (%)		22 - 30	3 - 6	3 - 5
Percentagem de betume modificado (%)		≥ 4 (1)	≥ 5 (1)	≥ 5 (1)

(1) Valor determinado com recurso a ensaios conduzidos pelo método *Marshall*

2.3.2.4 - Misturas betuminosas com borracha

Nas misturas betuminosas com borracha, os materiais constituintes, são, tal como o seu nome indica, para além dos materiais típicos das misturas betuminosas (agregados e betume), borracha moída proveniente da reciclagem de pneus usados.

A utilização de misturas com betume modificado com borracha na construção/reabilitação de pavimentos, permite que a própria via de comunicação de transporte rodoviário, a estrada, possa absorver, na sua infra-estrutura, um resíduo inevitavelmente gerado na sua actividade: os pneus usados (Gallego, 2001).

Segundo o mesmo autor estima-se que na União Europeia se geram anualmente cerca de 2 000 000 toneladas de pneus usados. O destino habitual deste resíduo é o seu depósito em vazadouro, com todos os inconvenientes que daí decorrem. O depósito em vazadouro deste tipo de material apresenta sérios problemas, como seja, ocupa grandes volumes, dadas as dificuldades de compactação, e tem uma enorme resistência à biodegradação. Por outro lado, em caso de incêndio, são emitidas substâncias que podem contaminar não só a atmosfera, como os solos e as águas subterrâneas. Outra possibilidade para a eliminação dos pneus usados, é a sua combustão em incineradoras de resíduos sólidos urbanos. No entanto, estas instalações, recusam frequentemente este material, devido a razões que se prendem essencialmente com o poder calorífico relativamente alto que têm, provocando "pontos quentes" durante o processo, ou por contribuírem para o aumento significativo das emissões gasosas da instalação, o que pode conduzir a que a quantidade de substâncias tóxicas permitida por lei seja ultrapassada. Assim, a reciclagem de pneus usados, através da sua incorporação nas misturas betuminosas para pavimentação, constitui uma técnica, do ponto de vista ambiental, muito interessante, sendo uma medida considerada como prioritária pela Comissão Europeia (Gallego, 2001).

Antes da borracha dos pneus usados poder ser incorporada na mistura betuminosa, é necessário "processar" os pneus por forma a obter-se borracha com as características adequadas ao fabrico de misturas betuminosas a aplicar na pavimentação de estradas. Assim, é necessário, por exemplo, extrair, aos pneus, a armadura metálica. Posteriormente procede-se à moagem (mecânica e/ou criogénica) dos pneus.

Na Fig. 2.8 pode-se observar o aspecto de uma amostra de borracha moída reciclada de pneus utilizada numa obra em Portugal (Antunes *et al.*, 2001c).



Fig. 2.8 – Borracha moída reciclada de pneus

Nas aplicações que têm sido realizadas em Portugal, a mistura betuminosa com borracha é fabricada pelo processo de via húmida (designado na terminologia inglesa por "*wet process*"), no qual o betume é previamente modificado com a borracha reciclada de pneus, antes deste se misturar com os agregados que constituem o esqueleto mineral da mistura betuminosa.

Noutros Países, como por exemplo em Espanha (Gallego, 2001), têm-se vindo também a realizar experiências com misturas fabricadas pelo processo de via seca ("*dry process*" na terminologia inglesa), segundo o qual a borracha é adicionada juntamente com os agregados.

O fabrico do betume modificado com borracha por via húmida compreende duas fases, a primeira, de adição da borracha ao betume base, e a segunda, de interacção da borracha com o betume base, a que se chama correntemente fase de "digestão". Para as misturas que se têm realizado no nosso País, em particular, com betumes-borracha fabricados com betumes de penetração nominal 35/50 ou 50/70 e para percentagens de borracha da ordem dos 20%, têm-se adoptado as seguintes temperaturas e tempos de "digestão":

- Adição de borracha ao betume base com este a uma temperatura compreendida entre 175ºC e 220ºC;
- "Digestão" do betume base com a borracha a uma temperatura da ordem de 180ºC, durante cerca de 45 min.

No LNEC têm-se realizado diversos estudos, nomeadamente, sobre a influência do tempo de "digestão" do betume base com a borracha e das condições de armazenamento do ligante modificado. Nestes estudos, tem-se avaliado a influência destes e outros factores não só nas propriedades do ligante final mas também no comportamento mecânico das misturas betuminosas fabricadas com este ligante (Antunes *et al.*, 2000a, 2000b e 2001a). Outros aspectos que têm sido abordados são o efeito da temperatura de digestão e a influência da percentagem de borracha nas propriedades do ligante e da mistura (Antunes *et al.*, 2002, 2003). Nas misturas que se têm vindo a realizar em Portugal, o betume modificado com borracha reciclada de pneus, incorpora cerca de 18 a 20% de borracha em relação ao peso total do ligante (betume+borracha).

O fabrico de misturas betuminosas com betume-borracha é realizado no mesmo tipo de centrais "fixas" que as utilizadas para o fabrico das misturas betuminosas a quente, sendo necessário complementar o processo de fabrico tradicional com a incorporação de algumas operações adicionais, uma vez que o processo de modificação do betume por acção da borracha é geralmente realizado em obra. Segundo os processos habituais, introduz-se uma unidade de produção de ligante entre a cisterna de armazenamento do betume base e o misturador da central, por forma a modificar-se o betume base pela adição de borracha de acordo com o anteriormente descrito, antes de este ser incorporado na mistura betuminosa. Nas Figuras 2.9 e 2.10 retratam-se respectivamente, o esquema de funcionamento de uma central contínua adaptada ao fabrico de misturas betuminosas incorporando borracha reciclada de pneus e uma unidade de produção de betume modificado com borracha.

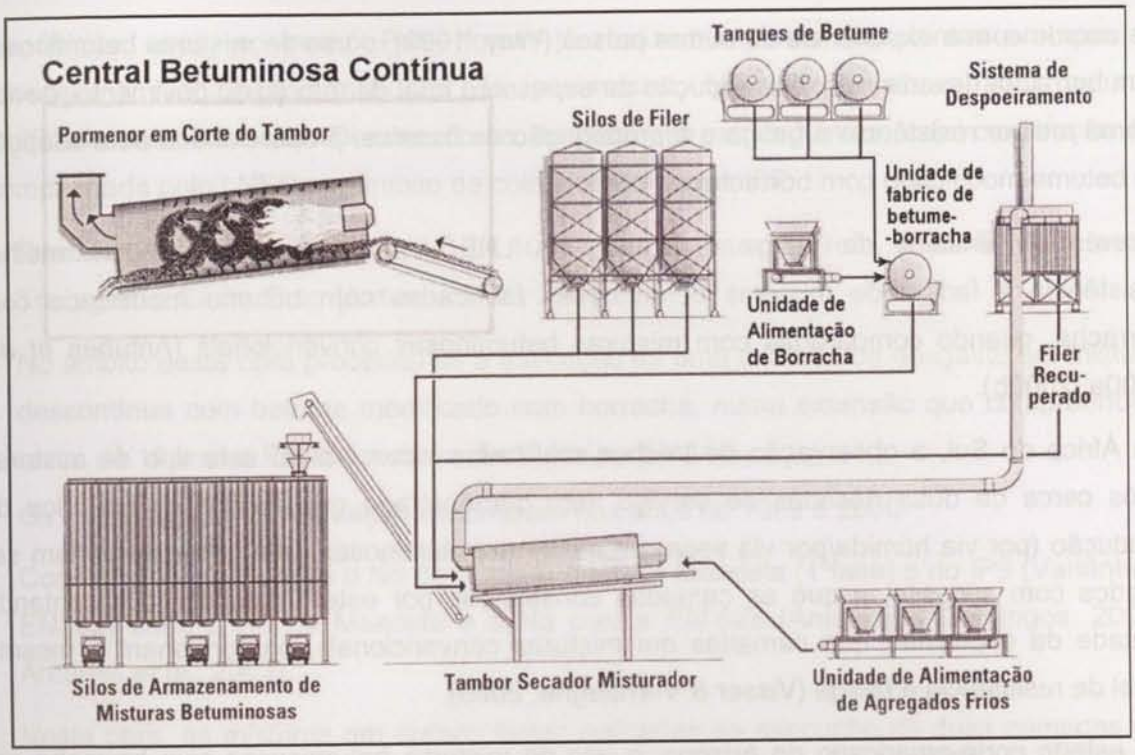


Fig. 2.9 – Configuração de uma central contínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas com borracha reciclada de pneus (adaptado de EAPA, 1998)

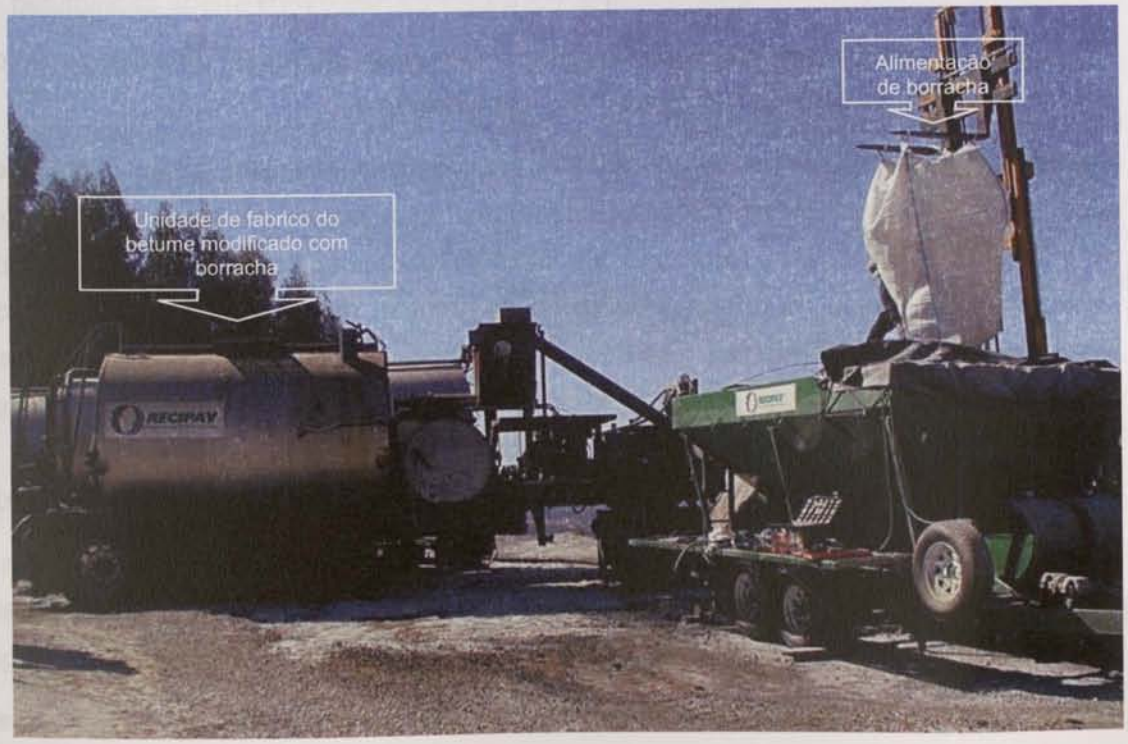


Fig. 2.10 – Produção em central do betume modificado com borracha

De acordo com a experiência de outros países (Way, 1999), o uso de misturas betuminosas com borracha deveria permitir a redução da espessura total de reforço do pavimento, devido a uma melhor resistência à fadiga e à propagação de fissuras, proporcionada pela adopção de betume modificado com borracha.

Através de ensaios de fadiga realizados no LNEC, pôde-se constatar uma melhor resistência à fadiga de misturas betuminosas fabricadas com betume modificado com borracha, quando comparadas com misturas betuminosas convencionais (Antunes *et al.*, 2000a, 2000b).

Na África do Sul, a observação de trechos realizados incorporando este tipo de misturas após cerca de duas décadas de serviço, tem demonstrado que ambos os métodos de produção (por via húmida/por via seca) de misturas betuminosas com borracha podem ser usados com sucesso, e que as camadas constituídas por estes materiais, apresentando metade da espessura que camadas em misturas convencionais, proporcionam o mesmo nível de resistência à fadiga (Visser & Verhaeghe, 2000).

No estado norte-americano do Arizona, o uso de misturas betuminosas com borracha em camada de desgaste contribui ainda para uma melhoria das características superficiais e diminuição do ruído de rolamento (Way, 2000).

Este tipo de misturas apresenta pois as seguintes principais vantagens:

- Permite a utilização de um resíduo (borracha de pneus), contribuindo para a redução de jazidas de pneus, ou para a redução de volumes a incinerar;
- No caso de os problemas estruturais do pavimento a reabilitar serem traduzidos essencialmente pela ruína por fadiga das camadas betuminosas, e não por deformações permanentes, a utilização deste tipo de misturas pode conduzir a uma redução da espessura da camada de reforço a executar; a redução da espessura da camada de reforço proporciona por sua vez uma série de vantagens descritas na secção 2.3.3, tais como, redução da utilização dos recursos naturais (agregados e betume), redução dos tempos e custos de transportes, redução dos tempos de execução da camada, e portanto, redução dos custos suportados pelos utentes durante as obras (resultantes de atrasos e/ou acidentes).
- Quando colocadas em camada de desgaste, podem conduzir a uma maior durabilidade do pavimento, devido à maior resistência ao envelhecimento das misturas;
- Ainda nesta camadas, permitem uma redução dos impactos ambientais negativos da estrada em serviço, por diminuir o ruído.

Nos últimos anos, no nosso País, foram já realizadas obras importantes em que se procedeu à reabilitação/construção de pavimentos utilizando misturas com betume modificado com borracha. Dessas obras destacam-se as seguintes, cuja construção foi acompanhada pelo LNEC, no âmbito da colaboração com o IEP:

- Reabilitação dos pavimentos da EN 104, entre Azurara e Trofa, e da EN 105, entre Travagem e Santo Tirso (Antunes *et al.*, 2001b)

  No âmbito desta obra procedeu-se à execução de uma camada de desgaste em mistura descontínua com betume modificado com borracha, numa extensão que compreendeu cerca de 16 km na EN 104 e cerca de 17 km na EN 105.

  Os trabalhos de pavimentação decorreram nos anos de 1999 e 2000.

- Construção do IC1 entre o Nó de Viana e o Nó da Meadela (1ªfase) e do IP9 (Variante à EN202) entre o Nó da Meadela e o Nó com a EM 526 (Antunes & Domingos, 2003; Antunes *et al.*, 2003)

  Nesta obra, as misturas em apreço foram aplicadas na execução de duas camadas do pavimento de um lanço do IP9 (4 vias), com cerca de 2 km de extensão. No referido lanço foi realizada uma camada de regularização em mistura betuminosa descontínua com betume modificado com borracha, e uma camada de desgaste em mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha.

  Os trabalhos de pavimentação desta obra decorreram entre os anos de 2000 e 2002;

- Reabilitação do pavimento do IP 4 entre Sta. Comba de Rossas e Bragança (Miranda *et al.*, 2003; Freire & Antunes, 2004)

  As obras de reabilitação deste pavimento incluíram a execução de uma camada de regularização e de uma camada de desgaste em mistura com betume modificado com borracha, numa extensão de cerca de 10 km.

  Estes trabalhos de pavimentação decorreram essencialmente em 2002.

As aplicações de misturas fabricadas com betume modificado com borracha, têm sido essencialmente, em camadas com características de desgaste, do tipo rugoso (misturas descontínuas) ou drenante (misturas abertas), com todas as vantagens, em termos de segurança e conforto para os utentes, inerentes a este tipo de aplicação.

Na Fig. 2.11 pode-se observar o aspecto final de uma camada de desgaste em mistura descontínua com betume modificado com borracha.

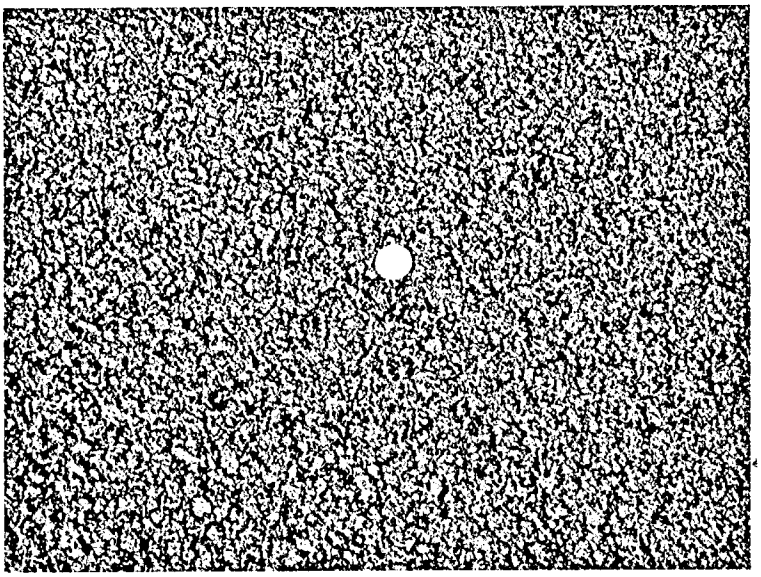


Fig. 2.11 – Aspecto final da camada em mistura com betume modificado com borracha

No âmbito do acompanhamento de obras de pavimentação nas quais se utilizam misturas com betume modificado com borracha, para além do apoio prestado à Fiscalização no decurso das obras, o LNEC tem vindo a realizar estudos com vista ao aprofundamento dos conhecimentos existentes relativamente a este tipo de materiais. Pretende-se com os estudos realizados contribuir para o estabelecimento de especificações relativas a este tipo de misturas betuminosas devidamente adaptadas às condições Portuguesas.

Uma vez que na última revisão do Caderno de Encargos Tipo da Administração Rodoviária, então JAE (1998), as misturas em apreço não estão contempladas, nas obras que se têm realizado, têm-se adoptado especificações baseadas na experiência do Arizona, EUA (Arizona DOT, 1996). De referir que, quer neste Estado Americano, quer na África do Sul (Sabita Manual 3, 1988; Sabita Manual 19, 1997), existe já uma vasta experiência na aplicação deste tipo de misturas.

A nível Europeu tem-se verificado um interesse crescente na utilização nas misturas betuminosas que incorporam borracha reciclada de pneus, o que se deve, em grande parte, à maior sensibilização para os aspectos ambientais. No País vizinho foi recentemente elaborada uma tese de Doutoramento sobre estas misturas (Gallego, 1999) e, dado o interesse do tema, foi ainda publicado um documento baseado nos estudos desenvolvidos pelo mesmo autor (Gallego, 2001).

Nos Quadros 2.4 e 2.5 resumem-se, respectivamente, algumas das especificações para as misturas betuminosas com borracha que se têm adoptado nas obras acima descritas e as percentagens de ligante utilizadas em cada uma das misturas aplicadas nas referidas obras.

Quadro 2.4 – Especificações adoptadas para as misturas com betume modificado com borracha recentemente aplicadas em Portugal

		Mistura descontínua			Mistura aberta	Camada de desgaste
		Camada de desgaste (EN104 e EN105)	Camada de regulariza-ção (IP9)	Camada de regulariza-ção (IP4)	Camada de desgaste (IP9)	(IP4)
Fuso granulométrico da borracha (percentagem acumulada do material que passa) – Abertura das malhas de peneiros ASTM	2,00 mm (nº10)			100		
	1,18 mm (nº16)			65-100		
	0,600 mm (nº30)			20 - 100		
	0,300 mm (nº50)			0 - 45		
	0,075 mm (nº200)			0 - 5		
Penetração do betume modificado, a 25ºC, 100g, 5s ($x10^{-1}$mm) ASTM D5				20 - 75		
Fracções granulométricas dos agregados (dimensões nominais em mm)		0/6, 6/10, 10/14	0/4, 5/12, 12/16	0/3, 3/6, 6/12, 12/16	0/4, 6/10, 12/16	0/5, 5/10, 10/15 (2)
Fuso granulométrico da mistura de agregados sem filer (percentagem acumulada do material que passa) – Abertura das malhas de peneiros ASTM	19,0 mm (3/4")	100	100	100	100	100
	12,5 mm (1/2")	90 - 100	90 - 100	90 - 100	90 - 100	85 - 93
	9,51 mm (3/8")	79 - 89	79 - 89	79 - 89	-	66 - 74
	4,75 mm (nº4)	34 - 42	34 - 42	34 - 42	30 - 45	26 - 34
	2,00 mm (nº10)	15 - 23	15 - 23	15 - 23	6 - 10	13 - 19
	0,850 mm (nº20)	–	–	–	–	7 - 12
	0,425 mm (nº40)	8 - 14	8 - 14	8 - 14	3 - 7	5 - 9
	0,075 mm (nº200)	1 - 5	1 - 5	1 - 5	0 – 2,5	3 - 5
Porosidade (%)		4,5 - 6,5	4,5 - 6,5		18 - 22	
Percentagem de betume modificado com borracha (%)		7 - 8 (1)	7 - 8 (1)		9 - 10	

(1) Valor determinado com recurso a ensaios conduzidos pelo método *Marshall*

(2) Para além das várias fracções de agregados, utilizou-se ainda cimento (3%)

Quadro 2.5 – Percentagens de ligante em misturas com betume modificado com borracha recentemente aplicadas em Portugal

		Mistura descontínua			Mistura aberta	Camada de desgaste
		Camada de desgaste (EN104 e EN105)	Camada de regulariza-ção (IP9)	Camada de regulariza-ção (IP4)	Camada de desgaste (IP9)	(IP4)
Composição[1] do betume modificado com borracha (%)	Betume base	82	81	82	81	82
	Borracha	18	19	18	19	18
Percentagem[1] de betume modificado com borracha (%)		7,0	7,7	8,0	9,0	8,1

(1) Percentagem ponderal

2.3.2.5 - Misturas betuminosas a frio (com emulsão betuminosa)

Conforme exposto anteriormente, nas misturas betuminosas existem dois componentes principais: o ligante betuminoso e os agregados. No caso das misturas betuminosas denominadas correntemente por "misturas a frio", o ligante empregue no fabrico da mistura é uma emulsão betuminosa. Assim, enquanto que no caso das misturas betuminosas a quente, o processo utilizado para se obter um material com a viscosidade adequada ao fabrico, espalhamento e compactação da mistura betuminosa, é o aquecimento do betume e consequentemente, dos agregados, a altas temperaturas, no caso das misturas betuminosas a frio, a redução da viscosidade do betume (que à temperatura ambiente é praticamente sólido), é conseguida emulsionando-o com água, ou seja, fabricando emulsões betuminosas.

As emulsões betuminosas são sistemas formados por duas fases, cujos principais constituintes são betume (fase dispersa) e água (fase contínua). O betume é disperso na fase contínua aquosa, sob a forma de glóbulos discretos, que são mantidos em suspensão por cargas electrostáticas produzidas pelo emulsionante, conforme se representa esquematicamente na Fig. 2.12. O emulsionante é composto por uma cadeia extensa de hidrocarbonetos terminados por um grupo funcional catiónico ou aniónico, o que dá o nome, respectivamente, às emulsões betuminosas catiónicas e aniónicas.

As percentagens de betume numa emulsão betuminosa variam, em geral, entre 50 e 65%. As emulsões correntemente aplicadas no fabrico de misturas betuminosas densas a frio contêm cerca de 60% de betume (57 a 62%), sendo a restante parte essencialmente constituída por água e apenas uma pequena quantidade dos restantes constituintes (emulsionante, etc).

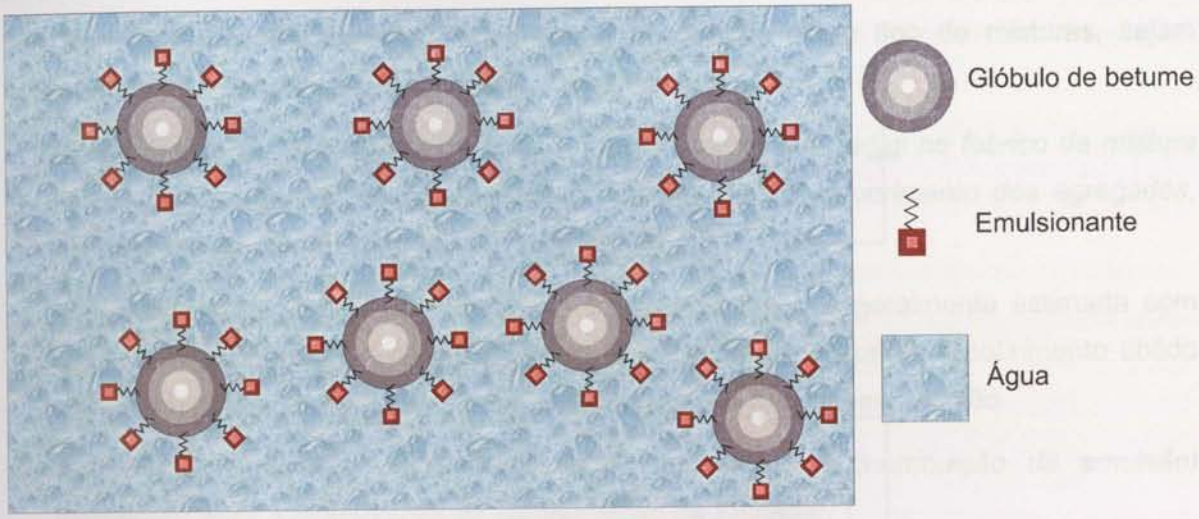


Fig. 2.12 – Constituição de uma emulsão betuminosa

Hoje em dia está disponível no mercado uma grande variedade de emulsões betuminosas, que são capazes de satisfazer a exigências relacionadas quer com a natureza e granulometria dos agregados a utilizar no fabrico da mistura betuminosa, quer com as condições climatéricas a que estas estarão sujeitas após aplicação.

Regra geral, os materiais empregues no fabrico das misturas betuminosas a frio em apreço são, para além de agregados e de emulsão betuminosa, 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.

Estas misturas podem ser fabricadas com agregados novos, ou podem ser fabricadas com material proveniente da fresagem das camadas superiores do pavimente existente, ou seja, misturas recicladas a frio. Nesta secção abordam-se apenas as misturas fabricadas com agregados novos, uma vez que as misturas recicladas serão tratadas mais adiante.

No que concerne à formulação de misturas densas a frio, os métodos seguidos em diversos países, apresentam os mesmos objectivos: determinar a proporção óptima dos materiais constituintes (mistura de agregados + emulsão betuminosa + água + outros aditivos), por forma a obter-se uma boa trabalhabilidade da mistura betuminosa durante o fabrico e aplicação da camada, bem como uma adequada estabilidade e comportamento mecânico durante a vida útil do pavimento reabilitado (Antunes *et al.*, 2000c; Batista & Antunes, 2002).

Na Fig. 2.13 representam-se esquematicamente os passos que se seguem nos estudos de formulação de misturas densas a frio.

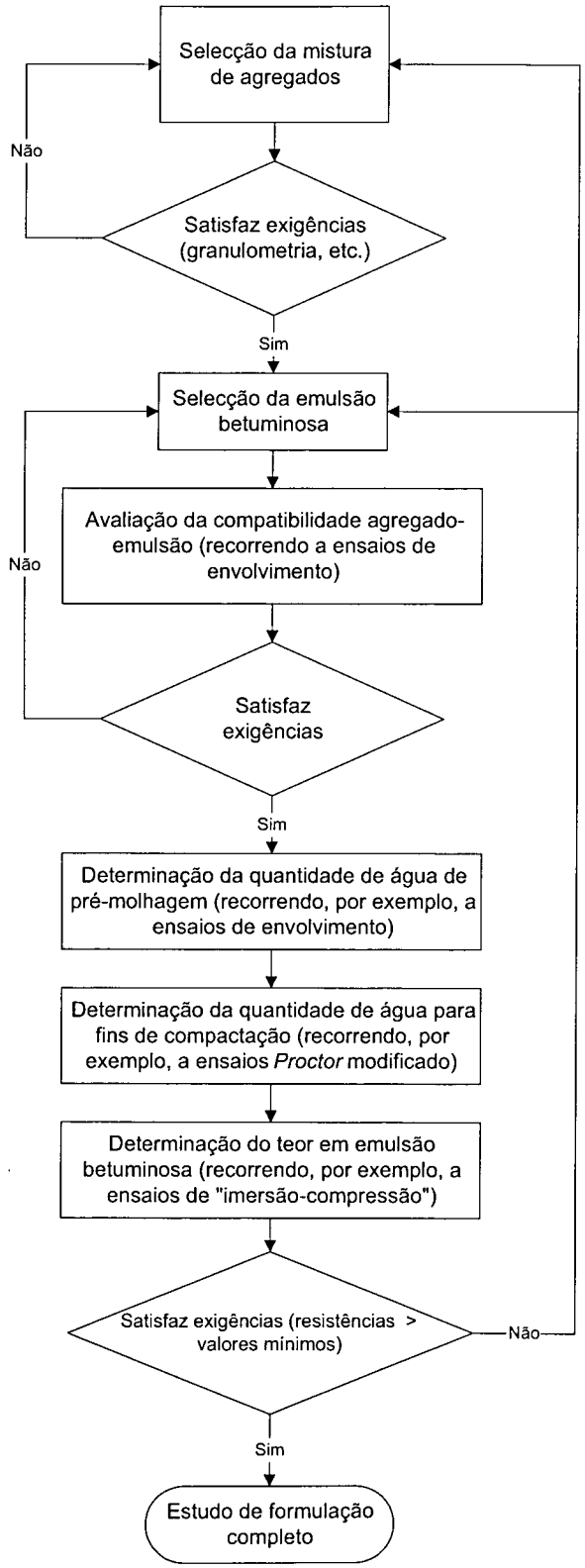


Fig. 2.13 – Organigrama para a formulação de misturas betuminosas densas fabricadas a frio com emulsão betuminosa

Em Portugal, é prática corrente que, para a formulação deste tipo de misturas, sejam observados os seguintes procedimentos:

- *Determinação da quantidade de água a adicionar aos agregados no fabrico da mistura (agregados+emulsão), tendo em vista a optimização do recobrimento dos agregados, por parte do ligante:*

  A quantidade de água de pré-molhagem dos agregados é geralmente estimada com base na experiência do operador, através da apreciação visual do recobrimento obtido em misturas com diferentes teores em água e com dado teor em emulsão.

- *Determinação do teor em líquidos (água de adição + contribuição da emulsão) necessário para a optimização da compactação da camada:*

  No actual Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) preconiza-se a realização do ensaio Proctor Modificado sobre a mistura de agregados, para a determinação do teor 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 betuminosa (igual à quantidade de água contida na emulsão, no caso de emulsões catiónicas.

- *Determinação da percentagem em ligante (betume residual) necessária para a obtenção de adequadas características mecânicas e de durabilidade da mistura:*

  A determinação da percentagem de betume residual é realizada com recurso ao ensaio de "imersão-compressão", que consiste na avaliação do efeito da água sobre a coesão das misturas betuminosas, através da determinação da diminuição percentual da resistência à compressão simples de provetes após imersão em água, a determinada temperatura, e durante um dado período de tempo. Este ensaio é realizado segundo as normas ASTM D 1074 e ASTM D 1075 (nas quais estão baseadas as normas Espanholas NLT161/84 e 162/84) com algumas modificações por forma a ter em conta as especificidades das misturas a frio.

A metodologia de formulação das misturas adoptada pelo IEP é semelhante à metodologia utilizada em Espanha, sendo, no entanto, os valores especificados para as características de resistência das misturas distintos dos valores limite estabelecidos naquele País.

Para o fabrico de misturas a frio com emulsão betuminosa e agregados novos, são utilizadas centrais relativamente simples, uma vez que não é necessário dispor de unidades de aquecimento dos diversos materiais, nem de unidades de filtragem das poeiras e de

recuperação do filer. Na Fig. 2.14 representa-se esquematicamente uma configuração usual de uma central betuminosa a frio.

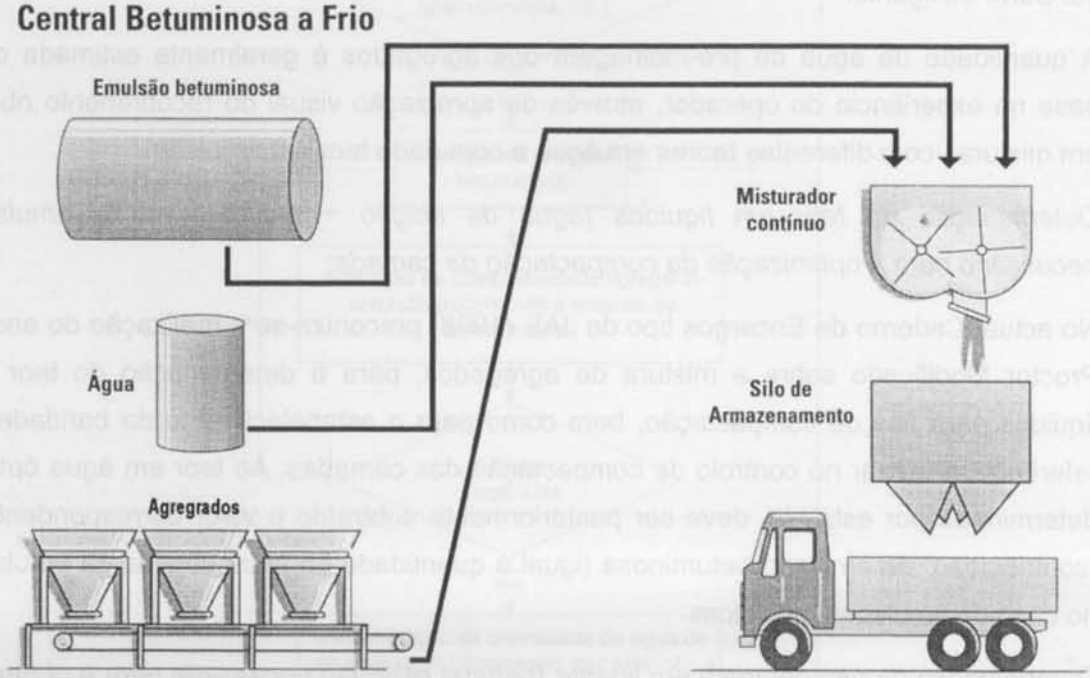


Fig. 2.14 – Configuração de uma central de fabrico de misturas betuminosas a frio (EAPA, 1998)

As principais vantagens das misturas betuminosas a frio relativamente às misturas a quente, resultam do facto de não ser necessário o aquecimento do ligante betuminoso e dos agregados para o seu fabrico e aplicação em obra. O facto de serem misturas fabricadas e aplicadas à temperatura ambiente, confere-lhes as seguintes vantagens:

- Redução dos gastos energéticos;
- Redução da emissão de poluentes;

- Possibilidade de utilização de centrais "móveis"[2] 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.

Às camadas executadas com este tipo de misturas é ainda reconhecida maior "flexibilidade", pelo que são mais adequadas para aplicação sobre suportes mais ou menos deformados e/ou relativamente fendilhados (Serfass, 2002; SETRA).

No entanto, estas misturas estão sujeitas a um período inicial de cura, durante o qual a água existente vai sendo eliminada, a mistura vai ganhando coesão e o seu comportamento vai-se modificando. Apenas findo este período, a mistura betuminosa apresentará as características "finais" para que foi dimensionada. Um aspecto que condiciona este período são as condições atmosféricas, razão pela qual este tipo de camadas deve ser realizada durante a Primavera/Verão.

Outro aspecto muito importante a considerar no que respeita às misturas a frio tem a ver com a sua compactação em obra. Na execução de camadas em misturas densas a frio tem-se verificado que existem dificuldades na compactação, devendo pois ser prestado especial cuidado na selecção do equipamento a utilizar em obra para esse fim, e do teor em água da mistura por ocasião da sua compactação.

No Caderno de Encargos Tipo da JAE (1998) são considerados os seguintes materiais para camadas em misturas betuminosas a frio: "*agregado britado de granulometria extensa, tratado com emulsão betuminosa*" (ABGETE) e "*misturas betuminosas abertas a frio*" para camadas com características de base ou de regularização, e ainda, "*semi-penetração betuminosa*" para camadas com características de regularização. No Quadro 2.6 apresentam-se algumas das especificações preconizadas para estas misturas.

Quanto às emulsões betuminosas a empregar no fabrico das misturas, recomenda-se que nas misturas densas do tipo ABGETE se utilizem emulsões de rotura lenta do tipo catiónico ou aniónico, por forma a que a emulsão envolva os agregados antes da sua rotura. As emulsões betuminosas devem ser especificamente formuladas para os materiais a utilizar.

[2] Designam-se centrais "móveis" por apresentarem maior mobilidade em comparação com as centrais tradicionalmente utilizadas no fabrico de misturas betuminosas a quente, que por oposição se designam por centrais "fixas".

Quadro 2.6 – Principais características das misturas betuminosas a frio que constam do Caderno de Encargos Tipo da JAE

		ABGETE	Mistura betuminosas aberta a frio			Semi-penetração betuminosa	
			< 4 cm	4 – 6 cm	> 6 cm	Para a camada base	Para o recobrimen -to
Tipo de emulsão betuminosa (LNEC E354 e E128)		ECL-1h EAL-1h	EAM-2 EAM-1	EAM-2 EAM-1	EAM-2 EAM-1	ECR-3	
Fracções granulométricas dos agregados (dimensões nominais em mm)		0/4, 4/10, 10/20 ou 0/6, 6/10, 10/20	2/4, 4/10	2/4, 4/10, 10/14	2/4, 4/10, 10/20	20/40	4/10, 10/14
Fuso granulométrico da mistura de agregados (percentagem acumulada do material que passa)	Abertura das malhas de peneiros ASTM						
	50 mm (2")					100	
	37,5 mm (1 ½")					90 - 100	
	25,0 mm (1")	100			100	20 - 55	
	19,0 mm (3/4")	90 - 100		100	70 - 90	0 - 15	
	16,0 mm (5/8")	-		-	-	-	100
	12,5 mm (1/2")	65 - 90	100	60 - 80	50 - 70	-	-
	9,51 mm (3/8")	55 - 75	70 - 90	45 - 65	35 - 55	0 - 5	40 - 75
	4,75 mm (nº4)	40 - 58	15 - 40	10 - 35	5 - 30		5 - 25
	2,36 mm (nº8)	-	0 - 5	0 - 5	0 - 5		-
	2,00 mm (nº10)	25 - 40	-	-	-		0 - 5
	0,850 mm (nº20)	16 - 28	-	-	-		0 - 2
	0,425 mm (nº40)	12 - 22	-	-	-		
	0,180 mm (nº80)	8 - 16	-	-	-		
	0,075 mm (nº200)	4 - 10	0 - 2	0 - 2	0 - 2		
Grau de compactação (%)		≥ 98(1)	≥ 100(2)	≥ 100(2)	≥ 100(2)		
Percentagem de betume residual (%)		≥ 3	≥ 3,5	≥ 3,5	≥ 3,5		

(1) Relação percentual entre a baridade seca determinada em obra e a baridade máxima de referência determinada no ensaio *Proctor* Modificado realizado sobre a mistura de agregados;

(2) Relação percentual entre a baridade seca determinada em obra e a baridade mínima de referência definida no estudo de formulação.

Durante os últimos anos têm-se realizado, um pouco por todo o País, obras em que se procede à reabilitação de pavimentos utilizando misturas betuminosas densas a frio do tipo "misturas de agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa". Seguidamente referem-se sucintamente três dessas obras, que o LNEC teve a oportunidade de acompanhar:

- Obra de reabilitação do pavimento da EN120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro, onde se procedeu ao reforço do pavimento com uma camada de agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa catiónica, ao longo de cerca

de 24 km, tendo os trabalhos decorrido essencialmente durante o segundo semestre de 2000 (Antunes & Batista, 2002);

- Obra de reabilitação do pavimento da EN120 entre Aljezur e Bensafrim, onde, em 1998/99, se procedeu ao reforço do pavimento com uma camada em agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa aniónica, num troço de cerca de 30 km;
- Obra de reabilitação do pavimento da EN260 (IP8), em cerca de 27 km, entre Serpa e Vila Verde de Ficalho, onde, em 1998, se utilizou a técnica da reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com emulsão betuminosa catiónica, e a execução de reforços com agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa catiónica (Antunes *et al.*, 1999d).

2.3.2.6 - Técnicas anti-reflexão de fendas

A colocação de camadas betuminosas para reforço de pavimentos flexíveis fendilhados introduz um mecanismo de ruína adicional no pavimento reabilitado. Para além dos dois mecanismos de degradação dos pavimentos habitualmente considerados no dimensionamento (fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas e deformações permanentes no solo de fundação), é também necessário, neste caso, levar em linha de conta o fenómeno de propagação das fendas existentes nas camadas subjacentes às novas camadas betuminosas de reforço, e o seu aparecimento à superfície do pavimento, conforme se esquematiza na Fig.2.15.

A existência de tais fendas à superfície tem consequências desfavoráveis que afectam a resistência e a durabilidade do pavimento, podendo contribuir significativamente para a sua ruína estrutural prematura. De seguida referem-se alguns dos mecanismos de degradação daí resultantes (Quaresma, 1992):

- As fendas propiciam a infiltração de água para o interior do pavimento, podendo, eventualmente, atingir o solo de fundação;
- Nas zonas fendilhadas, a repartição de tensões devidas aos rodados dos veículos é menor, pelo que o nível de tensão instalado é maior, em particular, nas camadas subjacentes às camadas fendilhadas e no solo de fundação;

  Os troços de pavimento situados entre duas fendas consecutivas sofrem um aumento de esforços devidos à acção do tráfego, pelo que as camadas betuminosas estarão em

condições mais desfavoráveis, quer do ponto de vista da fadiga por tracção, quer do ponto de vista das deformações permanentes;

- A camada de desgaste junto da fenda constitui uma zona mais vulnerável à acção combinada dos veículos, da água, do gelo, etc., sendo mais susceptível ao aparecimento de degradações, como sejam, a desagregação local da camada e o destacamento de pequenos blocos.

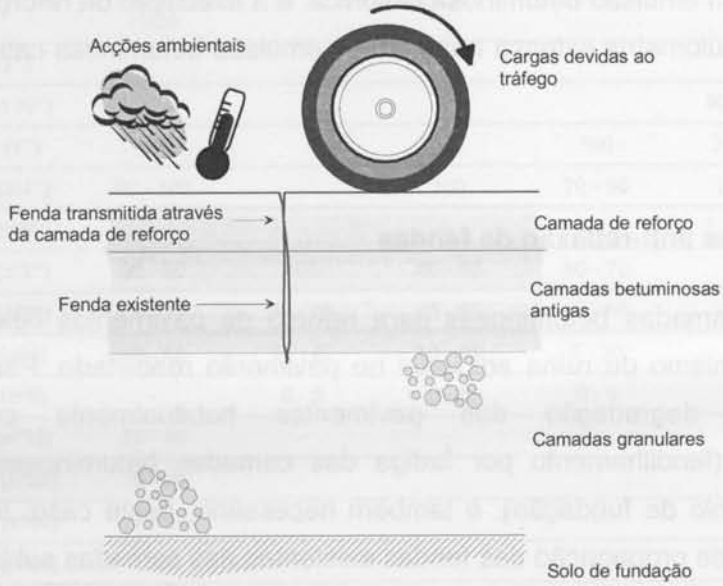


Fig.2.15 – Esquema da formação de fendas na camada de reforço por reflexão das fendas existentes no pavimento antigo

A propagação de fendas das camadas existentes às camadas superiores de reforço deve-se ao facto de, sob a acção de diversos tipos de solicitações, se registarem movimentos dos bordos da fenda que se transmitem à base da camada superior, onde se cria uma concentração de tensões (Colombier, 1989).

Os principais tipos de solicitações associados a este fenómeno, tal como se ilustra na Fig. 2.16, são:

- Tráfego

  Os veículos, em particular, os veículos pesados, ao passarem na vizinhança de uma fenda, provocam um assentamento do bordo carregado, ou seja, de uma forma geral, o

tráfego provocará deslocamentos verticais relativos dos bordos das fendas;

- Variações de temperatura

  As variações de temperatura dia-noite e Verão-Inverno provocam retracção ou dilatação dos troços de pavimento compreendidos entre duas fissuras. Consequentemente, estes efeitos traduzir-se-ão no aumento ou diminuição das dimensões da fenda. Nalguns casos, a existência de um gradiente térmico importante nas camadas poderá mesmo conduzir ao seu "arqueamento".

Existem, ainda, outros tipos de solicitações capazes de induzir deslocamentos relativos dos bordos das fendas existentes, tal como as variações do estado hídrico dos materiais. As acções higrométricas, à semelhança das acções térmicas, são susceptíveis de originar movimentos de abertura ou de fecho das fendas existentes.

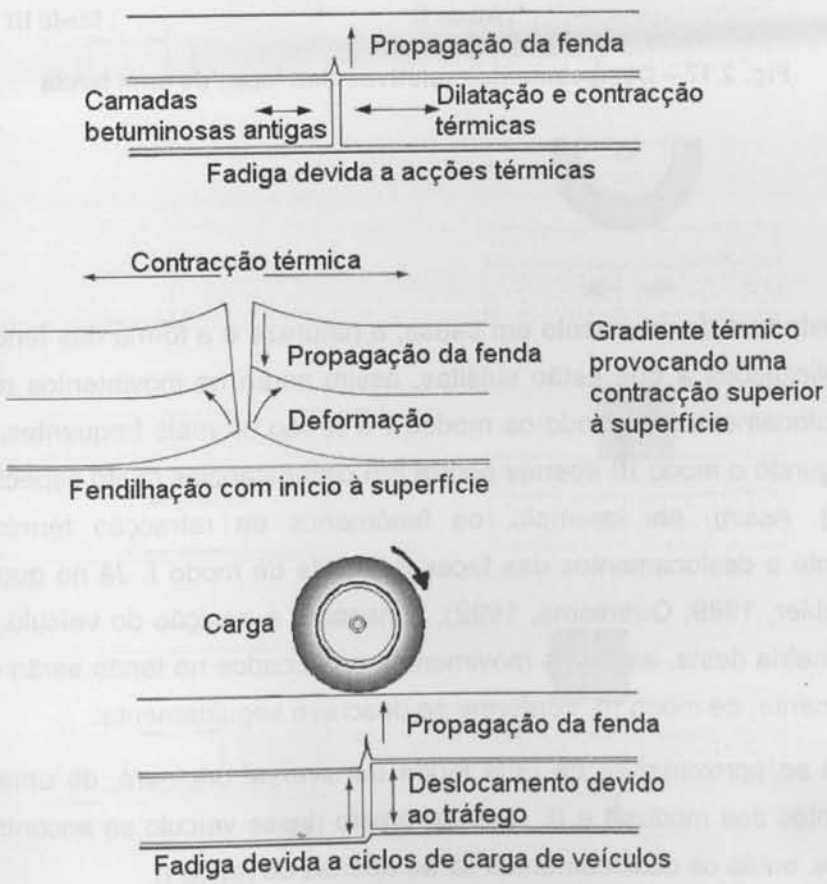


Fig. 2.16 – Mecanismos de reflexão de fendas (adaptado de Nunn, 1989)

Segundo o esquema clássico de Irwin (Colombier, 1989; Quaresma, 1992) podem-se distinguir 3 modos de deslocamentos relativos das faces de uma fenda existente na camada de um pavimento (*vd* Fig. 2.17):

- Modo I, correspondente a um deslocamento normal ao plano da fenda;
- Modo II, correspondente a um deslizamento no plano da fenda, na direcção vertical;
- Modo III, correspondente a um deslizamento no plano da fenda, na direcção horizontal.

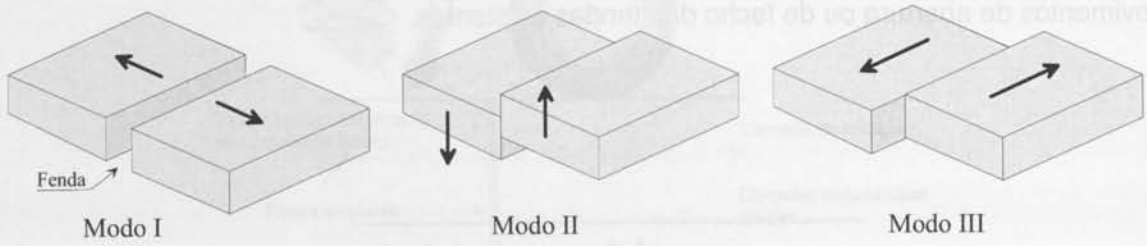


Fig. 2.17 – Deslocamentos relativos das faces de uma fenda

Consoante a estrutura do pavimento em causa, a natureza e a forma das fendas existentes e o tipo de solicitações a que estão sujeitas, assim serão os movimentos registados nas fendas. Os deslocamentos segundo os modos I e II são os mais frequentes, sendo que o movimento segundo o modo III apenas ocorre em circunstâncias muito específicas (Haas & Joseph, 1989). Assim, por exemplo, os fenómenos de retracção térmica conduzem sistematicamente a deslocamentos das faces da fenda de modo I. Já no que concerne ao tráfego (Colombier, 1989; Quaresma, 1992), consoante a posição do veículo em relação à fenda e a geometria desta, assim os movimentos provocados na fenda serão de modo I ou II e, mais raramente, de modo III, conforme se descreve seguidamente:

- Um veículo ao aproximar-se de uma fenda transversal originará, de uma forma geral, deslocamentos dos modos I e II. Quando o eixo desse veículo se encontrar na vertical dessa fenda, então os deslocamentos serão apenas do modo I;
- Um veículo a circular ao longo de uma fenda longitudinal, com um pneu centrado na referida fenda, originará deslocamentos do modo I;

- Um veículo a circular ao longo de uma fenda longitudinal, com um pneu assente num dos bordos laterais dessa fenda, conduzirá a deslocamentos do modo II. Ao atingir o final dessa fenda, poderá eventualmente conduzir a deslocamentos do modo III.

Na Fig. 2.18 representam-se esquematicamente alguns destes tipos de movimentos que podem acarretar a rotura da camada superior de reforço.

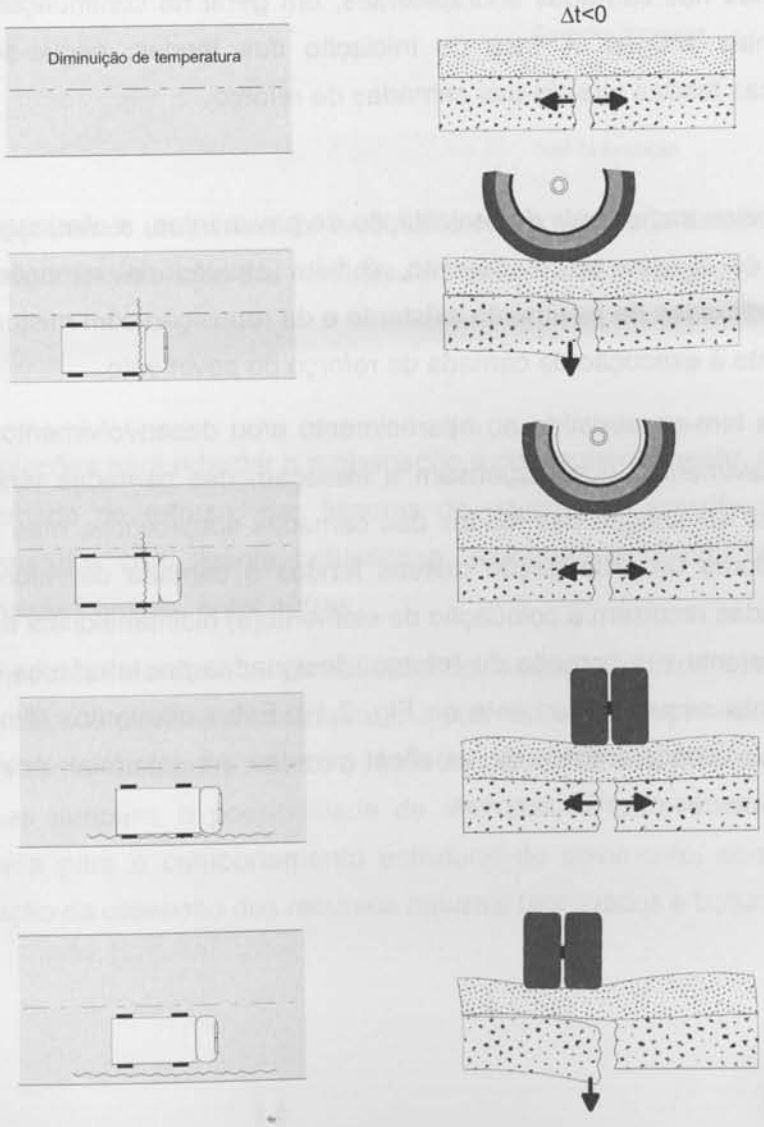


Fig. 2.18 – Exemplos de deslocamentos relativos das faces das fendas, induzidos por diferentes tipos de solicitações

Regra geral, a reflexão de fendas é essencialmente causada por repetições das cargas devidas ao tráfego, por ciclos de contracções térmicas, ou por combinações destes dois factores.

Num pavimento reabilitado, sob a acção do tráfego e das variações de temperatura, ocorrem tensões elevadas na zona inferior das camadas betuminosas de reforço, junto das fendas das camadas betuminosas existentes. Esta concentração de tensões pode conduzir a uma iniciação de fendas nas camadas sobrejacentes, em geral na continuação das existentes nas camadas mais antigas. À fase de iniciação das fendas, segue-se uma fase de propagação dessas fendas através das camadas de reforço.

Segundo os métodos tradicionais de reabilitação de pavimentos, a eliminação do fenómeno de propagação de fendas acima descrito, é feita através da remoção das camadas relativamente fendilhadas do pavimento existente e da reposição com misturas betuminosas novas, previamente à execução da camada de reforço do pavimento.

Nos últimos anos tem-se assistido ao aparecimento e/ou desenvolvimento de técnicas de reabilitação de pavimentos que dispensam a fresagem das camadas fendilhadas, e que funcionam não por eliminação das fendas das camadas subjacentes, mas por adopção de medidas retardadoras da propagação dessas fendas à camada de reforço. As técnicas geralmente utilizadas recorrem à colocação de elemento(s) bidimensionais entre a superfície do pavimento existente e a camada de reforço, designadas por interfaces anti-fissuras, tal como se representa esquematicamente na Fig. 2.19. Estes elementos têm como principal função absorver a concentração de tensões geradas na interface entre as camadas existentes e as camadas de reforço novas.

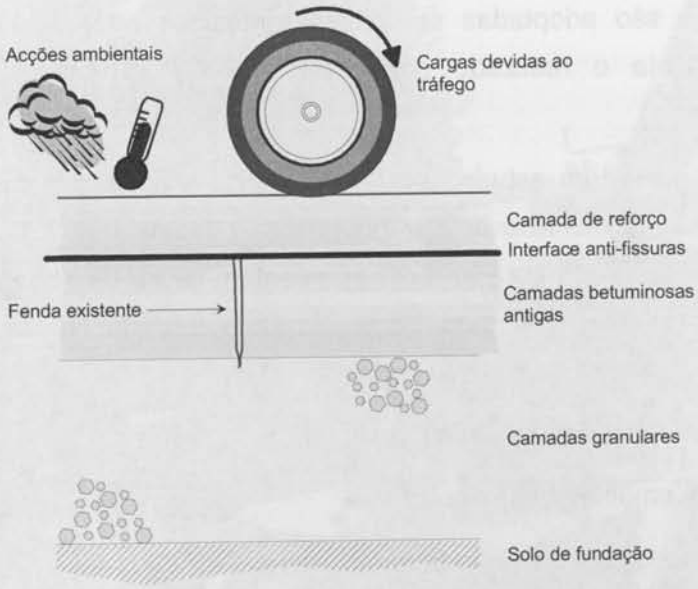


Fig. 2.19 – Esquema de um pavimento reabilitado com a aplicação de uma camada de reforço em que foram adoptadas medidas retardadoras da propagação de fendas

Existem várias soluções para retardar a propagação e consequentemente, o aparecimento à superfície da camada de reforço, das fissuras de pavimentos envelhecidos, tais como, geotexteis impregnados com ligante betuminoso, argamassas betuminosas, geogrelhas, misturas betuminosas porosas, entre outras.

A adopção de medidas retardadoras da reflexão de fendas, ao dispensar a fresagem das camadas fendilhadas do pavimento existente e a sua reposição com misturas betuminosas novas, apresenta como vantagens não só o facto de proporcionar a eliminação dos volumes a vazadouro, mas também, a possibilidade de tirar partido da eventual contribuição da camada fendilhada para o comportamento estrutural do pavimento, com a consequente economia e redução da utilização dos recursos naturais (agregados e betume).

Nos últimos anos têm-se desenvolvido estudos importantes acerca do dimensionamento de pavimentos em que são adoptadas as referidas medidas retardadoras da reflexão de fendas, nomeadamente o realizado por *Bondt* (1999), no âmbito da sua tese de Doutoramento.

No LNEC está em curso, um estudo que tem em vista a avaliação do comportamento a longo prazo de diversas técnicas aplicar no reforço de pavimentos flexíveis fendilhados (Antunes *et al.*, 1998; 2000d). Na Fig. 2.20 apresentam-se as técnicas que, no âmbito do referido estudo, foram aplicadas num trecho de uma Estrada Nacional, e que são as seguintes:

- Argamassa betuminosa com betume modificado
- Base tratada com emulsão betuminosa
- Geotêxtil impregnado com emulsão betuminosa (*vd* Fig. 2.21)
- Grelha metálica com *Slurry Seal* (*vd* Fig. 2.22)

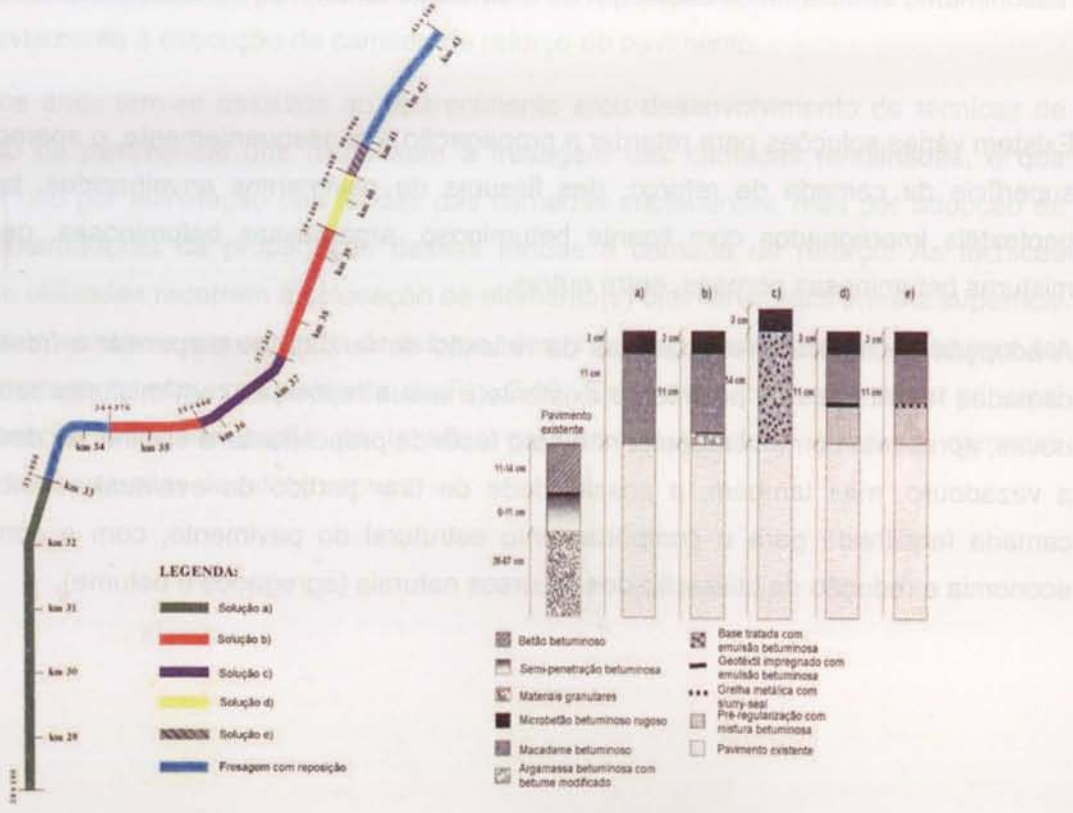


Fig. 2.20 – Soluções de reabilitação adoptadas num troço da EN 118



Fig. 2.21 – Aplicação de geotêxtil impregnado com emulsão betuminosa



Fig. 2.22 – Aplicação de grelha metálica com *slurry seal*

No Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) são consideradas as seguintes técnicas concebidas como soluções retardadoras da propagação de fendas do pavimento antigo à superfície da camada de reforço:

- *Execução de tratamento em mistura betuminosa a quente ou a frio, eventualmente com betumes modificados*, nomeadamente dos seguintes tipos:
  - *Argamassa betuminosa em camada com características de regularização*;
  - *Revestimento superficial*;
  - *Slurry seal;*
  - *Microaglomerado a frio*;
- *Aplicação de geotêxtil impregnado*

Dentro destas técnicas merece uma especial referência, a última referida, uma vez que se trata de uma aplicação específica para a resolução do problema de reflexão de fendas que se tem vindo a tratar na presente secção. Assim, no Caderno de Encargos Tipo da JAE é especificado que o geotêxtil a utilizar como base impregnável na constituição de interfaces anti-fissuras, para além de dever satisfazer a uma série de exigências relativas à sua inalterabilidade perante acções devidas ao calor, ataque de ácidos ou bases, micro--organismos, entre outras, deve ainda, por exemplo, ter uma resistência à tracção mínima de 8 kN/m. Em relação ao ligante a empregar na colagem e impregnação do geotêxtil, especifica-se que para este efeito, deve ser utilizada uma emulsão betuminosa, em princípio, do tipo catiónico de rotura rápida, fabricada a partir de betume modificado com a incorporação de polímeros adequados. A penetração do resíduo de destilação da emulsão deve ser de 100-200 ($x10^{-1}$mm).

2.3.3 - Reciclagem de pavimentos

Em grande medida devido ao enorme esforço de construção de estradas que nos últimos anos tem vindo a ser desenvolvido no nosso país, por vezes em detrimento de uma conservação atempada dos pavimentos em exploração, estes têm atingido frequentemente estados de degradação tais que determinam a fresagem das camadas superiores do pavimento, por vezes em extensas áreas. Segundo os procedimentos tradicionais, estes materiais são considerados como resíduos e transportados a vazadouro.

Assiste-se hoje em dia, a uma consciencialização cada vez maior acerca da necessidade de reutilizar os materiais desperdiçados. Numa perspectiva de desenvolvimento sustentado, estes produtos residuais devem ser reutilizados em detrimento do seu depósito em vazadouro.

Os pavimentos antigos são um, entre muitos, dos diversos tipos de produtos residuais. Na Alemanha, cerca de 42 % de todos os produtos desperdiçados são oriundos da construção civil e de toda a indústria associada. Incluem-se nestes, uma grande quantidade de pavimentos betuminosos antigos recuperados, "*reclaimed asphalt pavement* (RAP)" na terminologia inglesa, que contém uma importante parcela de agregados minerais.

Nos últimos anos tem-se assistido ao desenvolvimento da técnica de reciclagem de materiais fresados de pavimentos, que consiste, na reutilização, como matéria prima, dos materiais provenientes dos pavimentos antigos, no fabrico de misturas a aplicar em camadas de pavimentos.

No meio técnico internacional existe um consenso quanto às três grandes vantagens que a reutilização dos materiais provenientes da fresagem dos pavimentos antigos representa:

- Utilização do pavimento como fonte de matéria prima, o que conduz à redução da utilização dos recursos naturais, como por exemplo, agregados virgens e betume novo;
- Eliminação de zonas de vazadouro de materiais fresados provenientes do levantamento de camadas dos pavimentos antigos e;
- Diminuição dos custos na reabilitação do pavimento.

Actualmente, existem diversas técnicas de reciclagem dos materiais fresados dos pavimentos, que se podem distinguir, por exemplo, quanto à localização dos trabalhos de reciclagem (*in situ* ou em central), quanto ao ligante utilizado (betume, emulsão betuminosa, cimento, etc) e consequentemente, quanto à temperatura de fabrico da mistura reciclada (a quente ou a frio). Assim, tem-se que as principais técnicas de reciclagem que, um pouco por todo o mundo, têm vindo a ser desenvolvidas, são as seguintes:

- Reciclagem em central
  - A quente (com betume)
  - Semi-quente (com emulsão betuminosa modificada)
- Reciclagem *in situ*:
  - A quente (com betume);
  - A frio (com emulsão betuminosa, com espuma de betume, com cimento, etc)

Seguidamente, descrever-se-ão algumas das técnicas de reciclagem de materiais fresados de pavimentos flexíveis que têm vindo a ser utilizadas no nosso País, como sejam, a reciclagem a quente em central, a reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa, com cimento e com espuma de betume. Em relação às misturas recicladas a frio *in situ* com emulsão betuminosa, far-se-á uma abordagem mais abreviada, uma vez que no Capítulo 3 estas serão descritas de uma forma mais pormenorizada.

Referem-se também, de forma mais sucinta, outras técnicas de reciclagem.

2.3.3.1 - Misturas betuminosas recicladas a quente em central

As misturas betuminosas recicladas a quente em central, são misturas cujos materiais constituintes são, para além de agregados e betume "novos", materiais fresados de pavimentos antigos degradados.

O fabrico deste tipo de misturas é realizado no mesmo tipo de centrais "fixas" que as utilizadas para o fabrico das misturas betuminosas a quente convencionais, sendo, no entanto, necessário introduzir algumas modificações às referidas centrais por forma a adaptá-las para esse efeito. Existem diversos processos para adaptar as centrais "fixas" de fabrico das misturas betuminosas a quente, ao fabrico de misturas que incorporam materiais fresados, em função do tipo de central (contínua ou descontínua) e da percentagem de materiais fresados que se pretende incorporar na mistura.

Actualmente, as centrais mais comuns em funcionamento no mercado permitem a incorporação de 10 a 50% ou de 10 a 70% de material a reciclar, respectivamente para o caso das centrais contínuas ou centrais descontínuas, conforme se verá adiante.

Um dos aspectos importantes a considerar no processo de fabrico das misturas recicladas a quente, tem a ver com o sistema adoptado para o aquecimento das misturas betuminosas retiradas de pavimentos antigos a reciclar. Em função do processo adoptado para o aquecimento deste material, assim serão as percentagens permitidas para a sua incorporação no fabrico de misturas betuminosas a quente.

As limitações à quantidade de material fresado a reciclar, prendem-se, fundamentalmente, com o facto de este ser um material constituído por agregados e betume envelhecido, que requer cuidados especiais durante o seu aquecimento, em particular, no que respeita à temperatura empregue, que não deve exceder determinados valores por forma a não se propiciar ainda mais o envelhecimento de um betume já por si envelhecido.

Em geral, nas centrais contínuas, as misturas betuminosas a reciclar são, após processamento, introduzidas na zona central do tambor secador-misturador, onde estão protegidas da chama do queimador. Neste caso, o aquecimento das misturas betuminosas fresadas é feito quer pelos gases de combustão quentes, quer pelo contacto com os agregados sobreaquecidos a incorporar na mistura betuminosa.

Na Fig. 2.23 representa-se esquematicamente o modo de funcionamento de uma central contínua adaptada ao fabrico de misturas betuminosas incorporando materiais fresados dos pavimentos. Nestas centrais, as percentagens de reciclagem de material fresado usualmente permitidas situam-se aproximadamente entre 10 e 50% (EAPA, 1998).

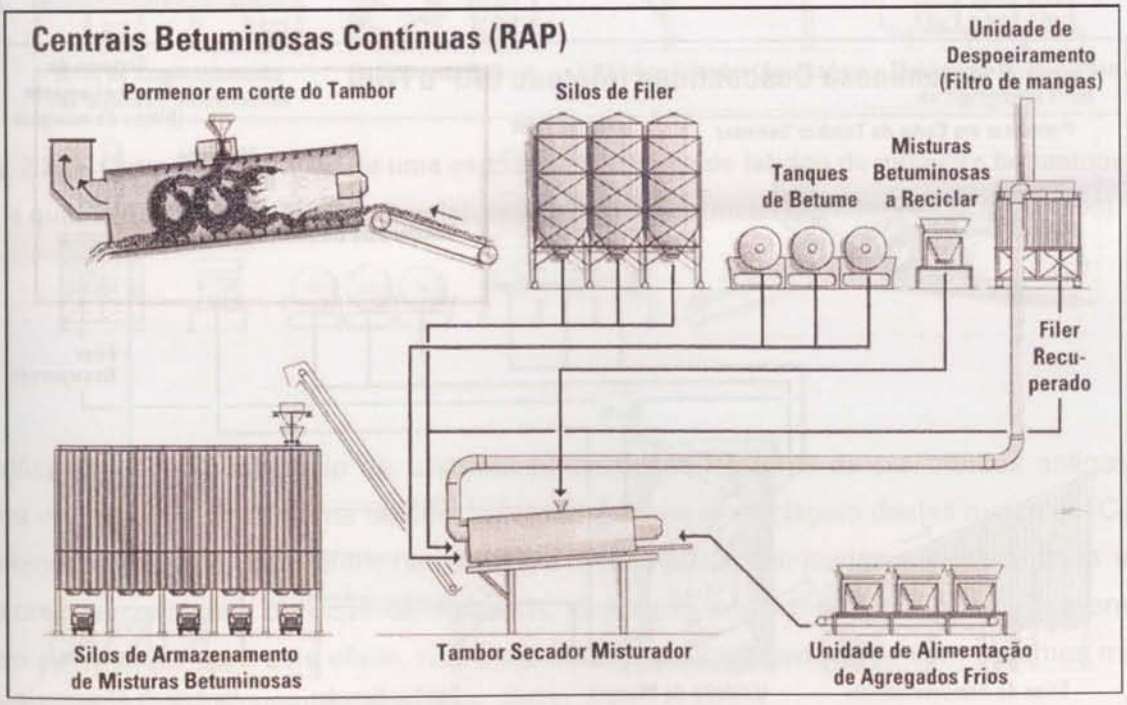


Fig. 2.23 – Configuração de uma central contínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados (adaptado de EAPA, 1998)

Nas centrais descontínuas, uma das formas mais simples de se adaptarem as instalações ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados, é efectuando a introdução do material a reciclar directamente no misturador. Neste caso, o aquecimento e desidratação das misturas betuminosas fresadas é feito através do contacto com os novos agregados sobreaquecidos.

Na Fig. 2.24 pode observar-se o modo de funcionamento destas instalações, que permitem a incorporação de cerca de 10 a 30% de material fresado na mistura reciclada.

Outra possibilidade, é complementar-se a central descontínua de fabrico das misturas betuminosas, com a instalação de outro tambor secador destinado ao aquecimento, em separado, das misturas betuminosas fresadas, conforme se representa esquematicamente na Fig. 2.25. Este sistema permite a reciclagem de grandes quantidades de material fresado, em geral, até percentagens da ordem de 70%.

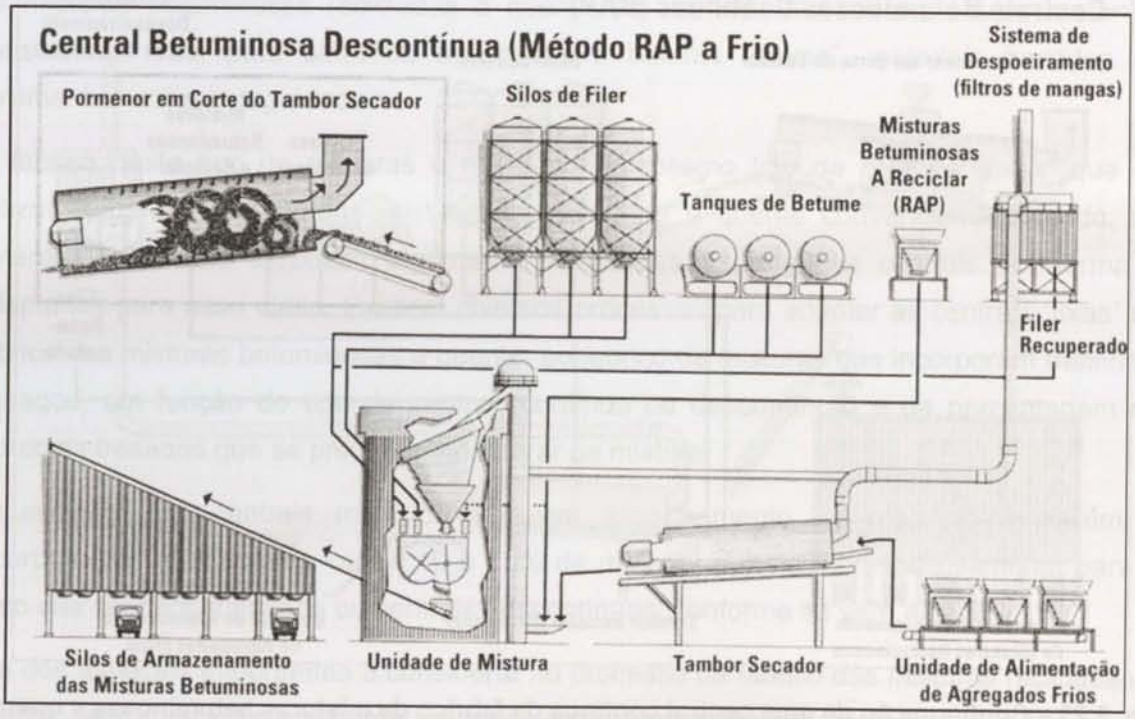


Fig. 2.24 – Configuração de uma central descontínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados (EAPA, 1998)

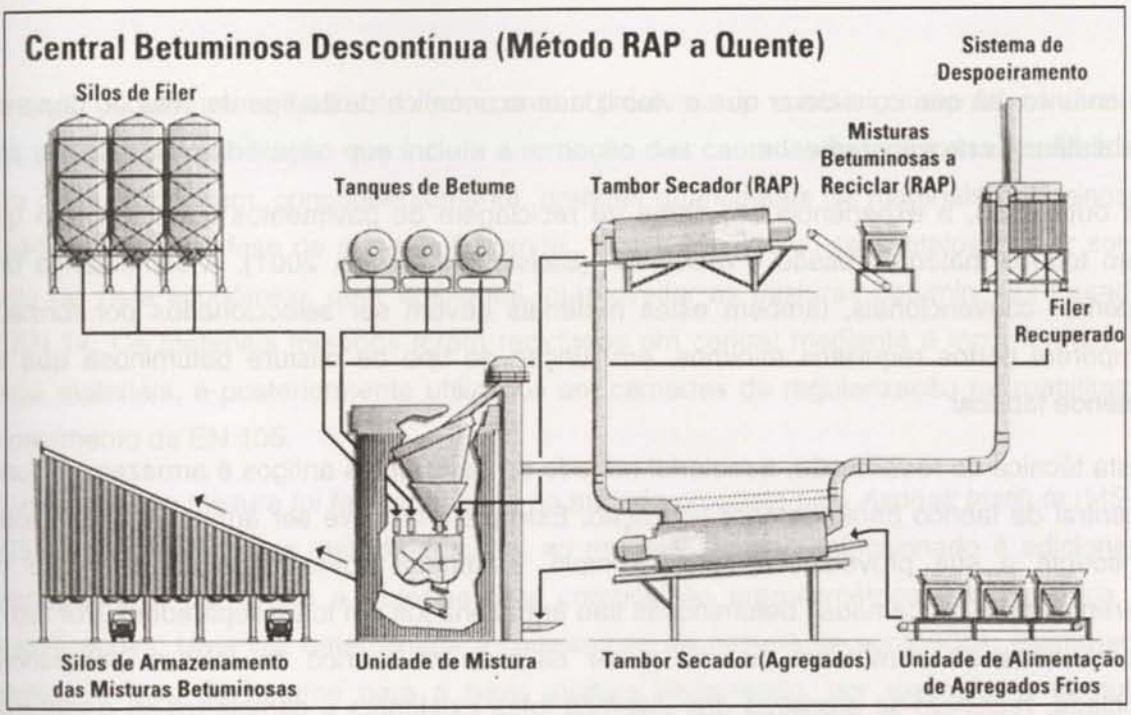


Fig. 2.25 – Outra configuração de uma central descontínua de fabrico de misturas betuminosas a quente adaptada ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados (EAPA, 1998)

Verifica-se que a quantidade de misturas betuminosas fresadas de pavimentos antigos é cada vez maior, existindo uma tendência crescente para a reciclagem destes materiais. Com o objectivo de se incorporarem nas misturas betuminosas fabricadas a quente, cada vez maiores percentagens de materiais fresados, têm vindo a ser desenvolvidos equipamentos mais sofisticados para este efeito, nomeadamente, tambores secadores com sistemas mais complexos de funcionamento (Bonvallet, 2003).

As principais vantagens associadas ao fabrico de misturas betuminosas a quente incorporando materiais fresados do pavimento são as seguintes:

- Possibilidade de utilizar materiais provenientes de outra obra;
- Redução de depósitos em vazadouro;
- Possibilidade de usar equipamentos e métodos construtivos tradicionais, com pequenas modificações.

No entanto, há que considerar que a viabilidade económica deste tipo de solução depende das distâncias de transporte.

Por outro lado, a experiência em obras de reciclagem de pavimentos tem mostrado que "nem todo o material fresado é reciclável" (Batista & Antunes, 2001). À semelhança dos materiais convencionais, também estes materiais devem ser seleccionados por forma a cumprirem certos requisitos mínimos, em função do tipo de mistura betuminosa que se pretende fabricar.

Nesta técnica de reabilitação, o material retirado de pavimentos antigos é armazenado junto à central de fabrico para posterior utilização. Este material deve ser armazenado em lotes consoante a sua proveniência (por exemplo, materiais provenientes da fresagem de diferentes tipos de camadas betuminosas são armazenados em lotes separados). Por forma a seleccionar-se o material fresado a ser utilizado no fabrico da mistura betuminosa reciclada, recolhem-se amostras dos diversos lotes existentes e caracteriza-se o material. Se houver material fresado que, mesmo com adição de material correctivo, não apresente os requisitos mínimos para a aplicação em causa, não deve, naturalmente, ser usado.

Em Portugal, entre 1999 e 2000 foi realizada a obra de reabilitação do pavimento da EN 105, em cerca de 16 km, entre Travagem e Santo Tirso, no âmbito da qual se procedeu ao reforço do pavimento com uma camada de regularização em mistura betuminosa a quente, fabricada em central, incorporando materiais betuminosos fresados (provenientes da fresagem das camadas superiores do pavimento existente num troço da EN 14 situado naquela zona) (Batista *et al.*, 2000).

A solução de reabilitação adoptada surgiu no contexto das obras de beneficiação preconizadas para o conjunto das EENN 14, 104 e 105 (Antunes *et al.*, 1999a).

O estado do pavimento da EN 14, bem como o problema de cotas aí existente, conduziu a uma solução de reabilitação que incluía a remoção das camadas betuminosas fendilhadas, e de onde resultariam, consequentemente, grandes quantidades de materiais betuminosos fresados. Ainda na fase de projecto (Miranda, 1996), considerou-se vantajoso, quer sob o ponto de vista económico, quer ambiental, reaproveitar as misturas betuminosas fresadas na EN 14. Os materiais fresados foram reciclados em central mediante a incorporação de novos materiais, e posteriormente utilizados em camadas de regularização na reabilitação do pavimento da EN 105.

A formulação da mistura foi feita com base no método proposto pelo *Asphalt Institute* (MS-2, 1993). De acordo com o método seguido, ao material fresado seleccionado é adicionado agregado novo por forma a obter-se uma composição granulométrica que satisfaça as especificações. Uma vez determinada a composição da mistura de agregados, estima-se a quantidade total de betume para a nova mistura, recorrendo, por exemplo, a fórmulas empíricas que têm em conta a superfície específica dos agregados. Estima-se seguidamente, a quantidade de betume novo a adicionar à mistura, deduzindo à quantidade total determinada, a percentagem de betume presente no material fresado. Selecciona-se o tipo de betume novo por forma a que, em conjunto com o betume antigo, se obtenha um ligante final cujas características funcionais se considerem adequadas. Finalmente, optimiza-se a formulação da mistura betuminosa através do método Marshall, e determina-se a quantidade final de betume.

Os principais passos a seguir na formulação da mistura reciclada a quente segundo o método adoptado, são os que se esquematizam na Fig. 2.26.

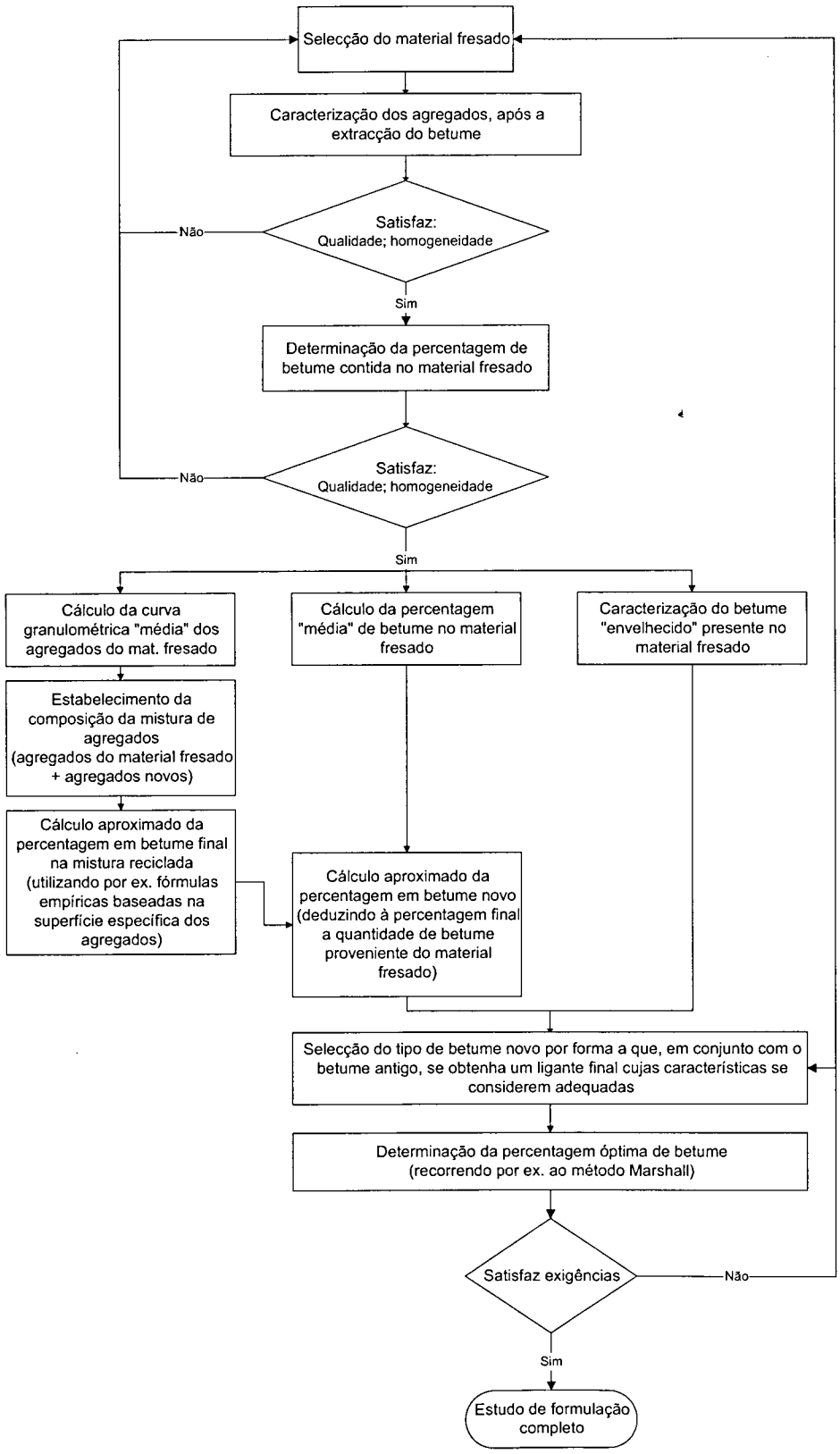


Fig. 2.26 – Organigrama para a formulação de misturas betuminosas fabricadas a quente, incorporando materiais fresados

Na obra de reabilitação da EN 105 já atrás referida, foram estudadas, para a mistura reciclada a quente, três composições da mistura de agregados distintas, correspondentes à adopção de três percentagens de material fresado reciclável: 20%, 30% e 40%. Para cada uma destas composições realizaram-se ensaios Marshall, formulou-se a mistura betuminosa reciclada, e realizaram-se trechos experimentais. Dos estudos efectuados para cada uma das composições granulométricas, concluiu-se que todas satisfaziam as exigências preconizadas no Caderno de Encargos da Obra. Por razões económicas e ambientais, optou-se por realizar uma mistura betuminosa incorporando 40 % de material fresado.

Nesta a obra, foi utilizada para o fabrico da mistura betuminosa reciclada a quente, uma central contínua "Ermont XLM 21". Nas Figuras 2.27 e 2.28 pode-se observar a central, que possui um tambor secador-misturador que está equipado com um anel central para incorporação do material a reciclar. O doseamento do material fresado é volumétrico por variação da abertura da tremonha de descarga no tambor e variação da velocidade do tapete transportador desde a tolva de recepção do material até à referida tremonha. Nesta central todo o processo de fabrico é automático, sendo monitorizado a partir da cabine de controlo.

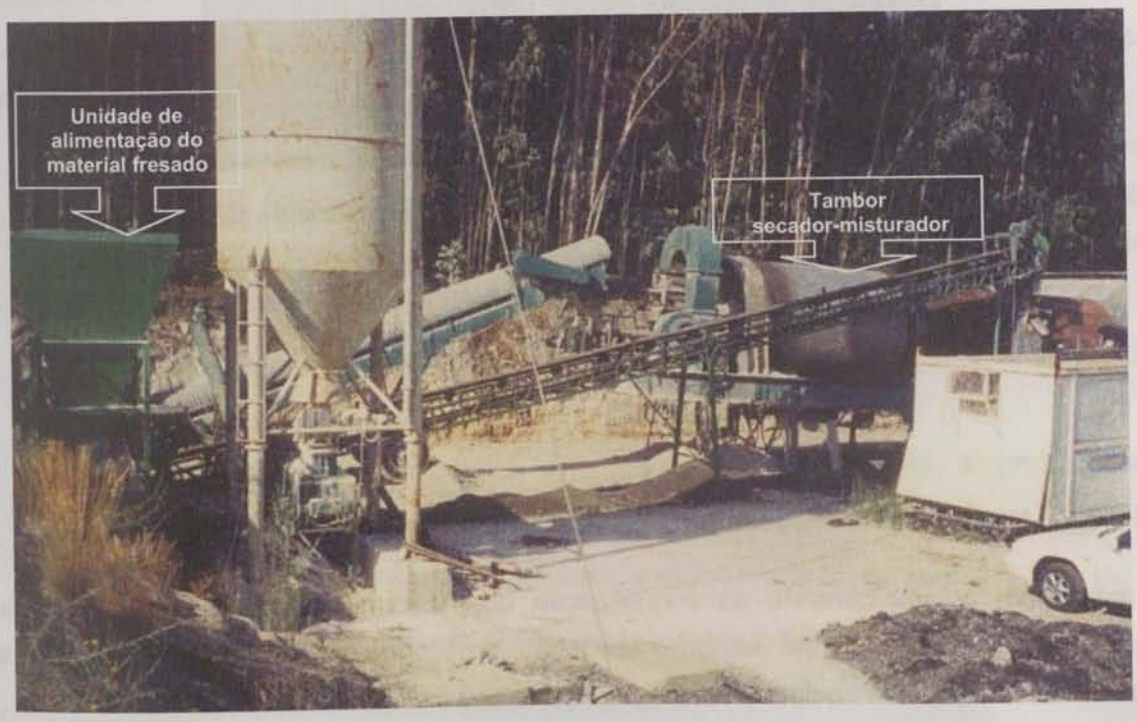


Fig. 2.27 – Panorâmica de uma central contínua adaptada ao fabrico de misturas betuminosas incorporando materiais fresados de pavimentos

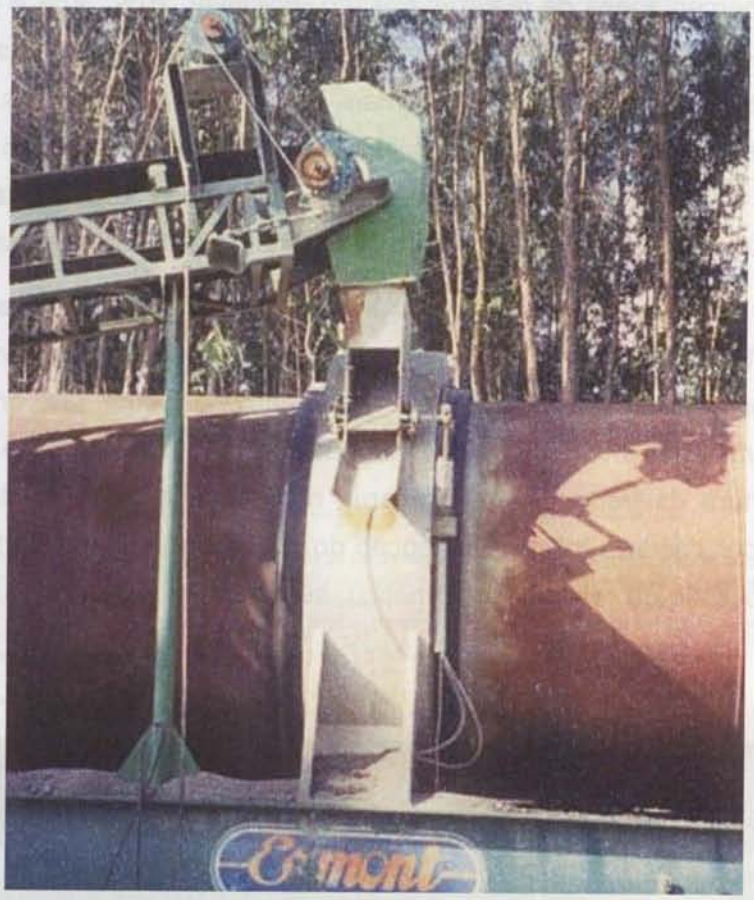


Fig. 2.28 – Pormenor do anel localizado na zona central do tambor secador-misturador para introdução do material a reciclar

2.3.3.2 - Misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio com emulsão betuminosa

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 água. 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 (Marques, 1999).

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 (*vd* Fig. 2.29):

- 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, como se verá na subsecção 2.3.3.4.
- 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.

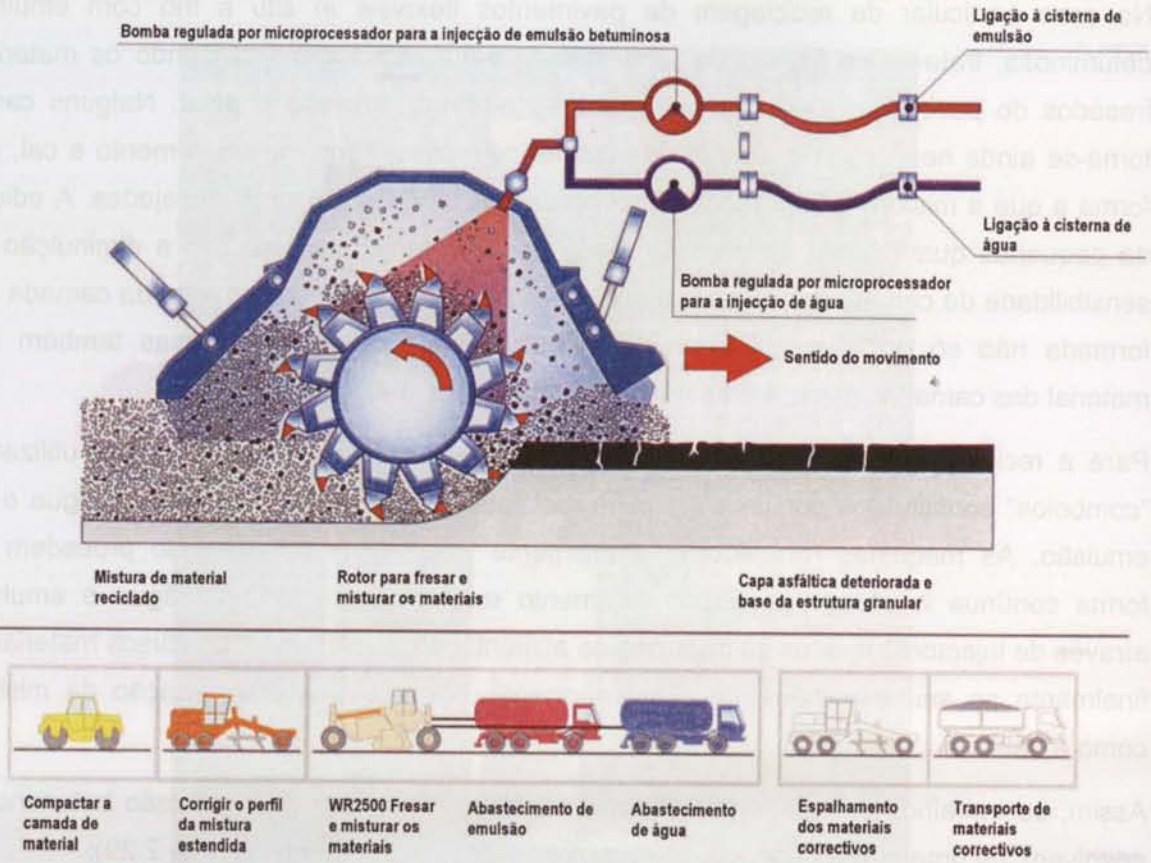


Fig. 2.29 – Esquema das operações de reciclagem do pavimento (Wirtgen, 1997)

Na Fig. 2.30 pode-se observar um aspecto dos trabalhos de reciclagem levados a cabo numa obra realizada no Sul de Portugal. Nesta obra procedeu-se ao espalhamento prévio de "pó de pedra" e de cal hidráulica sobre o pavimento existente, seguindo-se a passagem da máquina recicladora ligada às cisternas de alimentação de emulsão e água.

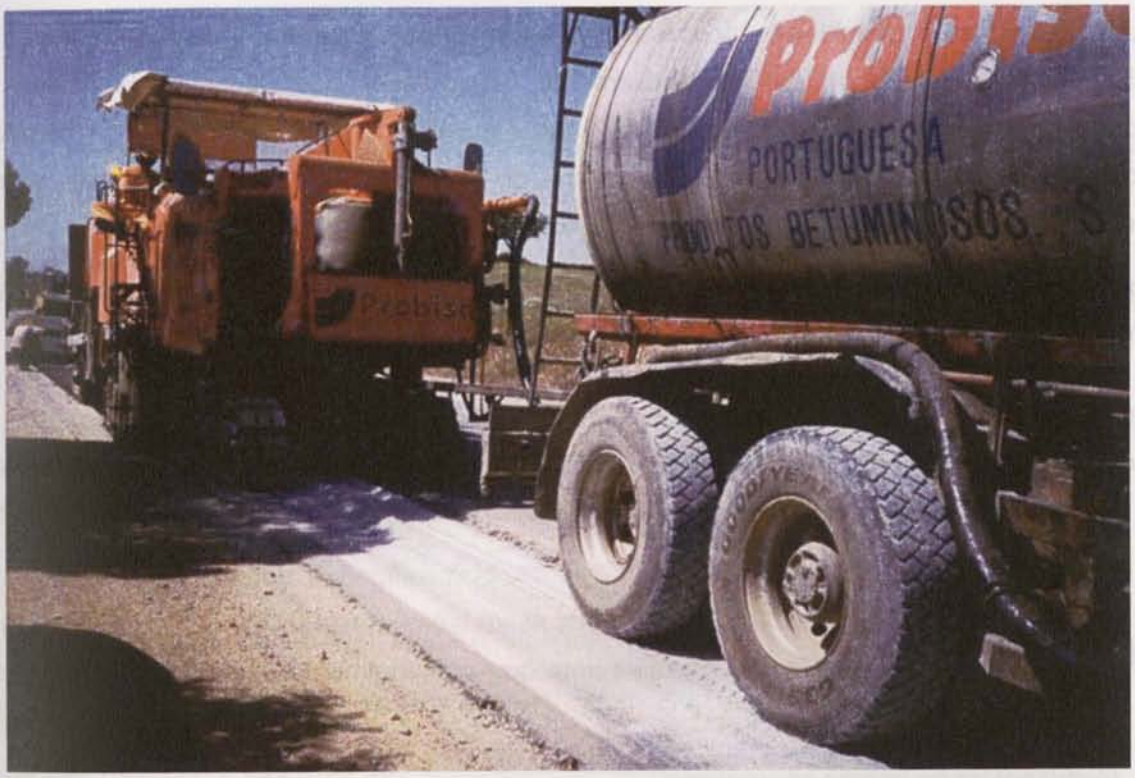


Fig. 2.30 – Trabalhos de reciclagem do pavimento

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.

Havendo a necessidade de se adicionar à mistura material correctivo, 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 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, uma vez que, tratando-se de uma mistura a frio, não deve, por exemplo, ser realizada em tempo chuvoso. Conforme já exposto anteriormente, recomenda-se que este tipo de trabalhos sejam executados 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.

Outros aspectos a considerar são os equipamentos de reciclagem e de compactação a utilizar, pois deles dependem respectivamente, algumas características dos materiais a reciclar (granulometria, homogeneidade, etc.) e, naturalmente, a compacidade da camada reciclada. Assim, por exemplo, a granulometria do material reciclado depende, não só do tipo de materiais a reciclar, mas também da potência e velocidade da máquina.

Do exposto, ressalta que as principais características que a reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com emulsão apresenta são as 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 que contêm os 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 sobrejacentes (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.*

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.

Nos casos 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.

Ainda no que concerne ao estudo de formulação de misturas recicladas, a experiência adquirida (Antunes *et al.*, 1999d; Batista & Antunes, 2001) 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 assim ser feita até à profundidade que se vai reciclar, de preferência recorrendo ao mesmo equipamento a utilizar na execução da obra (Batista & Antunes, 2002, 2003). Se tal não for possível, então poder-se-á optar por proceder ao estudo de formulação utilizando material desagregado do pavimento com a ajuda, por exemplo, de uma fresadora, com a salvaguarda de se confirmarem os resultados assim obtidos quando da execução do trecho experimental, altura em que já será possível recolher material resultante da passagem da própria máquina recicladora (Batista *et al.*, 2002).

Desde 1993 que se têm vindo a realizar no nosso País, obras importantes em que se procedeu à reciclagem dos pavimentos *in situ* a frio com emulsão betuminosa. Seguidamente referem-se sucintamente algumas destas obras:

- Obra de reabilitação do pavimento da EN 12 – Estrada de Circunvalação do Porto (Prates & Barros, 1998; Marques, 1999; Oliveira, 2000). Nesta obra procedeu-se, 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, numa profundidade de cerca de 20 cm, envolvendo sobretudo as camadas betuminosas. Os trabalhos de reciclagem decorreram durante o ano de 1993.
- Obra de reabilitação do pavimento da EN 222 entre a Régua e Ponte das Bateiras (Prates & Barros, 1998; Marques, 1999; Oliveira, 2000), ao longo de cerca de 22 km, onde se reciclou o pavimento existente com emulsão betuminosa e cimento, até uma profundidade de cerca de 15 cm, envolvendo camadas betuminosas e granulares. Nalgumas zonas, foram também utilizados materiais correctivos no fabrico da mistura

reciclada, em particular cal hidráulica, areia e pó de granulação. Os trabalhos de reciclagem tiveram lugar durante o ano de 1995.

- Obra de reabilitação do pavimento da EN 108 entre o Porto e Entre-os-Rios (Prates & Barros, 1998; Marques, 1999; Antunes *et al.*, 1999e), 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.

- Obra de reabilitação do pavimento da EN 260 (IP8) entre Serpa e Vila Verde de Ficalho (Prates & Barros, 1998; Antunes *et al.*, 1999d,e), onde se utilizou a técnica da reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com emulsão betuminosa catiónica, e a execução de reforços com base tratada com emulsão betuminosa catiónica 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.

- Obra de reabilitação do pavimento da EN 254 entre Évora e Viana do Alentejo (Martinho & Clérigo, 1999), onde se procedeu, numa extensão de 17 km, à reciclagem do pavimento *in situ* a frio com emulsão betuminosa catiónica e cimento, numa espessura de 10 cm envolvendo envolvendo camadas betuminosas e materiais granulares. Dada a granulometria (grosseira) do material recolhido *in situ*, incorporou-se também à mistura reciclada uma quantidade relativamente elevada de material correctivo (cerca de 40% de agregado de granulometria nominal 0/25 mm). Os trabalhos de reciclagem foram executados durante o ano de 1998.

  De referir ainda, que nesta obra, estava apenas previsto colocar sobre a camada reciclada, uma camada de desgaste em betão betão betuminoso com uma espessura nominal de 4 cm. Em face da irregularidade da camada reciclada, optou-se por se executar uma pré-regularização em mistura betuminosa densa com uma espessura média de 3 cm.

- Obra de reabilitação do pavimento do IP2 entre a Barragem do Fratel e a EN 118 (Batista *et al.*, 2002; Antunes & Batišta, 2004), 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 decorreram durante o ano de 2002.

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 (*vd* Quadro 2.6), 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 (Batista *et al.*, 2002) 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. Assim, nas obras acompanhadas pelo LNEC, 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 compacidade das misturas recicladas compactadas;
- Realização de ensaios de "imersão-compressão" utilizando mistura recolhida em obra, à saída da máquina recicladora.

De referir que os ensaios de "imersão-compressão" realizados sobre provetes com a composição adoptada para a mistura reciclada, devem conduzir a valores superiores aos mínimos estabelecidos no Caderno de Encargos tipo da JAE:

- Resistência à compressão simples, depois de imersão em água ($R_{im.água}$): ≥ 5 kN
- Resistência conservada ($R_{im.água}/R_{seco}$ x100): ≥ 60%

Cedo se verificou que estes limites são frequentemente largamente ultrapassados, sendo que em Espanha, são exigidos valores superiores. Na obra de reabilitação do IP2 (Batista *et al.*, 2002), tal foi já tido em consideração, tendo sido 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 ($R_{im.água}/R_{seco}$ x100): ≥ 75%

2.3.3.3 - Misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio com espuma de betume

Nesta técnica de reabilitação, o pavimento é reciclado *in situ* utilizando-se um ligante betuminoso designado correntemente por espuma de betume (*foamed bitumen*).

Os procedimentos seguidos neste tipo de reciclagem de pavimentos *in situ* são em tudo semelhantes aos seguidos na técnica de reciclagem com emulsão betuminosa acima descrita, com excepção das adaptações decorrentes da utilização de um ligante diferente.

A espuma de betume é produzida através da adição de pequenas quantidades de água, geralmente da ordem de 2 a 3% da massa de betume, a betume quente (acima de 170°C) (Fröbel, 2002). Quando se junta água ao betume quente, a água evapora-se rapidamente, levando o betume a formar uma "espuma", cujo volume pode ser cerca de 20 a 30 vezes superior ao volume inicial do betume. Durante este processo, aumenta-se a superfície específica do betume e reduz-se significativamente a sua viscosidade, o que conduz a uma melhoria das suas propriedades de dispersão, e consequentemente, a um aumento da sua capacidade de revestimento dos materiais a serem tratados. Nesta forma, o betume apresenta características que proporcionam a sua utilização como ligante para um largo espectro de materiais desagregados, podendo ser misturado com agregados húmidos e à temperatura ambiente.

Apesar do aquecimento necessário à produção da espuma de betume, este processo de reciclagem é considerado "a frio" dado que, quer a mistura dos diversos componentes (espuma de betume + material fresado + eventual material correctivo), quer a aplicação e compactação da mistura são efectuados à temperatura ambiente.

Na Fig. 2.31 representa-se esquematicamente o processo de formação da espuma de betume, que tem lugar numa câmara de expansão, onde a água é injectada no betume quente a uma pressão de aproximadamente 5 bar. A espuma de betume produzida sai da câmara de expansão através de um bico injector, sendo imediatamente misturada com o material desagregado no tambor de fresagem e mistura da máquina recicladora.

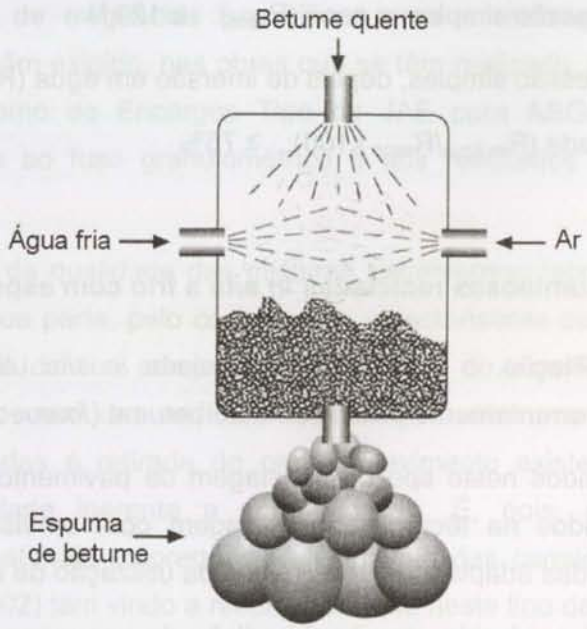


Fig. 2.31 – Esquema de produção de espuma de betume (Wirtgen, 2001c)

A espuma de betume é um sistema essencialmente formado por água no estado gasoso, betume e ar, que ao fim de um curto período de tempo (da ordem dos segundos) tem tendência para voltar ao estado inicial.

A espuma de betume é caracterizada em termos da "taxa de expansão" e da "meia-vida". A "taxa de expansão" define-se como a relação entre o máximo volume atingido durante a formação da espuma de betume e o volume final do betume após dissipação da espuma. A taxa de expansão é uma medida indirecta da viscosidade da espuma de betume (Jenkins, 2000). A "meia-vida" é o tempo que decorre, em segundos, entre o instante em que a espuma de betume atinge o volume máximo e o instante em que esse volume se reduz a metade. Este parâmetro mede, naturalmente, a estabilidade da espuma.

As propriedades da espuma de betume, formada a partir de um dado betume, dependem principalmente da temperatura do betume quando da adição da água, da quantidade de água adicionada, e da pressão a que o betume é injectado na câmara de expansão.

A variação dos dois parâmetros considerados para a caracterização da espuma, em função da temperatura do betume e da quantidade de água empregue no seu fabrico, segue o andamento apresentado na Fig. 2.32. As duas variáveis, taxa de expansão, e meia-vida, não são, como se deduz do andamento do diagrama, independentes e ambas variam com a percentagem de água e com a temperatura de fabrico. Para uma dada temperatura de injecção de betume, a meia-vida aumenta com a diminuição da percentagem de água,

enquanto que a taxa de expansão aumenta com aquela. O aumento da temperatura de fabrico favorece a maximização de ambos os parâmetros.

Apesar de não haver limites impostos para estas características, o ideal é que ambos os valores sejam o maior possível, por forma a que a espuma de betume apresente uma maior capacidade de se misturar com agregados à temperatura ambiente e húmidos, resultando em misturas mais homogéneas. É recomendável que a taxa de expansão seja superior a 10 (m^3/m^3) e a meia-vida superior a 12 s (Ribeiro, 2003).

Note-se porém, que ambas as características da espuma (taxa de expansão e meia-vida) não são de medição exacta, devendo ser considerada em ordens de magnitude (Wirtgen, 2001c). Por exemplo, taxa de expansão entre 10 e 15 (m^3/m^3) e meia-vida entre 10 e 15 s.

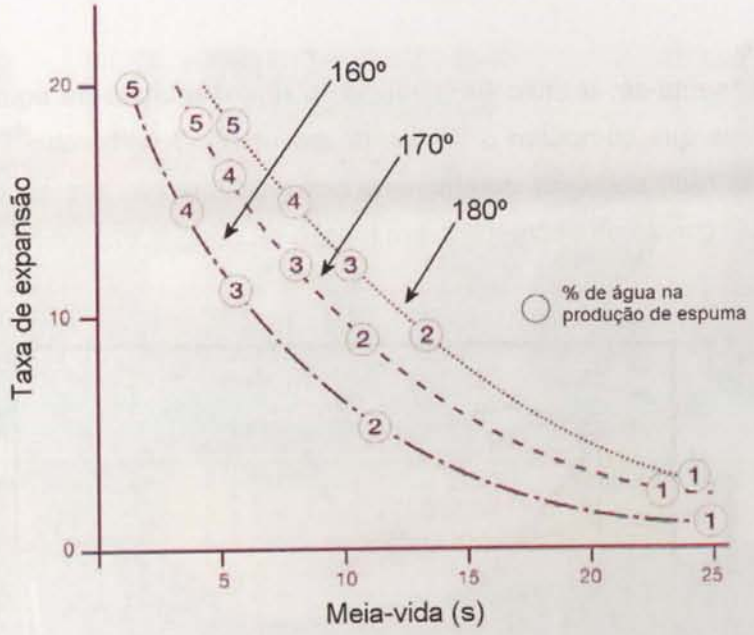


Fig. 2.32 – Diagrama típico de variação da taxa de expansão e da meia-vida da espuma de betume, com a percentagem de água e com a temperatura do betume

De acordo com Jenkins (2000) um processo para se determinar a quantidade de água para a produção da espuma, consiste na definição de um parâmetro adicional designado por "índice de espuma". Este parâmetro contabiliza os dois anteriores pois é uma medida da área do gráfico tempo *versus* taxa de expansão. A área é calculada entre dois intervalos de tempo pré-definidos, sendo o limite inferior estabelecido por forma a contabilizar-se o tempo de descarga da espuma (tempo entre o instante em que a espuma é fabricada e é aplicada), e o limite superior definido pelo tempo correspondente a uma taxa de expansão de 4 (m^3/m^3)

por corresponder ao valor mínimo de viscosidade para que se possa efectuar a mistura da espuma com os agregados.

Segundo o mesmo autor, as curvas de decréscimo da taxa de expansão obedecem, em geral, a uma variação exponencial, dada pela seguinte expressão:

$$TE = TE_{max}\, e^{\left(\frac{-\ln 2}{\tau_{1/2}} t\right)} \quad \text{, onde}$$

TE é a taxa de expansão;

TE_{max} a taxa de expansão máxima (medida imediatamente após a descarga da espuma);

$\tau_{1/2}$ a meia vida da espuma; e

t o tempo

Na Fig. 2.33 apresenta-se, a título de exemplo, a representação da equação anterior e a definição das áreas que compõem o "índice de espuma". O parâmetro $TE_{máx.R}$ ou taxa de expansão máxima real, pode ser determinado por retro-análise, através de determinações experimentais, das curvas de decréscimo em função da taxa de expansão máxima ($TE_{máx.}$).

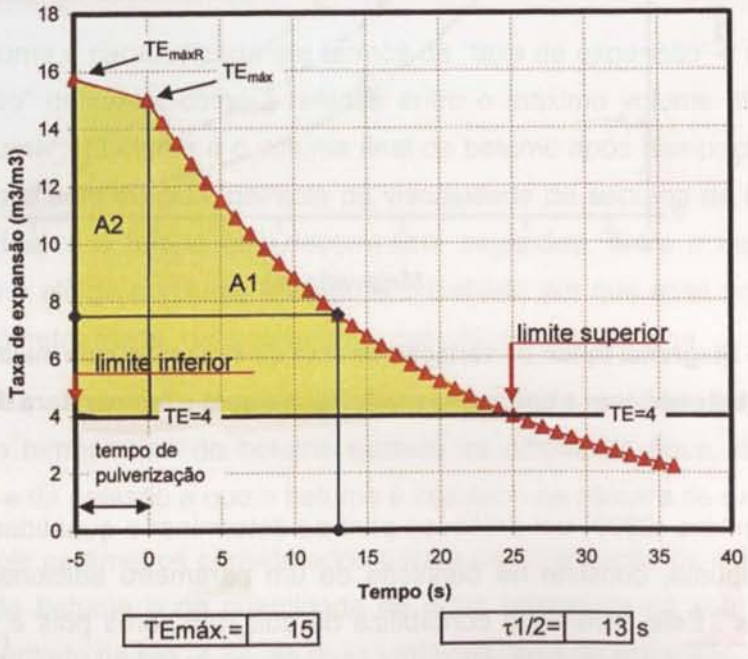


Fig. 2.33 – Curva teórica do decréscimo da taxa de expansão

O índice de espuma (Jenkins, *op. cit.*), é a soma das áreas A_1 e A_2, correspondentes, respectivamente, ao decréscimo após e durante a descarga da espuma.

A determinação da quantidade de água para a produção da espuma de betume pode ser feita calculando o índice de espuma para espumas produzidas com diferentes quantidades de água e com a eventual adição de agentes que potenciem a produção da mesma. A quantidade óptima de água é aquela que maximiza o índice de espuma.

Embora os métodos para a produção de espuma de betume tivessem sido desenvolvidos há já algumas décadas, apenas avanços mais recentes em vertentes, como sejam, os equipamentos utilizados em obra, as centrais de fabrico e o equipamento laboratorial (*vd* Fig. 2.34), tornaram este método tecnicamente atractivo e economicamente competitivo.

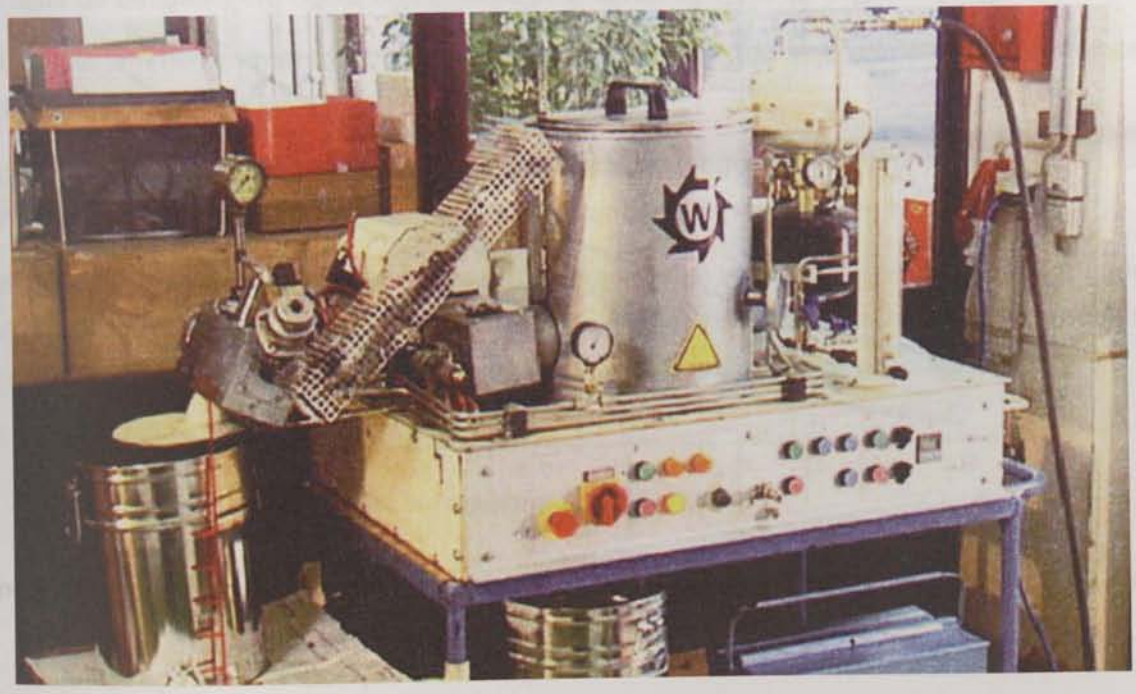


Fig. 2.34 – Unidade laboratorial de produção de espuma de betume (Wirtgen, 2001a)

No fabrico de espumas de betume utilizam-se, em regra, betumes de penetração nominal desde 50 a 200 ($x10^{-1}$ mm). Os betumes mais moles são aqueles que, em geral, se apresentam como mais adequados para a produção de espuma, no entanto, são aqueles que conduzem a misturas mais deformáveis. Deve-se pois acautelar a utilização deste tipo de betumes em climas mais quentes.

A percentagem de finos na mistura reciclada com espuma de betume, deve ser de pelo menos de 5% mas não deve exceder os 20% (em massa) (Neussner, 2001). Na Fig. 2.35 apresenta-se o fuso granulométrico considerado mais adequado para a reciclagem com espuma de betume. Os materiais com deficiência na quantidade de finos podem, porém ser corrigidos, por exemplo, pela adição de cimento ou materiais siltosos. No caso de se empregar cimento na correcção, convém não ultrapassar percentagens da ordem dos 2% pois, nestas circunstâncias, alteram-se as características de resistência à fadiga da camada reciclada. A utilização de materiais argilosos não é, em princípio, adequada, devido à componente coesiva que, em geral, estes materiais apresentam. Neste caso as partículas finas tendem a permanecer agrupadas não cumprindo o objectivo pretendido de facilitar a dispersão do betume.

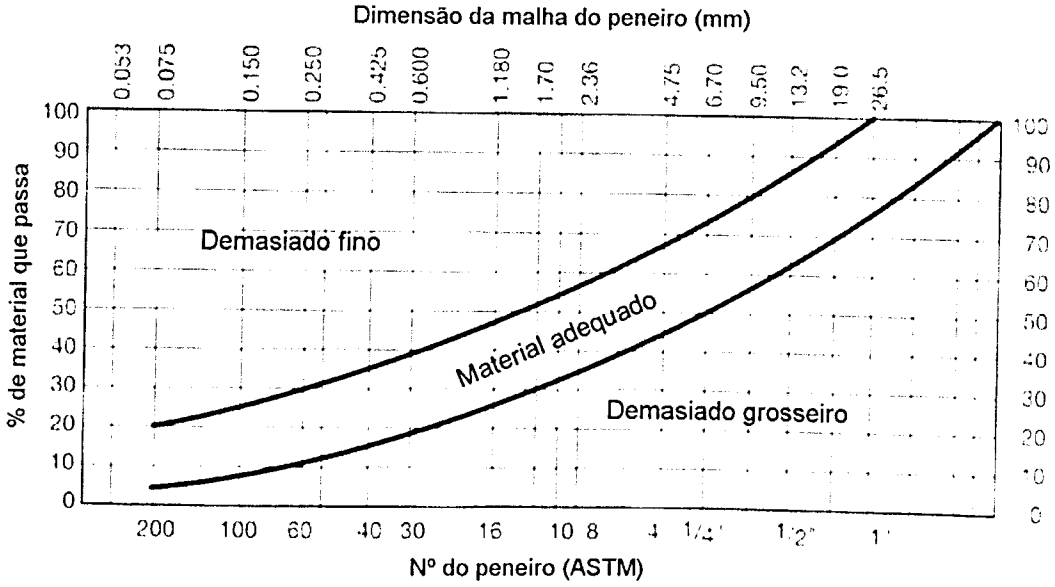


Fig. 2.35 – Fuso granulométrico adequado para a reciclagem com espuma de betume (Wirtgen, 2001c)

Acrescenta-se que neste tipo de reciclagem tem sido cada vez mais frequente a adição de 1 a 2% em massa de filer de cimento, cal ou combinações dos dois, que embora em quantidades reduzidas, conduzem a benefícios adicionais, tal como, o facto de a resistência ser atingida mais cedo, o que permite que a abertura ao tráfego seja mais rápida (Fröbel & Veith, 2002).

Em Portugal foi realizada, em 2002, a primeira experiência em que foi aplicada a presente técnica na reabilitação de um troço urbano na cidade do Porto. A extensão total do troço reabilitado foi de 1200 m. Tratou-se da reabilitação de um pavimento muito degradado cuja composição incluía cerca de 20 cm de camada de base granular em Agregado Britado de Granulometria Extensa (ABGE) e um revestimento betuminoso em semi-penetração com cerca de 10 cm (Teixeira *et al.*, 2003).

A solução prevista no projecto previa o saneamento do pavimento existente numa profundidade de cerca de 20 cm e a sua substituição com cerca 13 cm em macadame betuminoso, seguindo-se uma camada de desgaste em betão betuminoso, com 6 cm de espessura.

A solução alternativa consistiu na reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume do pavimento existente, numa profundidade de 20 cm, seguindo-se a execução de uma camada de desgaste em betão betuminoso com cerca de 6 cm de espessura.

Na reciclagem do pavimento utilizaram-se pois os materiais da semi-penetração betuminosa e de parte da camada granular existente.

Através da reciclagem por este método conseguiu-se, segundo Teixeira *et al.* (*op. cit.*), um ganho sensível nos prazos de execução e na economia de matérias primas.

Para o estudo de formulação da mistura, à excepção dos aspectos específicos relacionados com a utilização de espuma de betume, foram seguidos os passos usualmente utilizados na formulação das misturas a frio com ligante betuminoso, em particular, os seguintes:

- Caracterização do material a reciclar;
- Avaliação da necessidade de correcção granulométrica;
- Determinação do teor em água para fins de compactação da camada, recorrendo ao ensaio *Proctor* modificado;
- Determinação da composição e da temperatura de fabrico da espuma de betume;
- Determinação da percentagem em espuma de betume, recorrendo a ensaios de "resistência conservada" (isto é, resistência com e sem imersão em água), que consistiram neste caso, na avaliação da resistência à tracção por compressão diametral de provetes moldados com diferentes percentagens do ligante.

De referir, ainda, que na presente obra, na composição final da camada reciclada, para além de 3% de betume, foi também incorporado 2% de cimento.

2.3.3.4 - Misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio com cimento

O processo de reciclagem *in situ* com cimento consiste na fresagem, com equipamento apropriado, de camadas constituintes dos pavimentos antigos, e no fabrico de um nova mistura adicionando cimento e água. Nalguns casos, a composição granulométrica é corrigida com a adição de agregados novos.

O processo construtivo utilizado na reciclagem *in situ* com cimento é em tudo semelhante ao utilizado na reciclagem com emulsão betuminosa, exceptuando-se a forma de adição do ligante empregue.

No caso da reciclagem com cimento, existem duas formas distintas de se adicionarem o cimento e a água necessária para a sua hidratação: ou se adiciona ao material fresado, o cimento e a água por separado; ou, em alternativa, juntam-se previamente o cimento e a água, injectando-se de seguida a calda assim formada ao material fresado.

Um dos factores que mais tem contribuído para o desenvolvimento desta técnica relaciona-se precisamente com as melhorias que se têm registado nos equipamento disponíveis para a sua realização, em particular, nos sistemas utilizados para a adição do cimento.

No caso mais simples, o cimento é espalhado sobre o pavimento que se vai reciclar, imediatamente antes da passagem da recicladora. A distribuição do cimento pode ser efectuada manualmente, através do espalhamento dos sacos de cimento em quadrículas pré-definidas, ou pode ser efectuada com recurso a pulverizadores mecânicos. De acordo com o primeiro procedimento é difícil garantir uma distribuição homogénea do cimento, pelo que apenas deve ser empregue em obras muito pequenas e de tráfego reduzido (Jofré *et al.*, 1999). Se se utilizar o último procedimento, o cimento deve espalhar-se o mais uniformemente possível, na dosagem pretendida, sobre a superfície a reciclar. No entanto, segundo qualquer um dos procedimentos, o cimento assim espalhado apresenta uma grande exposição a acções externas, tal como o vento, que são susceptíveis de provocar o seu afastamento da zona alvo, e em consequência, diminuir a qualidade da mistura reciclada, para além de causar problemas ambientais. Para reduzir ao mínimo as perdas de cimento, e sobretudo, para evitar os inconvenientes que tal suscita, é recomendado que o tempo que decorre entre o espalhamento do ligante e a passagem da máquina recicladora seja o menor possível.

Hoje em dia, para a adição de cimento, existem dispositivos que se instalam à frente da máquina recicladora, tal como se retrata na Fig. 2.36. Este tipo de dispositivos contém uma comporta rotativa que espalha o cimento imediatamente à frente da câmara de fresagem e de mistura da máquina recicladora, garantindo assim a adição da dosagem de cimento estabelecida, minimizando o levantamento do pó para fora da zona alvo, e possibilitando a realização dos trabalhos de reciclagem em condições atmosféricas mais desfavoráveis, tais como, ventos mais fortes e chuvas ainda que fracas.

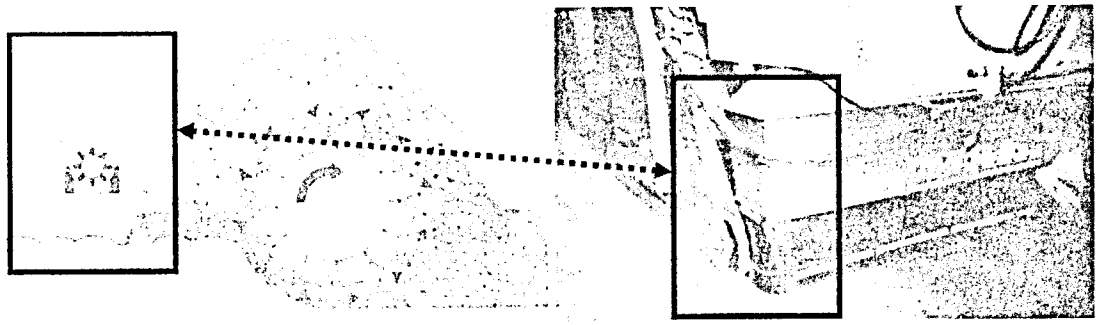


Fig. 2.36 – Sistema de adição de cimento à frente da máquina recicladora (Neussner, 2001)

Conforme já referido, outra forma de se adicionar o ligante hidráulico, é misturá-lo previamente com água, formando uma calda que se junta posteriormente aos materiais fresados. Para tal, existem misturadoras móveis do tipo da representada na Fig. 2.37, que circulam acopladas à máquina recicladora. Este tipo de unidades permite a mistura do cimento e da água nas dosagens exactas, conforme programado. De acordo com os parâmetros de largura e profundidade de reciclagem, densidade do material e velocidade de deslocação, a calda de cimento é bombada para os injectores instalados na câmara de fresagem e de mistura da máquina recicladora, não existindo de todo o levantamento de nuvens de cimento.

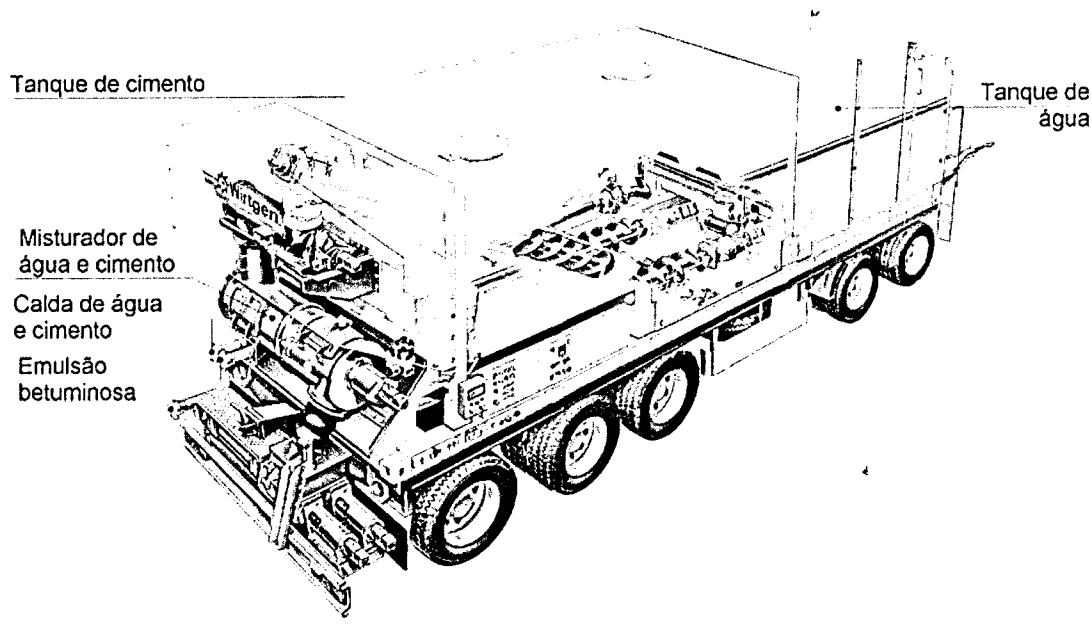


Fig. 2.37 – Unidade de produção de calda de cimento e água a empregar como ligante na reciclagem *in situ* de pavimentos (adaptado de Wirtgen, 1998)

Em relação à reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa, as camadas recicladas com cimento têm a vantagem de apresentarem maiores resistências à compressão, maiores módulos de deformabilidade, e consequentemente, uma maior capacidade de suporte.

Por outro lado, sendo camadas mais rígidas são mais propensas ao fendilhamento por fadiga. Neste tipo de técnica é ainda necessário proceder-se, durante a execução da camada, a um controlo do fendilhamento por retracção, devido à libertação do calor de hidratação que ocorre durante a cura.

Segundo Quaresma (1992) os factores que mais influenciam a cura de misturas com cimento são a temperatura e a variação de humidade. Na verdade, quanto maior for o período em que se impede a saída de água da camada com cimento, maior será a sua resistência, bem como, a sua durabilidade.

Os pavimentos reciclados com cimento, têm, em geral, um comportamento que se assemelha aos dos pavimentos semi-rígidos convencionais. As camadas em misturas com ligantes hidráulicos desenvolvem espontaneamente fissuração. Esta pode ser fina e pouco espaçada ou, em resultado de diversos factores, tais como eventuais heterogeneidades do pavimento a reciclar e elevadas espessuras de reciclagem entre outros, pode ser irregular, com espaçamentos relativamente elevados (superiores a 6 m) e aberturas importantes. Estas fendas, em especial no caso de as camadas betuminosas de reforço terem reduzida espessura, e de acordo com o exposto na secção 2.3.2.6, tendem a propagar-se até à

superfície, com todos os inconvenientes daí decorrentes no que respeita à degradação do pavimento.

Para controlar este fenómeno, é frequente recorrer-se a técnicas que consistem na criação artificial de "fendas" com espaçamento pré-definido. As tendências actuais apontam no sentido de se recorrer à técnica de "pré-fissuração", que consiste na realização, antes da compactação, de sulcos transversais na camada, com espaçamentos regulares curtos, da ordem de 2,5 a 3,5 m (Quaresma, 2002; Jofré, 2003). Para a execução destas "juntas", devem utilizar-se equipamentos especialmente desenvolvidos para o efeito que efectuem um sulco rectilíneo, pelo menos até uma profundidade de dois terços da espessura da camada reciclada, e que ao mesmo tempo, introduzam nesse sulco, uma emulsão betuminosa de rotura rápida ou outro produto adequado para impedir o fecho da junta.

A compactação da camada deve ser efectuada imediatamente após a aplicação da mistura reciclada com cimento e da execução das juntas transversais a fresco, minimizando as perdas de humidade e permitindo a sua conclusão dentro do prazo de trabalhabilidade da mistura.

Uma vez terminada a compactação, e com o menor desfasamento possível, deve-se proceder à cura da camada com vista a proteger-se a mistura das intempéries, da evaporação da água e do tráfego. Normalmente, recorre-se para tal, a uma rega com emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida, seguindo-se, no caso de o tráfego vir a circular sobre a mesma, o espalhamento de gravilha limpa e seca. A abertura ao tráfego da superfície reciclada só deve ser permitida após a emulsão ter rompido, e tomando sempre as devidas precauções para que a velocidade seja moderada, com o fim de evitar desprendimentos superficiais ou degradações de outro tipo.

A indústria cimenteira disponibiliza actualmente, diversos tipos de cimento (por exemplo, incorporando cinzas volantes ou escórias de alto-forno), que podem ser aplicados com vantagem na reciclagem de pavimentos rodoviários. Segundo Nunes & Santos (2003), procura-se que os referidos cimentos, para além de cumprirem os requisitos gerais impostos pela actual norma de cimentos (NP EN 197-1), satisfaçam uma série de critérios relacionados com a sua aplicação no fabrico de misturas recicladas, nomeadamente:

- Início de presa compatível com as necessidades de aplicação;
- Boa resistência química, para garantir a durabilidade perante uma reactividade potencial dos materiais a reciclar;
- Calor de hidratação baixo, de modo a minimizar a retracção de origem térmica;
- Baixa expansibilidade;

- Garantia de estabilização dos materiais, aprisionando quimicamente os contaminantes, obviando-se assim a lixiviação destes para o solo.
- Resistência mecânica média-baixa, de forma a conduzir a módulos de elasticidade compatíveis com o controlo da fissuração, permitindo uma dosagem adequada para uma mistura homogénea

  Em geral, é preferível utilizarem-se quantidades superiores de cimento de classe inferior, pois conseguem-se maiores prazos de trabalhabilidade, diminui-se a libertação de calor de hidratação e limitam-se os efeitos da fissuração por retracção. De salientar que a determinação do prazo de trabalhabilidade da mistura reciclada em função das condições climatéricas, se reveste de especial importância uma vez que condiciona não só o tempo disponível para a compactação da camada, como também o tempo de desfasamento entre a reciclagem de faixas adjacentes de pavimento.

  Por outro lado, a utilização de cimentos de classe de resistência elevada, pode conduzir a quantidades excessivamente baixas de ligante (da ordem de 2 a 2,5% em peso sobre os materiais secos), e não obstante ser obtida a resistência pretendida, é mais difícil garantir a homogeneização durante a aplicação (Jofré *et al.*, 1999);

Após seleccionado o tipo de cimento a aplicar, a quantidade óptima de cimento, deve ser a estritamente necessária de forma a atingir as resistências exigidas, não só por questões de economia de custos, mas também por forma a obter-se um padrão de fissuração o mais fino possível.

Actualmente, a reciclagem de pavimentos *in situ* com cimento é já uma técnica bastante utilizada em países como a Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América, França e Espanha. As aplicações desta técnica não se limitam a pavimentos de estradas, tendo, por exemplo, já sido utilizada em pavimentos aeroportuários (Jofré, 2001).

Trata-se pois, de materiais já relativamente bem estudados, existindo, em diversos países, manuais sobre técnicas de reciclagem com cimento, onde são indicados os processos a seguir para o estudo de formulação, parâmetros para o dimensionamento dos pavimentos reciclados, aspectos construtivos e procedimentos de controlo de qualidade.

Em Portugal, a reciclagem de pavimentos com cimento é muito recente. Exemplos de obras no nosso país em que esta técnica de reabilitação do pavimento foi adoptada, são as seguintes:

- Obra de reabilitação da EN 383 entre Canhestros e Aljustrel, num lanço com cerca de 21 km de extensão, realizada durante o ano de 2002 (Simões & Paul, 2002)

  Nesta obra procedeu-se à reciclagem/estabilização do pavimento existente com cimento,

numa profundidade de cerca de 20 cm, envolvendo sobretudo materiais granulares. Sobre a camada reciclada optou-se por executar uma camada em mistura betuminosa com betume modificado com polímeros, com uma espessura média de 3 cm. No entanto, veio a verificar-se que esta espessura não seria suficiente para corrigir a irregularidade da camada reciclada, no nivelamento da qual, efectuado através dos meios tradicionais (motoniveladora), se havia deparado com dificuldades acrescidas.

- Obra de reabilitação do IP 4 entre Sta. Comba de Rossas e Bragança, durante 2001/02, numa extensão de aproximadamente 10 km (Miranda *et al.*, 2003; Freire & Antunes, 2004)

  Nesta obra procedeu-se à reciclagem do pavimento existente com cimento, numa profundidade de cerca de 30 cm, envolvendo sobretudo materiais betuminosos. Por forma a diminuir o tempo de abertura ao tráfego, optou-se, nesta obra, por executar a camada sobrejacente (camada de regularização em mistura com betume modificado com borracha) à camada reciclada no mesmo dia, por forma a proteger a camada reciclada, e efectuar a abertura ao tráfego imediatamente após a sua conclusão.

No que respeita à formulação de misturas recicladas com cimento, o objectivo a atingir é determinar a quantidade de cimento (e água) a adicionar ao material fresado, eventualmente corrigido com a adição de mais material, por forma a que a mistura apresente durante o fabrico e aplicação, bem como ao longo da sua vida útil, as características pretendidas.

De referir que é usual fixar-se, por razões construtivas, um teor mínimo em cimento de 3% em massa relativamente ao material a reciclar seco. Segundo Dudgeon *et al.* (2001) este valor mínimo é estabelecido por forma a garantir-se que, durante o relativamente curto intervalo de tempo em que decorre a mistura dos diversos materiais *in situ*, se consiga uma adequada distribuição do cimento na mistura reciclada.

O estudo da formulação consiste na avaliação das propriedades da mistura (resistência mecânica, prazo de trabalhabilidade, fendilhamento por retracção, etc.) em função do teor em cimento, da quantidade de água e da compacidade.

Em diversos países, o critério final para a aceitação da composição a adoptar baseia-se na determinação da resistência, por exemplo à compressão simples, em provetes preparados em laboratório segundo determinadas condições, devendo o valor obtido ser superior a um mínimo estabelecido em função do tipo de camada pretendida.

Em Espanha, o Caderno de Encargos Tipo da Administração Rodoviária (PG-4, 2001 - Art.21), estabelece um conjunto de procedimentos para a formulação deste tipo de misturas recicladas, cujos principais passos a seguir, se resumem na Fig. 2.38.

Refira-se ainda que, em Espanha, se estabelece para os casos correntes, que a resistência mínima à compressão simples aos 7 dias de provetes compactados segundo a NLT-310[3], seja de 2,5 MPa. Segundo Jofré (2003), a quantidade de cimento necessária para a obtenção desta resistência oscila, em geral, entre 3 e 6% em massa dos materiais secos.

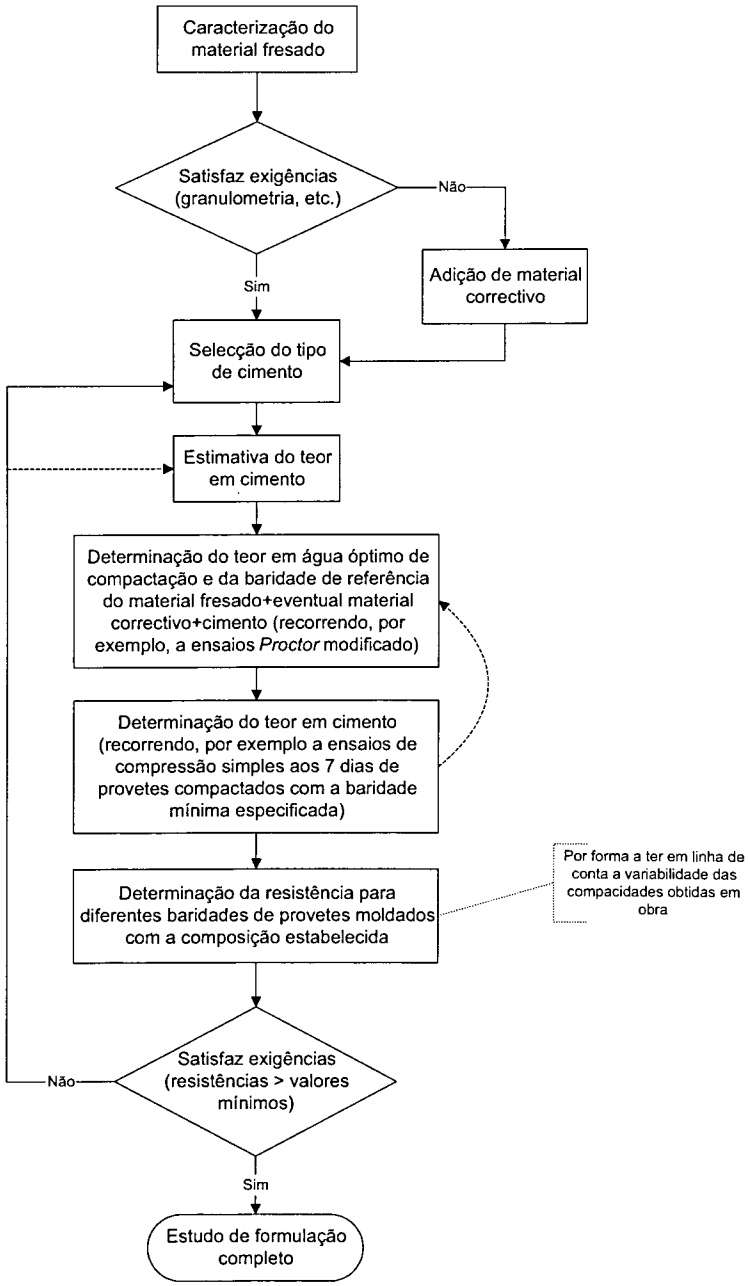


Fig. 2.38 – Organigrama para a formulação de misturas recicladas com cimento

[3] Compactação com martelo vibrador de materiais granulares tratados, em moldes cilíndricos de 152 mm de diâmetro interior e 178 mm de altura, para provetes com valores mínimos de baridade entre 97 e 100% do Proctor modificado.

Como consequência da grande heterogeneidade dos materiais a reciclar que se podem encontrar em distintas obras, e muitas vezes até na própria obra, as características das misturas recicladas com cimento, encontram-se num intervalo muito amplo, em particular, no que concerne às suas resistências mecânicas e módulos de deformabilidade (Jofré, 2003). Na Fig. 2.39 representam-se os resultados que a este respeito se obtiveram numa série de obras levadas a cabo em França, com idades compreendidas entre um e dois anos, e com teores em cimento compreendidos entre 4,5 e 6% em massa de materiais secos.

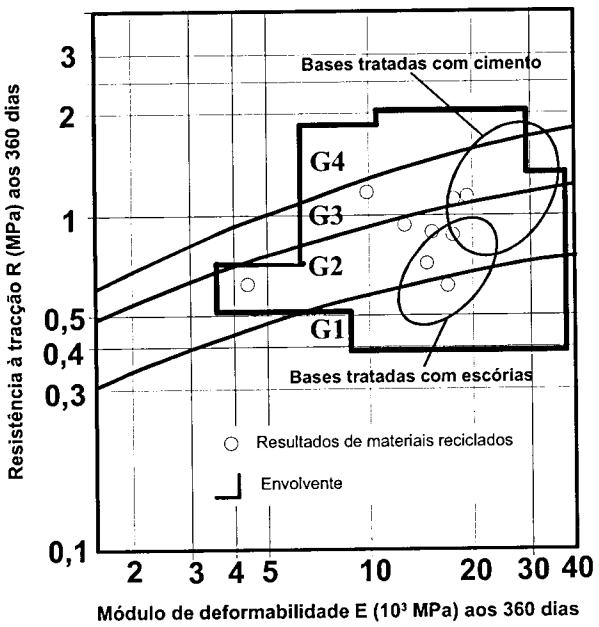


Fig. 2.39 – Resistências e módulos de deformabilidade de misturas recicladas com cimento obtidos em diversas obras realizadas em França

Jofré (*op. cit.*) representou na mesma figura, os domínios em que se situam, geralmente, quer as bases tratadas com cimento (gravacemento), quer as bases tratadas com escórias (gravaescorias), tendo deduzido que dentro dos materiais reciclados com cimento se podem encontrar desde misturas cuja deformabilidade e resistência são similares às de uma base tratada com cimento, até outras, em que os referidos parâmetros são mais semelhantes aos de um solo-cimento.

A elevada dispersão encontrada na resistência mecânica e deformabilidade do material reciclado deve-se a diversos factores, entre os quais se destacam os seguintes:

- Materiais a reciclar
  - Natureza e qualidade dos materiais - quanto melhor for a qualidade dos

agregados, melhor será naturalmente, o comportamento mecânico da mistura reciclada;

- Contaminação com argilas - a presença de argilas conduz a piores resultados, ou em alternativa, à necessidade de adição de cal ou maiores quantidades de cimento;
- Proporção de misturas betuminosas no material fresado - segundo Jofré (*op. cit.*) a presença de 30% de misturas betuminosa no material a reciclar, pode conduzir a uma redução da ordem de 50% quer da resistência, quer do módulo de deformabilidade da mistura reciclada, em relação ao mesmo tipo de material sem betume;

- Percentagem de cimento
  - A resistência mecânica aumenta de forma notável com o aumento da percentagem de cimento;
- Processo de reciclagem
  - O processo de adição do cimento influencia de forma sensível a qualidade da mistura, nomeadamente, quanto à homogeneidade obtida;
  - O equipamento de reciclagem (fresadora/misturadora) utilizado, bem como, a respectiva velocidade de avanço, é outro factor que afecta a qualidade da mistura;
- Compacidade da camada reciclada – a resistência mecânica é directamente proporcional à baridade obtida após compactação;
- Teor em água da mistura – variações do teor em água dos materiais a reciclar, e consequentemente da mistura reciclada, conduzem a variações da qualidade da mistura, influenciando também directamente a compactação da camada;
- Idade da camada – nas misturas com cimento, à medida que o processo de cura vai avançando, a mistura vai ganhando resistência mecânica.

Apesar de todas as variáveis expostas, as misturas recicladas com cimento caracterizam-se por apresentarem uma elevada rigidez, muito superior à original dos materiais provenientes do pavimento existente. Como consequência, o pavimento, após a reciclagem das camadas existentes, apresenta uma diminuição significativa das deflexões medidas, bem como, das tensões transmitidas ao solo de fundação.

A técnica da reciclagem *in situ* com cimento é pois um dos métodos a ter em consideração quando o pavimento a reabilitar está muito degrado, com deflexões elevadas.

Para o dimensionamento de pavimentos reciclados com cimento, propôs-se em França, que se tomassem, em função quer da qualidade dos agregados a reciclar, quer dos equipamentos utilizados, valores do módulo de deformabilidade aos 360 dias compreendidos entre 11 000 e 20 000 MPa, sendo o valor máximo estabelecido para o caso de se reciclarem agregados de boa qualidade e granulometria homogénea, utilizando equipamentos para a alimentação do cimento e para a reciclagem dos materiais, de gama alta (Jofré, *op. cit.*).

Noutros países utilizam-se, em geral, valores de módulo de deformabilidade inferiores, se bem que definidos para idades mais jovens. Por exemplo, em Espanha, no manual de pavimentos reciclados *in situ* com cimento (Jofré *et al.*, 1999) indicam-se módulos de deformabilidade aos 90 dias de 6 000 MPa e 10 000 MPa. Estes valores aplicam-se a misturas recicladas com resistência mínima à compressão simples aos 7 dias e percentagem mínima de cimento, respectivamente, de 2,5 MPa e 3%, e 3,5 MPa e 3,5%.

No que concerne ao comportamento à fadiga por tracção destes materiais, é usual recorrer-se, no dimensionamento das camadas recicladas com cimento, a leis de fadiga semelhantes às que são utilizadas para o solo-cimento ou para bases tratadas com cimento. Para estes materiais, as leis de fadiga são geralmente do tipo semi-logarítmico (Quaresma, 1992; Jofré, 2001), podendo ser representadas por:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_r} = a + b.\log N \quad \text{, onde}$$

σ_r é a tensão de rotura por tracção em flexão, em ensaio de carregamento único;

N é o número de aplicações da tensão σ_N até à rotura; e

a, b são constantes

No cálculo da capacidade de carga dos pavimentos utilizando a metodologia da análise estrutural, considera-se por vezes o efeito das juntas de retracção na camada reciclada, mediante a aplicação de um coeficiente de majoração da ordem de 1,25 às tensões obtidas na análise de sistemas constituídos por camadas homogéneas e infinitas na direcção horizontal.

2.3.3.5 - Outras técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis

Seguidamente referem-se brevemente outras técnicas de reciclagem, que apresentam algumas modificações às técnicas já apresentadas. Estas diferenças resultam ou do local onde decorrem os trabalhos de reciclagem, ou do tipo de ligante utilizado.

Reciclagem semi-quente em central (com emulsão betuminosa modificada)

A reciclagem semi-quente consiste na reciclagem do material fresado proveniente das camadas betuminosas dos pavimentos antigos, através do seu aquecimento a temperaturas da ordem dos 90°C, e na adição de uma emulsão betuminosa adequada. No fabrico destas misturas emprega-se uma emulsão de betume modificado, com cerca de 62% de ligante residual, que segundo estudos da Cepsa (Vieira, 2003), é capaz de envolver o material fresado sem escorrimentos, e sem se deteriorar pelo facto de a temperatura ser elevada e, ao mesmo tempo, proporcionar à mistura uma elevada coesão inicial, uma adesividade activa e passiva elevadas, bem como uma trabalhabilidade suficiente para a sua aplicação com espalhadoras convencionais.

A mistura reciclada pode ser armazenada durante 24 h, desde que o espalhamento e compactação sejam efectuados a uma temperatura mínima de 60°C.

O fabrico das misturas recicladas "semi-quentes" com emulsão betuminosa modificada pode ser efectuado em centrais do mesmo tipo que as utilizadas no fabrico das misturas convencionais a quente. No caso das centrais contínuas, o aquecimento dos materiais fresados e a mistura dos diversos componentes é efectuada no tambor secador-misturador (*vd* Fig. 2.5). No caso das centrais descontínuas, o aquecimento dos materiais fresados é efectuado no tambor secador, seguindo-se a mistura dos diversos componentes no misturador da central (*vd* Fig. 2.6). Em ambos os tipos de central é permitida a reciclagem de 100% do material fresado.

Este tipo de mistura reciclada, ao ser fabricada a uma temperatura acima da temperatura ambiente, permite que a abertura ao tráfego seja imediata e que o tempo de cura seja muito reduzido quando comparado com o de uma mistura fabricada a frio (temperatura ambiente) com uma emulsão betuminosa convencional (não modificada).

Segundo estudos da Cepsa (Vieira, 2003), em que se procedeu a ensaios de "imersão--compressão" sobre provetes moldados em laboratório com misturas recicladas de diferentes tipos, conclui-se que as misturas recicladas "semi-quentes", comparativamente com as misturas recicladas a frio convencionais, apresentavam as seguintes melhorias:

- Duplicação das resistências à compressão simples, a seco e após imersão dos provetes;
- Aumento da resistência conservada em cerca de 10%;
- Aumento das baridades secas das misturas compactadas, com uma redução em cerca de 3% da percentagem de vazios.

Segundo os mesmos estudos, conclui-se ainda que o módulo dinâmico das misturas "semi--quentes" é maior que o das misturas a frio fabricadas com emulsão betuminosa.

Reciclagem a quente *in situ*

Na reciclagem a quente *in situ*, o ligante utilizado é betume, sendo a mistura fabricada a altas temperaturas. Os equipamentos de reciclagem são mais complexos do que nos demais processos de reciclagem *in situ* devendo nomeadamente, ser munidos de unidades de aquecimento dos diversos materiais. O processo de reciclagem a quente *in situ* inicia-se pelo aquecimento do pavimento existente, de forma a facilitar a sua posterior escarificação ou fresagem. Uma vez completada esta operação, o material resultante é misturado podendo, eventualmente, incorporar outros materiais, nomeadamente, agregados virgens, betume ou aditivos. Em seguida, o material resultante é colocado e compactado segundo as técnicas tradicionais para camadas em misturas betuminosas a quente. A quantidade total de materiais novos eventualmente adicionados ao material reciclado está limitada, por restrições dos equipamentos, a 30% em massa desse material (ARRA, 2001).

Na Fig. 2.40 representa-se o esquema de funcionamento de uma central móvel para fabrico de misturas betuminosas recicladas a quente *in situ*.

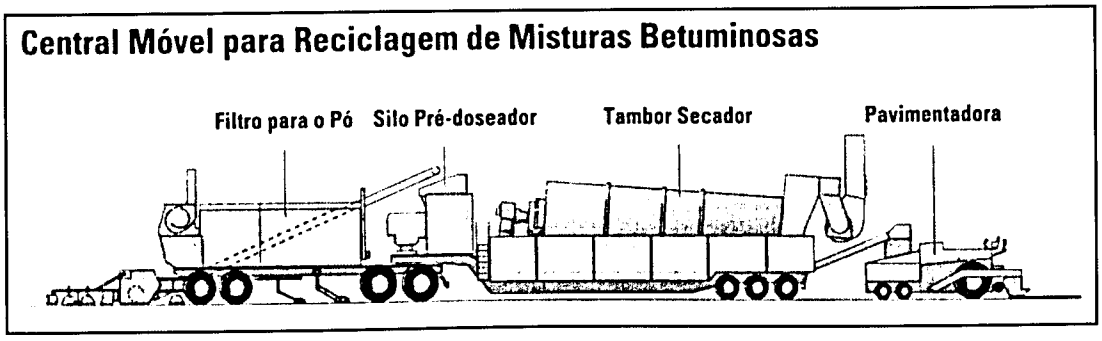


Fig. 2.40 – Reciclagem a quente *in situ* de pavimentos flexíveis (EAPA, 1998)

Devido, por um lado, à dimensão e complexidade dos equipamentos utilizados para a reciclagem a quente *in situ*, e por outro, ao facto de durante o fabrico da mistura serem emitidas substâncias para a atmosfera (resultantes do aquecimento dos materiais), este tipo de solução pode conduzir a impactos sociais e ambientais consideráveis, para além de constituir um investimento financeiro importante.

Em Portugal, tem-se apenas conhecimento de uma experiência realizada durante os anos 80, na Base Aérea de Sintra, na que se aplicou este tipo de solução.

Na vizinha Espanha, a reciclagem *in situ* a quente foi a primeira a ser aplicada. As primeiras experiências realizadas em pavimentos betuminosos deformados, tiveram também lugar nos anos 80. No entanto, os resultados então obtidos foram pouco satisfatórios, pelo que a técnica foi abandonada até 1995, altura em que se voltou a utilizar na reabilitação de uma auto-estrada (Jofré *et al.*, 1999).

2.3.3.6 - Apreciação sucinta das técnicas de reciclagem *in situ* a frio

Na presente secção apresenta-se uma análise comparativa de alguns dos aspectos mais relevantes nas diversas técnicas de reciclagem *in situ* a frio. As vantagens da reciclagem como processo racional de aproveitamento de materiais, permitindo a melhoria da homogeneidade e regularidade do trecho minimizando a subida de rasante e o depósito de materiais em vazadouro, entre outros, foram já abordadas no início da subsecção 2.3.3, bem como na subsecção 2.3.3.2.

A reciclagem a frio com ligantes betuminosos, tanto com emulsão betuminosa (subsecção 2.3.3.2) como com espuma de betume (subsecção 2.3.3.3) conduzem a pavimentos flexíveis que, para além de mais confortáveis (Antunes *et al.*, 1999b, 1999c), possuem melhores características no que respeita à formação de fendas. No caso das espumas de betume, para além disso, as partículas ficam mais eficientemente envolvidas e o pavimento resulta mais resistente (Wirtgen, 2001c). No entanto, as emulsões betuminosas não são tão sensíveis a variações do material a reciclar, como o são as espumas de betume (Collings, 2001).

Na reciclagem com cimento, a ocorrência de fissuração por retracção é inevitável e a sua minimização/controlo requer disposições construtivas específicas. Apesar deste facto e, pela natureza do material, a reciclagem com cimento produz significativos acréscimos de resistência das camadas obtidas quando em comparação com as camadas antes da reciclagem.

Para além das técnicas já descritas existe a possibilidade de utilizar como ligante, emulsões betuminosas ou espumas de betume em combinação com cimento. Estas associações encontram-se implícitas nas descrições apresentadas já que, por vezes, há vantagem em fazer as combinações referidas.

Nas técnicas de reciclagem a frio que utilizam como ligante a combinação entre betume (emulsão ou espuma) e cimento, conseguem-se valores de estabilidade elevados e controla-se a tendência que as camadas ligadas por materiais puramente hidráulicos têm para a formação de fissuras. Geralmente, este resultado só é satisfatoriamente atingido se o teor em cimento não exceder, ou se apenas exceder ligeiramente, o teor em betume (Neussner, 2001).

Em todos os processos de reciclagem em análise, a utilização dos materiais do pavimento existente pressupõe a sua adequada caracterização quer no que respeita à composição das camadas a reciclar, quer no que respeita ao estado hídrico do pavimento e respectiva fundação. Em qualquer um dos processos pode ser necessário proceder a correcções da granulometria ou ter em consideração o teor em água *in situ* durante o fabrico da mistura. No caso das espumas de betume, os materiais saturados (com teores naturais em água muito elevados) ou materiais com deficiência de finos não podem ser reciclados com esta técnica (Wirtgen, 2001c).

No que concerne aos custos associados a cada tipo de reciclagem, há que ter em atenção vertentes como os custos do ligante propriamente dito e os custos relacionados com a sua disponibilidade no mercado, bem como os custos do equipamento necessário para a produção do ligante (no caso das espumas de betume) ou do equipamento específico para o tipo de reciclagem em causa.

Atendendo apenas ao ligante utilizado, os custos associados à reciclagem com cimento são, em geral, inferiores aos que envolvem emulsão ou espumas de betume. Acresce a este facto, a circunstância de ser mais fácil obter a matéria prima (cimento) no caso da reciclagem com cimento do que na reciclagem com emulsão ou espuma de betume. Na reciclagem com espuma de betume os custos são, em geral, inferiores aos associados às emulsões dado que estas requerem agentes emulsionantes, em geral, caros, e técnicas de controlo de qualidade mais exigentes. No entanto, o processo de produção da espuma é, quando comparado com as emulsões ou com a reciclagem com cimento, relativamente dispendioso já que para produzir a espuma o betume tem de ser aquecido a temperaturas da ordem dos 170°C o que para além do gasto energético implica instalações adequadas. Por outro lado, o facto de a espuma ser produzida em obra induz um factor adicional de eventuais variabilidades nas misturas produzidas.

No que respeita aos processos de aplicação, a comparação depende bastante dos equipamentos disponíveis. No entanto, das técnicas em análise, as que envolvem emulsão ou espuma requerem sempre que, à recicladora, esteja acoplado um tanque para fornecimento e injecção do ligante na mistura. No caso da reciclagem com cimento, na pior das hipóteses, na ausência de equipamento específico, o espalhamento pode ser feito "à mão". No entanto, esta forma de espalhamento só é em geral permitida, em obras de reduzida dimensão e de pouco tráfego, atendendo não só às tolerâncias de fabrico a observar (menos exigentes), mas também ao custo de mão de obra, e aos problemas ambientais que daí podem resultar, sobretudo em dias de vento.

No que concerne à colocação da via em serviço, as técnicas de reciclagem com cimento ou com emulsão betuminosa apresentam algumas restrições a uma imediata abertura ao tráfego. No caso das espumas de betume o processo de ganho de resistência é muito rápido pelo que a via reciclada pode entrar em funcionamento imediatamente após a colocação da camada.

Em resumo, a análise comparativa dos processos mais usuais de reciclagem a frio para aplicação em cada caso, deve ser efectuada tendo em consideração as diversas condicionantes e pesando as vantagens e desvantagens aplicáveis. Factores como a disponibilidade das matérias primas ou de equipamentos podem ser decisivos nos processos a adoptar.

3 - MISTURAS BETUMINOSAS DENSAS A FRIO

3.1 - Introdução

As misturas betuminosas conhecidas como "misturas a frio" ou antes "misturas com emulsão betuminosa" são utilizadas há já algumas décadas. As primeiras aplicações de misturas betuminosas a frio na pavimentação de estradas foram realizadas, a título experimental, no início do século passado. No entanto, até finais da década de oitenta, a utilização de misturas a frio restringia-se quase exclusivamente a trabalhos de conservação e de reperfilamento, apenas com raras incursões noutros campos de utilização, como a sua utilização para o fabrico de misturas betuminosas a aplicar na reabilitação estrutural ou em construções novas de pavimentos. Por diversas razões, nomeadamente, por ser rentável para a indústria e também por ser ambientalmente aliciante, o interesse neste tipo de materiais aumentou desde então.

Embora nalguns países da Europa se tenha verificado, no final da década de noventa, uma redução na produção de emulsões betuminosas para pavimentação, tal facto fica a dever-se a problemas económicos derivados da conjuntura mundial. No entanto, em diversos países, onde se verifica um grande esforço na reabilitação das infra-estruturas rodoviárias, tem havido um aumento muito significativo na produção/consumo destes materiais. Destacam-se, na Europa, Portugal e a Turquia, no Continente Americano, o Brasil e o México, e mesmo na Ásia, nomeadamente na Tailândia, se verifica a mesma tendência (Le Coroller, 1999).

Os principais produtores mundiais de emulsões betuminosas são, por ordem decrescente, os Estados Unidos da América, a França, o México, o Brasil, a Espanha, o Japão e o Reino Unido (Le Coroller, *op. cit*).

Para esta revitalização, tem sido essencial o resultado dos avanços nas propriedades das emulsões betuminosas e das suas técnicas de produção. O objectivo dos produtores é, obviamente, a extensão do campo de utilização deste tipo de misturas, o que significa que estas devem ser capazes de suportar acções mais severas. Tal tem sido atingido através do desenvolvimento de novas formulações e de novos processos de fabrico e aplicação em obra.

Uma das aplicações mais interessantes das misturas a frio é a reciclagem de pavimentos *in situ*. Um primeiro antecedente do emprego das técnicas de reciclagem deu-se depois da Segunda Guerra Mundial quando, para reparar estradas secundárias afectadas pela Guerra, se colocou em prática, no Reino Unido, um procedimento designado por "*Retread Process*" ou processo de "recauchutagem". Segundo este processo escarificava-se o pavimento, se necessário adicionava-se uma pequena quantidade de material correctivo (agregados) e misturavam-se *in situ* estes materiais com a ajuda de uma motoniveladora ou grade de discos. Seguidamente regava-se com uma emulsão betuminosa com baixa percentagem de betume, e imediatamente se procedia a uma nova mistura dos materiais com uma grade de discos. No primeiro dia apenas se compactava muito ligeiramente o material, uma vez que este continha uma grande quantidade de água, terminando-se a compactação no dia seguinte. Tratava-se de um procedimento de reciclagem a frio muito simples mas que, se executado correctamente, proporcionava resultados aceitáveis (Jofré, 2001).

Os principais factores que têm contribuído para o desenvolvimento das técnicas de reciclagem (Jofré, *op. cit.*) são os seguintes:

- Um melhor conhecimento das características mecânicas dos materiais;
- O emprego de novos equipamentos de maior potência, rendimento e capacidade de tratar espessuras mais elevadas, que proporcionam uma melhor qualidade do produto final, o que por outro lado se traduz numa redução dos custos;
- Crescente consciência ambiental, que impulsionou esta técnica pelos benefícios que proporciona ao meio ambiente, em oposição ao esgotamento das pedreiras existentes e à dificuldade de abrir novas explorações.

De facto, em diversos países existe já legislação por forma a incentivar a utilização de materiais alternativos e a reutilização dos materiais residuais, em particular, dos materiais fresados dos pavimentos rodoviários (Van der Zwan, 2003). Esta legislação consiste, geralmente, no estabelecimento de percentagens mínimas de materiais fresados dos pavimentos a incorporar na construção e/ou reabilitação dos mesmos; ou através da implementação de impostos sobre material não reutilizado. Nos Estados Unidos da América existem diversos estados com legislação acerca das percentagens mínimas de materiais a utilizar (ARRA, 2001). Quanto ao segundo tipo de legislação (imposto penalizador da não re-utilização dos materiais), dá-se como exemplo, o caso da Finlândia (ETNRecy, 2000).

Adicionalmente, no caso das misturas a frio, há ainda um menor consumo de energia dado não ser necessário aquecer o ligante e os agregados, que são aplicados à temperatura ambiente. Segundo a ARRA (2001), a reciclagem *in situ* a frio como solução de reabilitação alternativa a uma solução técnica convencional, pode corresponder a uma redução dos custos da ordem de 20 a 40% e a poupanças de energia de 40 a 50%.

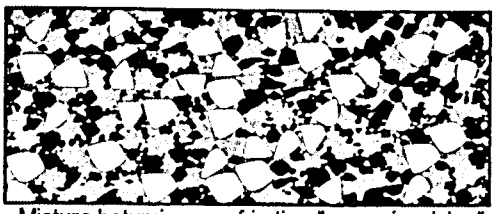
As misturas a frio com emulsão betuminosa apresentam um comportamento específico, que difere, em muitos aspectos, do das misturas a quente. Devido ao facto de muitos desses aspectos não serem ainda devidamente compreendidos/conhecidos, e daí resultarem por vezes alguns problemas, a sua utilização continua a ser limitada.

A garantia de sucesso na utilização das misturas a frio com emulsão betuminosa justifica a necessidade de um conhecimento mais pormenorizado do seu comportamento. Como se verá, os métodos de caracterização e respectivos ensaios desenvolvidos e largamente testados para as misturas betuminosas a quente, não podem ser aplicados directamente às misturas a frio. Neste contexto, tem-se vindo a desenvolver estudos e métodos específicos para a avaliação das misturas a frio. Nos próximos capítulos far-se-á uma descrição sumária destes estudos.

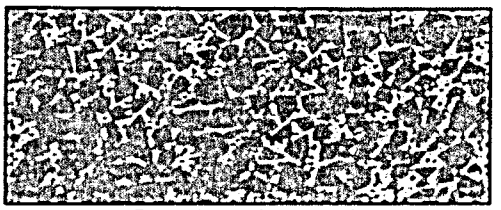
3.2 - Tipos de misturas e suas aplicações

As misturas betuminosas fabricadas a frio com emulsão betuminosa são misturas cujos materiais empregues no seu fabrico são agregados, água e emulsão betuminosa, podendo ser fabricadas, espalhadas e compactadas à temperatura ambiente.

No entanto, consoante a composição específica de cada mistura, como por exemplo, a dimensão e proporção das fracções granulométricas utilizadas, ou o tipo e teor em betume utilizado, assim se podem obter misturas cujas características são distintas entre si. Na Fig. 3.1 ilustram-se esquematicamente a textura de misturas fabricadas a frio com emulsão betuminosa, resultante de diferentes composições da mistura.



Mistura betuminosa a frio tipo "grave-émulsion"
Agregado grosso mais ou menos envolvido, num mastique rico em betume



Betão betuminoso a frio
Agregado de granulometria continua, com todos os elementos envolvidos



Mistura betuminosa aberta a frio
Agregado grosso e médio envolvidos, sem agregados finos

Fig. 3.1 – Textura de diferentes tipos de misturas betuminosas a frio (adaptado de Serfass, 2002)

Nos casos em que as misturas são fabricadas recorrendo a agregados "novos", elegem-se as fracções granulométricas a utilizar consoante o tipo de mistura pretendida. No caso em que se procede à reciclagem do pavimento *in situ*, o campo de acção é mais limitado, na medida em que a granulometria do material fresado é condicionado quer pela granulometria dos agregados da(s) camada(s) a reciclar, quer pelo próprio processo de fresagem, havendo apenas uma pequena margem de intervenção, através, por exemplo, da adição de material correctivo, ou procedendo a ajustes no processo de fresagem (rolo dentado mais ou menos potente, maior ou menor velocidade de avanço da máquina recicladora, etc.).

Do exposto anteriormente, ressalta que existem diversos tipos de misturas betuminosas, adequadas a diferentes aplicações, sendo os aspectos que mais influenciam o seu comportamento os seguintes:

- Tipo de agregado utilizado, em particular, a sua natureza e granulometria;
- Tipo de ligante betuminoso;
- Método de fabrico e aplicação em obra.

Assim, em função do tipo de aplicação a que se destinam as misturas betuminosas, um dos aspectos essenciais a considerar, é a granulometria dos agregados. Podem-se utilizar agregados com maior ou menor dimensão máxima (D) consoante a mistura se destine a camadas com maior ou menor espessura, adoptar-se diferentes tipos de composições granulométricas consoante se pretenda produzir misturas mais ou menos densas, entre outros.

No que concerne ao tipo de misturas betuminosas fabricadas a frio com emulsão betuminosa utilizadas na pavimentação, não existe ainda uma terminologia consensual e bem definida. Mesmo a terminologia que tem sido utilizada nas especificações, é bastante limitada e não reflecte completamente a prática (Serfass, 2002).

Tal como exposto no capítulo anterior, no nosso país, a terminologia adoptada no Caderno de Encargos Tipo da JAE (1998) para os tipos de misturas betuminosas a frio nele considerados é a seguinte:

- "Agregado Britado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão betuminosa" (ABGETE) para camadas com características de base ou de regularização;
- "Misturas Betuminosas Abertas a Frio" para camadas com características de base ou de regularização, e ainda,
- "Semi-penetração Betuminosa" para camadas com características de regularização.

No Quadro 2.6 do capítulo anterior apresentaram-se algumas das especificações preconizadas para estas misturas.

Neste trabalho, apenas são objecto de estudos as misturas betuminosas densas fabricadas a frio com emulsão betuminosa, englobando-se neste caso, entre as acima referidas, as misturas em ABGETE.

Como se sabe, as misturas betuminosas são classificadas em função da sua porosidade (V_v), em misturas "abertas", "semi-densas" e "densas". No entanto, não existe internacionalmente, uma uniformidade relativamente às gamas de porosidade das misturas correspondentes a cada uma das categorias. Existem autores que classificam de forma diferente as misturas fabricadas a quente e a frio, tendo em linha de conta a maior dificuldade em se obterem maiores compacidades (valores mais baixos de porosidade) para as misturas a frio que para as misturas fabricadas a quente. Por outro lado, Santana (1992) refere que as misturas a frio necessitam de um maior volume de vazios de forma a permitir a evaporação da água (parte integrante do processo de cura) após a compactação. Assim, por exemplo, no "*Manual de pré-misturados a frio*" (Santana, *op. cit.*) consideram-se os valores apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (Santana, 1992)

	Misturas betuminosas fabricadas a quente	Misturas betuminosas fabricadas a frio (1)
Misturas densas	$V_v \leq 8\%$	$V_v < 15\%$
Misturas semi-densas	$8 < V_v \leq 12\%$	$15 < V_v \leq 22\%$
Misturas abertas	$V_v > 12\%$	$V_v > 22\%$

(1) Valores obtidos no ensaio *Marshall* para mistura betuminosa a frio com "emulsão asfáltica", realizado segundo a norma brasileira DNER-ME 107-80

Num estudo sobre "Metodologia para formulação de misturas betuminosas fechadas fabricadas a frio" realizado, em finais da década de 80, no LNEC (Azevedo, 1987) referia-se que, em geral, a porosidade das misturas betuminosas para cada uma das classes tomava os valores que se apresentam no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (Azevedo, 1987)

	Misturas betuminosas
Misturas fechadas ou densas	$V_v \leq 6\%$
Misturas semi-fechadas ou semi-densas	$6 < V_v \leq 12\%$
Misturas abertas	$V_v > 12\%$

Em França, a SETRA publicou um manual sobre materiais fabricados a frio com emulsão betuminosa, para aplicação em tratamentos superficiais ou misturas betuminosas para camadas de pavimentos. No Quadro 3.3 resumem-se os valores de porosidade considerados neste documento para as misturas betuminosas fabricadas a frio com emulsão

a aplicar em camadas de pavimentos. No Dicionário Técnico da AIPCR (1990) especificam-se para as misturas betuminosas em geral, as mesmas percentagens de vazios que as indicadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (SETRA; AIPCR, 1990)

	Misturas betuminosas
Misturas densas	$V_v \leq 10\%$
Misturas semi-densas	$10 < V_v \leq 15\%$
Misturas abertas	$V_v > 15\%$

Neste país, têm-se realizado estudos por forma a averiguar as razões pelas quais as camadas em misturas a frio apresentam, em geral, menores compacidades que as camadas em misturas equivalentes fabricadas a quente (Serfass, 2002).

De facto, se se compararem duas misturas betuminosas, uma fabricada a frio, e outra a quente, para aplicação no mesmo tipo de camada (de desgaste ou de base), com a mesma espessura, agregados de granulometria continua semelhantes, com a mesma natureza, observa-se que o grau de compactação no final dos trabalhos de aplicação da mistura em obra, é sistematicamente inferior para o caso das misturas a frio. A diferença é, geralmente, da ordem de 7 a 9% para camadas de desgaste, e de 6 a 8% para camadas de base (Serfass, 2002).

Por outro lado, enquanto nas camadas em misturas a quente se registam apenas pequenos aumentos de baridade devido à acção do tráfego, já nas camadas em misturas a frio se pode dar um aumento relativamente significativo nos primeiros meses, ou anos, após a entrada em serviço, como resultado da cura e consolidação da mistura sob acção do tráfego. O ganho correspondente pode atingir, ou mesmo exceder, cerca de 5% (Serfass, 2002).

Estas diferenças no aumento das compacidades dos dois tipos de misturas compactadas quando em serviço, são parcialmente devidas à reduzida trabalhabilidade das misturas a quente, resultante do facto de que o betume, à temperatura ambiente, praticamente não actuar como lubrificante.

O principal aspecto a que se atribui a maior dificuldade em se obterem compacidades elevadas nas misturas betuminosas a frio tem a ver com a presença da água quando da sua compactação. De facto, se por um lado a água actua como agente lubrificador da mistura facilitando as operações de compactação, ao não ser totalmente eliminada durante es

BIBLIOTECA F.E. PORTO

operações, ocupa na mistura betuminosa um determinado "espaço", cujo volume corresponderá, à medida que a água vai sendo eliminada (principalmente por evaporação) a volume de ar, ou seja, a volume de vazios.

Por forma a compreender melhor todos os fenómenos que poderiam influenciar a compacidade, realizaram-se (Serfass, 2002) vários tipos de misturas betuminosas, compactaram-se, e submeteram as amostras a uma análise da imagem microscópica. Como exemplo, referem-se as seguintes misturas, uma fabricada a quente e outra a frio, fabricadas com um mesmo lote de agregados de natureza diorítica, com granulometria de dimensão nominal 0/10 mm, e compactadas até apresentarem cerca de 15% de vazios:

- Mistura a quente fabricada com 5% de teor em betume de penetração nominal 70/100 ($x10^{-1}$mm);
- Mistura a frio fabricada com 7,7% de teor em emulsão com 65% de betume base de penetração nominal 70/100 ($x10^{-1}$mm), o que corresponde a 5% de teor em betume residual.

Nas Figuras 3.2 e 3.3 apresentam-se respectivamente, histogramas onde se representa a distribuição de vazios em termos de tamanho (área), obtidas para o caso da mistura a quente e da mistura a frio.

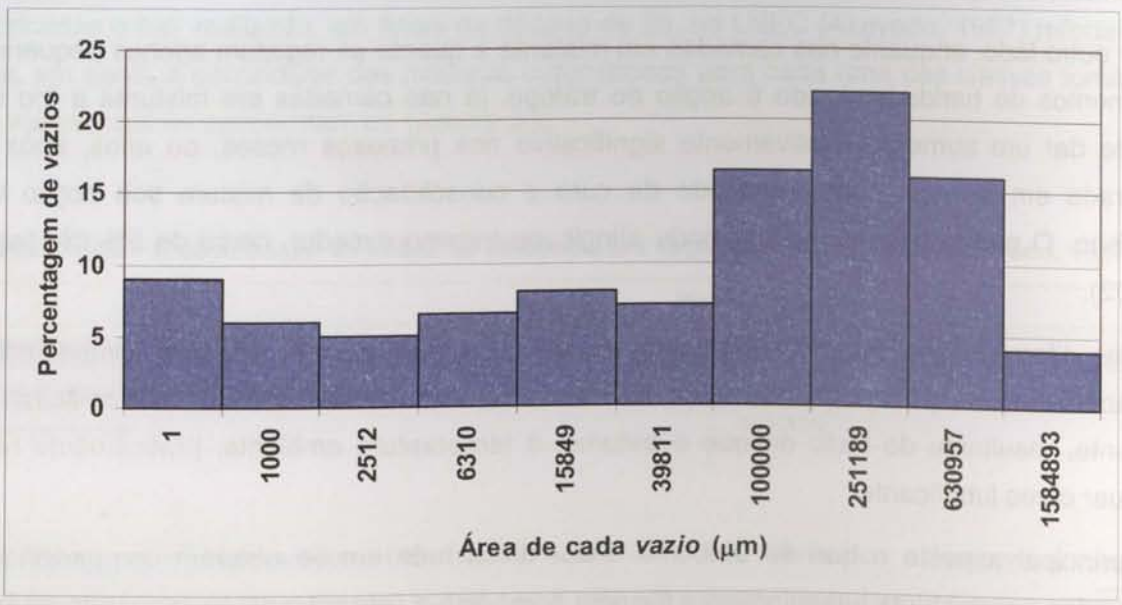


Fig. 3.2 – Histograma da distribuição de vazios numa mistura a quente (Serfass, 2002)

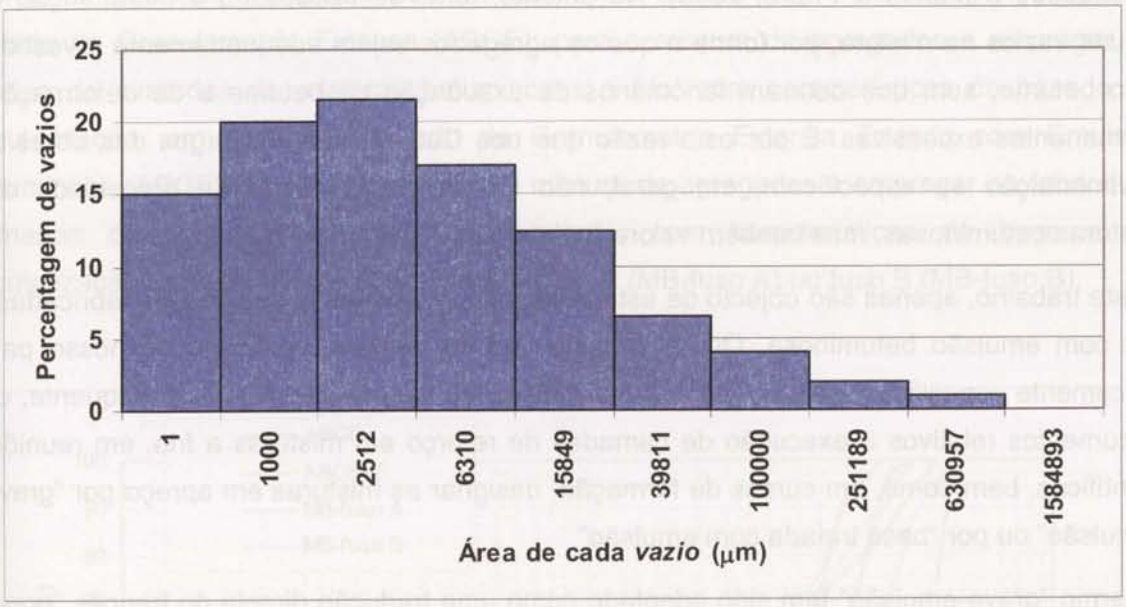


Fig. 3.3 – Histograma da distribuição de vazios numa mistura a frio (Serfass, 2002)

Da observação de ambos os histogramas, verifica-se que para uma dada percentagem de vazios, estes apresentam tamanho mais reduzido para o caso da mistura a frio, encontrando-se consequentemente, em maior número. Na analise de duas áreas iguais de ambas as misturas, mediram-se 7 200 vazios na mistura a frio e 332 na mistura a quente. Os autores deste estudo atribuem a existência de numerosos vazios de pequenas dimensões na mistura a frio, ao modo de como a película contínua de ligante é formada (por coalescência), bem como ao facto da viscosidade do betume ser maior à temperatura ambiente.

Estes resultados permitem que se compreenda melhor a razão pela qual as baridades iniciais das misturas a frio com emulsões betuminosas sejam necessariamente menores que as obtidas para as misturas a quente equivalentes. Nas misturas a frio, os vazios de reduzidas dimensões encontram-se no interior do mastique betuminoso, pelo que os equipamentos de compactação utilizados em obra, não conseguem eliminá-los. O aumento da compacidade destas camadas, apenas se consegue gradualmente, quando em serviço, à medida que a cura da mistura vai ocorrendo, bem como devido à consolidação resultante da acção do tráfego.

As misturas betuminosas que apresentam melhores características mecânicas são, teoricamente, aquelas cuja composição granulométrica conduz a misturas de maiores densidades (Antunes & Freire, 2003). No entanto, torna-se necessária a manutenção de alguns vazios na mistura, por forma a que os agregados sejam adequadamente revestidos pelo betume, sem que ocorram fenómenos de exsudação de betume e de deformações permanentes excessivas. É por esta razão que nos Cadernos de Encargos das obras de pavimentação se especificam, em geral, não só valores mínimos de porosidade das misturas betuminosas, mas também valores máximos.

Neste trabalho, apenas são objecto de estudo as misturas betuminosas densas fabricadas a frio com emulsão betuminosa. Quanto a este tipo de misturas, existem, no nosso país, unicamente especificações para misturas em ABGETE. No entanto, tem sido frequente, em documentos relativos à execução de camadas de reforço em misturas a frio, em reuniões científicas, bem como, em cursos de formação, designar as misturas em apreço por "grave--emulsão" ou por "base tratada com emulsão".

O termo "grave-emulsão" tem sido adoptado como uma tradução directa do francês "*grave--émulsion*" (GE_F), país europeu que muito tem impulsionado a aplicação deste tipo de misturas betuminosas, bem como por associação ao país vizinho, que adoptou também nas suas especificações a designação de "*grava-emulsión*" (GE_E). No entanto, a utilização desta designação em português não é consensual. Os agregados designados em francês por "*Graves*", correspondem, segundo a norma francesa XP 18 – 540 (1997), a agregados de granulometria 0/D onde D pode estar compreendido entre 6,30 mm e 80,00 mm, sendo distinguidas três categorias conforme as características dos agregados. Havendo em português o termo "macadame betuminoso" (*vd* Quadro 2.1), que corresponde a misturas betuminosas para camadas com características de base ou regularização, fabricadas com agregados de granulometria 0/D onde D pode tomar o valor de 20 ou 40 mm, considera-se desnecessária a utilização do referido galicismo, parecendo mais razoável, que se utilize o termo de "macadame betuminoso a frio". Este termo corresponderá, à semelhança dos macadames tradicionais fabricados a quente, a misturas betuminosas fabricadas a frio, a aplicar quer em camadas com características de base, quer em camadas com características de regularização.

Quanto ao termo "base tratada com emulsão", parece poder ser aplicável quando a mistura a frio se destina à realização de camadas com características de base, tornando-se no entanto desadequado, para designar misturas a empregar em camadas de regularização.

Na Fig. 3.4 representam-se graficamente os fusos granulométricos especificados no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) para a mistura de agregados a empregar no fabrico de camadas granulares, com características de sub-base e de base, em Agregado Britado de Granulometria Extensa (ABGE); para a mistura de agregados a empregar no fabrico de camadas de misturas betuminosas a frio, com características de base e de regularização, em Agregado Britado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão betuminosa (ABGETE); bem como, para a mistura de agregados a empregar no fabrico de camadas de misturas betuminosas a quente, com características de base e de regularização, em macadame betuminoso – fuso A (MB-fuso A) ou fuso B (MB-fuso B).

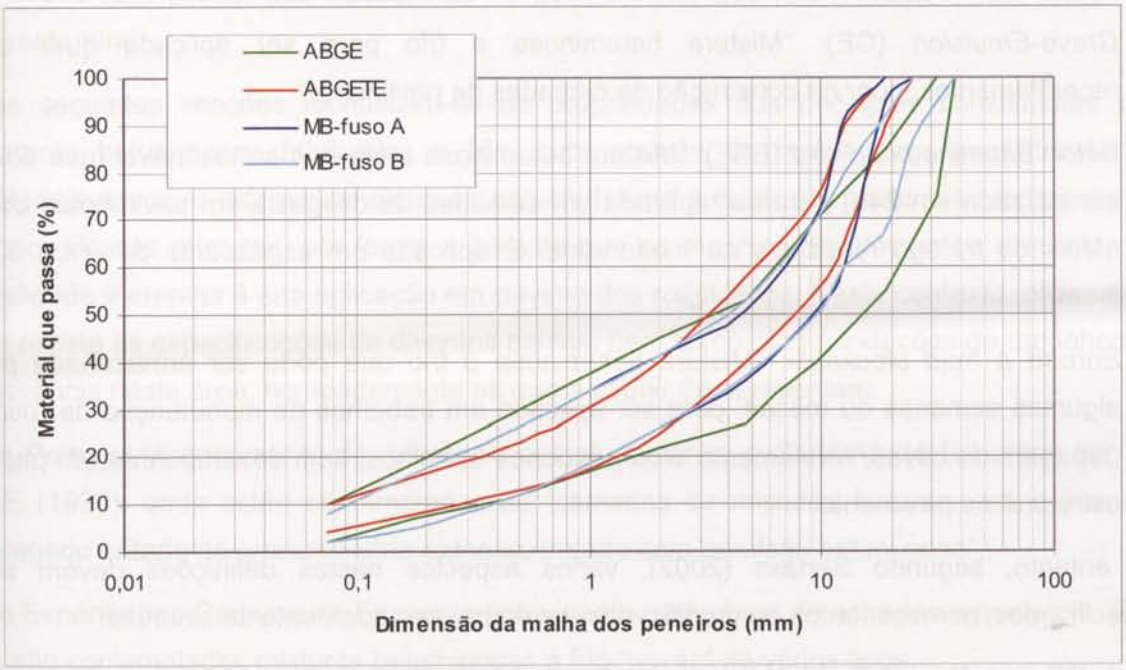


Fig. 3.4 – Estudo comparativo entre os fusos granulométricos das misturas de agregados a empregar no fabrico de camadas em ABGE, ABGETE e de MB

Por outro lado, na última década, têm sido desenvolvidas misturas a frio para camadas de desgaste, denominadas em francês por "*bétons bitumineux à froid*", que se traduzem em português por "betão betuminoso a frio". Como se sabe, o termo "betão betuminoso" é, em português, utilizado para designar misturas betuminosas do tipo das aplicadas em camadas de desgaste (*vd* Quadro 2.1), pelo que, no caso de se tratar deste tipo de misturas fabricadas a frio, parece correcta a utilização do referido termo ("betão betuminoso a frio") para as designar. Este tipo de misturas ainda não está contemplado no Caderno de Encargos tipo da JAE.

Nos últimos anos têm-se vindo a verificar importantes desenvolvimentos, existindo já um vasto leque de misturas betuminosas fabricadas a frio consoante o tipo de aplicação.

Conforme mencionado anteriormente, em França, existe actualmente uma vasta experiência na aplicação de misturas betuminosas a frio. As definições existentes neste país, são de acordo com a norma francesa NF P 98-149 (2000), as que se apresentam seguidamente, incluindo-se também alguns comentários (Serfass, 2002):

- *Enrobé Hydrocarboné à Froid* (EHF): "Mistura betuminosa realizada a partir de agregados, de um ligante de hidrocarboneto, e eventualmente de aditivos, com características tais que o agregado possa estar envolvido sem secagem ou aquecimento."
- *Grave-Émulsion* (GE): "Mistura betuminosa a frio para ser aplicada quer em reperfilamentos, quer na construção de camadas de pavimento"
- *Béton Bitumineux à Froid* (BBF): "Mistura betuminosa a frio não armazenável (que deve ser utilizada em 24h) para ser aplicada em camadas de desgaste em pavimentos com níveis de tráfego reduzidos ou moderados. É aplicada em espessuras de entre 5 a 8 cm."
- *Enrobé à froid stockable*: "Mistura betuminosa a frio que pode ser armazenada por algumas semanas ou meses, para ser aplicada em trabalhos de manutenção de rotina (tapagem de covas, nivelamento e/ou pequenos trabalhos, sem desempenhar um papel estrutural no pavimento)"

No entanto, segundo Serfass (2002), vários aspectos nestas definições devem ser especificados, acrescentados ou modificados, conforme seguidamente se sintetiza:

- A GE tipo "francês" obtém algumas das suas características pelo facto de ser uma mistura rica em ligante betuminoso, e pelo ligante em questão ser relativamente mole (flexibilidade, *capacidade de regeneração*, capacidade *de ligação/coesão*, etc.). Estas propriedades determinam o seu campo de aplicação, em particular são utilizadas em reperfilamentos, em situações em que é requerida uma espessura variável e para aplicação em superfícies relativamente deformadas.

  É aceite, quer explicitamente, quer implicitamente, que a alta percentagem de ligante no mastique pode compensar o facto de as partículas mais grossas estarem pouco ou nada envolvidas pelo betume (estas partículas estão embebidas no mastique e sobre uma camada em GE é sempre colocada uma outra camada).
- A definição de BBF é restritiva e não corresponde a todas as aplicações:

- "utilização em 24h": algumas composições permanecem utilizáveis por diversos dias;
- "tráfego reduzido ou moderado": mais detalhes são necessários, como por exemplo, o número de veículos (pesados), natureza do tráfego potencialmente danificante (forças tangenciais);
- "em espessura de 5 a 8 cm": é aplicado BBF em espessuras compreendidas entre 2 e 5 cm mais frequentemente do que entre 5 e 8 cm.

- Algumas misturas a frio armazenáveis são utilizadas no reperfilamento e/ou em camadas em estradas de baixo tráfego. Neste caso, mesmo que quando as suas características mecânicas iniciais são fracas, não se pode afirmar que não desempenham um papel estrutural.

Nas seguintes secções identificam-se as propriedades dos principais constituintes das misturas betuminosas fabricadas a frio, quer através de reciclagem, quer através de materiais novos, e referem-se algumas características a exigir aos materiais empregues no fabrico dessas misturas, por forma a garantir que as mesmas satisfaçam os requisitos de qualidade inerentes à sua aplicação em pavimentos rodoviários. Neste contexto, passam-se em revista as especificações de diversos países, bem como recomendações de reconhecida relevância nesta área, nomeadamente as que a seguir de apresentam.

Em Portugal, o documento de referência é, naturalmente, o Caderno de Encargos tipo da JAE (1998), onde estão contempladas as "camadas de misturas betuminosas a frio, em agregado britado de granulometria extensa, tratado com emulsão betuminosa".

Em Espanha, no Caderno de Encargos tipo vigente para obras de estradas e pontes, o "PG-3", são contempladas misturas betuminosas a frio "novas" de vários tipos.

Assim, no Art. 514 do PG-3, relativo às misturas tipo "*grava-emulsión*", estão são definidas como sendo uma mistura de agregados, emulsão betuminosa e água que, convenientemente compactada, se utiliza para a construção de camadas de pavimentos de estradas. No Art. 541 do PG-3, são ainda definidas misturas betuminosas a frio em geral, como sendo uma combinação de agregados e um ligante betuminoso (alcatrões, betumes fluidificados ou emulsões betuminosas), a qual não necessita para o seu fabrico, o aquecimento prévio dos agregados, sendo a mistura assim realizada espalhada e compactada à temperatura ambiente. No entanto, a redacção das especificações referidas (Art. 514 e 541 do PG-3) data de 1976, altura em que foi aprovado, pela primeira vez, o Caderno de Encargos tipo para obras de construção "PG-3". Dado o avanço tecnológico de que este tipo de misturas tem sido alvo, para além das novas preocupações ambientais (já

não é, por exemplo, permitida a utilização de alcatrões), as referidas especificações não são actualmente aplicadas em Espanha, sendo em alternativa, seguidas recomendações de cada Região Autónoma e/ou as condições particulares estabelecidas no Caderno de Encargos da própria obra. Para efeitos do presente trabalho, foi adoptado, como documento de referência de misturas betuminosas "novas", as especificações espanholas em preparação para "*grava-emulsión*" (GE_E) (PROBISA, 1998a).

No que respeita às misturas recicladas, foi recentemente aprovado no país vizinho, um Caderno de Encargos tipo para obras de conservação de estradas, o "PG-4". No Art. 20 deste Caderno de Encargos, é definida a reciclagem *in situ* com emulsão de camadas bituminosas (RE_E), como tratando-se de uma mistura homogénea, convenientemente espalhada e compactada, de material resultante da fresagem de uma ou mais camadas de mistura betuminosa de um pavimento existente, numa espessura compreendida entre seis (6) e doze centímetros (12 cm), emulsão betuminosa, água e, eventualmente, aditivos. Todo o processo de execução desta unidade de obra se realiza à temperatura ambiente e sobre a própria superfície a tratar. A redacção do referido Caderno de Encargos data de 2001, tendo entrado em vigor em 2002, sendo um dos documentos de referência seguido. No entanto, tendo em atenção que uma grande parte dos estudos desenvolvidos no presente trabalho se referem a datas anteriores (por exemplo, acompanhamento de obras de reciclagem efectuadas em 1998), tomou-se ainda como referência as recomendações de Fernández del Campo (1998) para a reciclagem de camadas de pavimento com emulsão betuminosa.

Foram também consultadas as especificações francesas AFNOR para *"graves-émulsion"* (GE_F) (NF P 98-121, 1993), bem como para *"bétons bitumineux à froid"* (BBF_F) (NF P 98-139, 1994).

Por forma a ter em linha de conta a experiência dos EUA, na utilização das misturas a frio em apreço, tomaram-se ainda em consideração as recomendações do *Asphalt Institute* para misturas betuminosas a frio (Asphalt Institute MS-14, 1997; MS-19; MS-21, 1983).

3.3 - Materiais empregues em misturas a frio

3.3.1 - Emulsões betuminosas

Uma emulsão pode ser definida como um sistema constituído por duas fases líquidas não miscíveis, em que uma das fases, sob a forma de pequenas gotas de dimensão microscópica ou coloidal (fase dispersa ou fase descontínua), está dispersa na outra (fase dispersante ou fase contínua).

Para se conseguir a dispersão de uma das fases líquidas na outra, é necessário fornecer ao sistema uma certa energia, geralmente, mecânica. No entanto este sistema não é, por si só, estável. De facto, uma vez terminado o fornecimento de energia mecânica, as fases não miscíveis em presença ir-se-iam separando, depositando-se no fundo do recipiente a fase de maior densidade, conforme se ilustra na Fig. 3.5. Para manter o sistema estável durante um dado período de tempo, é necessário fornecer ao sistema uma certa energia química através de um agente emulsionante, tal como se representa na Fig. 3.6.

No entanto, importa referir que uma emulsão estabilizada continua a ser um sistema termodinamicamente desequilibrado que evoluirá sempre para uma situação mais estável e irreversível, correspondente à união das pequenas gotas da fase dispersa (Miranda, 1979).

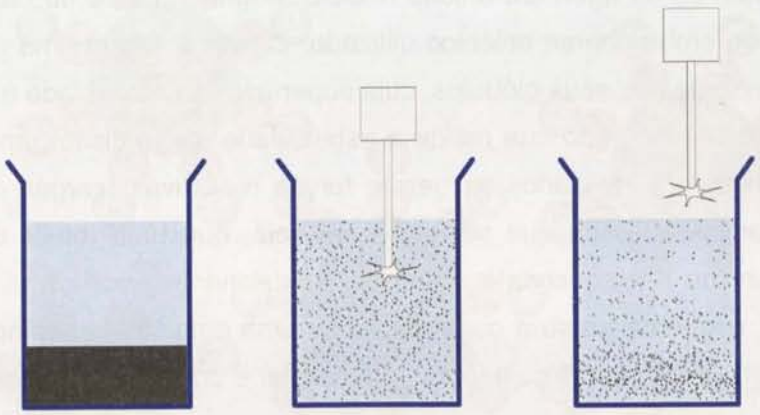


Fig. 3.5 – Sistema constituído por dois líquidos não miscíveis, ao qual é temporariamente fornecida energia mecânica (adaptado de Miranda, 1979)

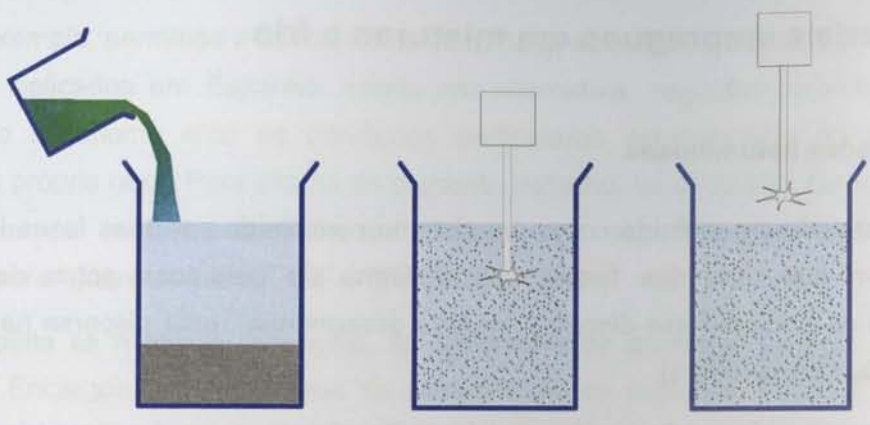


Fig. 3.6 – Sistema constituído por dois líquidos não miscíveis, ao qual é adicionado um emulsionante e é temporariamente fornecida energia mecânica (adaptado de Miranda, 1979)

As emulsões betuminosas são fluídos em que o betume se encontra disperso numa fase aquosa sob a forma de glóbulos discretos que se mantêm em suspensão devido a cargas electrostáticas produzidas pelo emulsionante. O emulsionante é composto por uma cadeia extensa de hidrocarbonetos (radical R) terminados por um grupo funcional catiónico ou aniónico. De acordo com a natureza electrolítica do emulsionante, as emulsões betuminosas são classificadas em emulsões betuminosas catiónicas ou emulsões betuminosas aniónicas.

Regra geral, os emulsionantes aniónicos são sais sódio ou sais potássio de ácidos orgânicos, tendo uma molécula do tipo R-COONa ou R-COOK, respectivamente. Estas moléculas dissociam-se na água em aniões $R\text{-}COO^-$ e igual número de catiões Na^+ ou K^+, consoante o tipo de emulsionante aniónico utilizado. O radical R tem uma grande afinidade pelo betume, fixando-se nos seus glóbulos, cuja superfície fica electrizada negativamente. É essencialmente neste fenómeno que reside a estabilidade da emulsão, uma vez que entre os glóbulos de betume electrizados se geram forças repulsivas (cargas do mesmo sinal repelem-se), evitando-se assim que se unam, ou seja, que haja rotura da emulsão. Os aniões do tipo Na+ ou K+, consoante o tipo de emulsionante aniónico utilizado, ficam na água. Na Fig. 3.7 esquematiza-se a composição de uma emulsão betuminosa aniónica em que foi utilizado um emulsionante cuja fórmula molecular é do tipo R-COONa.

No que concerne aos emulsionantes catiónicos estes são geralmente um produto da reacção de ácidos inorgânicos fortes (p.ex. ácido clorídrico) com aminas gordas, tendo uma molécula do tipo $R\text{-}HC\ell NH_3$, que se dissocia em água, dando origem a catiões $R\text{-}NH_3^+$ e igual número de aniões $C\ell^-$. À semelhança dos emulsionantes aniónicos, também o radical R, tendo uma grande afinidade pelo betume, penetra nos seus glóbulos, que ficam electrizados positivamente, e o anião $C\ell^-$ fica na água, conforme se ilustra na Fig. 3.8.

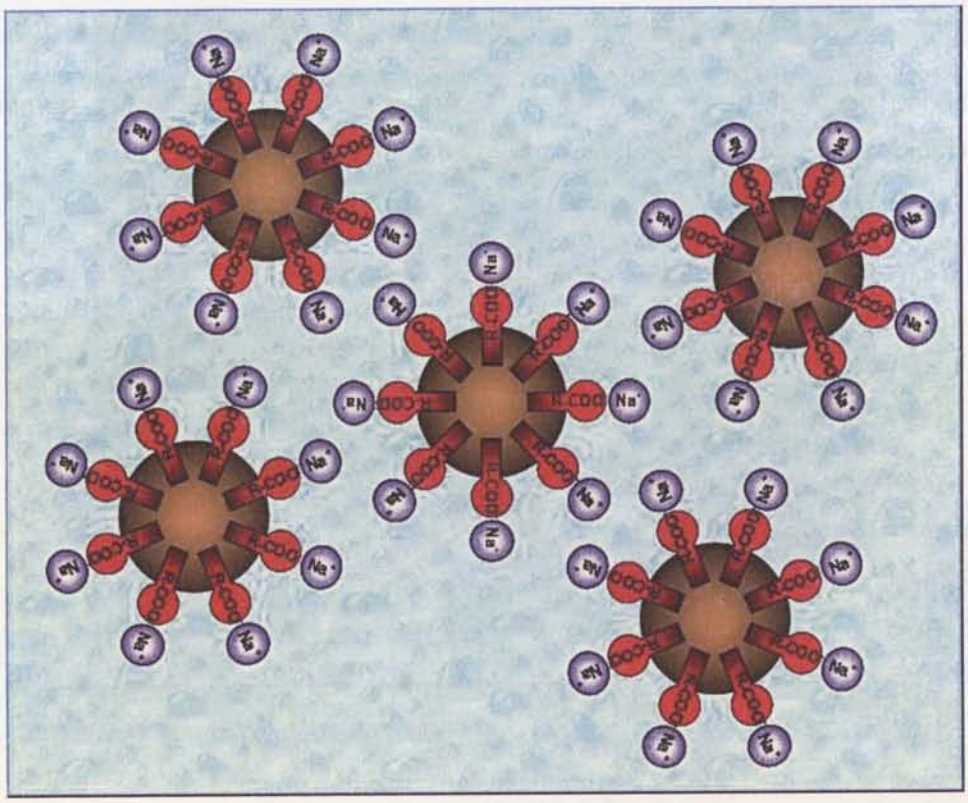


Fig. 3.7 – Emulsão betuminosa aniónica

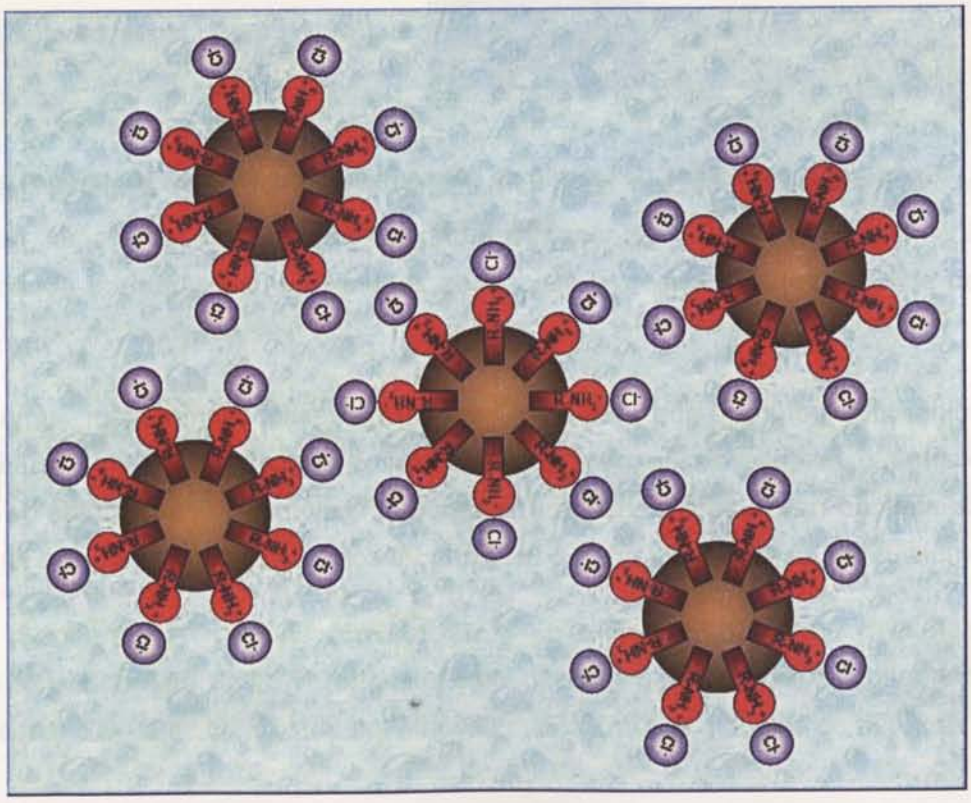


Fig. 3.8 – Emulsão betuminosa catiónica

Para o fabrico de emulsões betuminosas recorre-se a meios mecânicos, geralmente, a moinhos coloidais de corte, tal como se esquematiza na Fig. 3.9.

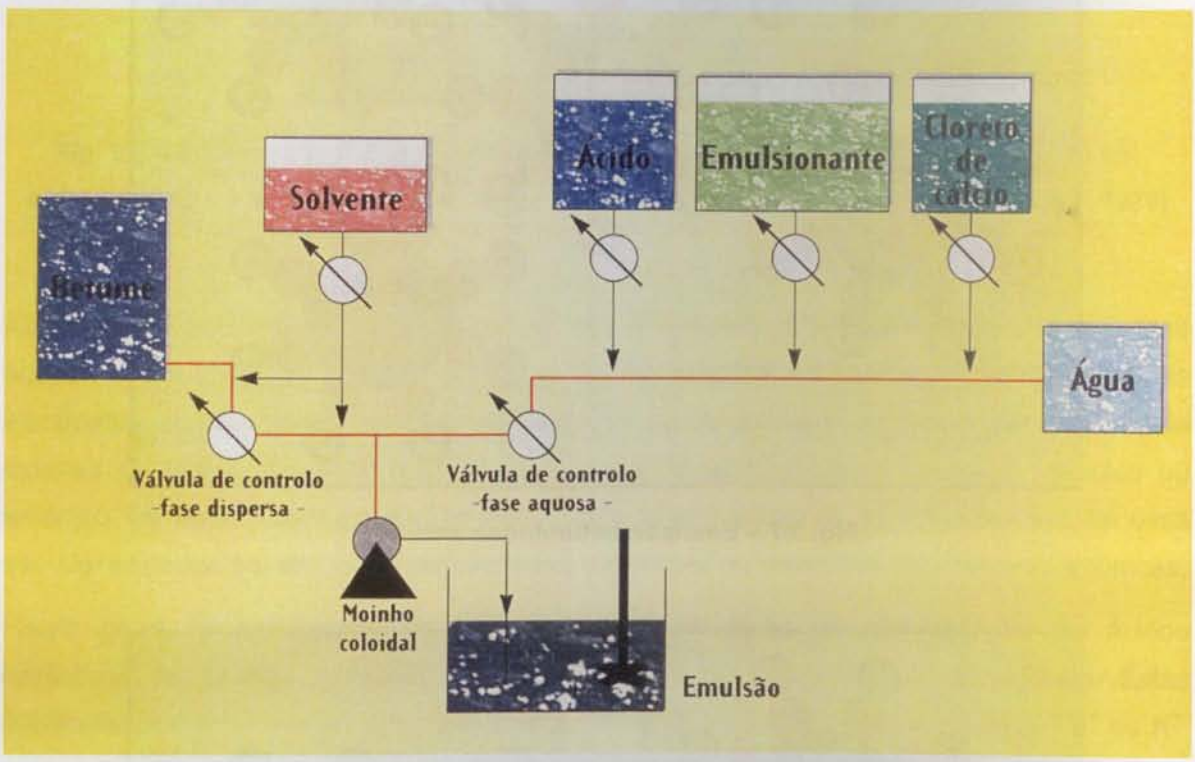


Fig. 3.9 – Esquema do processo de fabrico de uma emulsão betuminosa (Catálogo da Shell Betumes)

Os glóbulos de betume que resultam deste processo apresentam uma forma aproximadamente esférica, razão pela qual se toma o diâmetro destas partículas como medida de aferição das suas dimensões. Geralmente, o diâmetro dos glóbulos de betume de uma emulsão betuminosa varia entre 1 e 10 μm, tal como se pode observar na Fig. 3.10.

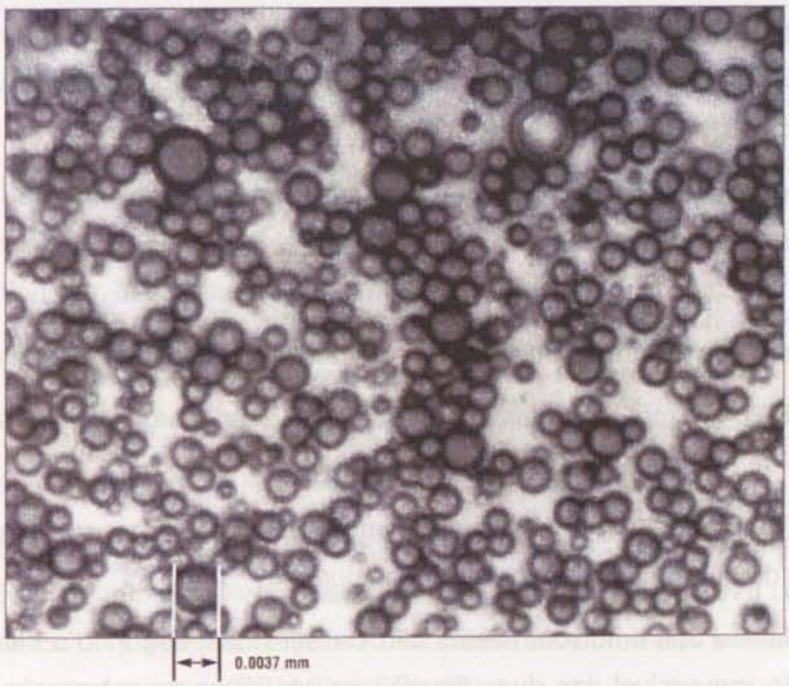


Fig. 3.10 – Dimensões e distribuição dos glóbulos de betume numa emulsão (Asphalt Institute MS-19)

As propriedades de uma emulsão betuminosa dependem em grande parte da sua composição e da forma como foi preparada.

As características básicas que definem uma emulsão betuminosa são a sua viscosidade, estabilidade ao armazenamento, estabilidade frente aos agregados (reactividade) e adesividade (Potti & Leal, 2000). De uma forma geral, as emulsões betuminosas devem apresentar uma boa estabilidade ao armazenamento e uma boa adesividade aos agregados. Já os requisitos relacionados com a sua viscosidade e reactividade dependem do tipo de aplicação em causa.

A rotura de uma emulsão betuminosa é um processo irreversível, em que se dá a sua desestabilização devido a um processo de coalescência dos glóbulos de betume (Potti & Leal, 2000). A coalescência é pois, um processo durante o qual os glóbulos de betume se fundem para formar um maior. Para que tal suceda, é necessário que dois glóbulos de betume adjacentes se aproximem um do outro e se rompa a película líquida existente entre os dois. Segue-se um período em que se dá a relaxação da forma dos glóbulos em contacto, que adoptam então a forma externa de uma gota de maiores dimensões. Esta etapa é essencialmente controlada pela tensão superficial dos glóbulos de betume.

De uma forma geral, as **emulsões betuminosas** são classificadas segundo a sua **natureza** (aniónicas ou catiónicas), **estabilidade** (velocidade de rotura), **viscosidade** e **dureza do betume base** empregue no seu fabrico.

No caso de Portugal, as emulsões betuminosas são classificadas de acordo com o preconizado nas especificações LNEC E 128/1984 e E 354/1984, conforme a seguir se sintetiza.

No que concerne à sua natureza, as emulsões podem ser:

- **Aniónicas (EA)**, em que o emulsionante (aniónico) induz cargas negativas na superfície dos glóbulos de betume suspensos no meio aquoso
- **Catiónicas (EC)**, em que o emulsionante (catiónico) induz cargas positivas na superfície dos glóbulos de betume suspensos no meio aquoso

Quanto à estabilidade das emulsões, estas são classificadas, segundo a sua velocidade de rotura (separação irreversível das duas fases), em emulsões de **rotura rápida (R)**, **média (M)** ou **lenta (L)**. A velocidade de rotura de uma emulsão betuminosa depende essencialmente da composição do emulsionante e da sua concentração, para além dos aspectos relacionados com os agregados (natureza mineralógica e superfície específica).

Em relação à viscosidade da emulsão, esta é classificada em "**1**" ou "**2**" consoante seja menos (1) ou mais viscosa (2). A viscosidade das emulsões depende essencialmente dos seguintes factores:

- Viscosidade do betume base;
- Teor em betume;
- Dimensão dos glóbulos do betume

As emulsões betuminosas são ainda diferenciadas quanto à dureza do betume utilizado no seu fabrico, sendo as que são fabricadas a partir de betume de dureza superior, designadas por "**h**", do inglês *"hard"*.

Assim, na especificação LNEC E 128-1984, relativa às características e recepção de emulsões betuminosas aniónicas para pavimentação, são considerados os seguintes tipos de emulsões:

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

No caso das emulsões aniónicas cujo betume base é de dureza corrente (EAR-1, EAR-2, EAM-1 e EAL-1), a penetração do resíduo de destilação (NP-82) deve estar compreendida entre 100 e 200 x 10^{-1}mm. Já as emulsões cujo betume base é de dureza superior (EAM-2h e EAL-1h), a penetração deve situar-se entre 40 e 90 x 10^{-1}mm.

Na especificação LNEC E 354-1984, equivalente à acima referida, mas para emulsões betuminosas catiónicas, diferenciam-se os seguintes tipos de emulsões:

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

Quanto à penetração do resíduo de destilação (NP-82) de emulsões catiónicas, esta deve ser de 100 a 250 x 10^{-1}mm para emulsões cujo betume base é de dureza corrente (ECR-1, ECR-2, ECM-2 e ECL-1), e de 40 a 90 x 10^{-1}mm para as emulsões fabricadas a partir de betume base de dureza superior (ECM-2h e ECL-1h).

O Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) indica que as características das emulsões betuminosas a empregar no fabrico de misturas a frio em "agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão", deverão obedecer às especificação LNEC E 354 e E 128, consoante o tipo de emulsão, devendo ser, normalmente, do tipo catiónico de rotura lenta ECL-1h, ou aniónico de rotura lenta EAL-1h. Neste Caderno de Encargos permite-se, no entanto, que a penetração do resíduo de destilação apresente eventualmente valores superiores aos mencionados naquelas especificações, ou seja, valores que poderão estar compreendidos entre 60 e 100 (x 10^{-1}mm), de modo a melhorar a trabalhabilidade da mistura em obra.

Em Espanha (PG-3 – Art. 213, 1999), a denominação das emulsões compõe-se das letras EA ou EC, representativas do tipo de emulsionante utilizado no seu fabrico (aniónico ou catiónico), seguidas da letra R, M, L ou I, consoante o tipo de rotura (rápida, média ou lenta) ou caso se trate de uma emulsão especial para regas de impregnação, e, nalguns casos, do número "1", "2" ou "3", indicador do seu teor em betume residual e, eventualmente da letra "d" *("duras")* ou "b" *("blandas")*, para emulsões betuminosas com uma menor ou maior penetração do resíduo de destilação. Resumidamente, têm-se os seguintes tipos de emulsões:

- Emulsões aniónicas de rotura rápida EAR-1, EAR-1d, EAR-2 e EAR-2d
- Emulsões aniónicas de rotura média EAM
- Emulsões aniónicas de rotura lenta EAL-1, EAL-1d, EAL-2 e EAL-2d

- Emulsões aniónicas para regas de impregnação EAI
- Emulsões catiónicas de rotura rápida ECR-1, ECR-1d, ECR-2, ECR-2d, ECR-3 e ECR-3d
- Emulsões catiónicas de rotura média ECM
- Emulsões catiónicas de rotura lenta ECL-1, ECL-1d, ECL-2 e ECL-2d
- Emulsões catiónicas para regas de impregnação ECI

No Art. 216 do PG-3 (1999) definem-se ainda emulsões betuminosas modificadas com polímeros, ou seja, emulsões fabricadas a partir de betume modificado com polímeros. Para identificar este tipo de emulsões acrescenta-se à designação da emulsão, a letra "m", sendo definidos 6 tipos diferentes: ECR-1-m, ECR-2-m, ECR-3-m, ECM-m, EAM-m e ECL-2-m.

As especificações espanholas em preparação para "*grava-emulsión*" (PROBISA, 1998a) preconizam o tipo de emulsão betuminosa a empregar no seu fabrico, em função do tipo de camada do pavimento, da zona térmica estival e da categoria de tráfego pesado conforme definição da norma *6.1-IC "Secciones de firmes"* da *Instrucción de Carreteras* (2003). Estas indicações, para emulsões catiónicas traduzem-se no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Tipo de emulsão betuminosa catiónica a empregar no fabrico de "*grave-emulsión*", segundo as especificações espanholas

Situação da camada	Classe de tráfego (Espanha)	Zona térmica estival		
		Quente	Média	Temperada
"Pavimento"[1], excepto camada de desgaste	T3, T4 (TMDp<200)	ECL-2d	ECL-2	
Base	T1, T2 (200≤TMDp<2000)	ECL-2d		
	T3 (50≤TMDp<200)	ECL-2d	ECL-2	
	T4 (TMDp<50)	ECL-2		
Sub-base	T0, T1, T2, T3, T4 (TMDp<4000)	ECL-2		

LEGENDA: TMDp – Tráfego médio diário de veículos pesados previsto para a via de projecto no ano de entrada em serviço

(1) Entende-se que se refere apenas a camadas superiores

Segundo as especificações espanholas para misturas recicladas *in situ* (PG-4 – Art. 20, 2001) preconiza-se o uso de emulsões do tipo ECL-2, ECL-2b ou ECL-2-m.

Na norma francesa NF T 65-011 (1984), relativa às características das emulsões de betume a empregar na pavimentação, consideram-se as seguintes classes, em função tipo de carga das partículas (EA – aniónicas ou EC – catiónicas), da velocidade de rotura (R – rápida, M – semi-rápida, L – lenta ou S – sobre-estabilizada) e do teor em betume residual (50% a 69%):

- Emulsões aniónicas de rotura rápida EAR 50, EAR 55, EAR 60 e EAR 65
- Emulsões aniónicas de rotura lenta EAL 55, EAL 60 e EAL 65
- Emulsões aniónicas sobre-estabilizadas EAS 55 e EAS 60
- Emulsões catiónicas de rotura rápida ECR 60, ECR 65 e ECR 69
- Emulsões catiónicas de rotura semi-rápida ECM 60, ECM 65 e ECM 69
- Emulsões catiónicas de rotura lenta ECL 55 e ECL 60
- Emulsões catiónicas sobre-estabilizadas ECS 65, ECS 55 e ECS 60

Segundo as especificações francesas para *"graves-émulsion"* (NF P 98-121, 1993), a emulsão a utilizar é uma emulsão catiónica de rotura lenta ou sobre-estabilizada, cujo betume base pode ser de penetração nominal 35/50, 50/70, 70/100 ou 180/220 ($x10^{-1}$ mm) ou um ligante modificado. No caso de agregados ácidos, o pH da emulsão deve ser superior a 1,8. No caso de agregados básicos, o pH deve ser superior a 2,2.

As especificações para *"bétons bitumineux à froid"* (NF P 98-139, 1994), são um pouco mais restritivas quanto à emulsão betuminosa a utilizar no seu fabrico, sendo apenas permitido o uso de emulsão catiónica de rotura lenta ou sobre-estabilizada, cujo betume base pode ser um 70/100, um 180/220 ($x10^{-1}$ mm) ou um ligante modificado.

Segundo o *Asphalt Institute* (MS-19), as emulsões betuminosas são classificadas em três categorias: aniónicas, catiónicas e não-iónicas. Neste último tipo de emulsões (não-iónicas), as partículas de betume são neutras, ou seja, não estão carregadas electricamente. Na prática, apenas os dois primeiros tipos de emulsões (aniónicas e catiónicas) são correntemente utilizados em trabalhos de pavimentação. Assim, é utilizada a letra "C" no início da designação de uma dada emulsão catiónica, sendo que, quando esta letra não é utilizada, se entende que a emulsão é aniónica.

As emulsões betuminosas são ainda classificadas com base na velocidade de coalescência das partículas de betume, sendo adoptados os termos RS *("rapid-setting")*, MS *("medium-setting")*, SS *("slow-setting")* e QS *(quick-setting")* para as designar. A tendência para a coalescência está intimamente relacionada com a velocidade com que uma determinada emulsão se torna instável e rompe após entrar em contacto com a superfície dos agregados. Um emulsão RS tem pouca tendência para se misturar com agregados, uma emulsão MS

tem geralmente boa tendência para se misturar com agregados grossos, mas não com agregados finos, enquanto que as emulsões SS e QS também têm boa tendência para se misturarem com agregados finos, sendo que as QS rompem mais rapidamente que as SS.

As emulsões são também identificadas por uma série de números e letras relacionados respectivamente, com a sua viscosidade e com a dureza do betume base. Quanto à viscosidade da emulsão, tem-se, por exemplo, que uma emulsão MS-2 é mais viscosa que uma MS-1. No que concerne à dureza do betume base, as letra "h" *("hard")* e "s" *("soft")* significam que são utilizados respectivamente, betumes de maior e de menor dureza.

Por fim, as letras "HF" *("high-float")* precedem a designação de algumas emulsões aniónicas, indicando que no ensaio de flutuação, apresentam valores relativamente elevados. Estas emulsões têm uma propriedade gel, proporcionada pela adição de determinados químicos, que permitem a formação de películas de betume mais espessas sobre as partículas de agregados e previnem o seu desprendimento dos agregados. Este tipo de emulsões, é comum designar, nas línguas latinas, por emulsões de reologia modificada (Fernández del Campo, 1983).

No Quadro 3.5 sintetizam-se os diversos tipos de emulsão betuminosas consideradas nas especificações ASTM D977 e D2397, ou nas especificações equivalentes da AASHTO M140 e M208 (Asphalt Institute, MS-19).

Quadro 3.5 – Emulsões betuminosas segundo as especificações ASTM e AASHTO

	Emulsões betuminosas aniónicas (ASTM D977, AASHTO M140)	Emulsões betuminosas catiónicas (ASTM D2397, AASHTO M208)
Emulsões betuminosas de rotura rápida	RS-1, RS-2 HFRS-2	CRS-1, CRS-2
Emulsões betuminosas de rotura média	MS-1, MS-2, MS-2h HFMS-1, HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s	CMS-2, CMS-2h
Emulsões betuminosas de rotura lenta	SS-1, SS-1h	CSS-1, CSS-1h

No manual do *Asphalt Institute* sobre misturas betuminosas a frio (MS-14, 1997), estabelece-se um guia sobre o tipo de emulsão a utilizar em função do tipo de mistura a fabricar, recomendando-se que no fabrico de misturas a frio para camadas base e superiores, com agregados bem graduados, se utilizem emulsões aniónicas de rotura média do tipo HFMS-1, ou de rotura lenta SS-1 ou SS-1h, ou emulsões catiónicas de rotura lenta do tipo CSS-1 ou CSS-1h.

No manual de reciclagem a frio do *Asphalt Institute* (MS-21, 1983), é recomendado o uso do mesmo tipo de emulsões, chamando-se a atenção da importância de se realizarem ensaios laboratoriais para a selecção de um determinado tipo de emulsão, em função do tipo de agregado e da aplicação específica.

A nível europeu, ainda está em discussão a norma relativa às emulsões betuminosas. Segundo a primeira versão acordada em 1999 para a pré-norma prEN 13808, a denominação das emulsões seria feita em função dos seguintes aspectos (Potti, 1999):

- Carga das partículas de betume na emulsão
  - Catiónica (C)
  - Aniónica (A)
  - Não-aniónica (N)
- Velocidade de rotura
  - Rápida (R)
  - Média (M)
  - Lenta (S)
  - Sobre-estabilizada (O)
- Percentagem de ligante (60, 65, 70, ...)
- Presença de fluxantes
  - Sim (L)
  - Não (-)
- Betume modificado
  - Com polímero (P)

Assim, uma emulsão definida pela sigla M70CL, corresponderia a uma emulsão catiónica de rotura média, contendo fluxantes no seu ligante e não modificada.

Posteriormente foi decidido mudar a forma de classificar a velocidade de rotura, por o tipo de terminologia utilizado ter suscitado problemas de ordem linguística (Sá da Costa & Eusébio, 2002). Assim, na versão da pré-norma europeia prEN 13808 de 2001, relativa às emulsões betuminosas catiónicas, optou-se por se classificar a velocidade de rotura das emulsões em função do índice de rotura, para o qual foram então estabelecidas 8 classes (0 a 7). A classe 0 reporta-se à exclusão do indíce de rotura, a classe 1 à ausência de requisitos para ele, as classes 2 e 3 a emulsões de rotura rápida, as classes 4 e 5 a

emulsões de rotura média e as classes 6 e 7 a emulsões de rotura lenta (Sá da Costa & Eusébio, 2002).

Houve também um pequeno ajuste na designação do tipo de ligante utilizado, passando a ser indicado da seguinte forma:

- Betume de pavimentação: B
- Com polímeros: P
- Com fluxantes/fluidificantes: F

Assim, uma emulsão designada por C 70 BPF 7 corresponderá a uma emulsão catiónica, com 70% de teor nominal de ligante, que contém polímero e fluxantes/fluidificantes, com classe 7 no índice de rotura (Sá da Costa & Eusébio, 2002).

Esta designação foi mantida na última versão da pré-norma, que data de 2003.

Cabe aqui referir que apesar de historicamente, as emulsões aniónicas precederam as emulsões catiónicas, actualmente a média mundial de sua utilização é inferior a 10% das últimas (Tomás, 1999). Aliás, esta é a principal razão pela qual a nível do Comité Técnico Europeu, apenas se encontra em preparação uma norma para emulsões betuminosas catiónicas.

Como se verá nas secções seguintes, o que limita a utilização das emulsões aniónicas é, para além da sua deficiente adesividade com os agregados electronegativos, a maior sensibilidade às condições atmosféricas durante a cura das misturas colocadas em obra. Com efeito, enquanto que a rotura das emulsões aniónicas é muito condicionada pela evaporação da água, no caso das emulsões catiónicas, o mecanismo predominante de rotura é a reacção química entre o emulsionante e os agregados. Além disso, veio a verificar-se que as emulsões catiónicas podem apresentar boa adesividade quer com agregados electronegativos, quer com agregados electropositivos. De facto, estas emulsões apresentam por exemplo, boa adesividade com agregados electropositivos, como sejam, os de natureza basáltica ou calcária (Santana, 1992).

Um dos aspectos mais relevantes das emulsões betuminosas quando comparadas com as soluções convencionais de aplicação de betume a quente relaciona-se com o facto de as primeiras apresentarem menores riscos em termos de segurança e saúde.

De facto, as emulsões são manuseadas à temperatura ambiente ou a temperaturas relativamente baixas e, nessa gama de temperaturas são produtos não inflamáveis. Os impactos ambientais são muito reduzidos quando comparados com os betumes a quente. De igual forma são produtos menos tóxicos, sem ou quase sem produtos voláteis e,

portanto, adequados para aplicação em ambiente urbano. Apesar destas vantagens algumas precauções têm de ser tomadas, nomeadamente para evitar a contaminação de linhas de água. Outro aspecto de grande importância relaciona-se com o pH das emulsões. De facto estes produtos podem ser fortemente ácidos ou fortemente alcalinos (pH a variar entre 3 a 12) pelo que qualquer contacto com a pele pode ser nocivo implicando, naturalmente, a utilização de vestuário adequado (Asphalt Institute MS-19).

3.3.2 - Água

Enquanto as misturas a quente não contêm praticamente qualquer quantidade de água, já no caso das misturas a frio com emulsão betuminosa, um dos principais constituintes é precisamente a água.

A presença da água neste tipo de misturas a frio desempenha um papel importante em idades jovens da mistura, integrando mesmo o seu fabrico, mas é prejudicial em idades mais avançadas.

Assim, a primeira função da água é a de diminuir a viscosidade do ligante, sendo imprescindível no fabrico da própria emulsão betuminosa por ser o principal constituinte da fase contínua deste tipo de emulsão. No caso das emulsões catiónicas de rotura lenta geralmente utilizadas no fabrico das misturas densas a frio, a água corresponde a cerca de 40% do total.

Embora a produção da emulsão seja uma preocupação específica das empresas petrolíferas que fornecem este tipo de materiais, convém referir que a água usada para este efeito deve obedecer a determinadas características. Dentro destas refere-se que a água não deverá conter determinados minerais, sais ou partículas em suspensão que possam afectar a estabilidade da emulsão, por exemplo, nem sempre a água potável é adequada para o seu fabrico (Asphalt Institute, MS-19).

Outra função da água, relaciona-se, tal como se verá na subsecção 3.3.4, com o facto de quando da mistura dos vários componentes, a água, ao ionizar o meio, permitir que a coalescência e rotura da emulsão tenham lugar (Serfass, 2002).

Por outro lado, a água adicionada à mistura durante o seu fabrico, facilita não só a distribuição da emulsão na mistura de agregados, como também, a posterior compactação da mistura betuminosa pelo efeito de lubrificação que exerce nos agregados.

De referir que, à semelhança do referido relativamente à água usada no fabrico da emulsão, também para a água adicionada para o fabrico da mistura betuminosa a frio, se devem ter

alguns cuidados. Assim, nem todo o tipo de água é compatível com o tipo de emulsão betuminosa seleccionado, pelo que quando da realização dos estudos laboratoriais, deve ser recolhida uma amostra da água a ser utilizada em obra e efectuar-se a mistura betuminosa nas proporções estabelecidas. Se algum efeito adverso for detectado, deve ser encontrada em obra uma outra fonte de água (Asphalt Institute MS-21, 1983).

Apesar da água ser um material imprescindível na realização de misturas betuminosas a frio, a sua presença na mistura atrasa, no entanto, a formação de uma película contínua do betume e consequentemente a coesão da própria mistura, para além de reduzir as características de resistência da mistura nas idades jovens.

As características finais das misturas só serão obtidas após o processo de cura estar completo, ou seja, quando a quase totalidade da componente aquosa da mistura tiver sido eliminada.

3.3.3 - Agregados

As misturas betuminosas incluem uma quantidade apreciável de agregados que, em peso, podem representar mais de 90% do total da mistura e em volume cerca de 80%.

Os agregados podem ser classificados quanto à sua origem em naturais ou artificiais ou, quanto à sua natureza, de acordo com a rocha que lhes dá origem. No entanto, para o fabrico de misturas betuminosas a frio tem igualmente interesse a consideração de outra propriedade que se relaciona com a carga electrostática que espontaneamente se forma à sua superfície. De facto, esta carga dos agregados pode, em certos casos, ter influência no comportamento da emulsão.

Assim, os agregados podem ser classificados como electronegativos quando as cargas à superfície são negativas. Este é, em geral, o caso dos agregados que derivam de granito, gnaisse, arenitos, areias quartzíticas, entre outros. Quando as cargas são positivas, o agregado é, naturalmente, classificado como electropositivo estando, geralmente neste caso, os agregados que derivam de rochas como calcário, basalto e gabro.

As rochas utilizadas para a obtenção dos agregados a utilizar em pavimentação raramente contêm um só mineral (Serfass, 2002). À excepção do quartzo, de alguns quartzitos que contêm 100% de sílica e de alguns calcários puros (raramente utilizados em pavimentação), a maioria das rochas consistem em arranjos mais ou menos complexos de vários átomos, que são, por simplicidade, frequentemente representados por óxidos (SiO_2, Al_2O_3, CaO,

FeO, etc). Na Fig. 3.11 ilustra-se de forma esquemática a composição em sílica de alguns tipos principais de rochas.

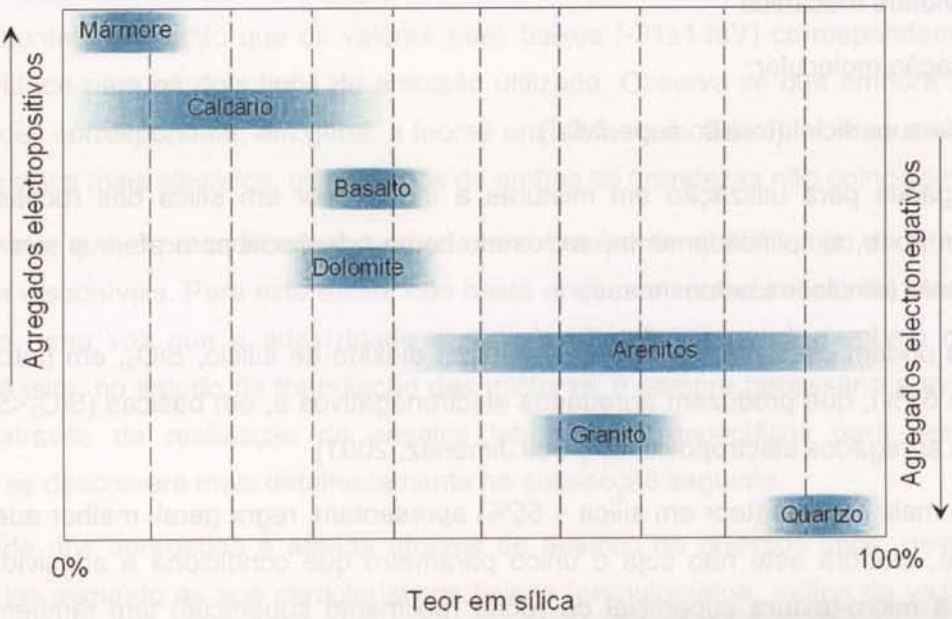


Fig. 3.11 – Quantidade de sílica dos agregados de diversas naturezas (adaptado de Arcé Jiménez, 2001)

No que concerne às rochas ígneas, os minerais mais abundantes são os silicatos, cuja composição e estrutura molecular pode ser muito diversa.

As rochas sedimentares são habitualmente constituídas por carbonatos, apesar de estes raramente estarem isolados. De facto, neste tipo de rochas é também frequente a presença de silicatos.

Quanto aos materiais aluvionares, estes são, de um modo geral, resultado de vários tipos de rochas, havendo alguns calcários siliciosos, mas também outros muito mais complexos.

Uma das propriedades que se pretende que as misturas betuminosas apresentem é um boa adesividade agregado-ligante, e que esta se mantenha a longo prazo, quer sob as acções atmosféricas, quer sob as acções do tráfego.

Os mecanismos que possibilitam a adesividade entre os agregados e os ligantes (Epps & Quintus, 1990) são de um dos seguintes tipos ou da sua combinação:

- Reacções químicas;
- Adesividade mecânica
- Orientação molecular;
- Energia superficial (tensão superficial).

Nos agregados para utilização em misturas a frio, o teor em sílica das rochas que os constituem pode, simplificadamente, ser usado como referência para aferir a sua afinidade com o ligante (emulsões betuminosas).

As rochas podem diferenciar-se em ácidas (com dióxido de sílicio, SiO_2, em percentagem superior a 65%), que produzem agregados electronegativos e, em básicas (SiO_2<55%) que produzem agregados electropositivos (Arce Jiménez, 2001).

As rochas mais básicas (teor em sílica < 55%) apresentam, regra geral, melhor adesividade ao betume, embora este não seja o único parâmetro que condiciona a adesividade. Por exemplo, a micro-textura superficial da rocha (polimento superficial) tem também grande importância.

Para quantificar a carga eléctrica superficial das partículas de agregado (e/ou de uma emulsão betuminosa) introduziu-se o conceito de "potencial Z" (potencial zeta). O medidor de potencial Z quantifica a velocidade do movimento das partículas num meio aquoso. A intensidade da carga, positiva ou negativa, é expressa em milivolt (Asphalt Institute MS-19).

No Quadro 3.6 apresentam-se alguns dos resultados obtidos num estudo acerca do potencial Z (Paranhos, 1990).

Quadro 3.6 – Potencial Z de diferentes agregados (Paranhos, 1990)

Agregado	Potencial Z (mV)	Adesividade em função de dois tipos de emulsão (% área)		Teor dos minerais		
		Tipo 1	Tipo 2	SiO_2	CaO	MgO
Calcário	-10 ± 2	80 - 90	50 - 70	6,2	52,8	1,4
Dolomites	-15 ± 1	80 - 90	80 - 90	0,8	31,1	19,9
Granito 1	-20 ± 2	100	100	73	0,9	0,5
Granito 2	-19 ± 2	80 - 90	80 - 90	66,8	3,8	0,8
Granito 3	-18 ± 2	80 - 90	100	66,3	0,7	2,9
Granito 4	-31 ± 1	100	100	65,5	1,2	2,9
Basalto	-14 ± 2	80 - 90	80 - 90	48,9	9,4	4,5

Da leitura do Quadro 3.6 é possível verificar que para os valores extremos do potencial Z, ocorrem também os comportamentos extremos em termos de adesividade agregado--emulsão. Os valores mais altos do potencial Z (-10±2 mV) correspondem a adesividades mais deficientes, enquanto que os valores mais baixos (-31±1 mV) correspondem a 100% de adesividade para os dois tipos de emulsão utilizada. Observa-se que embora as piores adesividades correspondam, em geral, a teores em sílica mais reduzidos, e os mais altos, a teores em sílica mais elevados, os extremos de ambas as grandezas não coincidem.

Deve-se notar que, o procedimento adequado em obra é o de ajustar o tipo de emulsão aos agregados disponíveis. Para este efeito, não basta apenas o conhecimento da natureza dos agregados, uma vez que a adesividade agregado-emulsão, depende também de outros factores. Assim, no estudo de formulação das misturas, é sempre necessário a avaliar este aspecto através da realização de ensaios laboratoriais específicos para esse efeito, conforme se descreverá mais detalhadamente na subsecção seguinte.

A qualidade dos agregados é aferida através de ensaios de diversos tipos, destinados a classificá-los segundo as sua características físicas (granulometria, índice de vazios, etc.), mecânicas (resistência à abrasão, resistência ao impacto), composição (quantidade de argila e a sua natureza), etc. Nos Quadros 3.7 e 3.8 apresentam-se as propriedades mais usuais para classificação das diversas características dos agregados e que são contempladas pela norma europeia relativa aos agregados para misturas betuminosas (norma europeia EN 13043: 2002).

Quadro 3.7 – Propriedades mais usuais para classificação dos agregados grossos e finos a utilizar em misturas betuminosas

Propriedades geométricas	Propriedades físicas
• Granulometria • Teor em finos • Qualidade dos finos (azul de metileno) • Forma das partículas do agregado grosso (índice de achatamento; índice de forma) • Percentagem de superfícies britadas e fracturadas no agregado grosso • Angulosidade do agregado fino	• Resistência à fragmentação dos agregados grossos (coeficiente de Los Angeles; resistência por impacto) • Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste (coeficiente de polimento acelerado) • Resistência à abrasão • Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso (coeficiente micro-Deval) • Massa volúmica das partículas e absorção de água • Baridade • Durabilidade (absorção de água e resistência oa gelo-degelo) • Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos

Quadro 3.8 – Propriedades mais usuais para classificação do filer

Propriedades geométricas	Propriedades físicas	Requisitos químicos
• Granulometria • Finos nocivos (azul de metilino)	• Teor em água • Massa volúmica das partículas • Características rigidificantes (vazios de filer compactado (Ridgen); variação da temperatura de anel e bola)	• Solubilidade em água • Susceptibilidade à água • Teor em carbonato de cálcio de filer calcário • Teor em hidróxido de cálcio do filer aditivado

A generalidade das especificações contidas nos actuais Cadernos de Encargos relativas aos agregados a empregar no fabrico das misturas do tipo "macadame betuminoso a frio" preconiza valores para as seguintes características do agregado: composição granulométrica, resistência à fragmentação (Los Angeles), equivalente de areia e, absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes.

Quanto à composição granulométrica, o Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) especifica que a mistura composta por "material de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa" deve ser fabricada a partir das seguintes fracções granulométricas, expressas através da sua dimensão nominal em milímetros:

- 0/4, 4/10, 10/20; ou em alternativa
- 0/6, 6/10, 10/20.

A composição granulométrica obtida a partir destas fracções granulométricas deve ainda respeitar obrigatoriamente um dado fuso granulométrico, cuja dimensão máxima permitida é de 25 mm.

As especificações espanholas em preparação para "*grava-emulsión*" (Probisa, 1998a), indicam três opções para a granulometria da mistura de agregados. Dois dos fusos granulométricos preconizados permitem uma dimensão máxima do agregado de 25 mm, e o terceiro uma dimensão máxima de 40 mm.

As especificações francesas (NF P 98-121, 1993), distinguem três tipos de "*graves-émulsion*", consoante o teor em ligante da mistura. As "*graves-émulsion*" do tipo 1 ($GE1_F$), de granulometria 0/10 ou 0/14, são geralmente utilizadas em trabalhos de regularização. As "*graves-émulsion*" do tipo 2 e 3 ($GE2_F$ e $GE3_F$), de granulometrias 0/10, 0/14 ou 0/20, consoante a espessura da camada, são utilizadas em camadas de base. Nestas especificações é recomendada uma determinada curva granulométrica para os agregados que compõem cada uma das "*graves-émulsion*", que poderá eventualmente ser alterada, tendo em vista a optimização da mistura.

Nas especificações para *"bétons bitumineux à froid"* (BBF) (NF P 98-139, 1994), consideram-se as granulometrias 0/10 e 1/14.

Segundo o manual do *Asphalt Institute* sobre emulsões betuminosas (MS-19) uma vasta gama de ganulometrias do agregado podem ser utilizados no fabrico de misturas a frio. Para misturas densas (*Dense Graded Emulsion Mixtures*, DGEM) são recomendados 5 tipos de fusos diferentes, correspondendo a dimensões máximas dos agregados de 50 mm, 37,5 mm, 25,0 mm, 19,0 mm e 12,5 mm.

Nos Quadros 3.9 e 3.10 apresentam-se os fusos granulométricos indicados nestes documentos.

Quadro 3.9 - Fusos granulométricos especificados nos documentos de referência portugueses e norte-americanos para misturas betuminosas a frio

		JAE	Asphalt Institute MS-19				
		ABGETE	DGEM1	DGEM2	DGEM3	DGEM4	DGEM5
Fuso granulométrico da mistura de agregados (percentagem acumulada do material que passa)	Abertura das malhas dos peneiros						
	50 mm (2")		100				
	37,5 mm (1 ½")		90-100	100			
	25,0 mm (1")	100	–	90-100	100		
	19,0 mm (3/4")	90-100	60-80	–	90-100	100	
	12,5 mm (1/2")	65-90	–	60-80	–	90-100	100
	9,51 mm (3/8")	55-75	–	–	60-80	–	90-100
	4,75 mm (nº4)	40-58	20-55	25-60	35-65	45-70	60-80
	2,36 mm (nº8)	–	10-40	15-45	20-50	25-55	35-65
	2,00 mm (nº10)	25-40	–	–	–	–	–
	0,850 mm (nº20)	16-28	–	–	–	–	–
	0,425 mm (nº40)	12-22	–	–	–	–	–
	0,300 mm (nº50)	–	2-16	3-18	3-20	5-20	6-25
	0,180 mm (nº80)	8-16	–	–	–	–	–
	0,075 mm (nº200)	4-10	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10

Quadro 3.10 - Fusos granulométricos especificados nos documentos de referência espanhóis e franceses para misturas betuminosas a frio

Fuso granulométrico da mistura de agregados (percentagem acumulada do material que passa)	Abertura das malhas dos peneiros	Especificações espanholas (em preparação)			Especificações francesas			
					$GE2_F$ ou $GE3_F$			BBF
		$GE1_E$	$GE2_E$	$GE3_E$	0/10	0/14	0/20	0/10 ou 0/14
	40 mm			100				
	25 mm	100	100	75-100				
	20 mm	80-100	80-100	–			95	
	14 mm	–	–	–		95	–	
	10 mm	60-75	50-80	–	95	–	–	
	6,3 mm	–	–	–	55	55	55	65
	5,0 mm	43-58	30-60	30-65	–	–	–	–
	2,5 mm	30-45	20-45	20-54	–	–	–	–
	2,0 mm	–	–	–	38	58	33	35
	1,25 mm	–	15-35	–	–	–	–	–
	0,630 mm	15-25	10-25	10-36	–	–	–	–
	0,500 mm	–	–	–	18	18	17	–
	0,320 mm	10-18	8-20	–	–	–	–	–
	0,160 mm	6-13	5-15	–	–	–	–	–
	0,080 mm	4-8	3-12	3-15	7	7	6	7

Quanto às misturas recicladas a frio, no tratado sobre reciclagem de pavimentos com emulsão betuminosa de Fernández del Campo (1998), recomendam-se, também, fusos granulométricos para o "material final reciclado e eventualmente corrigido". Estes fusos diferenciam-se em duas famílias: uma primeira de qualidade mais "estrita" (FC-cs1 e FC-cs2) e, uma segunda, com maior tolerância, para camadas "inferiores" (FC-ci) e de menores exigências do ponto de vista das propriedades mecânicas.

Nas especificações espanholas (PG-4 – Art. 20, 2001) preconizam-se dois fusos granulométricos, RE1 e RE2, sendo o primeiro (RE1) para utilização em aplicações com espessuras superiores a dez centímetros (10 cm) e o segundo (RE2) para espessuras compreendidas entre seis (6) e dez centímetros (10 cm).

No manual de reciclagem a frio do Asphalt Institute (MS-21, 1983) são recomendados quatro fusos granulométricos para misturas densas, consoante se tratem de agregados bem graduados (D), de uma areia (E, F) ou de solo arenoso (G). Neste trabalho faz-se referência apenas ao primeiro, por se considerar ser o único comparável com o tipo de materiais em estudo.

No Quadro 3.11 apresentam-se os fusos granulométricos indicados nos documentos anteriores.

Quadro 3.11 – Fusos granulométricos especificados nos documentos de referência para misturas recicladas com emulsão

		Recomendações de Fernández del Campo			Especificações espanholas		Recomen-dações do Asphalt Institute
		FC-cs1	FC-cs2	FC-ci	RE1	RE2	D
Fuso granulométrico da mistura de agregados (percentagem acumulada do material que passa)	Abertura das malhas dos peneiros						
	40 mm			100	100		
	37,5 mm			–	–		100
	25 mm		100	75-100	78-100	100	80-100
	20 mm	100	80-95	–	69-95	80-100	–
	12,5 mm	80-95	68-82	–	52-82	62-89	–
	10 mm	70-84	60-75	–	–	–	–
	8 mm	–	–	–	40-70	49-77	–
	5 mm	47-62	43-58	30-65	–	–	–
	4,75 mm	–	–	–	–	–	25-85
	4 mm	–	–	–	25-53	31-58	–
	2,5 mm	30-45	30-45	20-54	–	–	–
	2 mm	–	–	–	15-40	19-42	–
	0,630 mm	15-25	15-25	10-36	–	–	–
	0,500 mm	–	–	–	2-20	2-20	–
	0,320 mm	10-18	10-18	–	–	–	–
	0,250 mm	–	–	–	0-10	0-10	–
	0,080 mm	4-10	4-10	4-15	–	–	–
	0,075 mm	–	–	–	–	–	3-15
	0,063 mm	–	–	–	0-3	0-3	–

Conforme se depreende da observação dos Quadros 3.9 a 3.11, o fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos da JAE é muito semelhante a um dos fusos granulométricos preconizados nas especificações espanholas em preparação para "grave-emulsão" (GE1) e a um dos fusos recomendados no tratado de Fernández del Campo, para camadas de pavimento reciclado a frio com algumas exigências estruturais (FC-cs2).

O fuso recomendado no tratado de Fernández del Campo para camadas "inferiores" - de menores exigências estruturais, é praticamente igual ao fuso mais permissivo preconizado para grave-emulsão (GE3), de acordo com as especificações espanholas em preparação.

As exigências relativas ao valor de equivalente de areia (E.A.) para a mistura de agregados a empregar no fabrico das misturas betuminosas a frio são, de acordo com os diversos documentos utilizados como referência, as que a seguir se descriminam:

- Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) para mistura de agregados para "camadas de misturas betuminosas a frio, em agregado britado de granulometria extensa, tratado com emulsão betuminosa, com características de base" e/ou "de regularização" (ensaio realizado segundo a especificação LNEC E 199):
  - E.A. ≥ 40 %;
- Especificações espanholas em preparação para "*grava-emulsión*"
  - Em função da classe de tráfego e da situação da camada:

Classes de tráfego (Espanha)	Pavimento	Base	Subbase
T0, T1 (TMDp≥800)	-	-	E.A. ≥ 35 %
T2 (200≤TMDp<800)	-	E.A. ≥ 40 %	E.A. ≥ 30 %
T3 (50≤TMDp<200)	E.A. ≥ 40 %	E.A. ≥ 35 %	E.A. ≥ 30 %
T4 (TMDp<50)	E.A. ≥ 35 %	E.A. ≥ 30 %	E.A. ≥ 25%

- Manual de misturas betuminosas a frio do "Asphalt Institute" (MS-14, 1997; MS-19);
  - E.A. ≥ 35 % ;

No que respeita às outras características dos agregados exigidas no Caderno de Encargos tipo da JAE, os valores a obter são seguintes:

- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes (NP 954, NP 581):
  - Gravilha 12/20: ≤ 3%;
  - Gravilha 6/12: ≤ 3%;
  - Pó 0/6: ≤ 3%
- Perda por desgaste na máquina de *Los Angeles* (LNEC E 237): ≤ 40% (granulometria A)

No que concerne ao ensaio de desgaste de *Los Angeles*, o Caderno de Encargos tipo da JAE preconiza para estas misturas, que o ensaio seja efectuado com a granulometria A, para cuja composição é necessário ter 1250 g de material passado no peneiro ASTM 1 ½" e retido no 1" para além do material mais fino. No entanto, conforme acima apresentado, para as misturas do tipo ABGETE é preconizado que a fracção mais grossa a utilizar na mistura de agregados seja de dimensão nominal 12/20 mm. Assim, em muitos casos, não é possível

para este tipo de misturas, realizar o ensaio com granulometria A, mas sim com granulometria B. Note-se que a granulometria B corresponde a uma composição em que a fracção mais grossa utilizada é constituida por 2500 g de material que passa no peneiro ASTM ¾" e é retido no peneiro ½". Esta é também a granulometria recomendada para as misturas a quente excepto para as misturas com características de base e para o macadame betuminoso com características de regularização.

3.3.4 - A emulsão como ligante das misturas betuminosas para pavimentação

O papel final da emulsão é o de actuar como ligante dos agregados envolvendo-os e mantendo-os fixos nas posições que resultaram da compactação.

Para que a emulsão possa desempenhar o papel de ligante, é necessário que a fase aquosa se separe do betume e se evapore. O processo que conduz à separação é designado por "rotura" da emulsão.

A rotura é iniciada quando o betume se começa a separar da fase aquosa (constituída maioritariamente por água), os glóbulos de betume se começam a juntar formando uma película que envolve os agregados. A água separada da emulsão deve então ser eliminada, dando-se a cura da mistura.

Habitualmente considera-se que o processo de rotura e cura envolve cinco fases distintas (Glet, 2000). A primeira fase corresponde à situação em que os glóbulos de betume se encontram individualizados e se podem mover livremente nessas condições. É na primeira fase que podem ocorrer as diversas operações de fabrico, colocação e compactação da mistura. Durante a compactação, uma parte da água é eliminada, devendo a restante sê-lo por evaporação.

As fases que se seguem encontram-se esquematicamente representadas na Fig. 3.12.

Na segunda fase, decorre a coalescência que corresponde à junção dos glóbulos individuais em entidades de maior dimensão, diminuindo-se a sua mobilidade e começando a aumentar a consistência do material betuminoso. Na fase seguinte – fase 3 – deixam de existir partículas individuais de betume, apenas aglomerados dessas partículas em "blocos", separados da água da emulsão. O betume não constitui ainda um ligante, no sentido que ainda não proporciona coesão à mistura. Na fase 4, os diversos blocos estão ligados e começam a conferir coesão à mistura. Os blocos de betume passam a constituir a "fase contínua", deixando de estar dispersos em água, inicia-se a "solidificação" e dá-se o aumento de resistência da mistura.

A quinta e última fase, corresponde à situação em que o betume pode ser considerado como contínuo envolvendo completamente as diversas partículas de agregado. Toda a água em excesso foi eliminada e a mistura está curada, e exibe agora todas as suas capacidades de resistência e durabilidade para que foi dimensionada.

Uma emulsão betuminosa apresenta normalmente uma cor castanha e à medida que o processo de rotura se verifica, devido à separação da água, começam a formar-se pequenos aglomerados de betume com a cor negra. Com a conclusão desse processo, resulta um revestimento de betume, de cor negra, em torno dos agregados, com o aspecto final da mistura betuminosa.

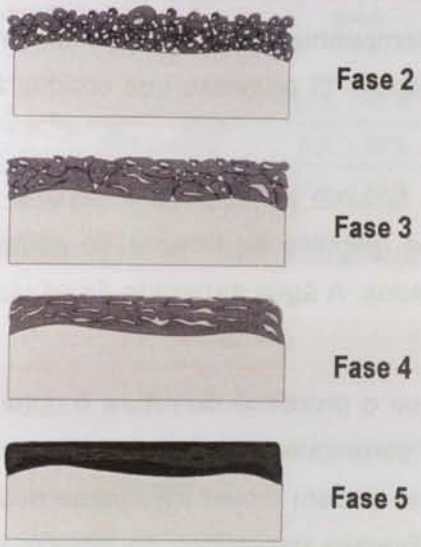


Fig. 3.12 – Esquema da rotura da emulsão e processo de cura da mistura betuminosa a frio (adaptado de Austroads, 2002)

Os fenómenos que regem a rotura de uma emulsão aniónica devem-se essencialmente à eliminação da água. Com a diminuição da quantidade de água contida na mistura, quer devido à sua expulsão durante a compactação, quer devido à sua evaporação, os glóbulos de betume adjacentes têm condições para entrarem em contacto uns com os outros, formando gotas com "diâmetros" cada vez maiores. A rotura das emulsões aniónicas é, pelas razões apontadas, bastante mais condicionada pelas condições atmosféricas, como sejam, a humidade do ar e a temperatura, do que no caso das catiónicas.

A rotura de uma emulsão catiónica deve-se basicamente a reacções físico-químicas entre o agente emulsionante e o agregado, o que se traduz por uma rotura da emulsão mais rápida (Fernández del Campo, 1983; Potti, 1999).

Uma série de reacções ocorrem entre os minerais presentes no agregado e a emulsão betuminosa. Nas Figuras 3.13 e 3.14 ilustra-se este processo para o caso de uma emulsão catiónica na presença respectivamente de um agregado puramente calcário e de um agregado puramente silicioso.

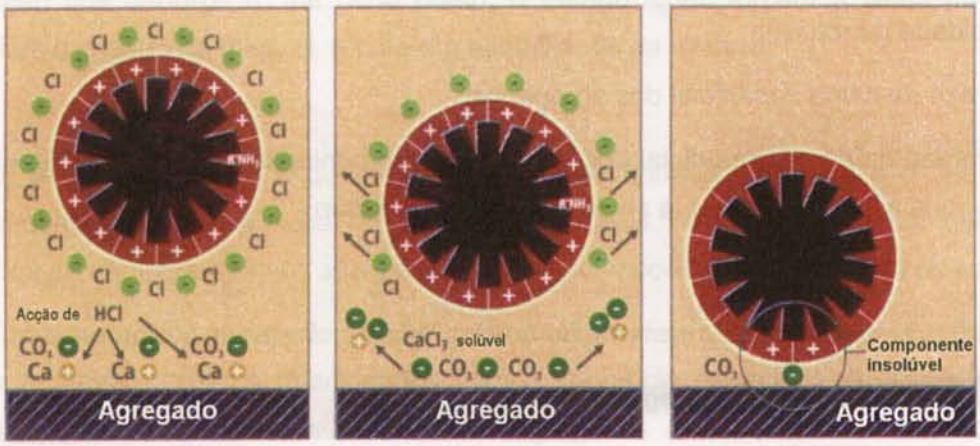


Fig. 3.13 – Rotura por adsorção de uma emulsão catiónica na presença de um agregado calcário (adaptado de Serfass, 2002)



Fig. 3.14 – Rotura por adsorção de uma emulsão catiónica na presença de um agregado silicioso (adaptado de Serfass, 2002)

Conforme tem sido descrito ao longo da presente secção, existem diversos factores que desempenham um papel importante na rotura e cura da emulsão. Para se atingirem os

melhores resultados é necessário controlar todos os aspectos enumerados, por forma a serem cumpridos os requisitos específicos exigidos para uma dada aplicação da mistura betuminosa a frio.

Seguidamente sintetizam-se os principais factores que afectam a rotura e a cura da emulsão (Asphalt Institute MS-19; Austroads, 2002):

- *Tipo e quantidade de emulsionante*

  O tipo de emulsionante utilizado (aniónico ou catiónico) bem como a sua concentração na emulsão são determinantes para a estabilidade da emulsão frente aos agregados (velocidade de rotura).

- *Natureza da carga superficial dos agregados*

  A natureza da carga superficial dos agregados, em conjugação com o tipo de emulsão, condiciona a velocidade a que se dá a rotura da emulsão.

- *Dureza do betume base*

  Emulsões com betumes de penetração nominal inferior, aceleram a rotura e cura.

- *Superfície específica dos agregados*

  Uma superfície específica elevada, excesso de finos, ou agregados sujos, aceleram a rotura da emulsão.

  Assim, a velocidade de rotura de uma determinada emulsão betuminosa será mais elevada quanto maior for a superfície específica do agregado de uma mesma natureza mineralógica, por exemplo, a velocidade de rotura será mais elevada sobre uma gravilha 6/10 mm do que sobre uma gravilha 10/20 mm.

- *Condições atmosféricas*

  A temperatura, a humidade e a velocidade do vento influênciam a evaporação da água e consequentemente a rotura e cura da mistura.

  Apesar de, em geral, a cura se dar mais rapidamente com temperaturas mais elevadas, tal não constitui regra, uma vez que, temperaturas mais elevadas podem causar o aparecimento de uma película que faz um efeito de selagem impedindo a água de se evaporar e atrasando a cura.

  Por outro lado, existem actualmente emulsões que permitem que a rotura se processe também com temperaturas reduzidas.

- *Teor em água dos agregados*

A utilização de agregados húmidos facilita o processo de revestimento, o que é especialmente importante no caso de se utilizarem emulsões de rotura lenta, tendo, no entanto, tendência para dificultar a cura porque aumentam o tempo necessário para a eliminação da água.

- *Absorção de água dos agregados*

  Agregados rugosos e porosos aceleram o processo, absorvendo a água da emulsão.

- *Agitação/acções mecânicas*

  A acção dos cilindros e, até certo ponto, o tráfego lento, forçam a saída da água e auxiliam a coesão da mistura, a cura e a estabilidade da mistura.

Enquanto que nas misturas a quente, as interacções entre o agregado e o betume são essencialmente de natureza física, no caso das misturas a frio com emulsão betuminosa, as interacções de natureza química são igualmente muito importantes.

A combinação emulsão-agregado é função da reactividade do sistema, que é influenciada quer por fenómenos físicos relacionados com a superfície específica do agregado e da emulsão e com o estado da superfície dos agregados (microtextura, microfendilhação, microporosidade, etc); quer por reacções químicas, em função dos diferentes minerais que constituem o agregado.

De referir que a fracção fina dos agregados é particularmente reactiva em presença da emulsão, o que conduz a que esta se fixe preferencialmente naquela fracção. Este aspecto constitui a principal razão pela qual durante algum tempo as misturas betuminosas a frio estiveram limitadas a dois tipos: misturas do tipo *"grave-émulsion"* (*vd* Fig. 3.1), misturas que apresentam uma fracção de mastique rica em betume; e misturas abertas a frio, misturas que não contêm fracção fina (Serfass, 2002).

No entanto, nos últimos anos, os progressos que se registaram não só no campo das emulsões betuminosas com o aparecimento de novas formulações, mas também no que respeita aos processos de envolvimento da mistura (separação das fracções finas e grossas, pré-envolvimento das duas fracções, e mistura de ambas), têm permitido o desenvolvimento de misturas betuminosas densas a frio em que o betume se encontra uniformemente distribuído na mistura.

No caso das misturas a frio, um outro aspecto que se reveste pois de especial importância, é o grau de envolvimento obtido na mistura, que pode ser avaliado através de uma quantificação da percentagem da superfície dos agregados envolvida. Deste aspecto

depende por exemplo, a viabilidade de se aplicar este tipo de misturas em camadas de desgaste onde, devido às acções dos agentes atmosféricos e do tráfego, a existência de agregados pobremente envolvidos conduz normalmente à sua desagregação precoce.

Na Fig. 3.15 podem-se observar três misturas fabricadas utilizando diversas amostras de uma mesma mistura de agregados, mas utilizando três tipos de emulsões betuminosas diferentes. Nessa figura verifica-se, por simples observação visual, que para uma das emulsões utilizadas, o grau de envolvimento dos agregados é manifestamente deficiente, pelo que para o tipo de agregados em causa a emulsão utilizada deve ser rejeitada.



Fig. 3.15 – Ensaios de envolvimento de uma mistura de agregados para três tipos diferentes de emulsão betuminosa

No que concerne ao envolvimento dos agregados por parte do ligante, tem ainda sido observado ocasionalmente (Serfass, 2002) que certas misturas que apresentam um bom grau de envolvimento no final do seu fabrico, já não o fazem após o seu transporte e espalhamento em obra. Portanto um outro aspecto a considerar é a "adesividade" desse envolvimento, sendo pois recomendado que se avalie a tendência da perda de aderência entre os agregados e a emulsão sob efeito de acções mecânicas no manuseamento da mistura.

A obtenção de uma mistura com uma coesão elevada, é outro factor de maior importância no que se refere às misturas a frio. No entanto, a obtenção de uma elevada coesão num curto espaço de tempo, pode implicar uma má trabalhabilidade da mistura, prejudicando desta forma a sua correcta aplicação em obra. Para se obterem níveis satisfatórios de compacidade e regularidade em obra, é pois necessário conseguir-se um bom compromisso entre a coesão inicial e a trabalhabilidade da mistura (Serfass, 2002). Tal é conseguido à custa da optimização dos seguintes aspectos:

- Parâmetros de formulação da mistura, como sejam, a granulometria dos agregados, o tipo de emulsão e do betume utilizado no seu fabrico;
- A selecção e ajustamento dos equipamentos de espalhamento e compactação das misturas em obra;
- Os métodos de aplicação das misturas.

Quando o ganho de coesão for demasiado lento, não permitindo que a mistura tenha a resistência suficiente para num prazo razoável, permitir a abertura ao tráfego do pavimento, deve-se proceder a um novo estudo de formulação da mesma.

Na secção seguinte apresentam-se alguns aspectos gerais relativos à formulação e controlo de qualidade de misturas a frio, obtidas quer através de reciclagem, quer através de materiais novos.

3.4 - Formulação de misturas a frio

3.4.1 - Aspectos gerais

Para o fabrico de uma dada mistura betuminosa estuda-se em laboratório a sua composição quanto à qualidade e quantidade dos materiais a utilizar, por forma a que a mistura apresente um bom comportamento quando em serviço, sob a acção do tráfego e dos agentes atmosféricos.

No que diz respeito à formulação de misturas densas a frio, não existem ainda metodologias e critérios unanimemente aceites pelas autoridades competentes nos diversos países onde se aplicam estes tipos de materiais. No entanto, os métodos de formulação apresentam, na sua generalidade, os mesmos objectivos: uma vez estabelecida a composição da mistura de agregados, determina-se a proporção óptima dos materiais constituintes (mistura de agregados + emulsão betuminosa + água + outros aditivos) por forma a obter-se uma boa

trabalhabilidade da mistura betuminosa durante o fabrico e aplicação da camada, bem como adequadas características de estabilidade e comportamento mecânico durante a vida útil do pavimento onde a mistura é aplicada.

Genericamente, os passos a seguir na formulação deste tipo de misturas betuminosas, são os seguintes:

- Selecção do tipo de agregados e respectiva composição granulométrica, por forma a cumprirem-se certos requisitos mínimos, em função do tipo de mistura a executar;
- Selecção do tipo de emulsão betuminosa em função dos aspectos relacionados com o tipo de aplicação, como por exemplo, dureza do betume residual da emulsão, e com a natureza dos agregados;
- Avaliação preliminar da compatibilidade entre a mistura de agregados e a emulsão betuminosa (ensaios de envolvimento);
- Determinação da quantidade de água a adicionar aos agregados no fabrico da mistura betuminosa, tendo em vista a obter-se um grau de recobrimento dos agregados (por parte do ligante) satisfatório;
- Determinação da quantidade de água necessária, quer para uma boa trabalhabilidade da mistura, quer para a optimização da compactação da camada;
- Determinação do teor em ligante (betume residual) necessário para a obtenção de características mecânicas e de durabilidade adequadas;
- Eventual ajuste da quantidade de água necessária, face à quantidade de emulsão empregue na mistura.

A formulação de misturas recicladas a frio rege-se pelos mesmos objectivos que os das misturas "novas". No entanto, deve-se prestar especial atenção a uma série de aspectos específicos desta técnica, resultantes do facto de neste tipo particular de misturas betuminosas a frio, a fonte de agregados ser o próprio pavimento existente a reabilitar:

- Os "agregados" serão constituídos pelo material fresado do pavimento existente, pelo que a mistura de agregados pode apresentar maior variabilidade que os convencionais agregados "novos". Assim, torna-se indispensável proceder a uma caracterização detalhada dos materiais que constituem o pavimento com o fim de avaliar aquela variabilidade, bem como avaliar a viabilidade de reciclar os referidos materiais. Para tal, é indispensável assegurar que as amostras recolhidas sejam representativas;

- A natureza dos agregados vai depender essencialmente da espessura a reciclar e da proporção entre os materiais que constituem as camadas do pavimento a reciclar. Desta forma, e dependendo não só das características do pavimento existente, mas também da espessura a ser reciclada, o material a ser fresado poderá estar contaminado; neste caso, quando da formulação da mistura dever-se-á ter em conta a conveniência de usar cal e/ou cimento para corrigir aquela situação;
- A granulometria dos agregados dependerá não só dos materiais a serem reciclados mas também da máquina recicladora que será utilizada para o efeito. O material fresado poderá não ter uma granulometria apropriada para a mistura betuminosa densa a frio que se pretende, o que poderá ser resolvido pela adição de agregados novos e/ou por ajustamentos na máquina recicladora, nomeadamente na velocidade de avanço;
- Para finalizar, salienta-se que as amostras utilizadas na formulação da mistura devem ser extraídas do pavimento existente utilizando um equipamento que exerça, tanto quanto possível, uma acção de desagregação do material semelhante à do equipamento de reciclagem. Só desta forma se poderá garantir que as amostras recolhidas são representativas.

Uma vez determinada em laboratório a composição da mistura betuminosa a frio, devem-se realizar trechos experimentais por forma a afinar os processos de fabrico e aplicação da mistura e a comprovar as suas propriedades finais em obra, obtendo-se a fórmula de trabalho. Este aspecto, reveste-se ainda de maior importância no caso das misturas recicladas *in situ* a frio.

3.4.2 - Descrição sumária de métodos de formulação utilizados em vários Países

No que respeita à formulação de misturas densas a frio, nas quais se incluem as misturas de agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa utilizadas em Portugal, bem como as misturas recicladas a frio com emulsão betuminosa, efectuou-se recentemente (Gonçalves, 2000; Antunes *et al.*, 2000c) uma análise comparativa de métodos de formulação utilizados em diferentes países, tendo sido seleccionados três métodos com vista a um estudo mais pormenorizado:

- "Método *Marshall* modificado", também designado por "Método da Universidade de *Illinois*" (E.U.A.) (Asphalt Institute MS-14, 1997).

- Método correntemente utilizado em Espanha, seguidamente designado por "Método Espanhol". Este método baseia-se nas normas espanholas NLT-161/84 e NLT-162/84; que foram desenvolvidas para misturas a quente. Por forma a ter em conta as especificidades das misturas a frio, Fernández del Campo (1998) propõe que após a preparação de provetes segundo a NLT-161/84, estes sejam submetidos a uma cura acelerada (um dia à temperatura ambiente e três dias a 60°C), antes de serem ensaiados à "imersão-compressão" segundo a NLT-162/84. Este procedimento de cura acelerada tem sido utilizado, quer em Espanha, quer em Portugal.
- Método recomendado nas especificações AFNOR (França) (Norma Francesa AFNOR NF P 98-121, 1993 e NF P 98-251-4, 1992).

Estes três métodos de formulação apresentam os mesmos objectivos gerais, que foram resumidos na secção anterior.

O recurso a ensaios de "imersão-compressão" (*vd* subsecção 2.3.2.5) tendo em vista a caracterização mecânica das misturas e a avaliação da sua susceptibilidade à acção da água, é comum a estes três métodos, embora eles sejam distintos, tanto no que se refere à organização do estudo de formulação, como aos próprios processos de preparação, cura e condicionamento de provetes e de ensaio dos mesmos.

Assim, uma vez caracterizados os materiais intervenientes na mistura e estabelecida a fórmula de trabalho para a obtenção da mistura de agregados, os principais passos a seguir nos estudos de formulação descrevem-se em seguida para cada um dos métodos.

Tanto no caso do método *Marshall* modificado, como no caso do método "Espanhol" (no qual se baseia a metodologia correntemente adoptada no nosso país), o estudo inicia-se pela determinação do teor em água óptimo para garantir um adequado recobrimento dos agregados, sendo posteriormente determinado o teor em líquidos óptimo para compactação. Após a obtenção destes valores, são moldados provetes para ensaios de "imersão--compressão", cujos resultados permitem a determinação da percentagem óptima de betume residual.

Uma das diferenças entre os dois métodos (*Marshall* e "Espanhol") reside na metodologia para a determinação do teor óptimo em líquidos para a compactação que, no caso do segundo, consiste na realização do ensaio *Proctor* modificado sobre a mistura de agregados e, no primeiro caso, na moldagem de provetes com diversos teores em água utilizando o compactador *Marshall*, e na análise da variação das respectivas baridades e forças de rotura *Marshall*, em função do teor em água de compactação. No caso do método *Marshall*

modificado, estes provetes são preparados com uma percentagem de emulsão previamente estimada com base na superfície específica da mistura de agregados.

A abordagem utilizada no método adoptado em França reside na fixação prévia do teor em betume residual da mistura, obedecendo a valores mínimos preconizados em função do tipo de camada a que esta se destina e da granulometria dos agregados, e na posterior determinação do teor óptimo em líquidos, com base em resultados de ensaios de "imersão--compressão".

Para além das diferenças relacionadas com a organização dos estudos de formulação, a que se fez referência acima, existem diferenças importantes relacionadas com o método utilizado na determinação da resistência mecânica das misturas e respectiva susceptibilidade à água, através de ensaios de "imersão-compressão".

As principais diferenças relativamente aos ensaios de "imersão-compressão", resumem-se no Quadro 3.12, onde se pode constatar que existe uma grande disparidade entre os vários métodos, no que concerne ao processo de moldagem, de cura e condicionamento dos provetes a ensaiar, sendo que, no caso do método *Marshall* modificado, o tipo de ensaio realizado é também distinto dos outros dois, correspondendo a um estado de tensão complexo no interior do provete.

No que concerne à cura a que são submetidos os provetes ensaiados em laboratório, cabe aqui referir que o método que tem sido adoptado em Portugal, é o que tem sido utilizado em Espanha e recomendado por Fernández. del Campo (1998), ou seja, de um dia ao ar, à temperatura ambiente, seguindo-se 3 dias ao ar, em estufa a 60ºC. A recente especificação espanhola para misturas recicladas (PG-4 – Art.º20, 2001) preconiza que a cura acelerada, seja realizada também em quatro dias, sendo que para os três últimos se reduz a temperatura de cura em estufa, de 60ºC para 50ºC. De facto, segundo estudos realizados por Tejeda (1999) verificou-se que a resistência obtida em ensaios de "imersão--compressão", segundo a norma espanhola NLT 162/84, obtida em provetes curados à temperatura ambiente durante 21 dias, é semelhante à resistência obtida em provetes submetidos a uma cura acelerada de 1 dia à temperatura ambiente e de 3 dias a 50ºC. Segundo este autor as características a considerar no projectos deste tipo de misturas a frio é a que corresponde à obtida ao fim de 21 dias de cura em condições normais.

Quadro 3.12 – Métodos de ensaio de "imersão-compressão" utilizados na formulação de misturas a frio

Ensaio de "imersão-compressão"		Método da Universidade de Illinois, EUA (Modificação do Método Marshall)	Método "Espanhol" (1) (Espanha)	Método AFNOR (França)
Moldagem dos provetes	Dimensão dos moldes	$\phi_{int.}$ = 101.1 mm h ≈ 76 mm	$\phi_{int.}$ = 101.1 mm h ≈ 174 mm	$\phi_{int.}$ = 120 mm h = 270 mm
	Compactação	Compactação Marshall (50 pancadas em cada topo)	Estática, de duplo efeito t=2/3 min. : p=0 a 21 MPa t=2 min. : p=21 MPa	Estática, de duplo efeito t=1 min. : p=0 a 10.6MPa t=5 min. : p=10.6 MPa
Cura		- 1 dia no molde, à temp. ambiente - 1 dia ao ar, a 38°C	- 2h no molde, à temp. ambiente - 1 dia ao ar, à temperatura ambiente - 3 dias ao ar, a 60°C	- 1 dia no molde, à temperatura ambiente - 7 dias ao ar, a 18°C e a 50% de humidade relativa
Condiciona-mento dos provetes	sem imersão	(ensaio)	- 4 dias ao ar, a 25°C - 2h em água, a 25°C	- 7 dias ao ar, a 18°C e a 50% de humidade relativa
	com imersão	- 1h no vacuo - 1h em água, a 22°C	- 4 dias em água, a 49°C - 2h ao ar, à temp. ambiente - 2h em água, a 25°C	- 7 dias em água, a 18°C
Ensaio de rotura (Resistência mecânica)		Compressão no estabilómetro "Marshall" (v=50.8 mm/min)	Compressão simples (v=5.08 mm/min)	Compressão simples (v=1 mm/s)

(1) O condicionamento dos provetes corresponde ao procedimento nº1 da norma NLT162/84

LEGENDA: $\phi_{int.}$ – diâmetro interior dos moldes; h – altura dos moldes;
t – tempo de carga; p – pressão de compactação;
v – velocidade de deformação durante a compressão.

Os valores especificados (Asphalt Institute MS-14, 1997) para provetes misturas ensaiadas segundo o método da Universidade de Illinois são os que se apresentam no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 – Critérios de formulação de misturas a frio - Método da Universidade de *Illinois*, EUA

Ensaio		Especificações
Ensaio com o estabilómetro *Marshall*	Estabilidade a 22,2°C	≥ 2224 N
	Perda de estabilidade, após saturação e imersão por vácuo	≤ 50 %
Envolvimento dos agregados		≥ 50 %

As especificações em preparação em Espanha (PROBISA, 1998a) variam consoante a classe de tráfego definida com base no Tráfego Médio Diário de pesados (TMD_p) e o tipo de camada, conforme se sintetiza no Quadro 3.14.

Quadro 3.14 – Critérios de formulação de misturas a frio - Método "Espanhol"

Classes de tráfego (Espanha)	Ensaio de imersão-compressão (NLT162/84)		
	Resistência "em seco"	Resistência após imersão	Resistência conservada
T0, T1 (TMDp≥800)	≥ 15 kN	≥ 12 kN	≥ 75%
T2 (200≤TMDp<800)	≥ 12 kN	≥ 10 kN	≥ 75%
T3 (50≤TMDp<200)	≥ 10 kN	≥ 7,5 kN	≥ 60%
T4 (TMDp<50)	≥ 7,5 kN	≥ 5 kN	≥ 50%

As especificações francesas AFNOR (NF P 98-121, 1993) distinguem três tipos de mistura betuminosa densa a frio do tipo "*grave-émulsion*", consoante o teor em ligante da mistura. As misturas do tipo 1, de granulometria 0/10 ou 0/14, são geralmente utilizadas em trabalhos de regularização. As misturas dos tipos 2 e 3, de granulometrias 0/10, 0/14 ou 0/20, consoante a espessura da camada, são utilizadas em camadas de base. Nestas especificações é recomendada uma determinada curva granulométrica para os agregados que compõem cada uma das "*graves-émulsion*", que poderá eventualmente ser alterada, tendo em vista a optimização da mistura.

Quadro 3.15 – Critérios de formulação de misturas a frio - Método AFNOR (França)

Ensaio		Especificações		
		Tipo de mistura		
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
	Teor em ligante	≥ 4,2 %	≥ 3,2 %	≥ 3,8 %
Ensaio *Duriez* (NF P 98-251-4)	Percentagem de vazios	-	≤ 15 %	≤ 13 %
	Resistência à compressão, sem imersão:			
	- com betume 180/220	-	≥ 2 MPa	≥ 2,5 MPa
	- com betume 80/100	-	≥ 3 MPa	≥ 3,5 MPa
	- com betume 50/70	-	≥ 3,5 MPa	≥ 4 MPa
	- com todos os outros ligantes de base	-	≥ 4 MPa	≥ 4 MPa
	Resistência conservada	≥ 0,55 (MPa/MPa)	≥ 0,55 (MPa/MPa)	≥ 0,55 (MPa/MPa)
Ensaio de compactação com a prensa de corte giratório (NF P 98-252)	Percentagem de vazios:			
	Com betume 180/220			
	- com 10 rotações	-	-	≤ 22 %
	- com 200 rotações	-	-	≤ 12 %
	Com as outras classes de betume de base			
	- com 10 rotações	-	-	≤ 22 %
	- com 200 rotações	-	-	≤ 15 %

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 (1998), 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 (PROBISA, 1998a). No referido Caderno de Encargos tipo da JAE, preconiza-se também 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 após imersão: $\geq 5\,000$ N
- Resistência conservada: $\geq 60\%$

Da comparação destes valores com as características mínimas de resistência preconizadas em Espanha (*vd* Quadro 3.14), verifica-se que o nível de exigência estabelecido em Portugal corresponde ao nível de exigência para classes de tráfego mais baixas (entre T3 e T4) do país vizinho. De acordo com a experiência adquirida no LNEC, no acompanhamento de obras onde estes tipos de misturas foram aplicados, tem-se podido 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.

3.4.3 - Análise comparativa de diferentes métodos de formulação

Conforme exposto na secção anterior, da análise comparativa entre três métodos de formulação para misturas densas a frio, ressalta o facto de cada um deles preconizar procedimentos diferentes entre si no que concerne à compactação dos provetes, à cura e ao condicionamento das misturas, e ao método de ensaio utilizado na caracterização mecânica das misturas.

No estudo experimental comparativo efectuado por Gonçalves (2000) entre as três metodologias de formulação seleccionadas utilizaram-se os materiais destinados ao fabrico de uma mistura de macadame betuminoso a frio a empregar na obra de reabilitação da EN120, que se descreverá mais adiante (secção 4.5).

Conforme se verá na secção 5.2, no âmbito da presente dissertação, foram posteriormente utilizados os materiais desta obra para a realização de outros estudos relativos aos métodos de formulação destas misturas, em particular, tendo-se estudado a influência de algumas modificações a alguns procedimentos preconizados, nomeadamente quanto à pressão de compactação dos provetes, por forma a simular melhor as condições verificadas em obra.

No que concerne ao estudo experimental comparativo entre as três metodologias seleccionadas, os principais resultados obtidos resumem-se Quadro 3.16, em termos de teores óptimos em água e em emulsão e correspondentes características físicas e mecânicas das misturas. Neste estudo houve que fazer algumas adaptações aos procedimentos preconizados no Quadro 3.12.

Quadro 3.16 – Resultados obtidos através de diferentes métodos de formulação (Gonçalves, 2000)

Método	Método da Universidade de Illinois, EUA (Modificação do Método Marshall)		Método Espanhol (Baseado nas Especificações NLT)		Método AFNOR (França)	
	Resultados	Especific.	Resultados	Especific. [2]	Resultados	Especific. [4]
Teor em emulsão óptimo	6,5 %	-	7,1 %	-	6,5 % [3]	
Teor em betume residual óptimo	4,0 %	-	4,3 %	≥2%; ≤5%	4,0 % [3]	≥ 3,2 %
Teor em líquidos óptimo	7,5 %	-	6,4 %		5,0 %	
Teor em água de adição óptimo	5,0%	-				
Baridade seca (dos provetes ensaiados à "imersão-compressão")	1,826 g/cm^3	-	2,343 g/cm^3		1,730 g/cm^3	
Rotura sem imersão [1]	22,75 kN	≥2,224 kN	24,28 kN	≥ 10 kN	2,16 MPa ou 24,43 kN	≥ 3,5 MPa ⇒ [5] ≥ 39,58 kN
Rotura após imersão [1]	17,21 kN	-	16,01 kN	≥ 7,5 kN	0,76MPa	-
Perda de resistência [1]	24 %	≤ 50 %	-		65 %	-
Resistência conservada [1]	76%	-	66 %	≥ 60 %	35 %	≥ 55 %
Percentagem de vazios total	32,5 %	-	-	-	31 %	≤ 15 %

(1) Valores correspondentes a grandezas distintas, determinadas nas condições expressas no Quadro 3.12;

(2) Para classes de tráfego com TMDp compreendido entre 50 e 200 e para camada de base ou regularização;

(3) Valor fixado para dar início ao estudo, não sendo pois, necessariamente o "óptimo"; Com efeito, uma vez que não foram atingidos os valores de resistência especificados, o estudo deveria ser prosseguido utilizando teores mais elevados de betume residual, o que não foi possível neste caso;

(4) Para uma mistura do Tipo 2 segundo a Norma Francesa NF P 98-121, ou seja, mistura com um teor em betume residual mínimo de 3,2%, e para um betume base 50/70.

(5) A Norma Francesa preconiza como critério de avaliação do comportamento dos provetes à compressão simples, um valor mínimo de resistência à rotura expresso em termos de tensão de compressão; tendo-se calculado a correspondente força mínima para o caso em apreço em que se utilizaram provetes de 120 mm de diâmetro.

Da observação dos resultados apresentados neste Quadro podemos verificar que os diferentes métodos seguidos conduzem a composições da mistura betuminosa distintas. Este facto não é surpreendente, uma vez que os métodos seguidos se diferenciam entre si em diversos aspectos importantes, tais como, o processo de compactação (estática/dinâmica), energia de compactação, cura, condicionamento e ensaio de resistência à rotura.

Os resultados obtidos permitiram extrair as seguintes conclusões principais:

- O estudo de formulação realizado segundo o método preconizado pela AFNOR não se pode considerar como concluído, uma vez que não foi possível obter uma mistura satisfazendo às especificações, tanto no que concerne às características de resistência à compressão sem imersão, como no que se refere à percentagem de vazios. De acordo

com o exposto por Gonçalves (2000), o estudo deveria ser repetido, utilizando um agregado com diferente composição granulométrica e/ou um diferente teor em betume residual. Não houve, no entanto, disponibilidade para o fazer;

- No caso do ensaio *Marshall*, constatou-se que o método de compactação conduzia à expulsão de finos da mistura, juntamente com a água.
- No que concerne à compactação de provetes para ensaios de imersão-compressão segundo as normas espanholas NLT 161/84 e 162/84 (que se baseiam nas normas ASTM), obtiveram-se baridades muito superiores aos valores obtidos por compactação pelo método *Duriez*. Anota-se que a pressão aplicada na compactação pelo método *Duriez* é bastante inferior à aplicada pelo método NLT, o que justifica a reduzida baridade obtida. No entanto, o método de compactação utilizado nestes casos, ou seja, a compressão estática de duplo efeito, parece ser, de entre os três, o mais adequado para este tipo de misturas.

3.5 - Fabrico e aplicação em obra

3.5.1 - Misturas fabricadas em central

Os trabalhos relativos à execução de camadas em misturas do tipo ABGETE, envolvem, de uma forma genérica, as seguintes etapas construtivas:

a) Fabrico da mistura em central;

b) Transporte da mistura até ao local onde decorrem os trabalhos;

c) Espalhamento da mistura;

d) Compactação da mistura.

Para o fabrico das misturas (etapa *a)*) utilizam-se centrais cuja configuração típica se apresentou na subsecção 2.3.2.5 do capítulo anterior.

Na Fig. 3.16 apresenta-se uma panorâmica geral de uma central deste tipo.



Fig. 3.16 – Panorâmica geral de uma central para o fabrico de misturas betuminosas a frio

Em geral, a central dispõe de três tremonhas para materiais granulares de diferentes dimensões, com alimentadores de banda, de caudal regulável. Todos os alimentadores descarregam num único transportador, iniciando-se aqui a mistura das várias fracções. Este transportador levará os agregados até à misturadora. A humidificação dos agregados que chegam à misturadora é feita por pulverizadores de água regulados electronicamente por um contador de impulsos.

Neste tipo de centrais, para controlar o caudal de emulsão a misturar, é frequente utilizar-se uma bomba de volume constante e velocidade regulável que garante, em cada momento, uma pressão de pulverização ajustada ao tempo de mistura, e que regula automaticamente a adição de emulsão proporcionalmente ao caudal de agregados que chega à misturadora.

Uma vez fabricada a mistura betuminosa, esta pode ser descarregada directamente para o camião de transporte (etapa *b)*), ou ficar armazenada na obra durante algumas horas, até ser transportada para o local onde será aplicada. Para este tipo de misturas, o tempo que decorre entre o seu fabrico e a sua aplicação em obra pode ser alargado até cerca de 24 h, o que constitui uma vantagem interessante relativamente às misturas a quente.

Cabe aqui referir que, quando a mistura fica algum tempo armazenada em obra, forma-se um género de crosta à superfície da zona exposta ao ar, indicadora de que a emulsão da mistura superficial já "rompeu" totalmente e a mistura já começou ganhar coesão. Quando

do transporte da mistura para o local onde decorrem os trabalhos, esta crosta deve ser removida.

Neste tipo de misturas, há ainda que ter em atenção, a dessecação (perda de água) entre o momento em que a mistura é fabricada e aquele em que é aplicada em obra. No Caderno de Encargos tipo da JAE (1998), recomenda-se que se tome como valor aproximado uma perda de cerca de 1% do teor em água, devendo este valor, no entanto, ser ajustado para cada lote de fabrico, tendo em conta não só o tempo de armazenamento e transporte mas também as condições atmosféricas. No caso das condições atmosféricas serem desfavoráveis, ou seja, no caso de previsão de alguma precipitação, ou no caso da temperatura ambiente ser muito elevada, deverá recobrir-se o material transportado com uma lona, por forma a minimizar-se a alteração do teor em água da mistura.

No Caderno de Encargos tipo da JAE, preconiza-se ainda que durante o tempo de transporte se evite uma segregação excessiva, e sobretudo, que não ocorra a rotura total da emulsão betuminosa senão durante o processo de compactação.

Uma vez colocada a mistura no local dos trabalhos de pavimentação, esta é descarregada para uma pavimentadora (etapa *c)*) do tipo das geralmente utilizadas para o espalhamento das misturas betuminosas convencionais, conforme se pode observar na Fig. 3.17.



Fig. 3.17 – Pormenor da chegada do camião de transporte da mistura de ABGETE ao local da obra e descarga da mistura para a pavimentadora para o seu espalhamento

Para a realização da etapa *d)* de compactação da camada em mistura a frio, recorre-se usualmente à passagem, em primeiro lugar, de um cilindro de rasto liso com vibração, para dar à mistura uma primeira compactação, seguindo-se um cilindro de pneus, que tem como

principal função favorecer a expulsão de água da mistura à medida que o material é compactado. Esta fase dos trabalhos representa-se na Fig. 3.18.

Salienta-se a importância do equipamento de compactação, que deve proporcionar a obtenção de resultados óptimos de compacidade, utilizando a mínima quantidade de água possível.



Fig. 3.18 – Aspecto das operações de compactação de uma camada em ABGETE

3.5.2 - Reciclagem a frio *in situ*

Conforme exposto na subsecção 2.3.3.2, os trabalhos de reciclagem de pavimento a frio *in situ*, compreendem, geralmente, as seguintes etapas construtivas:

a) Desagregação do pavimento existente por fresagem, até à profundidade estabelecida;

b) Adição de cimento, agregados e/ou cal, se previamente estabelecido na fórmula de trabalho;

c) Adição contínua de ligante betuminoso, e eventualmente, de água;

d) Mistura do material desagregado com os materiais adicionados;

e) Espalhamento da mistura assim constituída;

f) Compactação da mistura.

Actualmente, é frequente que as etapas *a)*, *c)*, *d)* e *e)* sejam realizadas através da passagem da máquina recicladora, tal como se ilustra na Fig. 3.19. A alimentação de água e emulsão à recicladora realiza-se directamente por meio de cisternas ligadas à recicladora, conforme se pode observar na Fig. 3.20. De acordo com o referido na subsecção 2.3.3.4, existem actualmente sistemas que permitem a adição de cimento/calda de cimento juntamente com a passagem da máquina recicladora (etapa *b)*).

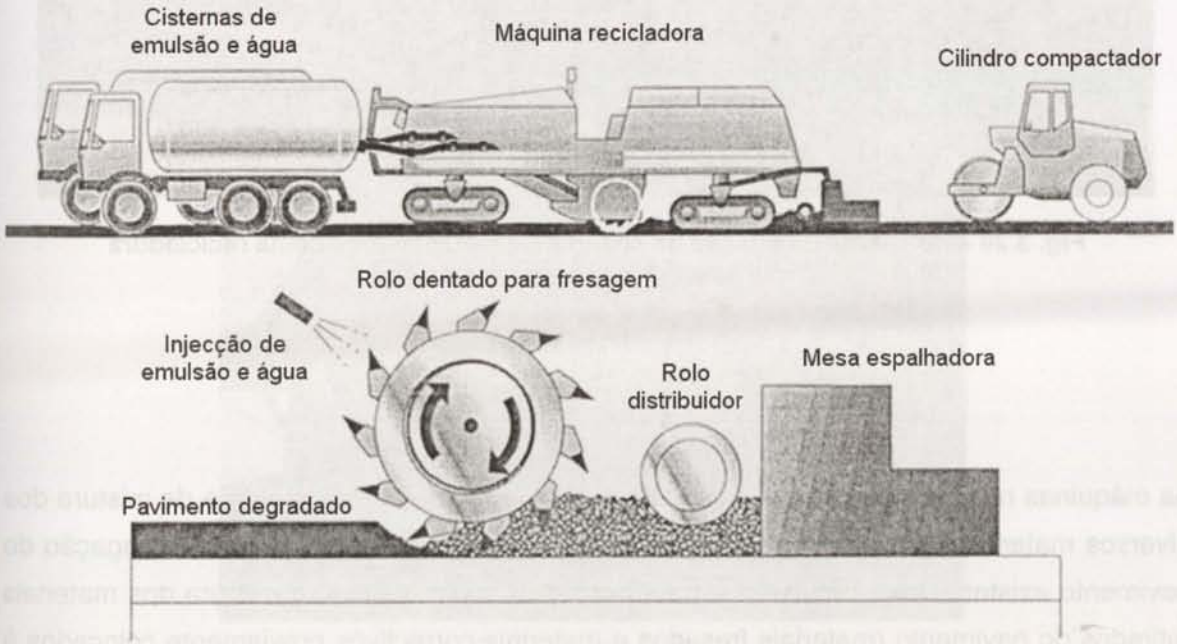


Fig. 3.19 – Esquema de reciclagem do pavimento *in situ* a frio com emulsão betuminosa (EAPA, 1995)



Fig. 3.20 – Pormenor da ligação da cisterna de emulsão à máquina recicladora

As máquinas recicladoras contêm uma câmara de fresagem do pavimento e de mistura dos diversos materiais, onde, conforme o nome indica, é efectuada não só a desagregação do pavimento existente com recurso a um rolo dentado, mas também, a mistura dos materiais retirados do pavimento (materiais fresados e materiais correctivos previamente colocados à sua superfície) com os materiais injectados para o seu interior (emulsão betuminosa, água, etc) usualmente com recurso a um rolo sem-fim.

Na Fig. 3.21 ilustra-se um dos aspectos da manutenção do rolo dentado para fresagem do material de uma máquina recicladora.

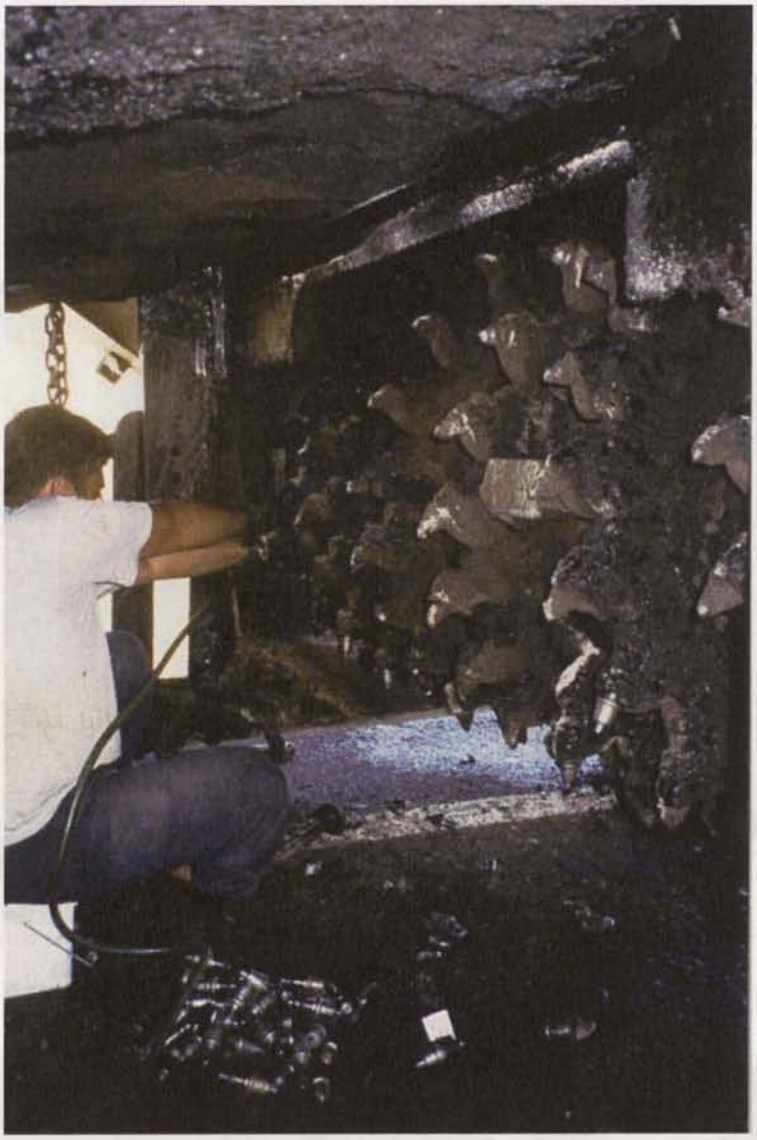


Fig. 3.21 – Pormenor da substituição dos "dentes" do rolo de fresagem da máquina recicladora

A etapa *b)*, relativa à adição de materiais correctivos (pó de pedra, cimento, cal, etc) nas proporções estabelecidas no estudo de formulação, consiste frequentemente no espalhamento destes materiais sobre o pavimento a reciclar, imediatamente antes da passagem da máquina recicladora, por forma a minimizar tempo que decorre entre a duas acções de espalhamento e de passagem da máquina, e consequentemente diminuir o risco de estes materiais serem afastados da zona alvo, com todos os inconvenientes que daí decorrem. Os materiais correctivos são desta forma incorporados à mistura logo quando da fresagem do pavimento.

Após a mistura dos diversos materiais no interior da câmara de fresagem e mistura da máquina recicladora, conforme se retrata na Fig. 3.22, procede-se ao espalhamento da mistura assim fabricada. Na Fig. 3.23 pode-se observar a mistura reciclada à saída da mesa espalhadora.



Fig. 3.22 – Rolo sem-fim de uma máquina recicladora



Fig. 3.23 – Pormenor do espalhamento de uma mistura reciclada *in situ* a frio

Na Fig. 3.24 pode-se observar um aspecto dos trabalhos referidos, como seja, a passagem da máquina recicladora ligada às cisternas de alimentação de emulsão e água.

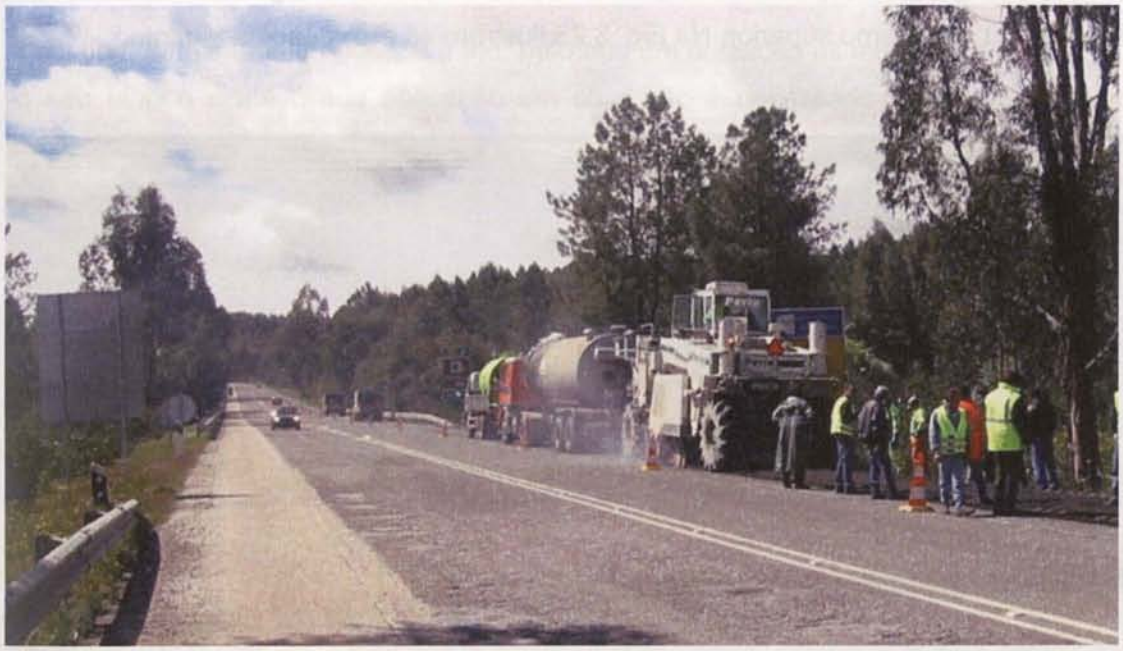


Fig. 3.24 – Trabalhos de reciclagem de um pavimento *in situ* a frio

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 (Ángel del Val & Rocci, 1998), com um valor mínimo de 10 cm (Task Force 38 Report, 1998).

Nas zonas de sobreposição há que evitar que haja "sobredosagem" de emulsão e água, e, em caso disso, 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.

Para a compactação das misturas recicladas a frio - etapa *f)*, são usualmente utilizados, tal como para o caso das misturas a frio fabricadas em central, dois tipos de cilindros: de rasto liso e de pneus. Segundo alguns autores (Task Force 38 Report, 1998) 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 t. Os cilindros de pneus têm geralmente um peso da ordem de 23 t ou mesmo superior. Na Fig. 3.25 ilustram-se estes equipamentos.



Fig. 3.25 – Equipamento utilizado na compactação de uma camada reciclada *in situ* a frio

3.6 - Síntese das principais vantagens relacionadas com a aplicação de misturas a frio

As principais vantagens das misturas a frio com emulsão betuminosa residem essencialmente na versatilidade do produto, economia do processo de fabrico e redução dos impactes ambientais. Referem-se em seguida, alguns dos principais aspectos:

- *Redução dos gastos energéticos*

  Pelo facto de estas misturas serem aplicadas à temperatura ambiente e o ligante betuminoso conter uma fase aquosa, não há necessidade de secar ou aquecer os agregados, sendo pois utilizada consideravelmente menos energia no fabrico da mistura

do que no caso das misturas a quente. Esta poupança de energia (Serfass, 2002) respeita não só à temperatura dos materiais (onde o parâmetro a considerar é a capacidade específica de calor), como também à energia necessária para evaporar a água dos agregados (onde o parâmetro a considerar é o calor latente de evaporação da água, cujo valor é bastante elevado: 540 calorias/g).

Este tipo de misturas é aplicada a frio, pelo que em oposição às misturas a quente, após o seu fabrico e até à sua aplicação em obra não é necessário mantê-la a elevadas temperaturas.

- *Benefícios ambientais*

  Como não há necessidade de secar ou aquecer os agregados, não se emitem fumos resultantes deste processo, nem vapores do ligante. Não existe ainda o desprendimento ou emissão de poeiras/filer por aquecimento.

- *Centrais "móveis"*[4] *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.

  Uma vez que as centrais para o fabrico das misturas a frio, em contraponto com as das misturas a quente, não necessitam de ter um tambor de secagem e aquecimento dos agregados, nem de sistema de despoeiramento, entre outros, são centrais de menor complexidade e de maior mobilidade.

  Todos os tipos de misturas, tanto a quente como a frio, podem ser produzidas em centrais móveis colocadas junto à obra. Sendo as centrais de fabrico das misturas a frio de menor complexidade, é geralmente economicamente viável movê-las para junto das obras, mesmo no caso de obras de relativa reduzida dimensão.

- *Aptidão/adequabilidade das misturas para serem aplicadas em trabalhos de regularização (camadas de espessura variável)*

  As misturas a frio são, na sua maioria, adequadas para serem aplicadas em camadas de espessura variável. Em particular, as misturas do tipo "macadame betuminoso a frio", são frequentemente aplicadas sobre superfícies deformadas. Tal deve-se essencialmente à trabalhabilidade que este tipo de mistura apresenta, permitindo por

[4] Designam-se centrais "móveis" por apresentarem maior mobilidade em comparação com as centrais tradicionalmente utilizadas no fabrico de misturas betuminosas a quente, que por oposição se designam por centrais "fixas".

exemplo que, se necessário, se corrijam/refaçam trabalhos de pavimentação, bem como ao facto de não haver problemas quanto ao "arrefecimento" da mistura.

- *Flexibilidade das condições de aplicação*

  Uma vez que o espalhamento das misturas a frio é feito à temperatura ambiente, não existe a necessidade de manter a mistura, como no caso das fabricadas a quente, a altas temperaturas após o seu fabrico. Tal significa que os prazos de construção podem ser geridos com maior flexibilidade, mesmo no caso em que as misturas não sejam armazenáveis mais do que 24 h.

  Outro aspecto a ter em consideração é o facto de a molhagem do material devido à ocorrência de chuvas fracas não constituir, em geral, um problema, uma vez que devido à sua natureza, as misturas betuminosas a frio com emulsão contêm água podendo suportar relativamente bem variações no teor em água. Da mesma forma, é geralmente possível depositá-las/espalhá-las sobre uma superfície húmida (mas não completamente saturada/molhada).

  No entanto, quando da compactação da camada, é muito importante, que o teor em água não seja superior ao determinado na fórmula de trabalho, por forma a não comprometer, quer a uma boa coesão inicial da mistura, quer uma cura mais rápida. Por esta razão, o material poderá ter que ser arejado, prolongando-se, para tal, a operação de espalhamento, até se alcançar o citado teor. Em alternativa poder-se-ão utilizar equipamentos de compactação mais potentes, por forma, a garantir a expulsão da água e a obter-se no final dos trabalhos uma mistura com a compacidade mínima estabelecida.

  Deve-se ainda chamar a atenção para as condições atmosféricas após a compactação, sendo que se estiver previsto a ocorrência de chuvas fortes, a camada a frio não deve ser executada.

- *Versatilidade*

  Existem diversos tipos de misturas betuminosas a frio (com emulsão): desde os produtos para pequenos trabalhos de manutenção até aos produtos para camadas de pavimentos incluindo camadas de desgaste, com diversas espessuras.

- *Flexibilidade e capacidade regenerativa*

  Tradicionalmente, as misturas a frio com emulsão betuminosa eram tidas como muito flexíveis, o que se traduzia por apresentarem um bom desempenho quando colocadas sobre superfícies deformadas e algo fendilhadas, uma boa resistência à fadiga e ainda uma verdadeira capacidade regenerativa. Tal devia-se em parte à consistência dos

betumes utilizados, cuja dureza estava ainda limitada ao estado da tecnologia. A investigação levada a cabo nos últimos anos, principalmente pela industria, tem conduzido a novas formulações de emulsões betuminosas, com betumes mais duros, que embora podendo penalizar a flexibilidade e capacidade regenerativa da mistura, permitem ainda assim, uma boa trabalhabilidade, um bom envolvimento dos agregados, bem como boas coesões iniciais.

Convém ainda referir que, durante o fabrico da mistura betuminosa a frio, não sendo necessário aquecer os materiais, o betume residual da emulsão não sofre, naturalmente, endurecimento por este efeito. Já nas misturas fabricadas a quente, durante a fase construtiva, fenómenos de oxidação do betume e de evaporação de compostos voláteis conduzem ao seu endurecimento, considerando-se geralmente que a penetração do betume após o fabrico da mistura diminui em cerca de 60% (Shell, 1990). Este aspecto deve ser tido em linha de conta sempre que se comparem misturas a frio e a quente.

A reciclagem a frio de pavimentos *in situ* apresenta ainda um maior leque de vantagens a adicionar às acima enumeradas, como sejam:

- *Redução do consumo dos recursos naturais: agregados novos e betume*

  Quando se recicla *in situ*, o pavimento degradado é a principal fonte de matéria prima para o fabrico da mistura betuminosa, sendo esta razão pela qual é por vezes denominado por "pedreira linear". Neste tipo de reciclagem utiliza-se todo o material fresado do pavimento, sendo apenas necessário para o fabrico da mistura a adição de emulsão e água, e eventualmente de pequenas quantidades de material correctivo, como materiais novos;

- *Eliminação das zonas de vazadouro*

  Ao reciclar um pavimento degradado, evita-se a deposição em vazadouro dos materiais fresados provenientes do levantamento de camadas dos pavimentos antigos;

- *Redução dos custos de transporte*

  O material recicla-se *in situ* não sendo necessário, contrariamente ao que sucede quando se fabrica a mistura betuminosa em central, transportá-lo até à central para o seu processamento, nem posteriormente transportar a mistura produzida da central até à obra. Assim, reduz-se consideravelmente o movimento de veículos e transporte de materiais à obra, reduzindo-se consequentemente os tempos e custos de transporte.

  A redução do volume e peso de materiais a transportar conduz ainda a benefícios colaterais pela menor contribuição para a degradação das estradas de acesso à obra.

- *Homogeneização do pavimento degradado*

  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 sobrejacentes (reforço e/ou desgaste). Por outro lado, elimina-se ainda o risco de propagação de fendas a estas últimas camadas;

- *Processo de fabrico sem "endurecimento" do betume*

  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.

Reciclar significa pois responder a algumas das prioridades estabelecidas pela Agenda 21 (1992) por forma a promover o desenvolvimento sustentável:

- Redução da utilização de recursos naturais
- Redução dos gastos energéticos
- Minimização da quantidade de resíduos
- Protecção do ambiente

As limitações de utilização de misturas densas a frio prendem-se sobretudo com o facto de as misturas conterem água adicionada durante o seu fabrico, o que conduz a maiores dificuldades de compactação das mesmas, e a um período de cura mínimo até à abertura ao tráfego.

Sintetizam-se de seguida, aspectos aos quais se deve prestar especial atenção:

- Quantificação da contida nos materiais (agregados) a utilizar no fabrico das misturas a frio;

- Selecção do equipamento a utilizar em obra para fins de compactação, devendo para tal ser tido em linha de conta as especiais particularidades inerentes à utilização deste tipo de misturas, tais como, as vantagens em se expulsar a máxima quantidade de água possível durante as operações de compactação das misturas;
- Condições atmosféricas durante a execução da camada e para idades jovens. Neste sentido recomenda-se que este tipo de camadas seja realizado durante a Primavera/Verão;

No que concerne à reciclagem a frio *in situ*, deve-se ter em atenção que:

- Ao reciclar-se todo o material fresado do pavimento não é viável que se retire o material contaminante que eventualmente exista nas camadas de pavimento a reciclar;
- 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 e respectiva homogeneidade.

4 - CASOS DE OBRA

4.1 - Introdução

No âmbito da colaboração entre o LNEC e o Instituto de Estradas de Portugal (IEP), anteriormente com a Junta Autónoma de Estradas (JAE), tem-se vindo a acompanhar a execução de diversas obras de reabilitação nas quais se utiliza este tipo de técnicas, em particular a reciclagem a frio *in situ* e a execução de reforços compreendendo camadas de macadame betuminoso a frio. O acompanhamento das referidas obras tem incidido, quer sobre os estudos de caracterização dos materiais a empregar e de formulação das misturas, quer sobre o seu fabrico e aplicação em obra. Têm ainda vindo a ser realizados estudos sobre o desempenho dos pavimentos reabilitados após entrada em serviço.

Pretende-se com estes estudos não só apoiar o IEP nas actividades relacionadas com o controlo de qualidade, mas também contribuir para o aperfeiçoamento e consolidação dos conhecimentos nesta área.

Assim, na sequência dos resultados obtidos no acompanhamento de cada obra, foram sendo identificadas as principais dificuldades relacionadas com a utilização deste tipo de materiais, e os aspectos a desenvolver em trabalhos subsequentes tendo em vista ultrapassar estas dificuldades.

Os principais aspectos abordados nos estudos realizados são 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;
- Especificações e métodos de ensaio com vista à garantia da qualidade em obras incorporando misturas betuminosas a frio.

Nas secções seguintes, far-se-á uma breve descrição de algumas das obras de reabilitação de pavimentos em que foram aplicadas as técnicas em apreço e que foram objecto de estudos no âmbito do presente trabalho. As referidas obras serão apresentadas por ordem

cronológica, por forma a evidenciar a evolução do trabalho e dos conhecimentos adquiridos ao longo do mesmo.

Cada uma das obras acompanhadas, teve, por parte do LNEC, diferentes graus de envolvimento, tendo em atenção a fase da obra em que o LNEC interveio, os diferentes prazos associados e outros condicionamentos próprios de cada obra.

Uma atenção especial será prestada à obra de reabilitação do pavimento de um trecho da EN 120, localizada no Sul de Portugal, onde foi realizada uma camada de reforço em mistura do tipo macadame betuminoso a frio, uma vez que uma grande parte dos ensaios realizados no âmbito do presente trabalho, foram realizados com materiais desta obra.

4.2 - Obra de Reabilitação do Pavimento da EN 260 (IP8), entre Serpa e Vila Verde de Ficalho

4.2.1 - Descrição da obra

A obra de reabilitação do pavimento da EN 260 (IP8), num troço de cerca de 27 km de extensão, entre Serpa (km 31+000) e Vila Verde de Ficalho (km 58+000), decorreu entre Março e Novembro de 1998.

Nesta obra foram utilizados dois tipos de técnicas de reabilitação de pavimentos flexíveis com misturas betuminosas a frio: reforço do pavimento com macadame betuminoso a frio e reciclagem *in situ* a frio do pavimento, tendo o adjudicatário sido a empresa PROBISA Portuguesa – Produtos Betuminosos, S.A., e tendo a fiscalização da obra ficado a cargo da Direcção de Estradas de Beja (JAE).

No que concerne à constituição do pavimento existente, os vários elementos recolhidos levaram a que se concluísse que o pavimento em apreço possuía uma constituição bastante variável, podendo, no entanto, descrever-se como um pavimento flexível, essencialmente constituído por camadas de materiais granulares (macadame hidráulico ou "*tout-venant*"), com camada de desgaste em revestimento superficial betuminoso, incluindo também, nalguns casos, semi-penetrações betuminosas sob o revestimento superficial (Profabril, 1988). De referir em particular que, para além da variabilidade de espessuras, se constatou existirem diferentes tipos de materiais granulares, tanto em termos de granulometria, como em termos de natureza do agregado. Acresce ainda que, de acordo com informações

prestadas pela JAE, antes da beneficiação do pavimento existiam diversos locais onde tinham já sido efectuadas reparações pontuais.

O pavimento existente encontrava-se em avançado estado de degradação, destacando-se a ocorrência de fendilhamento e desagregação da camada de desgaste, tal como se retrata na Fig. 4.1.



Fig. 4.1 – Aspecto da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (EN 260)

Por razões que se prendem com a falta de disponibilidade imediata de materiais, entre outras, optou-se por uma solução de reabilitação diferente da preconizada pelo projectista. Assim, a obra incluiu genericamente, numa primeira fase, os seguintes trabalhos para o pavimento da plena via:

- Extensão compreendida entre o km 31+000 e o km 40+200
  - Execução de uma camada do tipo macadame betuminoso a frio (então designada por ABGETE) com 10 cm de espessura;

  - Camada de desgaste em micro-aglomerado betuminoso a frio.

- Extensão compreendida entre o km 40+200 e o km 58+000
  - Reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa, até uma profundidade da ordem de 12 cm;
  - Camada de desgaste em micro-aglomerado betuminoso a frio.

Esta primeira fase da obra de reabilitação do pavimento da plena via, decorreu entre Março e Maio de 1998, tendo sido posteriormente realizadas algumas reparações pontuais, que consistiram essencialmente na realização de saneamentos. Os trabalhos desenvolveram-se no sentido Vila Verde de Ficalho - Serpa, isto é, foram iniciados do km 58+000 para o km 31+000.

Mais tarde, entre Agosto e Novembro de 1998, face a um conjunto de anomalias ocorridas no pavimento reciclado, durante o Verão, procedeu-se à segunda fase da obra, que consistiu na colocação de uma camada de reforço no troço correspondente à reciclagem. Genericamente os trabalhos realizados nesta última fase incluíram:

- Reforço com uma camada do tipo macadame betuminoso a frio, numa espessura variável entre 6 e 10 cm consoante o sub-trecho em causa;
- Camada de desgaste em micro-aglomerado betuminoso a frio.

Cabe aqui referir que anteriormente a esta obra, tinham já sido efectuadas algumas experiências no campo da reciclagem a frio de pavimentos, no âmbito da reabilitação de alguns troços de estrada no Norte do país. No entanto, aquelas experiências (*vd* subsecção 2.3.3.2) envolveram essencialmente a reciclagem de camadas betuminosas ou de camadas betuminosas e granulares em conjunto, mas sempre abrangendo uma espessura considerável de camadas betuminosas. A obra em apreço era pois, à época, a primeira na qual se pretendia efectuar a reciclagem de um pavimento envolvendo praticamente apenas camadas granulares.

De referir, por outro lado, que embora a realização de camadas de ABGETE viesse contemplada no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998), a experiência dos laboratórios da então JAE, ou mesmo do LNEC, relativamente aos ensaios para formulação e controlo do fabrico e aplicação deste tipo de materiais era bastante reduzida. Por outro lado, o acompanhamento da obra por parte do LNEC iniciou-se numa fase em que os estudos de formulação das misturas a aplicar, efectuados pelo adjudicatário haviam já sido aprovados,

estando-se nessa altura a dar início aos trabalhos de reciclagem do pavimento propriamente ditos.

Neste contexto, no decurso do acompanhamento desta obra, efectuaram-se diversos ensaios com vista à caracterização dos materiais, das misturas e das camadas executadas, procurando-se tirar o máximo partido da experiência e dos meios disponíveis na JAE e no LNEC, e, por outro lado, adquirir progressivamente experiência e equipamentos adequados ao estudo deste tipo de materiais. Para além dos laboratórios da Direcção de Estradas de Beja, da então Direcção de Serviços de Apoio Técnico (DSAT) da JAE e do LNEC, contou-se com a colaboração do laboratório da então Direcção de Serviços Regionais de Estradas do Norte (DSREN).

Atendendo às dificuldades existentes em termos de experiência e de equipamentos, a par de um reduzido prazo de execução da obra, não foi possível efectuar na totalidade os ensaios considerados desejáveis.

Nas secções seguintes descrevem-se os principais aspectos observados durante o acompanhamento da obra, e apresentam-se os resultados dos ensaios realizados complementarmente à fiscalização. Distinguem-se 3 "frentes" de execução da obra, por ordem cronológica: Reciclagem do pavimento, a partir do km 58+000 até ao km 40+200; Camada de reforço em macadame betuminoso a frio, desde o km 40+200 até ao km 31+000; Camada de reforço em macadame betuminoso a frio, entre o km 58+000 e o km 40+200.

4.2.2 - Reciclagem do pavimento *in situ* a frio (km 40,200 a km 58,000)

4.2.2.1 - Generalidades

No troço da EN 260 localizado entre o km 40+200 e o km 58+000, foi executada a reciclagem do pavimento "*in situ*" a frio, com emulsão betuminosa. Sobre esta camada, estava inicialmente prevista apenas a execução de uma camada de desgaste em micro-aglomerado betuminoso a frio, tendo-se no entanto optado, no decurso da obra, por executar uma camada adicional de reforço em macadame betuminoso a frio.

Tratou-se de reciclagem de camadas granulares com revestimentos betuminosos de pequena espessura, tendo-se pretendido, no início da obra, reciclar o pavimento existente até uma profundidade de cerca de 15 cm. No entanto, constatou-se, no troço inicial, que a

esta profundidade, as camadas intersectadas possuíam muitos finos argilosos, pelo que se optou por reciclar apenas numa espessura de 12 cm.

Na Fig. 4.2 apresenta-se esquematicamente a solução de reabilitação adoptada para este troço da EN 260.

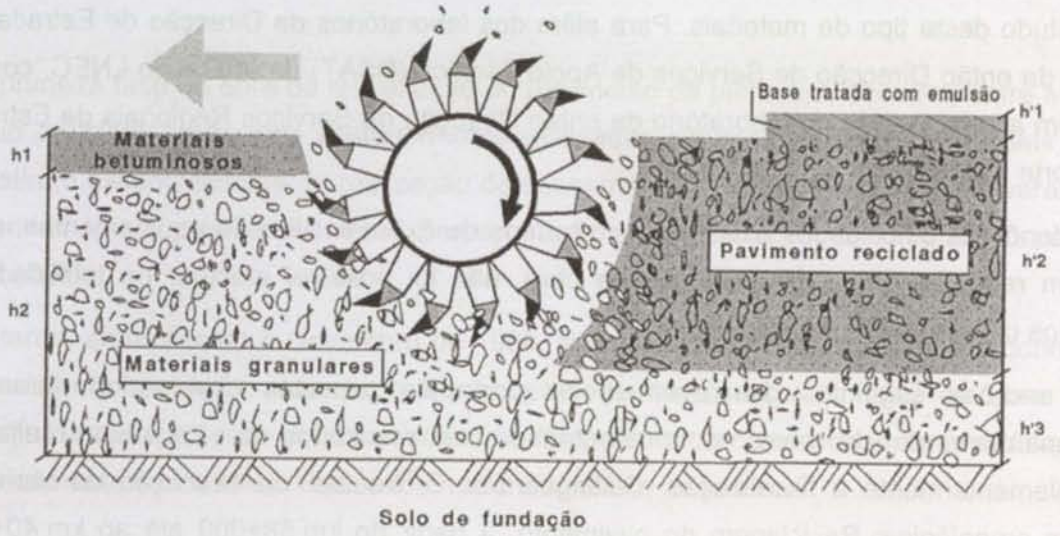


Fig. 4.2 – Esquema dos trabalhos de pavimentação realizados na plena via da EN 260, entre os km 40+200 e 58+000

Como ligante, a PROBISA optou por utilizar uma emulsão catiónica de rotura lenta, do tipo "ECL-2/GRAVAMUL", segundo a designação espanhola/comercial.

Segundo os estudos realizados (PROBISA, 1998a) verificou-se ser necessária a adição de material correctivo, tanto em termos de granulometria, como em termos da plasticidade dos finos, adoptando-se com esta finalidade, pó de pedra 0/5 mm e cal hidráulica.

4.2.2.2 - Caracterização dos materiais empregues na reciclagem

No decurso da obra foram realizados diversos ensaios com vista à caracterização dos materiais empregues.

Na Fig. 4.3 pode-se observar o aspecto de uma amostra de material fresado do pavimento existente, através da acção da máquina recicladora (sem adição de emulsão betuminosa).



Fig. 4.3 – Amostra de material fresado do pavimento existente (EN 260)

A análise granulométrica das amostras de materiais granulares recebidas para ensaio, foi realizada segundo a Especificação LNEC E 233 – 1970 e LNEC E 235 – 1970, para todos os materiais em estudo (material fresado e pó de pedra). Refere-se, em particular, que aquela especificação preconiza o aquecimento a 105-110ºC da amostra, com vista à sua secagem. Após terem surgido dificuldades em realizar este ensaio para o caso da primeira amostra de material fresado ensaiada, por este incluir algum ligante betuminoso, foi considerado mais correcto para este tipo de material, não aquecer o material a reciclar a temperaturas tão elevadas quanto as indicadas naquela especificação.

Assim, para a determinação da granulometria da mistura de agregados composta (material fresado, pó de pedra e cal hidráulica) seguiu-se a Especificação LNEC E 233 – 1970 e LNEC E 235 – 1970, excepto no que respeita à secagem em estufa do material, que foi realizada apenas a 30/35ºC.

Do ensaio realizado sobre a mistura de agregados composta verificou-se que esta continha elementos muito grossos quando comparados com a dimensão máxima da agregados estabelecida no Caderno de Encargos tipo da JAE.

No que concerne à emulsão betuminosa, utilizou-se na reciclagem do pavimento uma emulsão catiónica de rotura lenta, do tipo "ECL-2/GRAVAMUL", tal como se referiu atrás. A comparação entre as especificações espanholas para este tipo de emulsões e a

especificação LNEC E 354-1984 (*vd* subsecção 3.3.1) permite constatar que esta emulsão satisfaz as exigências da especificação LNEC para emulsões tipo ECL-1, acrescidas da exigência do Caderno de Encargos tipo da JAE, relativa à ausência de fluidificantes. Salienta-se no entanto, que a emulsão utilizada não é do tipo "h", possuindo, o respectivo resíduo de destilação, uma penetração superior ao limite máximo recomendado no Caderno de Encargos tipo da JAE, no valor de 100×10^{-1}mm.

Cabe ainda aqui referir que, em Espanha, segundo as especificações da Instrucción 6.1-IC - Secciones de firmes (2003), a zona de fronteira com Portugal, em Vila Verde de Ficalho, pertence à zona térmica estival "quente". Assim, segundo as indicações do Quadro 3.4, a emulsão catiónica a aplicar nas proximidades desta região, no fabrico de "*grava-emulsión*", numa camada "de base ou superior", e num pavimento com um tráfego de classe superior ou igual a T3 (com um TMDp≥50), deveria ser do tipo "ECL-2d", isto é, com um betume de base mais duro que a "ECL-2", na designação espanhola.

Sobre uma amostra da emulsão "ECL-2/GRAVAMUL" (PROBISA) utilizada na reciclagem do pavimento, foram realizados ensaios no Núcleo de Química do Departamento de Materiais de Construção[5] do LNEC. Os ensaios incidiram na determinação das características referidas na actual Especificação LNEC E 354-1984, bem como nos ensaios complementares de determinação da percentagem de água e de óleo através da destilação a 260ºC. A quantidade de emulsão disponível (3 L) não foi suficiente para a realização de todos os ensaios pretendidos, nomeadamente, o ensaio de determinação da sedimentação a 5 dias, o ensaio de peneiração e o de determinação da carga das partículas.

Os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão, bem como as características reportadas pela PROBISA para a emulsão utilizada, e as características preconizadas na Especificação LNEC E 354-1984 para uma emulsão do tipo "ECL-1" e "ECL-1h", resumem-se no Quadro 4.1.

[5] Actual Núcleo de Materiais Plásticos e Compósitos do Departamento de Materiais

Quadro 4.1 – Características da emulsão betuminosa catiónica utilizada na reciclagem (EN 260)

Propriedades		Características da emulsão ensaiada	Emulsão "ECL-2/ GRAVAMUL" PROBISA	Especificação LNEC E354-1984	
				"ECL-1"	"ECL-1h"
Viscosidade Saybolt Furol (25°C), s		24	< 50	20 – 100	20 – 100
Sedimentação às 24h, %		7	-	≤ 1	≤ 1
Sedimentação aos 7 dias, %		-	< 5	≤ 7	≤ 7
Peneiração, %		-	< 0,1	≤ 0,10	-
Rotura com cimento, %		-	-	≤ 2,0	≤ 2,0
Carga da partícula		-	Positiva	Positiva	Positiva
pH		-	2,5 – 3,5	-	-
Destilação	Resíduo, % (m/m)	61	> 57	≥ 57	≥ 57
	Óleo, % (v/m)	0,5	-	-	-
	Água, %	37	< 43	-	-
Resíduo de destilação	Penetração (25°C, 100g, 5s), 10^{-1} mm	160	160 - 220	100 – 250	40 – 90 (1)
	Ductibilidade, (25°C, 5 cm/min), cm	> 100	-	≥ 40	≥ 40
	Solubilidade no tolueno, %	99,65	-	≥ 97,5	≥ 97,5

(1) No Caderno de Encargos tipo da JAE permite-se que o resíduo de destilação apresente um penetração superior, com valores compreendidos entre 60 e 100 x 10^{-1}mm

A leitura dos resultados obtidos sugere os seguintes comentários:

- Todos os valores obtidos, à excepção do da sedimentação, se enquadram nos valores limites especificados para este tipo de emulsão;
- O ensaio de sedimentação para um período de repouso de 24h, permite determinar a estabilidade ao armazenamento da emulsão. Na especificação LNEC E 354 - 1984, a exigência relativa à sedimentação é de tantas unidades de percentagem quantos os dias completos do período de repouso, o que corresponde, neste caso, a 1%. O valor obtido de 7% é bastante superior ao máximo preconizado, o que significa que se devem ter cuidados acrescidos com a sua homogeneização, antes da sua aplicação em obra;
- Salienta-se o facto de o valor obtido para a penetração (160 x 0,1 mm) ser superior ao recomendado no Caderno de Encargos tipo da JAE para emulsões a aplicar em misturas a frio.

4.2.2.3 - Formulação da mistura reciclada

Na extensão de pavimento a reciclar, a PROBISA (Lara, 1998) considerou diferenciadamente as zonas onde que existia *tout-venant*, das zonas onde existia macadame hidráulico.

Para as zonas onde existia *tout-venant* foram tidos em linha de conta os estudos efectuados quando da elaboração do projecto inicial da obra.

Para as zonas com macadame, tomadas como zonas mais críticas por apresentarem granulometria muito grossa e aberta (Lara, 1998), foram recolhidas 10 amostras para caracterização dos materiais. Para além dos materiais betuminosos procedentes de revestimentos superficiais, os materiais recolhidos eram de dois tipos diferentes, consoante a localização: macadame granítico num sub-troço, e em macadame sílico-calcário noutro sub-troço. Atendendo às diferentes naturezas dos materiais constituintes do pavimento existente, no estudo de formulação da mistura reciclada efectuado pela PROBISA (1998b), foram considerados separadamente os dois sub-troços referidos.

Cabe aqui referir que, o material utilizado em cada um dos estudos de formulação resultou da junção das amostras recolhidas em cada um dos sub-troços (5 amostras em cada) e da desagregação do mesmo em laboratório tendo-se procurado simular a degradação granulométrica do material a reciclar durante a operação de fresagem. Este processo consistiu resumidamente, na separação do material em diferentes fracções, na britagem duma das fracções e posterior recomposição da mistura (PROBISA, 1998b).

Para cada um dos sub-trechos definidos realizaram-se ensaios de "imersão-compressão", sobre três provetes com percentagens crescentes de ligante residual (2,3%; 2,9% e 3,5%).

Atendendo aos resultados obtidos, a composição da mistura reciclada adoptada pela PROBISA (1998b), indicada em percentagem em relação à massa do material fresado, foi a seguinte:

- 10 % de pó de pedra 0/5 mm (correcção da granulometria);
- 5 % de emulsão do tipo "ECL-2/GRAVAMUL" (PROBISA);
- 1 a 2 % de cal hidráulica (tendo em vista a correcção da plasticidade dos finos).

Esta composição foi aplicada em ambos os sub-troços anteriormente referidos.

Conforme foi referido anteriormente, não houve, no âmbito do acompanhamento desta obra, qualquer intervenção na realização dos estudos de formulação. No entanto, no sentido de adquirir progressivamente experiência no estudo deste tipo de materiais e ganhar alguma sensibilidade, realizaram-se no LNEC alguns ensaios relativos à formulação da mistura reciclada, como sejam, ensaios de compactação *Proctor* modificado sobre a mistura de

agregados para determinação do teor óptimo em líquidos, e ensaios de "imersão--compressão" para diferentes composições da mistura (diversos teores em emulsão betuminosa), por forma a avaliar as resistências obtidas. No entanto, os resultados obtidos foram encarados com alguma reserva uma vez que a mistura de agregados continha elementos de dimensão máxima superior à recomendada, tendo em atenção as dimensões dos provetes de ensaio (*vd* Fig. 4.7).

Efectivamente, com a realização dos ensaios referidos, verificou-se a desaquabilidade dos mesmos face às misturas demasiado grossas em presença (material fresado cuja dimensão máxima apresentava frequentemente elementos de 50 mm). Salienta-se que no ensaio de "imersão-compressão" (*vd* Quadro 3.12) realizado segundo os procedimentos habituais (Método "Espanhol") se utilizam moldes cilíndricos de diâmetro interior de 101,6 mm, embora a norma (NLT 161/84 ou ASTM D 1074) também admita dimensões superiores. Mesmo o método AFNOR, em que os moldes apresentam dimensões superiores (diâmetro interior de 120 mm), não era adequado para a moldagem de provetes com os materiais em estudo, sem recurso a truncagem de elementos. Acresce que estes ensaios foram desenvolvidos para misturas fabricadas com agregados novos, com dimensão máxima de 25 mm.

No tratado de reciclagem com emulsão betuminosa de Fernández del Campo (1998), de entre os fusos recomendados para misturas recicladas (*vd* Quadro 3.11), aquele que permite a utilização de material fresado com dimensões máximas do agregado superiores (entre 25 e 40 mm), apenas é recomendado para aplicação em camadas "inferiores e auxiliares".

4.2.2.4 - Processo construtivo

Para a reciclagem do pavimento foi utilizada uma máquina fresadora/recicladora "Wirtgen 2100 DCR" (*vd* Fig. 4.4), que realiza a fresagem do pavimento existente, a adição do ligante betuminoso e da água, quando necessária, e efectua a mistura dos materiais e o espalhamento.

Esta máquina recicladora permite, em cada passagem, reciclar numa largura de 2,10 m e apresenta uma "rampa" de alimentação de emulsão com 8 injectores independentes distribuídos em toda a largura.

Uma vez que o pavimento apresentava em plena via uma largura de 7 m, foi necessário efectuar em cada local, 4 passagens da máquina, com sobreposições interiores de cerca de 35 cm (Lara, 1998). Nas zonas de sobreposição desligaram-se, à segunda passagem da

máquina, os injectores de emulsão aí localizados, para não haver "sobredosagem" de emulsão nestas zonas.

Por forma a evitar-se uma junta longitudinal demasiado marcada, avançando-se os trabalhos diariamente em meias secções de plataforma, optou-se nesta obra por se reciclar diariamente toda a largura da plena via, obtendo-se assim rendimentos da ordem de 600 m/dia (4 200 m^2/dia). Cada meia secção reciclava-se sempre começando pelo eixo da faixa de rodagem, de maneira a controlar melhor as inclinações transversais (Lara, *op. cit.*).

No que concerne aos materiais correctivos (pó de pedra e cal), a escassez de equipamento mais sofisticado, condicionou a forma como os mesmos foram aplicados em obra. Assim, optou-se por se misturar previamente o pó de pedra e a cal nas proporções determinadas, e posteriormente, proceder ao seu espalhamento sobre o pavimento existente, imediatamente antes da passagem da máquina recicladora, utilizando para tal máquina de espalhamento do microaglomerado.

Quanto ao espalhamento da mistura reciclada, este foi feito, conforme acima referido, quando da passagem da máquina recicladora, através do sistema integrado de espalhamento de que esta está munida. O nivelamento longitudinal e transversal da mistura reciclada realiza-se por ultrasons e é completamente automático. A régua de espalhamento possui igualmente um mecanismo automático de nivelamento e vibração.



Fig. 4.4 – Equipamento de reciclagem utilizado (EN 260)

A compactação foi realizada através de dois cilindros: um de rasto liso, de 15 ton., e outro de pneus, de 27 ton., tal como se pode observar na Fig. 4.5. A passagem do cilindro de rasto liso foi efectuada com vibração, tendo-se efectuado depois a passagem do cilindro de pneus.

Na Fig. 4.6 pode-se observar o aspecto final da camada reciclada.

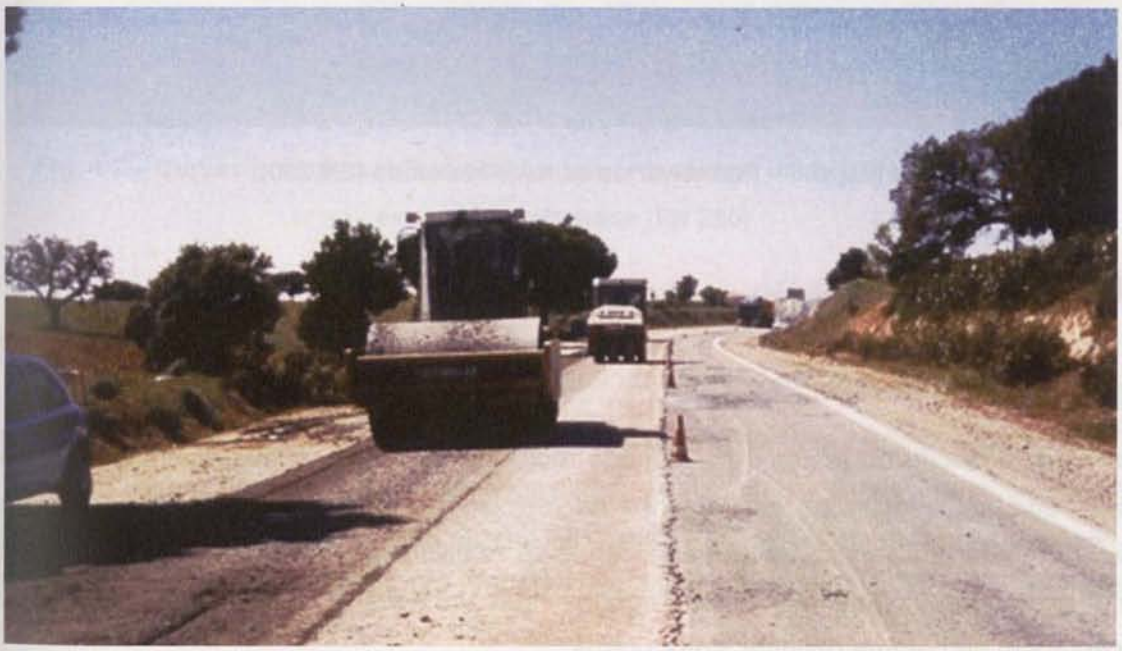


Fig. 4.5 – Compactação da camada reciclada (EN 260)



Fig. 4.6 – Pormenor da camada reciclada (EN 260)

4.2.2.5 - Caracterização da camada reciclada

Para caracterização do material da camada reciclada foram recolhidas diversas amostras, não só enquanto decorriam os trabalhos de reciclagem, mas também algumas semanas após a entrada em serviço da camada, tendo-se realizado ensaios para determinação da composição granulométrica dos agregados que compõem a mistura reciclada, da percentagem de betume residual, entre outros.

Quanto à granulometria do material reciclado, obtiveram-se resultados bastante variáveis ao longo da obra, conforme se pode constatar na Fig. 4.7, onde se apresentam as curvas granulométricas obtidas sobre 13 amostras, após extracção do betume. Constatou-se também frequentemente que os agregados apresentavam elementos muito grossos quando comparados com os fusos granulométricos recomendados para este tipo de misturas.

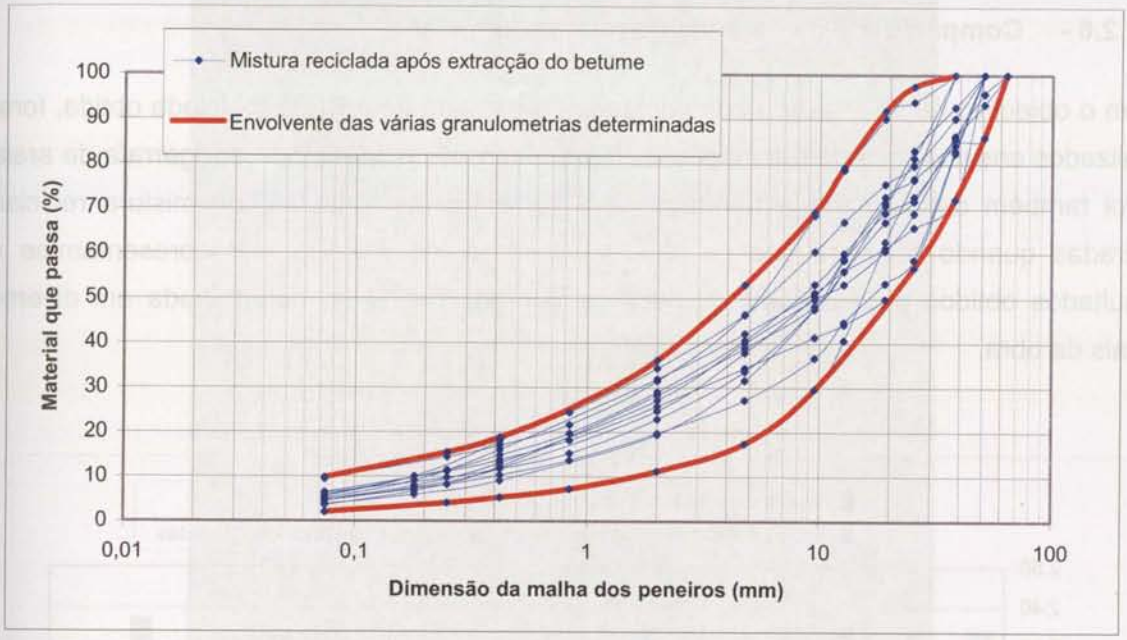


Fig. 4.7 – Curvas granulométricas obtidas sobre amostras de mistura reciclada após extracção do betume (EN 260)

Foram realizados ensaios laboratoriais para determinação da quantidade de betume residual da mistura reciclada a frio. Os ensaios foram realizados segundo dois métodos distintos, por incineração em mufla e por centrifugação, respectivamente nos laboratórios da JAE-DSAT e do LNEC. Estes ensaios permitiram constatar existir uma grande variabilidade nas percentagens em betume residual da mistura reciclada, sendo que, nalguns casos, a quantidade de betume residual era superior ao valor esperado, tendo em atenção a percentagem de emulsão definida no estudo.

Os valores obtidos, variaram entre os 3,5% e os 6,3%, atingindo-se percentagens frequentemente superiores a 5,0%, valores que se afiguram elevados quando comparados com as quantidades de betume residual usualmente recomendadas para este tipo de misturas. Embora estas percentagens de betume sejam resultantes do betume contido na emulsão adicionado ao betume já existente anteriormente nas camadas do pavimento, salienta-se que os dados disponíveis levariam a prever que esta última parcela fosse relativamente diminuta, atendendo às pequenas espessuras das camadas betuminosas.

Estes resultados permitiram pois, salientar a importância de uma avaliação detalhada da constituição das diversas camadas dos pavimentos a reciclar, por forma a avaliar a respectiva variabilidade ao longo do traçado. Nos estudos de viabilidade de aplicação da técnica de reciclagem este é naturalmente um dos aspectos que se reveste de especial importância.

4.2.2.6 - Compacidade da camada de mistura reciclada

Com o objectivo de se avaliar a compacidade da camada de mistura reciclada obtida, foram realizados ensaios para determinação da baridade *in situ* pelo método da "garrafa de areia", e foi também determinada a baridade seca de amostras "intactas" de mistura reciclada retiradas quando da execução de alguns saneamentos. Na Fig. 4.8 apresentam-se os resultados obtidos para a baridade seca da camada reciclada, determinada em diversos locais da obra.



Fig. 4.8 – Compacidade das amostras da mistura reciclada (EN 260)

4.2.2.7 - Breve apreciação dos resultados

Após a conclusão da primeira fase da obra, e na sequência da ocorrência de tempo muito quente, observou-se a ocorrência de anomalias em alguns locais, designadamente refluimento de betume (*vd* Fig. 4.9) e deformações excessivas da superfície. Admite-se que estes factos possam estar relacionados com a heterogeneidade do pavimento existente e com a ocorrência de quantidades excessivas de betume nalguns locais, agravadas com o facto de se ter utilizado uma emulsão com betume de base de elevada penetração ($160x10^{-1}$mm), associado às elevadas temperaturas observadas.



Fig. 4.9 – Refluimentos de betume à superfície do pavimento reciclado (EN 260)

A experiência adquirida salienta a necessidade de garantir que os estudos de caracterização dos materiais a reciclar e formulação das misturas sejam suficientemente detalhados para avaliar a situação existente ao longo de toda a extensão da obra, devendo-se garantir que a recolha das amostras seja realizada por um processo que seja, tanto quanto possível, semelhante à acção de desagregação obtida pela passagem do equipamento de reciclagem.

Concluiu-se também que, em regra, as estruturas de pavimento compreendendo camadas recicladas obtidas por este processo, deverão incluir uma ou mais camadas adicionais superiores, por forma a garantir a regularidade final da superfície, que não poderá ser garantida unicamente através de camadas de desgaste finas. Com efeito, tem-se vindo a verificar em diversas obras de reciclagem *in situ* (*vd* subsecção 2.3.3.2 e 2.3.3.4), a dificuldade em obter uma regularidade geométrica semelhante à geralmente obtida através da colocação de camadas convencionais.

4.2.3 - Reforço com camada em macadame betuminoso a frio (km 31,000 a km 40,200)

4.2.3.1 - Generalidades

Entre o km 31+000 e o km 40+200, a solução adoptada para a reabilitação do pavimento foi a execução de uma camada de reforço em mistura do tipo macadame betuminoso a frio, com uma espessura de 10 cm, seguida da execução de uma camada de desgaste em microaglomerado betuminoso a frio.

Para o fabrico da mistura betuminosa a frio (PROBISA, 1998c), utilizou-se uma mistura de agregados possuindo uma granulometria extensa, cujas fracções foram obtidas por britagem de material dolomítico, proveniente da pedreira "GRAVISUM" de Aracena em Espanha.

4.2.3.2 - Caracterização dos materiais empregues no fabrico do macadame betuminoso a frio

O estudo da PROBISA indica uma mistura de agregados composta pelas fracções granulométricas, expressas na sua dimensão nominal em mm, de 0/6, 6/12 e 12/25, ou seja, próxima da segunda opção preconizada no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998).

Como ligante betuminoso, a PROBISA optou por utilizar, no fabrico da mistura a frio, uma emulsão betuminosa fornecida pela unidade fabril de Rio Maior, do mesmo tipo que o utilizado na reciclagem do pavimento, ou seja, uma emulsão catiónica de rotura lenta, do tipo "ECL-2/GRAVAMUL" na designação espanhola/comercial, a que corresponderá, segundo a especificação LNEC E 354-1984, uma emulsão do tipo ECL-1.

Com uma amostra de 5 L da emulsão utilizada no fabrico da mistura a frio, realizaram-se também ensaios para caracterização da mesma, no Núcleo de Química do Departamento de Materiais de Construção do LNEC.

Os ensaios incidiram na determinação das características referidas na actual Especificação LNEC E 354-1984, bem como nos ensaios complementares de determinação da percentagem de água e de óleo no destilado a 260°C.

Os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão betuminosa são os que se apresentam no quadro que se segue.

Quadro 4.2 – Características da emulsão betuminosa catiónica utilizada no macadame betuminoso a frio (EN 260)

Propriedades		Características da emulsão ensaiada	Emulsão "ECL-2/ GRAVAMUL" PROBISA	Especificação LNEC E354-1984	
				"ECL-1"	"ECL-1h"
Viscosidade Saybolt Furol (25°C), s		21	< 50	20 – 100	20 – 100
Sedimentação às 24h, %		9	-	≤ 1	≤ 1
Sedimentação aos 5 dias, %		41	-	≤ 5	≤ 5
Sedimentação aos 7 dias, %		-	< 5	≤ 7	≤ 7
Peneiração, %		0,03	< 0,1	≤ 0,10	-
Rotura com cimento, %		(1)	-	≤ 2,0	≤ 2,0
Carga da partícula		Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
pH		-	2,5 – 3,5	-	-
Destilação	Resíduo, % (m/m)	62	> 57	≥ 57	≥ 57
	Óleo, % (v/m)	0,2	-	-	-
	Água, %	38	< 43	-	-
Resíduo de destilação	Penetração (25°C, 100g, 5s), 10^{-1} mm	180	160 - 220	100 – 250	40 – 90 (2)
	Ductibilidade, (25°C, 5 cm/min), cm	> 100	-	≥ 40	≥ 40
	Solubilidade no tolueno, %	99,25	-	≥ 97,5	≥ 97,5

(1) O betume ficou quase na totalidade coagulado, ficando retido no peneiro conjuntamente com cimento;

(2) No Caderno de Encargos tipo da JAE permite-se que o resíduo de destilação apresente um penetração superior, com valores compreendidos entre 60 e 100 x 10^{-1}mm

À semelhança do resultado obtido para a amostra de emulsão usada na reciclagem, todos os valores obtidos, à excepção dos da sedimentação, se enquadram nos valores limites especificados para este tipo de emulsão.

O facto de não se poder realizar o ensaio de rotura com cimento, pelo facto de a emulsão ter rompido de imediato, significa que existe um deficiente estabilidade da emulsão face a este material.

4.2.3.3 - Formulação da mistura do tipo macadame betuminoso a frio

No estudo de formulação da mistura em "base tratada com emulsão" (PROBISA, 1998c), uma vez estabelecida a composição granulométrica da mistura de agregados, realizaram-se ensaios de "imersão-compressão", sobre três provetes com percentagens crescentes de ligante residual (2,5%; 3,0% e 3,5%), para avaliação das resistências obtidas e definição da quantidade de emulsão a utilizar.

Atendendo aos resultados obtidos, a composição da mistura a frio adoptada pela PROBISA, indicada em percentagem em relação à massa do material fresado, foi a seguinte:

- 30% de gravilha 12/25 mm
- 20% de gravilha 6/12 mm
- 50% de pó 0/6 mm
- 5% de emulsão "ECL-2/GRAVAMUL" (PROBISA)

Em complemento ao estudo de formulação efectuado pela PROBISA e aprovado pela equipa de fiscalização da obra, no LNEC realizaram-se também ensaios por forma a avaliarem-se as características mecânicas e de durabilidade da mistura para a composição adoptada.

Para tal, efectuou-se em primeiro lugar, o ensaio de compactação *Proctor* modificado sobre a mistura de agregados, por forma a determinar-se o teor óptimo em líquidos para a moldagem de provetes para ensaios de "imersão-compressão".

Seguidamente, moldaram-se provetes segundo a norma espanhola NLT 161/84. Na moldagem dos provetes, a quantidade de água adicionada à mistura foi calculada seguindo as recomendações preconizadas no caderno de Encargos da JAE, ou seja, deduzindo ao teor óptimo em líquidos determinado no ensaio *Proctor* modificado, o valor referente à fase contínua (água) da emulsão betuminosa catiónica.

Os ensaios de "imersão-compressão" foram realizados segundo o método "Espanhol", conforme descrito em 3.4.2.

Tendo sido a presente obra de reabilitação utilizando o reforço com misturas do tipo macadame betuminoso a frio, a primeira a ser acompanha pelo LNEC, considerou-se oportuno estudar qual seria o efeito da cura na preparação dos provetes, para a realização dos ensaios de "imersão-compressão". Neste sentido, seguiram-se duas metodologias diferentes na preparação desses provetes. Num caso, os provetes foram submetidos ao ensaio de "imersão-compressão" após terem sido desmoldados, e terem permanecido ao ar por um período de apenas 24 h. No outro caso, após a desmoldagem dos provetes, estes foram submetidos ao processo de cura acelerada indicado no Quadro 3.12 para o método "Espanhol". Verificou-se naturalmente, que na situação em que os provetes foram submetidos ao processo de cura acelerada, se obtiveram maiores resistências do que no caso anterior. As diferenças entre as resistências obtidas pelos dois processos foram mais acentuadas, como seria de esperar, após imersão em água, onde para os provetes submetidos à cura acelerada se obteve uma resistência cerca de 40% maior do que a obtida para os provetes com cura de apenas um dia à temperatura ambiente.

Acresce que para o caso de provetes foram submetidos a cura acelerada antes da realização do ensaio de "imersão-compressão" propriamente dito, se obtiveram valores de resistência muito superiores (resistências após imersão e conservada, respectivamente, da ordem de 10 kN e de 90%) aos actualmente exigidas no Caderno de Encargos tipo da Administração Rodoviária em vigor, onde se preconiza que os valores mínimos de resistência após imersão e conservada são, respectivamente, de 5 kN e 60% (JAE, 1998). De referir, que mesmo para os provetes apenas com um dia de idade, acondicionados à temperatura ambiente, se obtiveram valores de resistência superiores aos mínimos estabelecidos naquele Caderno de Encargos.

4.2.3.4 - Processo construtivo

A mistura betuminosa a frio, foi fabricada numa central do tipo das já descritas anteriormente (*vd* subsecção 2.3.2.5 e 3.5.1). Nesta obra utilizou-se uma central "ROHER" (Série GMM – 3.50/70.170), que permite a dosificação dos vários componentes volumetricamente. Consoante o tempo de mistura pretendido, poderão obter-se produções entre 165 a 180 t/h.

Na Fig. 4.10 apresenta-se uma panorâmica geral da central.



Fig. 4.10 – Panorâmica geral da central para o fabrico de misturas betuminosas a frio (EN 260)

Este equipamento dispõe de três tremonhas para materiais granulares de diferentes dimensões, com alimentadores de banda, de caudal regulável. Todos os alimentadores descarregam num único transportador, iniciando-se aqui a mistura das várias fracções. Este transportador levará os agregados até à misturadora. A dosificação dos agregados faz-se actuando sobre a velocidade dos alimentadores contínuos situados sob as tremonhas. A humidificação dos agregados que chegam à misturadora é feita por pulverizadores de água regulados electronicamente por um contador de impulsos.

Nestas centrais, para controlar o caudal de emulsão a misturar, é utilizada uma bomba de volume constante e velocidade regulável que garante, em cada momento, uma pressão de pulverização ajustada ao tempo de mistura, e que regula automaticamente a adição de emulsão proporcionalmente ao caudal de agregados que chega à misturadora. Esta bomba está equipada com um dispositivo que controla em cada instante a rotura da emulsão.

Esta central de misturas betuminosas é também dotada de um dispositivo de segurança que interrompe automaticamente o processo de fabrico, quando o caudal de alguma das fracções de agregado ou de emulsão, se afasta do caudal teórico da mistura.

Na Fig. 4.11 e na Fig. 4.12 podem-se observar alguns pormenores da central utilizada para o fabrico da mistura a frio, como seja o transportador dos materiais granulares, o quadro de controlo, a misturadora e a descarga da mistura já fabricada.



Fig. 4.11 – Pormenor da central de fabrico das misturas betuminosas a frio (EN 260)



Fig. 4.12 – Pormenor da descarga da mistura betuminosa a frio fabricada (EN 260)

Nesta última figura é visível o fenómeno mencionado na subsecção 3.5.1, relativo ao facto de que quando a mistura produzida fica algum tempo armazenada em obra, se poder dar entretanto a "rotura" da mistura exposta à superfície e iniciar-se o processo de cura, mudando então da cor acastanhada que apresenta à saída da misturadora, para um tom mais negro.

Não tendo passado 24 h do fabrico da mistura, esta era transportada para o local onde decorriam os trabalhos, procedendo-se então ao seu espalhamento.

Para o espalhamento da mistura, foi utilizada uma pavimentadora de rastos "Blaunox 1500", com uma capacidade teórica de aplicação de 500 ton./h. Este equipamento dispõe de uma largura de base de 2,5 m, que incluindo uma mesa de extensão hidráulica, é ajustável até 4,75 m.

O sistema de nivelamento foi garantido apenas pela utilização de um pequeno patim, da ordem dos 30 cm, ao eixo da plataforma. Na primeira passagem o patim apoiava sobre o pavimento existente, na segunda passagem sobre a camada de macadame betuminoso a frio, executada no dia anterior.

Na Fig. 4.13 pode-se observar um aspecto dos trabalhos de pavimentação.



Fig. 4.13 – Execução da camada de macadame betuminoso a frio (EN 260)

Os trabalhos foram realizados em meias secções de plataforma, de 3,5 m, com rendimentos da ordem dos 1000 m/dia. As duas meias secções foram executadas em dias consecutivos.

A compactação foi feita através de dois cilindros: um de rasto liso, modelo da Caterpillar "CB – 534B" com um peso em serviço da ordem das 10 ton. e uma largura dos rolos de 1,7 m; e um de pneus, também da Caterpillar, "PS – 300B", com um peso máximo em serviço de 21 ton., a que corresponde um peso máximo por roda de 3 ton.

Na Fig. 4.14 apresenta-se um pormenor da camada de macadame betuminoso a frio.



Fig. 4.14 – Aspecto da camada de macadame betuminoso a frio executada (EN 260)

A aplicação do revestimento superficial, em microaglomerado betuminoso a frio, só se processou aproximadamente duas semanas após a execução da camada de "base tratada com emulsão", por forma a permitir a cura da mistura.

4.2.4 - Reforço com camada em mistura tipo ABGETE (km 40,200 a km 58,000)

4.2.4.1 - Generalidades

Estando finalizada a primeira fase da obra de beneficiação, correspondente aos trabalhos descritos nas secções anteriores, e na sequência das anomalias ocorridas no troço onde se havia efectuado a reciclagem do pavimento, já referidas em 4.2.2.7, decidiu-se reforçar o pavimento reciclado, com uma nova camada em mistura do tipo macadame betuminoso a frio, de espessura nominal variável, conforme os seguintes sub-trechos:

- Do km 40+200 ao km 46+000: 10 cm;
- Do km 46+000 ao km 50+000: 6 cm;
- Do km 50+000 ao km 58+000: 8 cm.

A definição daqueles sub-trechos, bem como o dimensionamento da espessura de reforço a executar, foram efectuados com base em resultados de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto realizados pelo LNEC (Antunes *et al.*, 1999d).

Esta segunda fase da obra decorreu em Agosto/Setembro de 1998.

A mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa a frio era um material de granulometria extensa, obtido por britagem de material granítico (proveniente da pedreira da MOTA & C^{ia} de Montemor-o-Novo), composta pelas fracções granulométricas, expressas na sua dimensão nominal em mm, de 0/6, 6/12 e 12/20. Esta composição de agregados é próxima da segunda opção preconizada no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998), de 0/6, 6/10 e 10/20.

Para o fabrico da mistura de macadame betuminoso a frio, optou-se, também neste caso, por uma emulsão catiónica de rotura lenta, mas com um betume base mais duro que o usado nas misturas anteriores. A PROBISA (1998d) adoptou uma emulsão betuminosa do tipo "ECL-2d/GRAVAMUL", na designação espanhola/comercial, cuja penetração do ligante residual (10^{-1} mm) pode tomar valores compreendidos entre 80 e 100, ou seja, valores intermédios entre os exigidos a uma emulsão ECL-1h (40 a 90 x10^{-1} mm) e a uma ECL-1 (100 a 250 x10^{-1} mm), na designação portuguesa.

A composição da mistura de macadame betuminoso a frio, adoptada pela PROBISA, indicada em percentagem em relação à mistura de agregados, foi a seguinte:

- 35% de gravilha 12/20 mm
- 10% de gravilha 6/12 mm
- 55% de pó 0/6 mm
- 5% de emulsão "ECL-2d/GRAVAMUL" (PROBISA), na designação espanhola/comercial

4.2.4.2 - Processo construtivo

Os trabalhos relativos à execução da camada em "base tratada com emulsão" envolveram as etapas construtivas já referidas em 3.5.1, tendo-se utilizado a mesma central móvel "ROHER" (Série GMM – 3.50/70.170) que na 1ª fase da obra.

Foi utilizada uma pavimentadora de rastos "Dinapac – F 14C", com uma capacidade teórica de aplicação de 500 ton./h. Este equipamento dispõe de uma largura básica de 2,5 m, incluindo mesa de extensão hidráulica, continuamente ajustável até 4,75 m.

Os trabalhos foram realizados em meias secções de plataforma, de 3,5 m, chegando-se a obter rendimentos da ordem dos 4 000 m/dia. As duas meias secções eram realizadas em dias consecutivos.

Nesta 2ª fase da obra, foi melhorado o sistema de nivelamento que, foi garantido através de uma régua de 9 m, disposta ao eixo da plataforma. Na primeira passagem a régua apoiava sobre a camada existente, de mistura betuminosa reciclada a frio. Na segunda passagem, a régua apoiava sobre a camada de base tratada, executada no dia anterior. Anota-se que com este processo foram obtidas melhorias significativas na regularidade superficial do pavimento (Antunes *et al.*, 1999d).

A compactação da mistura foi efectuada utilizando, como é usual neste tipo de misturas, primeiro, um cilindro de rasto liso, com vibração, seguindo-se um de pneus. O cilindro de rasto liso, modelo da Caterpillar "CB – 534B", apresentava um peso em serviço da ordem das 10 ton. e uma largura dos rolos de 1,7 m; e o cilindro de pneus, também da Caterpillar, modelo "PS – 300B", apresentava um peso máximo em serviço de 21 ton., a que correspondia um peso máximo por roda de 3 ton.

A aplicação do revestimento superficial, em microaglomerado betuminoso a frio, só se processou aproximadamente duas semanas após a aplicação do macadame betuminoso a frio, por forma a permitir a cura da mistura.

4.2.5 - Caracterização estrutural e superficial do pavimento

Com vista à caracterização estrutural do pavimento no decurso de diversas fases da obra, foram levadas a cabo, pelo LNEC, três campanhas de ensaio que compreenderam a inspecção visual da superfície e ensaios de carga com o deflectómetro de impacto.

Os ensaios de carga com deflectómetro de impacto (Antunes, 1993) realizaram-se com o equipamento do LNEC, da marca KUAB, em pontos situados ao longo da rodeira exterior da via, aplicando-se uma força de impacto de 60 kN, distribuída numa placa de carga com 300 mm de diâmetro, e medindo-se as deflexões da superfície em 7 pontos.

Primeiramente realizaram-se duas campanhas de ensaios abrangendo toda a extensão da obra, a primeira no decurso da execução da reciclagem, e a segunda após a conclusão dos trabalhos de reciclagem.

Com base nos resultados destas campanhas de ensaio, foi possível dividir a extensão total da obra em 4 zonas de comportamentos estruturais distintos, para cada uma das vias de tráfego, sendo que a primeira zona corresponde à parte da obra onde não foi efectuada reciclagem, e as restantes 3 correspondem ao pavimento reciclado.

Tendo em vista a observação da evolução do comportamento estrutural do pavimento reabilitado, seleccionou-se um conjunto de secções piloto, com extensão de 300 m cada,

nas quais se realizaram campanhas de ensaios de carga com deflectómetro de impacto para diversas idades da camada reciclada.

Em cada uma das 4 zonas anteriormente estabelecidas, definiu-se uma secção piloto de 300 m, seleccionada por forma a que o respectivo comportamento estrutural, caracterizado através dos valores médios e desvios padrão obtidos para as deflexões, pudesse ser considerado relativamente homogéneo, e representativo da zona em que ela estava inserida. Têm-se assim 4 secções piloto em observação, das quais uma se situa na zona de pavimento em que se procedeu ao reforço com uma camada de macadame a frio, designada por EN260-SP1 (km 39+550 a km 39+850, sentido Serpa – Vila Verde de Ficalho), e três se situam na zona com pavimento reciclado e posteriormente reforçado com uma camada de macadame betuminoso a frio, designadas por secções EN260-SP2 (km 44+550 a km 44+850, sentido Vila Verde de Ficalho - Serpa), EN260-SP3 (km 46+500 a km 46+800, sentido Serpa - Vila Verde de Ficalho) e EN260-SP4 (km 52+250 a km 52+550, sentido Vila Verde de Ficalho - Serpa).

Para além dos ensaios de carga com deflectómetro de impacto em toda a extensão da obra anteriormente referidos, foram posteriormente realizados ensaios nas secções piloto para deferentes idades das camadas de misturas a frio, bem como sondagens nos pavimentos, com vista à definição das espessuras das camadas.

As sondagens à rotação foram realizadas após a conclusão da segunda fase da obra, em locais situados nas secções piloto e fora destas.

Na Fig. 4.15 pode-se observar o aspecto de tarolos extraídos na EN 260 na zona onde se procedeu quer à reciclagem do pavimento, quer ao reforço com uma camada de macadame betuminoso a frio, que ilustram bem a variabilidade dos materiais constituintes da camada reciclada.



Fig. 4.15 – Aspecto de tarolos recolhidos na EN 260, após a conclusão da segunda fase da obra de reabilitação

A partir dos valores médios das deflexões medidas com deflectómetro de impacto, e com base no conhecimento das espessuras das camadas, estabeleceram-se os modelos de comportamento estrutural dos pavimentos, para cada uma das secções piloto anteriormente referidas (EN260-SP1, EN260-SP2, EN260-SP3, EN260-SP4).

A evolução dos módulos de deformabilidade obtidos com a idade das camadas, representa-se graficamente na Fig. 4.16, para as camadas em macadame betuminoso a frio realizadas durante a primeira (EN260-SP1) e segunda (EN260-SP2, EN260-SP3, EN260-SP4) fases da obra, e na Fig. 4.17, para a camada reciclada.

Relembra-se que as misturas de macadame betuminoso a frio aplicadas no troço correspondente à extensão compreendida entre o km 31,000 e o km 40,200, à qual pertence a secção piloto EN260-SP1, e as aplicadas no troço correspondente à extensão compreendida entre o km 40,200 e o km 58,000, à qual pertencem as secções piloto EN260-SP2, EN260-SP3 e EN260-SP4, foram fabricadas com composições diferentes, nomeadamente quanto à natureza do agregado e à dureza do betume da emulsão. Na interpretação dos resultados obtidos há que ter em atenção estes aspectos, pelo que tais resultados não podem ser directamente comparáveis.

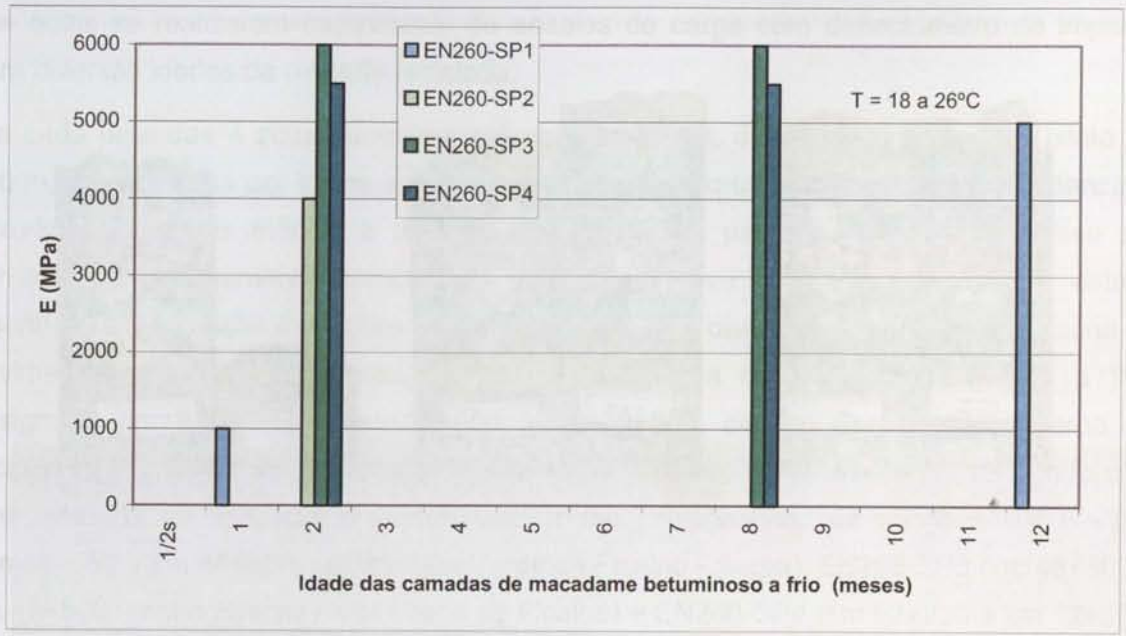


Fig. 4.16 – Módulos de deformabilidade das camada de macadame betuminoso a frio (EN 260)

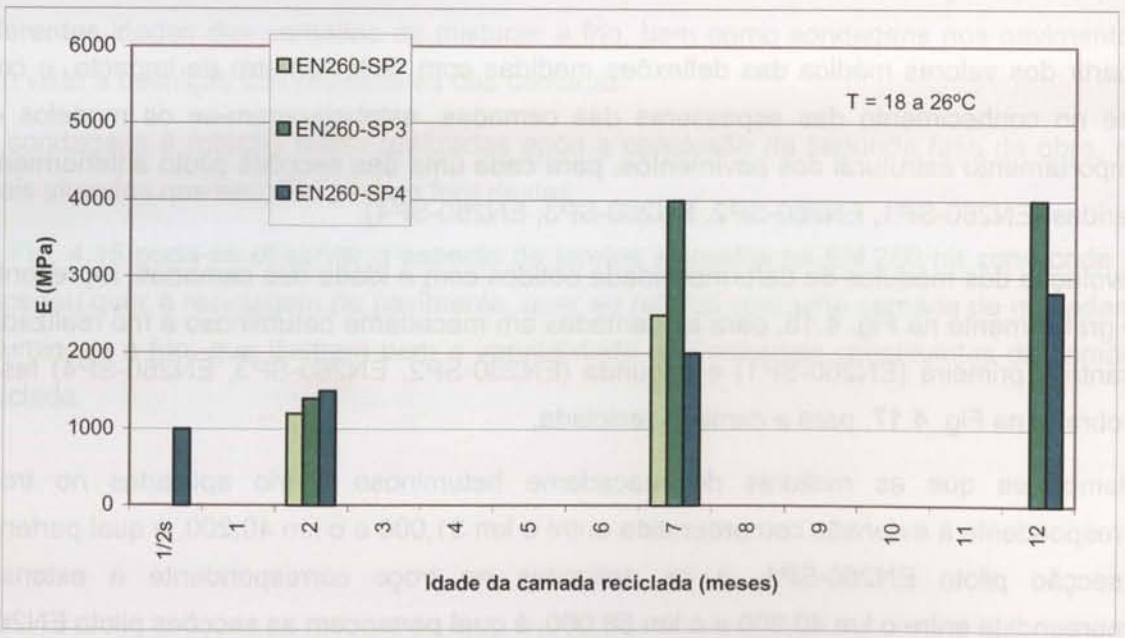


Fig. 4.17 – Módulos de deformabilidade das camada recicladas (EN 260)

Os resultados apresentados na Fig. 4.16 e na Fig. 4.17 permitem constatar que se obteve módulos de deformabilidade da ordem de 1 000 MPa para as camadas a frio quando recentemente executadas. Posteriormente, a partir de cerca dos 2 meses de idade, atingem-se, para as camadas de macadame betuminoso a frio, valores da ordem de 4 000 MPa ou

superiores. Quanto às camadas recicladas chega-se a valores da ordem de 2 000 MPa ou superiores, com idades a partir dos 6 meses. De referir, no entanto, que os valores de módulos que constam nestas figuras correspondem a ensaios de carga com deflectómetro de impacto realizados a diversas temperaturas.

No âmbito do acompanhamento da obra foram também realizadas campanhas de medição do coeficiente de atrito e da irregularidade da camada de desgaste do pavimento, com vista à caracterização superficial do pavimento após conclusão da obra.

Em relação à regularidade longitudinal, constatou-se que não foi possível atingir níveis de regularidade exigidos para pavimentos novos, salientando-se a necessidade de adquirir mais experiência neste campo, no que concerne às obras de reabilitação. Verificou-se ainda uma melhoria significativa relativamente a este aspecto, na segunda fase da obra, com a utilização de um sistema de nivelamento quando do espalhamento da camada em ABGETE, compreendendo uma régua de 9 m disposta ao eixo da plataforma.

4.3 - Obra de reabilitação do pavimento da EN108 entre o Porto e Entre-os-Rios

4.3.1 - Descrição da obra

Nesta obra, procedeu-se à reciclagem *in situ* a frio do pavimento com emulsão betuminosa catiónica e com cimento, num troço da EN 108 com uma extensão total de cerca de 38,7 km, compreendida entre o Porto (km 0+000) e Entre-os-Rios (km 38+700).

A obra de reabilitação do referido troço da EN 108, iniciou-se no Verão de 1997, tendo o adjudicatário sido a empresa Gomes do Monte, S.A., e tendo a fiscalização estado a cargo da Direcção de Estradas do Porto.

O pavimento a reabilitar era um pavimento flexível, constituído por camadas em betão betuminoso, assentes sobre semi-penetrações betuminosas e misturas a frio resultantes de reforços ou tapagem de covas. A base era constituída por uma camada em macadame hidráulico.

O pavimento existente encontrava-se muito fendilhado (fendilhamento tipo pele de crocodilo), com desprendimento de blocos em alguns locais, conforme se pode observar na Fig. 4.18.



Fig. 4.18 – Aspecto da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (EN 108)

Os trabalhos de pavimentação consistiram, numa primeira fase, na reciclagem a frio *in situ*, até 15 cm de profundidade, envolvendo essencialmente as camadas betuminosas existentes. Posteriormente foram executadas duas camadas de reforço, uma com características de regularização, em mistura betuminosa densa, com 6 cm de espessura e uma outra de desgaste, em betão betuminoso, com 5 cm de espessura.

Na Fig. 4.19 esquematizam-se os trabalhos de pavimentação referidos.

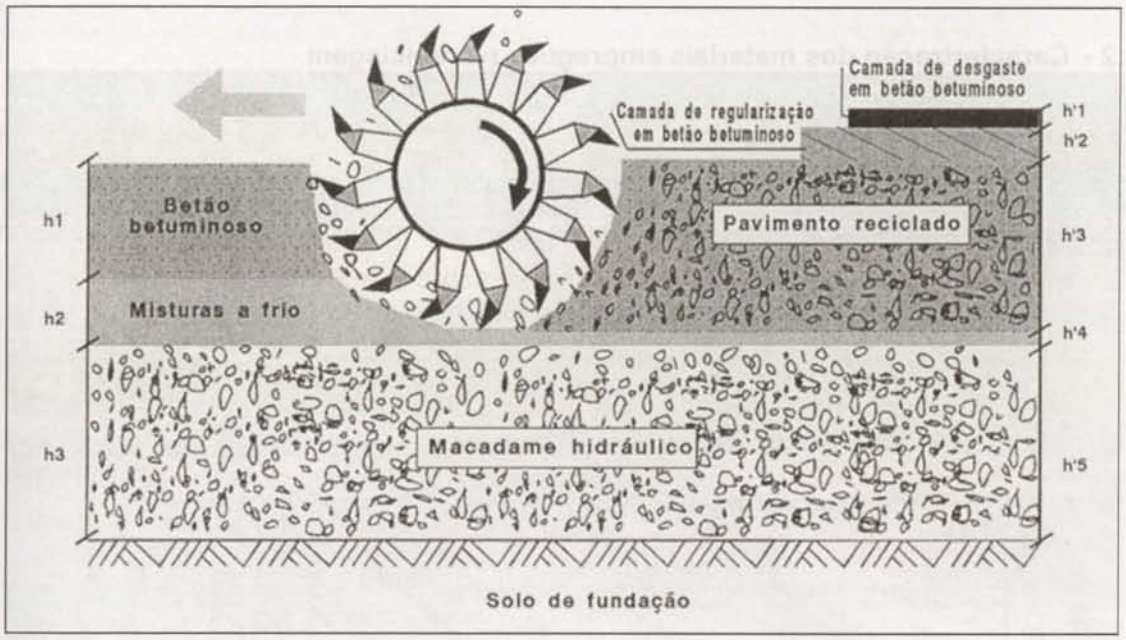


Fig. 4.19 – Esquema dos trabalhos de pavimentação realizados na plena via da EN 108

Uma primeira fase dos trabalhos de reciclagem do pavimento foi realizada em 1997, a que se seguiu uma interrupção e, posteriormente, uma segunda fase dos trabalhos, em 1998. O acompanhamento da obra por parte do LNEC, apenas se iniciou nesta segunda fase.

A composição adoptada para a mistura reciclada, indicada em percentagem em relação à massa de material fresado, foi, de acordo com o estudo "*Reciclado en Frio Portugal – EN 108 - Gomes do Monte*" realizado pelo *Centro de Investigación Elpidio Sanchez Marcos* - Madrid, a seguinte:

- 3,0% de emulsão de rotura lenta (posteriormente foi aumentada para 3,5%), denominada pela COMPOSAN Portuguesa como "Telcograva" (betume residual 80/100);
- 1,5% de cimento;
- 95,5% de material fresado.

De acordo com os estudos de formulação, a adição de 1,5% de cimento tinha como ojectivo assegurar uma boa resistência conservada.

4.3.2 - Caracterização dos materiais empregues na reciclagem

No decurso da obra foram realizados diversos ensaios com vista à caracterização dos materiais empregues. Quanto à granulometria do material reciclado, obtiveram-se resultados variáveis ao longo da obra, conforme se pode constatar na Fig. 4.20, onde se apresenta uma envolvente das curvas granulométricas obtidas sobre 9 amostras.

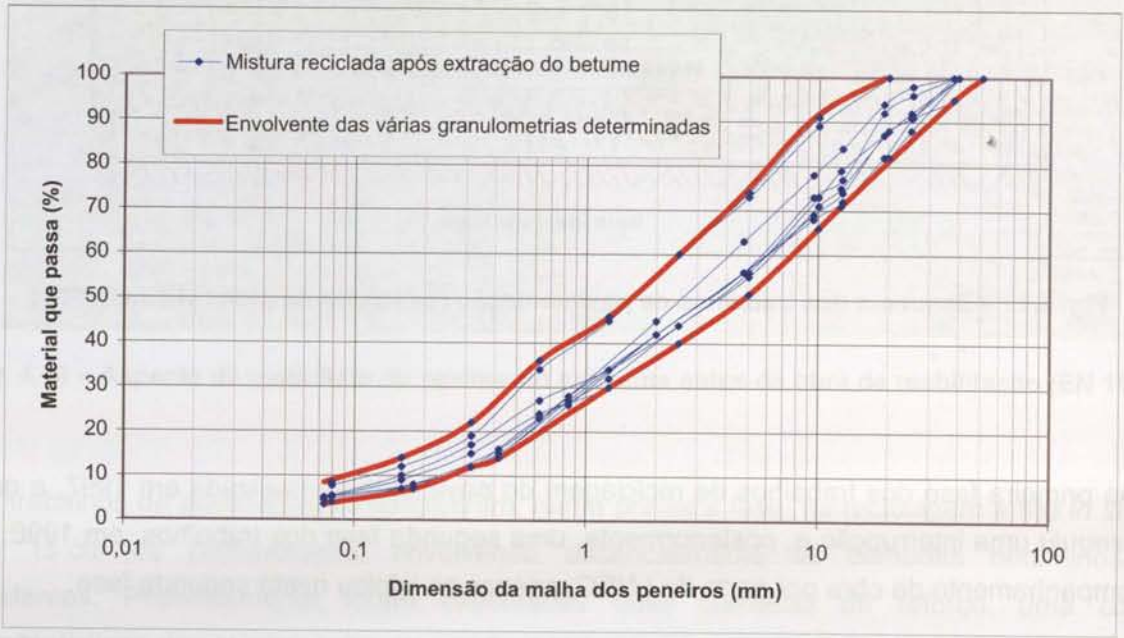


Fig. 4.20 – Envolvente das curvas granulométricas obtidas sobre amostras de material reciclado (EN 108)

4.3.3 - Processo construtivo

No sentido de facilitar a acção de desagregação da recicladora e aumentar a rentabilidade do conjunto dos equipamentos, efectuou-se primeiramente uma passagem com uma fresadora normal (*vd* Fig. 4.21), até uma profundidade da ordem dos 15 cm, procedendo-se depois a uma ligeira compactação.

Em seguida procedeu-se ao espalhamento do cimento e água, imediatamente antes da chegada da recicladora.

A alimentação da emulsão realizou-se directamente de cisternas ligadas à recicladora, que homogeneizava todos os componentes e os espalhava, através de um sistema simples, sem mesa pré-compactadora, tal como se pode observar na Fig. 4.22.



Fig. 4.21 – Fresagem do pavimento existente previamente à passagem da máquina recicladora (EN 108)



Fig. 4.22 – Aspecto da mistura à saída da máquina recicladora (EN 108)

A compactação foi efectuada com um cilindro de rasto liso muito pesado (43kg/cm), primeiro com vibração e depois sem vibração (*vd* Fig. 4.23).



Fig. 4.23 – Aspecto das operações de compactação do pavimento reciclado (EN 108)

Na Fig. 4.24 pode-se observar o aspecto final da camada reciclada.



Fig. 4.24 – Pormenor da camada reciclada (EN 108)

4.3.4 - Caracterização estrutural do pavimento

4.3.4.1 - Selecção de secções piloto

À semelhança do procedimento adoptado para a EN 260, tendo em vista a observação da evolução do comportamento estrutural do pavimento reabilitado ao longo do processo de cura, seleccionaram-se secções piloto. Por razões que se prendem com os elevados níveis de tráfego que ocorrem nesta estrada e com as condições do traçado, que envolve muitos troços em curva, optou-se por seleccionar apenas 2 secções, designadas por EN108-SP1 e EN108-SP2, localizadas entre os km 9+000 e km 9+300. Nestas secções realizaram-se campanhas de ensaios de carga com deflectómetro de impacto em diversas fases da obra, e para diversas idades da camada reciclada.

Os ensaios de carga com deflectómetro de impacto realizaram-se em pontos situados ao longo da rodeira exterior da via, aplicando-se uma força de impacto de 60 kN, distribuída numa placa de carga com 300 mm de diâmetro, e medindo-se as deflexões da superfície em 7 pontos. Utilizou-se o equipamento do LNEC, da marca KUAB, com excepção da 4ª campanha de ensaios, na qual foi utilizado um equipamento pertencente à firma PRONORSAN, também da marca KUAB.

4.3.4.2 - Modelos de comportamento estrutural do pavimentos

Com vista à definição das espessuras das camadas do pavimento da EN 108, foram executadas pela Direcção de Serviços Regionais de Estradas do Norte, duas sondagens por poço em cada secção, antes da realização das obras de beneficiação. Os elementos assim recolhidos relativamente à constituição do pavimento antes da obra, foram complementados com elementos fornecidos pela firma Monte e Monte S.A., relativamente às espessuras de materiais reciclados e de camadas sobrejacentes.

A partir dos valores médios das deflexões medidas com deflectómetro de impacto, e com base no conhecimento das espessuras das camadas, estabeleceram-se os modelos de comportamento estrutural dos pavimentos, para cada uma das situações estudadas, usando a metodologia habitualmente adoptada pelo LNEC para o efeito (Antunes, 1993).

Na Fig. 4.25 pode-se observar graficamente, a evolução do módulo de deformabilidade da camada reciclada ao longo das várias campanhas de ensaios efectuadas.

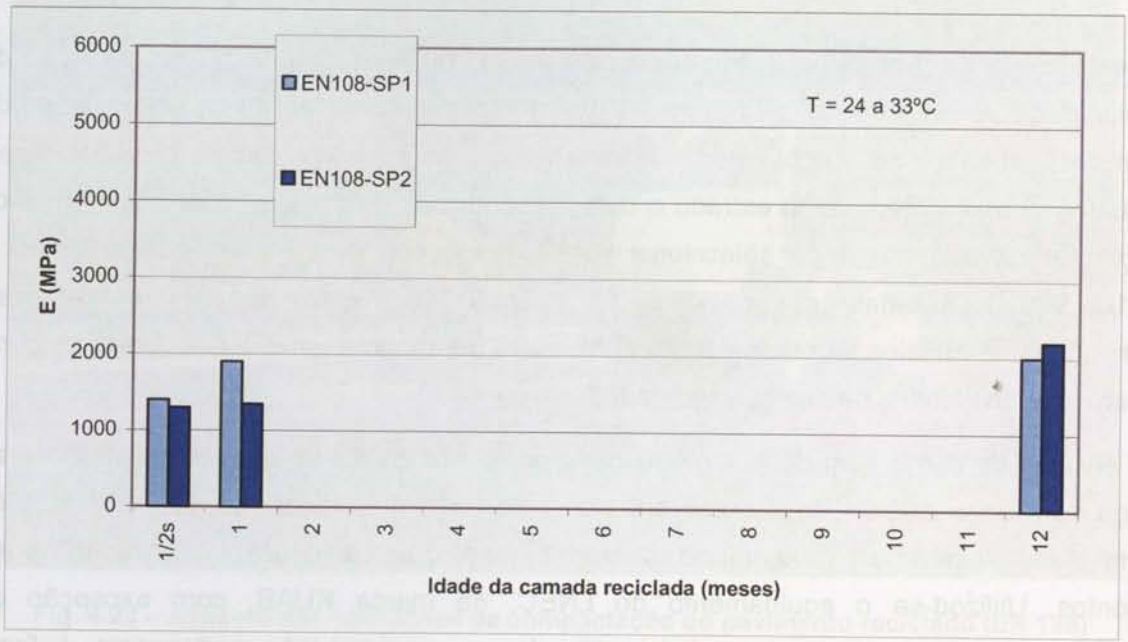


Fig. 4.25 – Módulos de deformabilidade das camada recicladas (EN 108)

Os resultados apresentados na Fig. 4.25 permitem constatar que se obtiveram módulos de deformabilidade um pouco superiores a 1 000 MPa para as camadas recicladas quando recentemente executadas, chegando-se posteriormente a valores da ordem de 2 000 MPa para as mesmas camadas, com cerca de um ano de idade.

De referir, no entanto que os valores de módulos que constam da Fig. 4.25 correspondem a ensaios de carga com deflectómetro de impacto realizados a diversas temperaturas, por vezes relativamente elevadas, em comparação com as temperaturas de "projecto" da região.

4.4 - Obra de reabilitação do pavimento da EN120 entre Aljezur e Bensafrim

4.4.1 - Breve descrição da obra

O projecto de reabilitação do pavimento da EN 120, entre Aljezur e Bensafrim (A/B), compreende a execução de uma camada em mistura a frio do tipo macadame betuminoso, com cerca de 10 cm de espessura, e de uma camada de desgaste com 4 cm em betão betuminoso.

Os trabalhos foram adjudicados à URBITERRAS. A COMPOSAN Portuguesa forneceu as emulsões betuminosas para o fabrico das misturas a frio, dando também apoio ao Empreiteiro no que concerne à formulação e controlo de qualidade das misturas.

De acordo com o estudo realizado pela COMPOSAN, a mistura de agregados, de origem calcária, é obtida através da seguinte composição:

- 50 % de pó;
- 25 % de brita nº1;
- 25 % de brita nº2.

A emulsão adoptada é do tipo "EMULGRAVA" aniónica, na designação comercial, recomendando-se uma percentagem próxima de 5,5 % sobre o peso de inertes.

Os trabalhos tiveram início em Outubro de 1998, foram interrompidos na época de chuvas intensas, e reiniciaram-se em meados de Janeiro de 1999.

4.4.2 - Caracterização dos materiais empregues

No decurso da obra foram realizados diversos ensaios com vista à caracterização dos materiais empregues.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

Quanto à granulometria da mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa a frio, representam-se graficamente na Fig. 4.26 os resultados obtidos para amostras recolhidas no estaleiro, observando-se alguma variabilidade dos resultados obtidos. Na mesma figura apresenta-se também, a fórmula de trabalho adoptada pela COMPOSAN, e ainda, o fuso granulométrico preconizado no Caderno de Encargos tipo da JAE para "camadas de agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão, com características de base ou de regularização".

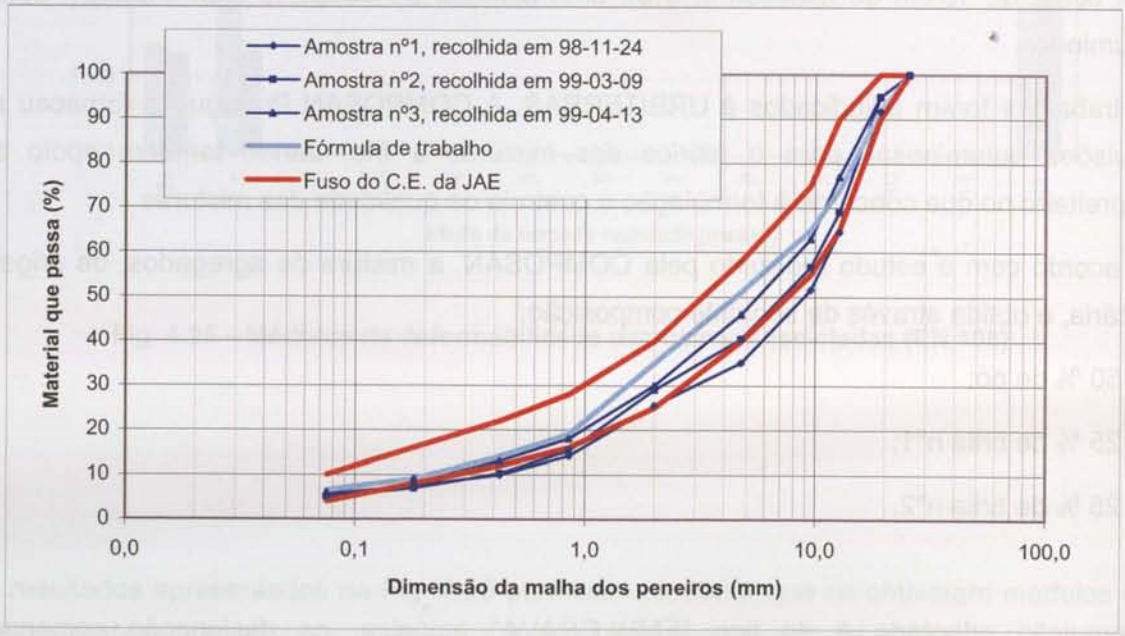


Fig. 4.26 – Granulometria da mistura de agregados (EN 120 – A/B)

No que concerne à emulsão betuminosa aniónica utilizada no fabrico da mistura, foram realizados ensaios sobre uma amostra no Núcleo de Química do Departamento de Materiais de Construção do LNEC. Da análise dos resultados obtidos verificou-se que a emulsão utilizada em obra obedecia, em geral, Especificação LNEC E 128-1984 para uma emulsão do tipo "EAL-1h".

BIBLIOTECA FE

4.4.3 - Estudo de formulação

No estudo da COMPOSAN, adoptou-se um teor em emulsão próximo de 5,5%, ou seja, uma mistura com uma percentagem de emulsão de cerca de 5,1% em relação à massa total.

Com amostras da mistura de agregados e da emulsão aniónica utilizada no fabrico da mistura betuminosa a frio, moldaram-se no LNEC, provetes de mistura a frio com crescentes percentagens de emulsão betuminosa (3,5%; 4,5%; 5,5% e 6,5%), que foram submetidos ao ensaio de "imersão-compressão", com base no método "Espanhol" (*vd* Quadro 3.12), seguindo o procedimento nº1 da norma espanhola 162/84.

No fabrico das misturas tomou-se como teor óptimo em líquidos (ω_{OPM}) para a compactação, o valor de 5,6 %, determinado através do ensaio *Proctor* modificado realizado sobre a mistura de agregados.

No Quadro 4.3 apresentam-se alguns dos resultados obtidos.

Quadro 4.3 – Características de misturas betuminosas a frio com diferentes percentagens de emulsão (EN 120 – A/B)

Execução da mistura betuminosa a frio		Nº de provetes ensaiados	Características da mistura				Ensaios de "imersão-compressão"		
Componentes	Teor em emulsão (%)		Teor em betume (%)	Teor em água (%)	Baridade máxima teórica (g/cm³)	Baridade da mistura (g/cm³)	Resistência em seco (kN)	Resistência após imersão (kN)	Resistência conservada (%)
- 93,3% de agregados - 3,2% de água - 3,5% de emulsão	3,8	3+3	2,1	5,2	2,607	2,343	22,0	11,4	52
- 93,0% de agregados - 2,5% de água - 4,5% de emulsão	4,8	3+3	2,4	4,86	2,582	2,348	17,4	11,8	68
- 92,7% de agregados - 1,8% de água - 5,5% de emulsão	5,9	3+3	2,9	3,74	2,547	2,329	16,9	10,8	64
- 92,4% de agregados - 1,1% de água - 6,5% de emulsão	7,0	3+3	3,5	3,82	2,535	2,331	14,2	9,7	68

4.4.4 - Processo construtivo

A mistura betuminosa a frio, foi fabricada numa central do tipo das já descritas anteriormente (*vd* subsecção 2.3.2.5 e 3.5.1), cuja panorâmica geral se apresenta na Fig. 4.27.



Fig. 4.27 – Panorâmica geral da central para o fabrico de misturas betuminosas a frio (EN 120 – A/B)

Na Fig. 4.28 apresenta-se em pormenor o quadro da central, onde são controladas as várias operações (dosificação dos materiais, caudal, etc).



Fig. 4.28 – Quadro de controlo das operações da central de fabrico das misturas betuminosas a frio (EN 120 – A/B)

Para o espalhamento da mistura, foi utilizada, como é habitual, uma pavimentadora, podendo-se observar um aspecto dos trabalhos de pavimentação na Fig. 4.29.



Fig. 4.29 – Execução da camada de reforço em macadame betuminoso a frio (EN 120 – A/B)

A compactação foi feita, como é usual neste tipo de misturas, através de dois cilindros: um de rasto liso e um de pneus, conforme se retrata na Fig. 4.30.



Fig. 4.30 – Trabalhos de compactação da camada em macadame betuminoso a frio (EN 120 – A/B)

Na Fig. 4.14 apresenta-se um pormenor da camada em macadame betuminoso a frio executada.



Fig. 4.31 – Aspecto da camada em macadame betuminoso a frio executada (EN 120 – A/B)

4.4.5 - Características da mistura betuminosa a frio

No âmbito do acompanhamento da obra, realizaram-se também ensaios sobre amostras da mistura recolhidas na Central.

Com cada uma das amostras de mistura betuminosa a frio recebidas, moldaram-se 6 provetes para realização do ensaio de "imersão-compressão" (Procedimento nº 1 da norma espanhola NLT 162/84), após sujeição ao processo de cura. Neste caso, optou-se não só por se realizarem ensaios com provetes curados de acordo com o procedimento habitual (1 dia à temperatura ambiente e 3 dias em estufa a 60ºC), mas realizou-se também um ensaio cujos provetes foram sujeitos a um período de cura de 15 dias à temperatura ambiente. Determinaram-se as resistências obtidas no ensaio de "imersão-compressão" e a baridade da mistura moldada.

Efectuaram-se também neste caso, ensaios para determinação do teor em betume, do teor em água e da baridade máxima teórica das amostras.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Características da mistura betuminosa a frio recolhida à saída da Central (EN 120 – A/B)

Amostra		Nº de provetes ensaiados	Caracteristicas da mistura			Ensaios de imersão-compressão			
Nº	Descrição		Teor em betume	Teor em água	Baridade máxima teórica	Baridade da mistura	Resistência em seco	Resistência após imersão	Resistência conservada
			(%)	(%)	(g/cm^3)	(g/cm^3)	(kN)	(kN)	(%)
5	Recolhida em 1998-11-24	3+3	3,5	4,16	2,521	2,350	20,8 (1)	8,8 (1)	42 (1)
6	Recolhida em 1999-03-09	3+3	3,3	3,45	2,562	2,332	17,1 (1)	10,2 (1)	60 (1)
7	Recolhida em 1999-04-13	3+3	3,1	4,51	2,527	2,314	22,1 (1)	8,5 (1)	38 (1)
8	Recolhida em 1999-04-27	3+3	2,6	3,04	2,560	2,336	14,7 (2)	2,5 (2)	17 (2)

(1) O processo de cura dos provetes consistiu na secagem ao ar, à temperatura ambiente, durante um dia e, em estufa, a 60ºC, durante os três dias subsequentes

(2) O processo de cura dos provetes efectuou-se à temperatura ambiente, durante 15 dias.

Verificou-se existir uma grande variabilidade da composição das misturas recolhidas em obra, o que se reflectiu nos resultados obtidos no ensaio de "imersão-compressão". Assim, a avaliação da influência das condições cura fica limitada a esta circunstância, podendo-se observar apenas que a mistura curada à temperatura ambiente durante 15 dias apresentou uma resistência à compressão simples, depois da imersão dos provetes, inferior ao valor mínimo (5 kN) preconizado no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998).

Quanto às misturas curadas segundo o procedimento habitual, mesmo as que apresentaram resistências conservadas inferiores ao mínimo exigido naquele Caderno de Encargos (60%), apresentaram resistências à compressão simples depois da imersão dos provetes muito acima do preconizado (5 kN).

4.5 - Obra de Reabilitação do Pavimento da EN 120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro

4.5.1 - Descrição da obra

No âmbito da obra de reabilitação da EN 120, entre Odemira (km 103,322) e o Limite de Distrito de Faro (km 127,736) procedeu-se ao reforço do pavimento com uma camada do tipo macadame betuminoso a frio. A obra de reabilitação do pavimento do lanço da EN 120 em estudo, decorreu essencialmente durante o segundo semestre de 2000, tendo o adjudicatário sido a empresa PROBISA Portuguesa – Construção e Obras Públicas, S.A., e tendo a fiscalização estado a cargo da Direcção de Estradas de Beja.

Segundo dados fornecidos pela Direcção de Estradas de Beja, extraídos do projecto de reabilitação, «a estrutura do pavimento no lanço em apreço é constituída por uma camada de macadame com 0,18 m de espessura, executada em 1936, sobre a qual se efectuou em 1953 e 1955 um revestimento superficial betuminoso em 2 aplicações com 2 kg/m^2 e 1 kg/m^2. O troço foi ainda alvo de várias "recargas betuminosas" com cerca de 1 kg/m^2 executadas entre 1974 e 1976. Finalmente, nos anos de 1992 e 1993 foi executado ao longo do troço um revestimento superficial betuminoso».

Sob o ponto de vista geológico considerou-se no projecto que o traçado da EN 120 se desenvolvia sobre uma zona bastante heterogénea, com valores do CBR do terreno de fundação variando entre 6 e 10%. Os solos são normalmente do tipo A-2-4 segundo a classificação AASHO, ocorrendo também solos do tipo A-3, A-4 e A-6.

Quanto ao estado da sua superfície, o pavimento flexível a reabilitar apresentava algumas anomalias, destacando-se a ocorrência de fendilhamento tipo pele de crocodilo nalgumas áreas, bem como a ocorrência de deformações permanentes localizadas.

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

- Execução de uma camada de pré-regularização em macadame betuminoso a frio;
- Execução de uma camada de regularização em macadame betuminoso a frio com uma espessura nominal de 10 cm;
- Camada de desgaste em micro-aglomerado betuminoso a frio.

No projecto, para zonas localizadas em que o pavimento se encontrava muito degradado, previu-se também a realização de saneamentos e a colocação de camadas novas.

Para o fabrico da mistura de ABGETE utilizaram-se agregados de natureza diorítica, provenientes da pedreira da TECNOVIA de Ourique-Gare, e uma emulsão catiónica de rotura lenta, com o betume base duro (ECL-1h).

A escolha da composição adoptada para a mistura foi efectuada com base no "Estudo da base tratada com emulsão", realizado pela PROBISA (2000). Com base nos resultados desse estudo de formulação, adoptou-se a seguinte fórmula de trabalho (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)
- 2.5 % de água de adição[6]

4.5.2 - Caracterização dos materiais empregues no fabrico da mistura de macadame betuminoso a frio

Foram caracterizadas no LNEC amostras, quer dos agregados, quer da emulsão betuminosa a utilizar no fabrico da mistura de macadame betuminoso a frio da obra em apreço.

Atendendo a que os materiais aplicados nesta obra foram utilizados no estudo experimental realizado no âmbito da presente dissertação (*vd* Capítulos 5 e 6), apresentam-se alguns resultados relativos à caracterização dos materiais, de forma mais detalhada.

Os resultados obtidos na análise granulométrica da mistura de agregados (especificações LNEC E 233 e LNEC E 235), bem como a fórmula de trabalho estabelecida no estudo realizado pela PROBISA e o fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) para misturas do tipo ABGETE, apresentam-se na Fig. 4.32. Através da observação desta figura verifica-se que a curva granulométrica da mistura de agregados se enquadra no fuso granulométrico preconizado no Caderno de Encargos tipo da JAE, afastando-se no entanto da fórmula de trabalho adoptada, no material que passa nos peneiros ASTM 9,4 mm (3/8") e 12,5 mm (½").

[6] Valor estimado com vista à obtenção de um teor em líquidos de 5%, e posteriormente ajustado em obra por forma a ter em conta a dessecação durante o transporte da mistura.

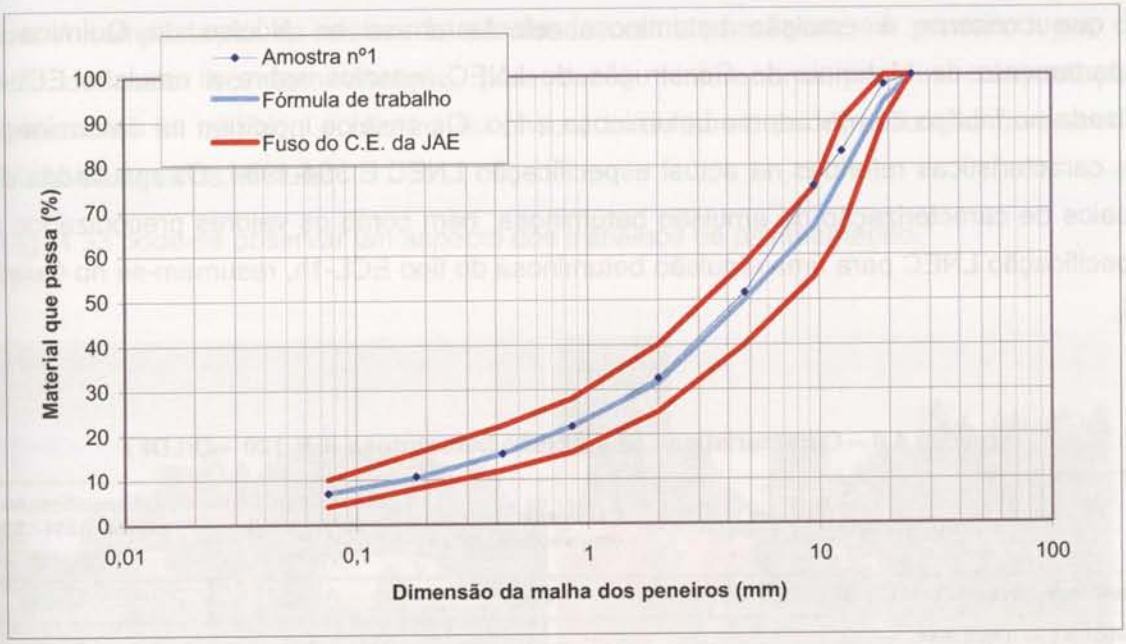


Fig. 4.32 – Curva granulométrica da mistura de agregados, fórmula de trabalho e fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos tipo da JAE (EN 120 – O/LDF)

No que diz respeito à mistura de agregados realizaram-se também ensaios para determinar a perda por desgaste na máquina de *Los Angeles*, o equivalente de areia e a absorção de água e compararam-se os valores obtidos com os preconizados no Caderno de Encargos tipo da JAE para o tipo de misturas em apreço. No Quadro 4.5 apresentam-se estes valores.

Quadro 4.5 – Características da mistura de agregados (EN 120 – O/LDF)

Designação do ensaio		Valores	
		Amostra ensaiada no LNEC	Caderno de Encargos tipo da JAE
Perda por desgaste na máquina de *Los Angeles* (LNEC E 237)		20% (Granulometria B)(1)	≤ 40% (Granulometria A)
Equivalente de areia (LNEC E 199)		45%	≥ 40%
Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes (NP 954, NP 581)	Gravilha 12/20	2,6% (valor ponderado)	≤ 3%
	Gravilha 6/12		≤ 3%
	Pó 0/6		≤ 3%

(1) Os agregados recebidos no LNEC não permitiram a realização do ensaio de desgaste de Los Angeles com a granulometria A, conforme preconizado no Caderno de Encargos da JAE, pelo que o ensaio foi realizado com a granulometria B.

Da apreciação dos resultados apresentados no Quadro 4.5 considera-se que os agregados da mistura cumprem os requisitos mínimos exigidos no Caderno de Encargos tipo da JAE.

No que concerne à emulsão betuminosa, efectuaram-se no Núcleo de Química do Departamento de Materiais de Construção do LNEC, ensaios sobre a emulsão ECL-1h utilizada no fabrico do macadame betuminoso a frio. Os ensaios incidiram na determinação das características referidas na actual especificação LNEC E 354-1984. Os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão betuminosa, bem como os valores preconizados na especificação LNEC para uma emulsão betuminosa do tipo ECL-1h, resumem-se no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Características da emulsão betuminosa (EN 120 – O/LDF)

Propriedades		Características da emulsão ensaiada	Emulsão ECL-1h GRAVAMUL PROBISA	Especificação LNEC E354-1984 "ECL-1h"
Viscosidade Saybolt Furol (25°C), s		23,3	< 50	20 – 100
Sedimentação aos 5 dias, %		33	-	≤ 5
Sedimentação aos7 dias, %		-	< 5	≤ 7
Peneiração, %		0,01	< 0,1	-
Rotura com cimento, %		22,8	-	≤ 2,0
Carga da partícula		Positiva	Positiva	Positiva
pH		-	2,5 – 3,5	-
Destilação	Resíduo, % (m/m)	61	> 57	≥ 57
Resíduo de destilação	Penetração (25°C, 100g, 5s), 10^{-1} mm	62	80 – 100	40 – 90
	Ductibilidade, (25°C, 5 cm/min), cm	> 100	-	≥ 40
	Solubilidade no tolueno, %	99,64	-	≥ 97,5

A leitura do Quadro 4.6 permite concluir que os valores obtidos se enquadram dentro dos valores especificados, à excepção do da sedimentação e da rotura com cimento, à semelhança do obtido já em casos anteriores (*vd* Quadro 4.1 e Quadro 4.2).

4.5.3 - Processo construtivo

Para o fabrico da mistura betuminosa a frio foi utilizada uma central "ROHER", que permite a dosificação dos vários componentes da mistura volumetricamente. Consoante o tempo de mistura pretendido, obtêm-se produções entre 165 e 180 ton./h.

A compactação foi realizada através de dois cilindros: um de rasto liso, modelo da HAMM "HD90", e um de pneus, da Caterpillar "PS – 300B", com um peso máximo em serviço de

21 ton. A compactação da mistura foi efectuada com a passagem, em primeiro lugar, do cilindro de rasto liso, com vibração, para dar à mistura uma primeira compactação. Seguidamente foi utilizado o cilindro de pneus, tendo como principal função favorecer a expulsão da água da mistura.

Na Fig. 4.33 pode-se observar um aspecto dos trabalhos de pavimentação.



Fig. 4.33 – Execução da camada de macadame betuminoso a frio (EN 120 – O/LDF)

4.5.4 - Composição da mistura aplicada

No decurso da obra de reabilitação em estudo, o LNEC recolheu amostras da mistura de macadame betuminoso a frio, quer na central de fabrico da mistura, quer durante o seu espalhamento.

Sobre estas amostras, realizaram-se ensaios em laboratório para determinação do teor em água e da quantidade de betume residual da mistura. No Quadro 4.7 identificam-se as amostras recolhidas e apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios referidos.

Quadro 4.7 – Teor em água e teor em betume residual da mistura produzida em obra (EN 120 – O/LDF)

Identificação da amostra	Data de recolha da amostra	Local de recolha da amostra	Teor em água da mistura (LNEC E 79)	Teor em betume residual da mistura (Centrifugação, ASTM D2172-método A)
M1	11-Jul-00	Central	6,2	-
M2		*Espalhadora*	*5,8*	*3,7*
M3	19-Jul-00	Central	6,1	3,9
M4		*Espalhadora*	*5,8*	*3,8*
M5	26-Jul-00	Junto à Central (1)	5,3	3,9
M6	9-Ago-00	Central	5,2	3,4
M7		*Espalhadora*	*4,7*	-
M8	14-Set-00	Central	5,5	3,8
M9		*Espalhadora*	*5,5*	-

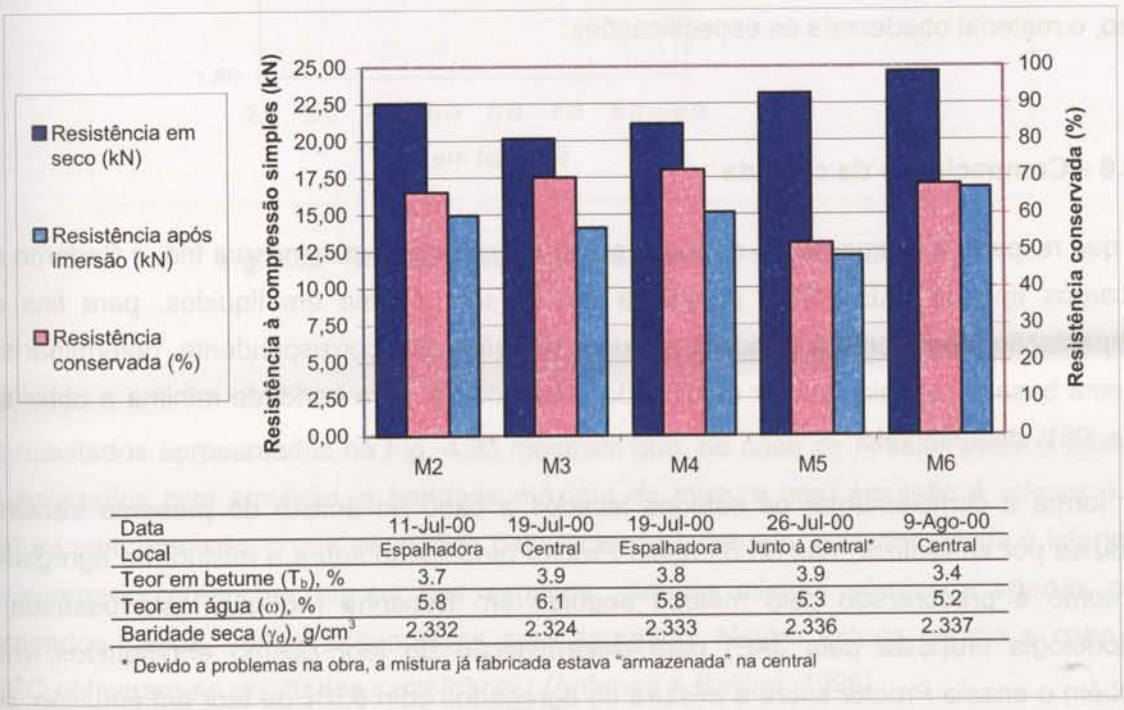
(1) Devido a problemas na obra, a mistura já fabricada encontrava-se "armazenada" na central por tempo indeterminado.

Os resultados apresentados no Quadro 4.7 permitem constatar o seguinte:

- O teor em água das misturas recolhidas na espalhadora, variou entre 4,7 e 5,8%, tomando pois valores em redor dos 5% (teor óptimo em água determinado através do ensaio Proctor modificado realizado sobre a mistura de agregados+emulsão, no Estudo da PROBISA (Antunes *et al.*, 1999d);
- No Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) recomenda-se que no estabelecimento do valor de água de adição a adoptar em obra se deve ter em consideração a dessecação durante o transporte da mistura, apontando-se, como regra geral, um aumento de cerca de 1% para ter em conta este aspecto, dependendo das condições climatéricas e da distância de transporte. Os valores acima apresentados no que respeita aos teores em água de amostras de misturas recolhidas no mesmo dia, na central e quando do seu espalhamento, apresentam, conforme seria de esperar, diferenças entre si, embora não tão acentuadas;
- Os teores em betume residual determinados variam, à excepção de uma amostra, entre os 3,7 e os 3,9%. A PROBISA havia especificado na sua fórmula de trabalho, 6,5% de emulsão (em relação à massa dos inertes), ou seja, um teor em betume residual de cerca de 3,9%. Se se atender ao facto de que a tolerância admitida na percentagem de betume residual pela JAE, em relação à fórmula de trabalho, é de ±0,5%, verifica-se que mesmo a amostra que apresentou um teor em betume mais baixo (M6) cumpre este requisito.

4.5.5 - Ensaios de "imersão-compressão"

No âmbito do presente trabalho, realizaram-se no LNEC, ensaios de "imersão-compressão", com as misturas que tinham sido recolhidas na obra, e que foram identificadas na secção anterior. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento preconizado no método "Espanhol" (*vd* Quadro 3.12), representando-se graficamente os resultados obtidos na Fig. 4.34.



Data	11-Jul-00	19-Jul-00	19-Jul-00	26-Jul-00	9-Ago-00
Local	Espalhadora	Central	Espalhadora	Junto à Central*	Central
Teor em betume (T_b), %	3.7	3.9	3.8	3.9	3.4
Teor em água (ω), %	5.8	6.1	5.8	5.3	5.2
Baridade seca (γ_d), g/cm^3	2.332	2.324	2.333	2.336	2.337

* Devido a problemas na obra, a mistura já fabricada estava "armazenada" na central

Fig. 4.34 – Ensaios de "imersão-compressão", realizados sobre provetes moldados com mistura recolhida em obra (EN 120 – O/LDF)

Os resultados apresentados na Fig. 4.34 permitem constatar que, de um modo geral, as misturas fabricadas em obra obedecem às especificações do Caderno de Encargos tipo da JAE relativamente à resistência "após imersão" (≥ 5 kN) e à resistência conservada (≥ 60 %), sendo os valores da resistência "após imersão" muito superiores ao mínimo especificado.

Verificou-se apenas um caso em que a mistura possuía uma resistência conservada inferior a 60 %, que corresponde à mistura que esteve armazenada, por tempo indeterminado, antes de ser recolhida.

De referir que a experiência adquirida até ao presente pelo LNEC relativamente às resistências de misturas a frio em ensaios de "imersão-compressão", indica que o valor mínimo de 5 kN especificado no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) para a resistência após imersão parece ser desajustado, uma vez que é, em regra, largamente excedido. Salienta-se ainda que os valores especificados em Espanha, para esta grandeza e para camadas de base ou superiores, se situam entre 5 kN e 12 kN consoante a classe de tráfego aplicável (*vd* Quadro 3.14). No presente caso, de acordo com informações prestadas pela Direcção de Estradas de Beja, estar-se-ia dentro da classe T3 da classificação espanhola, a que corresponde um valor mínimo de resistência à compressão simples após imersão de 7,5 kN de acordo com as especiicações vigentes naquele país. Mesmo neste caso, o material obedeceria às especificações.

4.5.6 - Compacidade da camada

No que respeita à compactação de misturas em macadame betuminoso a frio, o Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) preconiza que "o teor óptimo em líquidos, para fins de compactação, bem como a baridade máxima de referência correspondente, determinar-se-ão com base no ensaio *Proctor* modificado, tomando-se, para baridade mínima a obter em obra, 98% daquele valor".

Por forma a complementar os estudos levados a cabo no âmbito do presente trabalho, optou-se por se realizar, não só o ensaio *Proctor* modificado sobre a mistura de agregados tal como é preconizado pelo método seguido em Espanha (no qual está baseada a metodologia proposta pela JAE) para determinação do teor óptimo em líquidos, mas também o ensaio *Proctor* sobre a mistura de agregados com 6,5% de teor em emulsão, por ser o teor em emulsão empregue na obra. Os resultados dos dois ensaios de compactação apresentam-se na Fig. 4.35.

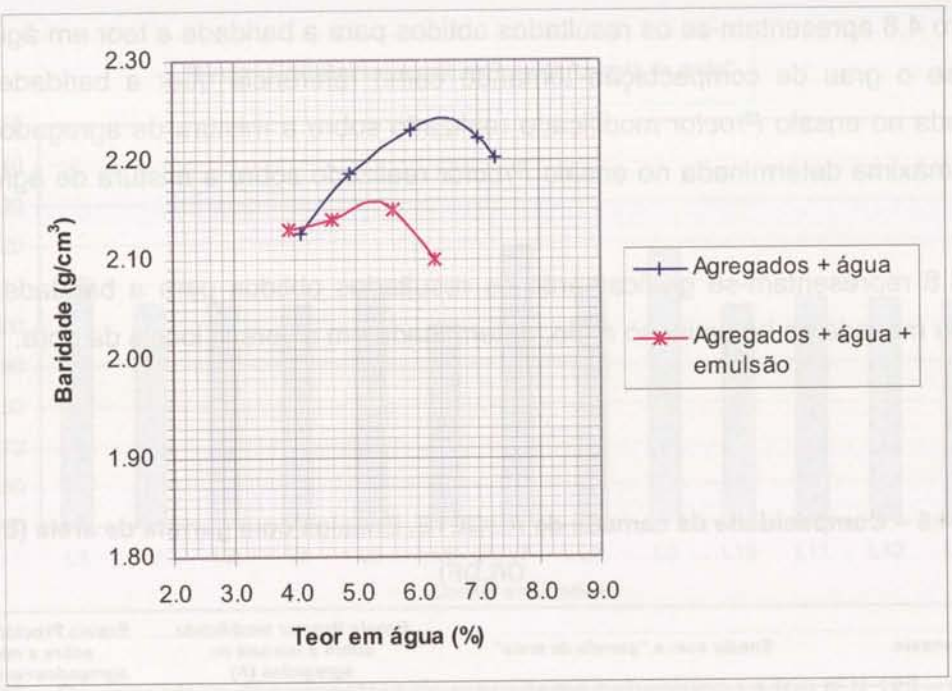


Fig. 4.35 – Ensaio Proctor modificado (EN 120 – O/LDF)

Os resultados apresentados na Fig. 4.35 mostram que, no caso do *Proctor* sobre a mistura de agregados com emulsão, a baridade máxima da mistura com emulsão é inferior à da mistura sem emulsão, o que se explica pelo facto de o betume, cuja densidade é inferior à do agregado, preencher alguns dos espaços, que na mistura efectuada apenas com agregados + água, seriam preenchidos com agregado. Noutro estudo levado a cabo no LNEC obtiveram-se resultados semelhantes (Antunes & Batista, 1999).

Por outro lado, o teor em água óptimo é inferior ao obtido no *Proctor* realizado sem emulsão. Tal explica-se pelo facto de o próprio betume contido na emulsão contribuir para a trabalhabilidade da mistura, pelo que não será necessária a mesma quantidade de água que para as misturas constituídas unicamente por água + agregados.

Com o objectivo de avaliar a compacidade da camada de macadame betuminoso a frio executada em obra, foram realizados ensaios para medição da baridade *in situ* da referida camada, pelo método da garrafa de areia, em pontos situados nas rodeiras externas de cada uma das vias do lanço da EN 120 em análise. Estes ensaios foram realizados após a conclusão dos trabalhos de pavimentação, mesmo no início da vida em serviço deste lanço, ou seja, numa altura em que a compacidade da camada era devida apenas à acção dos cilindros compactadores.

No Quadro 4.8 apresentam-se os resultados obtidos para a baridade e teor em água *in situ*, e avalia-se o grau de compactação tomando como referência quer a baridade máxima determinada no ensaio *Proctor* modificado realizado sobre a mistura de agregados, quer a baridade máxima determinada no ensaio *Proctor* realizado sobre a mistura de agregados e emulsão.

Na Fig. 4.8 representam-se graficamente os resultados obtidos para a baridade seca da camada de macadame betuminoso a frio, determinada em diversos locais da obra.

Quadro 4.8 – Compacidade da camada de ABGETE. Ensaios com garrafa de areia (EN 120 – O/LDF)

Local de ensaio		Ensaio com a "garrafa de areia"			Ensaio Proctor modificado sobre a mistura de agregados (A)		Ensaio Proctor modificado sobre a mistura de agregados+emulsão (A+E)	
Identificação	Localização	Baridade húmida *in situ*	Teor em água *in situ*	Baridade seca *in situ*	Baridade máxima	Grau de compactação da camada	Baridade máxima	Grau de compactação da camada
		γ_w (g/cm^3)	ω_0 (%)	γ_d (g/cm^3)	$\gamma_{máx.}$(A) (g/cm^3)	$\gamma_d/\gamma_{máx.}$ (A) (%)	$\gamma_{máx.}$(A+E) (g/cm^3)	$\gamma_d/\gamma_{máx.}$(A+E) (%)
L1	Km 120+300 Sentido LDF-O	2,15	1,2	2,12	2,24	95	2,16	98
L2	Km 119+100 Sentido LDF-O	2,10	2,5	2,05	2,24	92	2,16	95
L3	Km 118+600 Sentido LDF-O	2,14	4,2	2,05	2,24	92	2,16	95
L4	Km 118+560 Sentido LDF-O	2,11	3,3	2,05	2,24	92	2,16	95
L5	Km 117+900 Sentido LDF-O	2,15	3,0	2,09	2,24	93	2,16	97
L6	Km 114+200 Sentido O-LDF Ob.: Sombra	2,09	4,9	2,00	2,24	89	2,16	93
L7	Km 113+500 Sentido O-LDF	2,28	4,2	2,19	2,24	98	2,16	101
L8	Km 112+184 Sentido LDF-O	2,18	3,3	2,11	2,24	94	2,16	98
L9	Km 111+600 Sentido LDF-O	2,28	4,8	2,18	2,24	97	2,16	101
L10	Km 124+846 Sentido LDF-O	2,14	4,7	2,04	2,24	91	2,16	94
L11	Km 123+947 Sentido LDF-O	2,14	3,8	2,06	2,24	92	2,16	95
L12	Km 124+677 Sentido O-LDF	2,15	4,9	2,05	2,24	92	2,16	95
L13	Km 123+947 Sentido O-LDF	2,11	3,4	2,04	2,24	91	2,16	94

LEGENDA: O – Odemira; LDF – Limite do Distrito de Faro

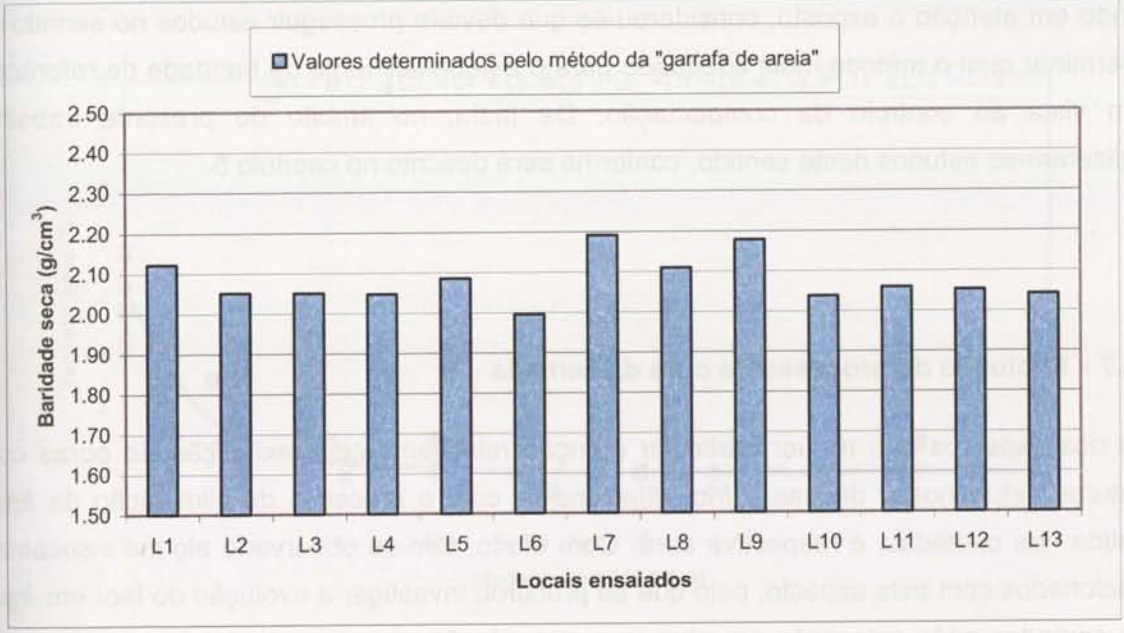


Fig. 4.36 – Compacidade das amostras de macadame betuminoso a frio (EN 120 – O/LDF)

Através da análise dos resultados apresentados no Quadro 4.8 pode-se constatar que:

- À excepção de um dos locais ensaiados (L7), os Graus de Compactação obtidos em obra são inferiores ao mínimo preconizado no Caderno de Encargos tipo da JAE, que é de 98% em relação à baridade obtida no ensaio *Proctor* modificado realizado sobre a mistura de agregados;
- Os valores de baridade obtidos em obra são inferiores aos valores obtidos nos provetes moldados em laboratório segundo a norma NLT 161/84, com mistura recolhida em obra, sendo estes últimos superiores a 2,32 g/cm^3, tal como se apresentou na Fig. 4.34.
- Os valores de baridade obtidos em obra apenas se aproximam dos valores obtidos no ensaio *Proctor* realizado sobre a mistura de agregados com emulsão.

Cabe aqui referir que durante o acompanhamento da obra, apenas houve oportunidade de realizar um único ensaio *Proctor* de referência sobre a mistura de agregados e emulsão, não tendo pois sido avaliada a reprodutibilidade dos resultados obtidos neste ensaio. Assim, a generalização das considerações anteriores deve ser encarada com reserva.

No entanto, os ensaio cujos resultados se apresentaram na Fig. 4.35, permitiram, ainda assim, constatar que, embora no Caderno de Encargos da JAE (1998) se preconize que o controlo da compactação seja efectuado com base nos resultados do ensaio *Proctor* modificado realizado sobre os agregados, a compactação da mistura é muito afectada pela presença da emulsão.

Tendo em atenção o exposto, considerou-se que deviam prosseguir estudos no sentido de determinar qual o método mais adequado para o estabelecimento da baridade de referência com vista ao controlo da compactação. De facto, no âmbito do presente trabalho, realizaram-se estudos neste sentido, conforme será descrito no capítulo 5.

4.5.7 - Evolução do processo de cura da camada

Um dos aspectos que requer particular atenção relativamente à execução de obras com misturas betuminosas densas a frio, relaciona-se com o processo de eliminação da água contida nas camadas, e respectiva cura. Com efeito, têm-se observado alguns insucessos relacionados com este aspecto, pelo que se procurou investigar a evolução do teor em água das camadas após colocação em obra, e a sua relação com a evolução da resistência da mistura.

Este aspecto 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;
- O teor em água da camada de mistura a frio está estabilizado antes de executar as camadas sobrejacentes, dado que estas, uma vez realizadas, condicionarão a posterior eliminação da água ainda contida na mistura.

No sentido dar seguimento aos estudos acima referidos, seleccionou-se um conjunto de locais ao longo da obra (*vd* Quadro 4.8), nos quais foi monitorizada a evolução do teor em água da camada ao longo do tempo. Os resultados obtidos representam-se graficamente na Fig. 4.37. Anota-se que os ensaios foram realizados em condições de tempo seco, e que não foi aplicada qualquer camada sobre o macadame betuminoso a frio, durante o período de observação.

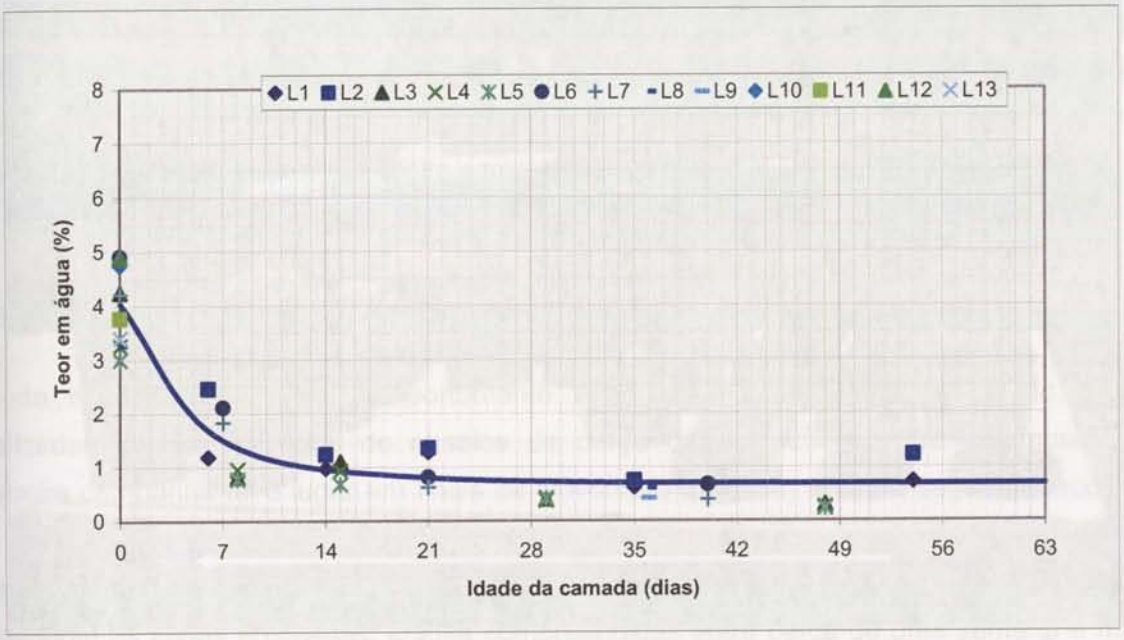


Fig. 4.37 – Evolução do teor em água da mistura com a idade da camada (EN 120 – O/LDF)

Os resultados apresentados na Fig. 4.37 permitem verificar que o teor em água da camada estabilizou num valor de cerca de 1% a partir de duas a quatro semanas de idade, embora se tenha constatado que, como é óbvio, este aspecto é muito influenciado pelas condições climatéricas e pelas condições de exposição ao Sol. De referir que a obra foi executada durante o Verão, ou seja, em condições climatéricas favoráveis, admitindo-se que para obras executadas no Inverno o tempo necessário à estabilização do teor em água seja superior.

Paralelamente, foram recolhidos, através de sondagens à rotação, tarolos da camada de macadame betuminoso a frio, considerando que a profundidade até à qual é possível recolher uma amostra íntegra (designada por "altura" dos tarolos) é uma medida indicadora do avanço do processo de cura da camada. Na Fig. 4.38 apresenta-se uma fotografia dos tarolos recolhidos e na Fig. 4.39 pode-se observar graficamente a evolução da altura dos tarolos com a idade da camada.



Fig. 4.38 – Tarolos extraídos à rotação da camada de ABGETE (EN 120 – O/LDF)

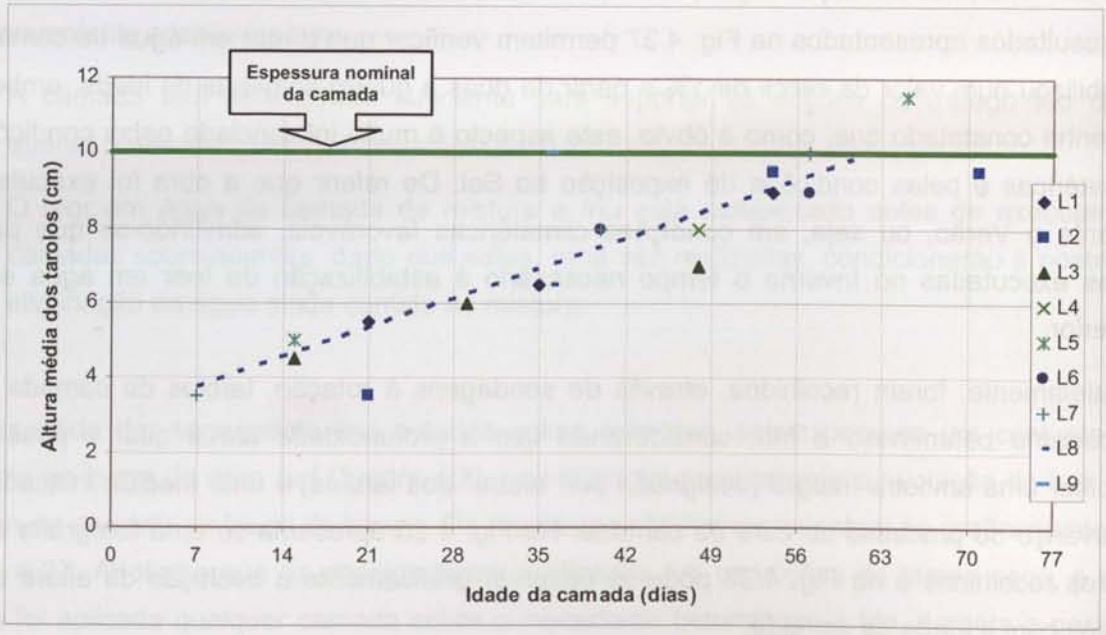


Fig. 4.39 – Evolução da altura dos tarolos extraídos através de sondagens à rotação, com a idade da camada (EN 120 – O/LDF)

Importa referir que para idades da camada inferiores a 7 dias não foi possível extrair tarolos, o que parece indicar que em idades jovens a mistura ainda não tem coesão suficiente para que possa ser considerada como um material "ligado".

A interpretação dos resultados obtidos permitem concluir que o facto de o teor em água estabilizar não significa necessariamente que a cura da mistura esteja totalmente completa. Aliás, a obtenção de tarolos íntegros em toda a espessura da camada (10 cm), só foi possível para idades superiores a oito semanas.

4.5.8 - Caracterização estrutural do pavimento

Tendo em vista avaliar o comportamento estrutural do pavimento reabilitado, foram realizadas duas campanhas de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto. A primeira campanha teve lugar em finais de Novembro de 2000, tendo a segunda decorrido no início de Dezembro de 2000 (Antunes *et al.*, 1999d). À época de realização de ambas as campanhas de ensaios de carga, a camada de macadame betuminoso a frio apresentava, consoante as zonas ensaiadas, idades compreendidas entre cerca de uma semana e meio ano.

Os ensaios de carga com deflectómetro de impacto realizaram-se com o equipamento do LNEC, da marca KUAB, em pontos situados ao longo da rodeira exterior da via, aplicando-se uma força de impacto de 50 kN, distribuída numa placa de carga com 300 mm de diâmetro, e medindo-se as deflexões da superfície em 7 pontos.

Os resultados obtidos nas campanhas de ensaios de carga com deflectómetro de impacto, conjuntamente com os elementos relativos à estrutura do pavimento, serviram de base para a determinação dos módulos de deformabilidade das camadas constituintes do pavimento e respectiva fundação.

Para o estabelecimento dos modelos de comportamento estrutural do pavimento, recorreu-se à metodologia habitualmente seguida pelo LNEC em estudos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos (Antunes, 1993), e estimaram-se os módulos de deformabilidade das camadas em cada um dos locais "representativos", utilizando o programa de cálculo ELSYM 5 para o cálculo de deflexões.

Na Fig. 4.40 relacionam-se, sob a forma de gráfico, os módulos de deformabilidade obtidos para a mistura de macadame betuminoso a frio com a idade da camada, para cada uma das vias ensaiadas. Anota-se que os valores apresentados naquela figura não entram em linha de conta com qualquer tipo de correcção para ter em consideração a temperatura da camada. À data de interpretação dos ensaios não se conhecia qualquer tipo de correlação entre os módulos de deformabilidade deste tipo de materiais e a temperatura, e admitia-se, tendo em atenção que se tratam de misturas com teores em betume residual relativamente baixos, que a dependência do módulo em relação à temperatura fosse menor que no caso

das misturas a quente. Por outro lado, os ensaios foram efectuados na mesma época do ano, para uma gama de temperaturas na superfície do pavimento entre 20 e 25ºC, a que corresponde uma gama mais estreita para as temperaturas no interior das camadas betuminosas.

Neste contexto, considerou-se ser oportuno desenvolver, no âmbito do presente trabalho, estudos para avaliação da influência da temperatura no módulo de deformabilidade deste tipo de misturas. Os estudos levados a cabo serão apresentados no Capítulo 6.

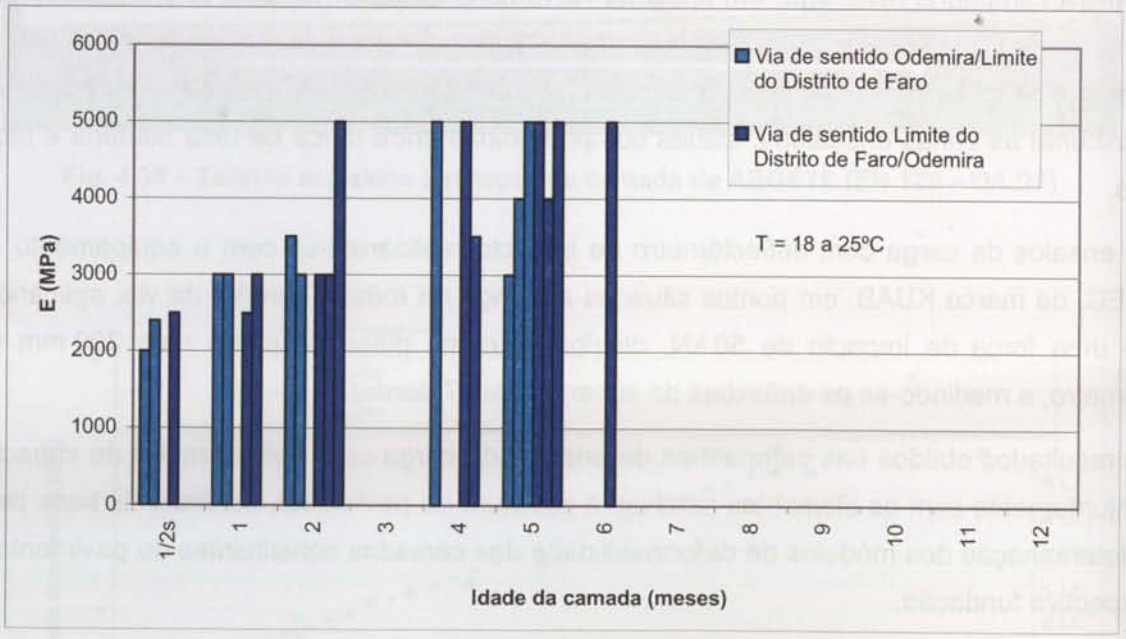


Fig. 4.40 – Módulos de deformabilidade da camada de macadame betuminoso a frio (EN 120 – O/LDF)

Da observação da Fig. 4.40, pode-se constatar, no que concerne à camada de macadame betuminoso a frio, que:

- Os módulos de deformabilidade estimados para a camada de macadame betuminoso a frio, apresentam valores mais baixos em zonas em que esta camada apresentava idades mais jovens (cerca de uma a duas semanas) e valores mais altos em zonas de idades mais avançadas (três a seis meses). Tal facto vem de encontro ao expectável, uma vez que se esperava que à medida que o processo de cura da camada fosse avançando,

assim fossem evoluindo as propriedades mecânicas da mistura, em particular o módulo de deformabilidade;

- Após dois meses de construção da camada, o módulo de deformabilidade estabilizou em cerca de 3 000 a 5 000 MPa;
- O módulo de deformabilidade atingido dois meses após a construção da camada, é em geral mais do que o dobro do módulo obtido para idades iniciais (menos de um mês). Existem contudo, zonas localizadas do pavimento, em que o módulo da camada de macadame betuminoso a frio não sofreu o mesmo aumento com a idade que a generalidade das outras zonas. Tal poder-se-á dever a diversos factores, como sejam: variações no fabrico e aplicação da mistura, zonas geometricamente mais desfavoráveis à drenagem da água, zonas com condições climatéricas mais desfavoráveis (menor exposição solar), etc;
- A estabilização do módulo ao fim de cerca de dois meses de execução da camada, coincide com a idade da camada a partir da qual foi possível extrair tarolos íntegros em toda a altura da mesma camada (*vd* subsecção 4.5.7).

4.6 - Obra de reabilitação do pavimento do IP2 entre a Barragem do Fratel e a EN 118

4.6.1 - Descrição da obra

A presente secção refere-se à execução 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 *in situ* a frio com emulsão betuminosa, numa extensão aproximada de 11 km.

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. A fiscalização da obra ficou a cargo da Direcção de Estradas de Portalegre (DEP) do ICERR, actual IEP.

De acordo com os elementos fornecidos pela DEP, o pavimento flexível a reabilitar, havia sido construído em 1992, e era constituído por 30 cm de agregado de granulometria extensa, 12 cm de mistura betuminosa densa e 4 cm de camada de desgaste em betão betuminoso.

No que concerne ao solo de fundação, os elementos disponíveis do projecto de construção permitem constatar que o solo de fundação do lanço é 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.

A extensão total do pavimento a reabilitar era de cerca de 11 km, estando compreendida entre a barragem do Fratel (proximidades do km 152+000) e a EN118/Nó de Arêz (proximidades do km 163+000).

Em 2002, decorridos dez anos 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, tal como se pode observar nas Figuras 4.41 e 4.42.



Fig. 4.41 – Aspecto da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (IP2)



Fig. 4.42 – Pormenor da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação (IP2)

Nesta 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.

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 15 cm, utilizando adição de emulsão betuminosa;
- Execução de uma camada de reforço com características de regularização, em macadame betuminoso, com uma espessura de 7 cm;
- Execução de uma camada de reforço com características de desgaste em microbetão betuminoso rugoso, com uma espessura de 3 cm.

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 da 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 e a programação dos condicionamentos de tráfego em cada secção.

As actividades desenvolvidas pelo LNEC durante o acompanhamento desta obra (Antunes & Batista, 2004), para além de compreenderem a prestação de apoio técnico à Direcção de Estradas de Portalegre (DEP), tiveram em vista o aperfeiçoamento dos conhecimentos no domínio da reciclagem *in situ* de pavimentos. Nas secções seguintes descrevem-se alguns dos resultados alcançados.

4.6.2 - Caracterização dos materiais empregues na reciclagem

A observação de tarolos extraídos ao longo do troço a reabilitar permitiu verificar que o pavimento apresentava uma certa homogeneidade quer em termos do tipo de materiais constituintes, quer em termos das espessuras das camadas, confirmando-se que a reciclagem do pavimento até à profundidade de 15 cm consistiria essencialmente na reciclagem de misturas betuminosas.

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.

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, bem como a granulometria dos agregados. A análise destes resultados permitiu concluir que a camada a reciclar possuía um teor em betume da ordem de 5% e que não seria necessária a adição de quaisquer materiais com vista à correcção da granulometria.

No que concerne ao estudo de formulação de misturas recicladas, tal com já foi exposto anteriormente, a experiência adquirida 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.

Na Fig. 4.43 apresentam-se algumas das características das amostras de material fresado recolhidas nesta fase, em particular, a granulometria, o equivalente de areia (EA) e o teor em betume residual (Tbr).

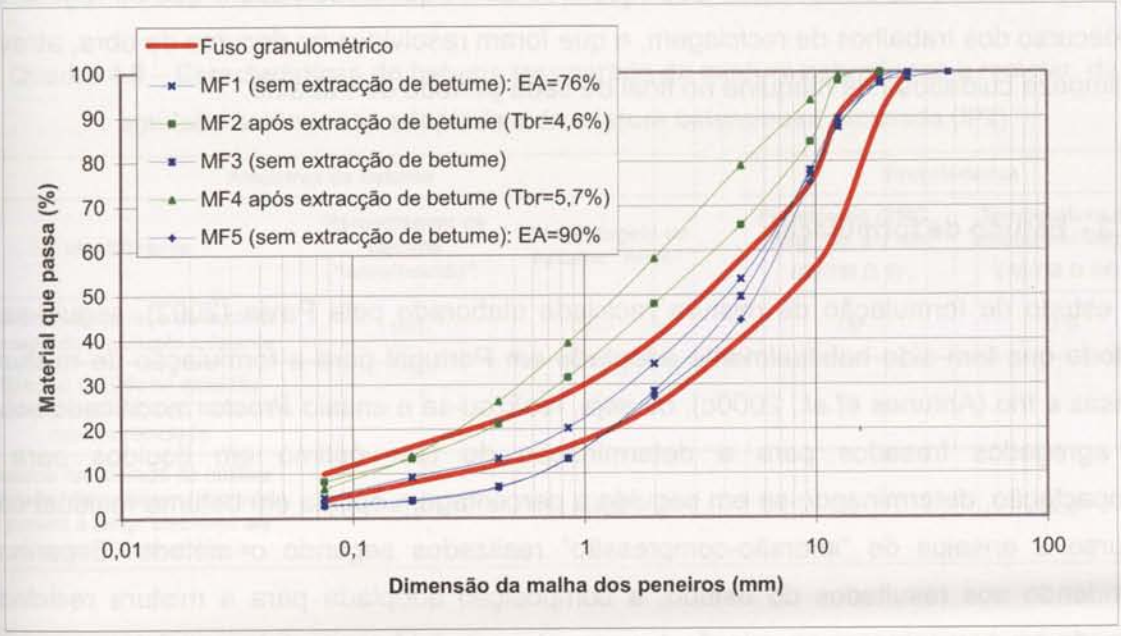


Fig. 4.43 – Curvas granulométricas de amostras do material desagregado do pavimento existente através da acção de uma máquina fresadora (IP2)

No que concerne à granulometria, pode-se comparar, na Fig. 4.43, os resultados referentes às amostras obtidas directamente da fresagem, com os resultados obtidos após extracção prévia do ligante betuminoso (MF2 e MF4). Constata-se que os primeiros se enquadram melhor no fuso recomendado no Caderno de Encargos da obra (Antunes & Batista, 2004) sendo que, após extracção do betume se obtém uma granulometria mais fina. Considera-se que a granulometria obtida sem extracção prévia de betume representa de uma forma mais adequada o "agregado" a misturar com emulsão e água e a compactar, para efeitos de formulação da mistura e de controlo de qualidade da obra.

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 para tratamento dos finos.

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 obedece à especificação do LNEC E 354--1984 para uma emulsão do tipo "ECL1-h". No entanto, no que respeita quer à viscosidade, quer à peneiração, obtiveram-se valores, respectivamente inferior e superior, aos preconizados. Os resultados referentes à peneiração poderão explicar de alguma forma alguns problemas de entupimento dos injectores da máquina recicladora que se registaram no decurso dos trabalhos de reciclagem, e que foram resolvidos no decurso da obra, através da limpeza cuidadosa da máquina no final de cada período de trabalho.

4.6.3 - Estudo de formulação

No estudo de formulação da mistura reciclada elaborado pela Pavia (2002), seguiu-se o método que tem sido habitualmente adoptado em Portugal para a formulação de misturas densas a frio (Antunes *et al.*, 2000c), 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 o método "Espanhol". 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

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 (Antunes & Batista, 2004):

- 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 ($R_{im.água}/R_{seco}$ x100): ≥ 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 4.9.

Quadro 4.9 – Características do betume recuperado da mistura betuminosa a reciclar, da emulsão betuminosa adoptada e da mistura betuminosa reciclada (IP2)

Amostras de betume			Propriedades	
Identificação	Percentagem de betume "envelhecido"	Percentagem de betume "novo"	Penetração (25ºC, 100g, 5s), 0.1 mm (ASTM D 5)	Temperatura de amolecimento, ºC (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

Os resultados apresentados 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.

4.6.4 - Processo construtivo

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 (*vd* Fig. 4.44);
- Compactação da mistura reciclada utilizando dois cilindros: um de rasto liso, de 17,3 ton. e outro de pneus, de 28 ton. (*vd* Fig. 4.45).



Fig. 4.44 – Trabalhos de reciclagem do pavimento (IP2)



Fig. 4.45 – Trabalhos de compactação da camada reciclada (IP2)

A máquina recicladora utilizada na presente obra permitiu 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 de largura. Desta forma, evitou-se que nas zonas de sobreposição houvesse "sobredosagem" de emulsão e de água.

4.6.5 - Características da mistura reciclada

4.6.5.1 - Trecho experimental

No início da obra, 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 DEP e da Pavia, ensaios *Proctor* modificado. Pretendia-se com estes ensaios confirmar os resultados obtidos relativamente à quantidade de água a adicionar e, sobretudo, obter valores de baridade de referência para efeitos do controlo da compactação da camada.

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 1,96g/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 referido em 4.6.4 ainda não estava disponível, pelo que não foi utilizado. Após a compactação de cada um dos sub-trechos foram realizados ensaios para determinação da baridade e do teor em água através dos métodos da "garrafa de areia" e de secagem em estufa, obtendo-se os resultados que se sintetizam no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Resultados obtidos no Trecho Experimental (IP2)

Sub-trecho experimental (Via de lentos)	Baridade húmida "*in situ*"	Teor em água "*in situ*" (1)	Baridade seca "*in situ*"
	γ_w (g/cm^3)	ω_0 (%)	γ_d (g/cm^3)
nº1 (km157+050 a km157+100	1,956	4,5	1,872
nº2 (km157+100 a km157+150	2,041	6,0	1,926
nº3 (km157+150 a km157+200	1,990	6,7	1,865

(1) Inclui a quantidade de água presente no pavimento existente, a quantidade presente na emulsão e a quantidade adicionada à mistura.

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 óptimo da mistura 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 1,93g/cm^3. Tendo em atenção que as baridades máximas obtidas nos ensaios *Proctor* realizados sobre a mistura com emulsão foram da ordem de 1,96g/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 1,96g/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 da obra, recolheu-se material desagregado do pavimento através da acção da máquina recicladora (MDR), bem como mistura reciclada no trecho experimental (MR), ou seja, material desagregado ao qual foi adicionada emulsão. Realizaram-se ensaios para caracterização destes materiais, cujos resultados, no que concerne à granulometria das amostras com e sem extracção de betume, e ao teor em betume residual (Tbr), se apresentam na Fig. 4.46.

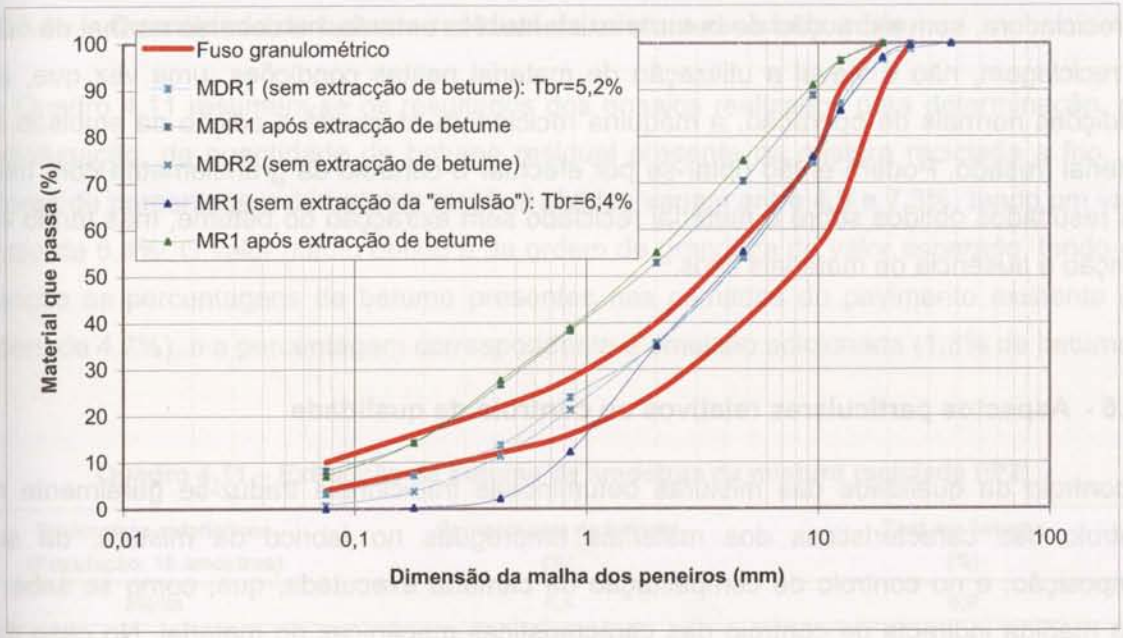


Fig. 4.46 – Curvas granulométricas de amostras de material desagregado do pavimento existente através da acção da máquina recicladora e de uma amostra de mistura reciclada (IP2)

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* Fig. 4.43). De uma maneira geral, estas granulometrias inserem-se no fuso preconizado no Caderno de Encargos tipo da JAE para misturas de ABGETE, afastando-se no entanto ligeiramente deste nas fracções mais finas, por apresentarem uma menor quantidade de finos. De facto, da experiência adquirida no acompanhamento deste tipo de obras, verifica-se que geralmente o material desagregado das camadas betuminosas do pavimento apresenta baixa quantidade de finos, uma vez que os rolos de fresagem das máquinas recicladoras não têm capacidade para desagregar o mastique das misturas betuminosas.

No que concerne ao material reciclado (isto é, material desagregado ao qual se adicionou 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.

De entre os três tipos de granulometria apresentados na Fig. 4.46, aquele que se considera como sendo mais representativo da granulometria dos "agregados" da mistura betuminosa a frio fabricada através da reciclagem, é a granulometria do material desagregado pela acção

da recicladora, sem extracção de betume existente. No entanto, no decurso normal da obra de reciclagem, não é viável a utilização de material nestas condições, uma vez que, em condições normais de operação, a máquina recicladora efectuará a adição da emulsão ao material fresado. Poderá então optar-se por efectuar o controlo da granulometria com base nos resultados obtidos sobre o material reciclado sem extracção do betume, mas tendo em atenção a ausência de materiais finos.

4.6.6 - Aspectos particulares relativos ao controlo da qualidade

O controlo da 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, que, como se sabe, é uma medida indirecta de controlo das características mecânicas do material. 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.

Do exposto na secção anterior, conclui-se também que é mais difícil verificar o cumprimento de tolerâncias relativamente às características dos materiais, nomeadamente no que concerne à percentagem de ligante e à granulometria da mistura desagragada do pavimento.

Pelas razões apontadas, o LNEC tem vindo a recomendar que neste tipo de obras, para além dos ensaios de caracterização dos materiais empregues na mistura e de controlo de compactação da camada, sejam 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, incide essencialmente nos seguintes aspectos:

- Controlo da composição das misturas (quantidade de betume residual; granulometria);
- Controlo da compacidade das misturas recicladas compactadas;
- Avaliação da resistência mecânica e da susceptibilidade à água através da realização de ensaios de "imersão-compressão" utilizando mistura recolhida em obra, à saída da máquina recicladora.

4.6.6.1 - Quantidade de betume residual da mistura reciclada a frio

No Quadro 4.11 resumem-se os resultados dos ensaios realizados para determinação, por centrifugação, da quantidade de betume residual presente na 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%. O valor médio obtido é da ordem de grandeza do valor esperado, tendo em atenção as percentagens de betume presentes nas camadas do pavimento existente (da ordem de 4,7%), e a percentagem correspondente à emulsão adicionada (1,8% de betume).

Quadro 4.11 – Extracção de betume de amostras da mistura reciclada (IP2)

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

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 (Antunes & Batista 2004) preconiza para a mistura reciclada um valor de ±0,5%, idêntico ao das misturas "novas" (tipo macadame betuminoso a frio). Considera-se, no entanto, de acordo com a experiência adquirida através do acompanhamento deste tipo de obras, que este valor deve ser futuramente ajustado, por forma a ter em conta, para além da variabilidade admissível na aplicação da emulsão betuminosa, a variabilidade própria da composição das misturas a reciclar, bem como as variações de espessuras das camadas do pavimento antigo.

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.

4.6.6.2 - Granulometria da mistura reciclada

Na Fig. 4.47 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 (14 amostras), com materiais mais finos, correspondente a ensaios efectuados após extracção do betume, e uma outra família

(8 amostras), correspondente a ensaios efectuados directamente sobre a mistura reciclada, isto é, ensaios efectuados sobre mistura com emulsão e água.

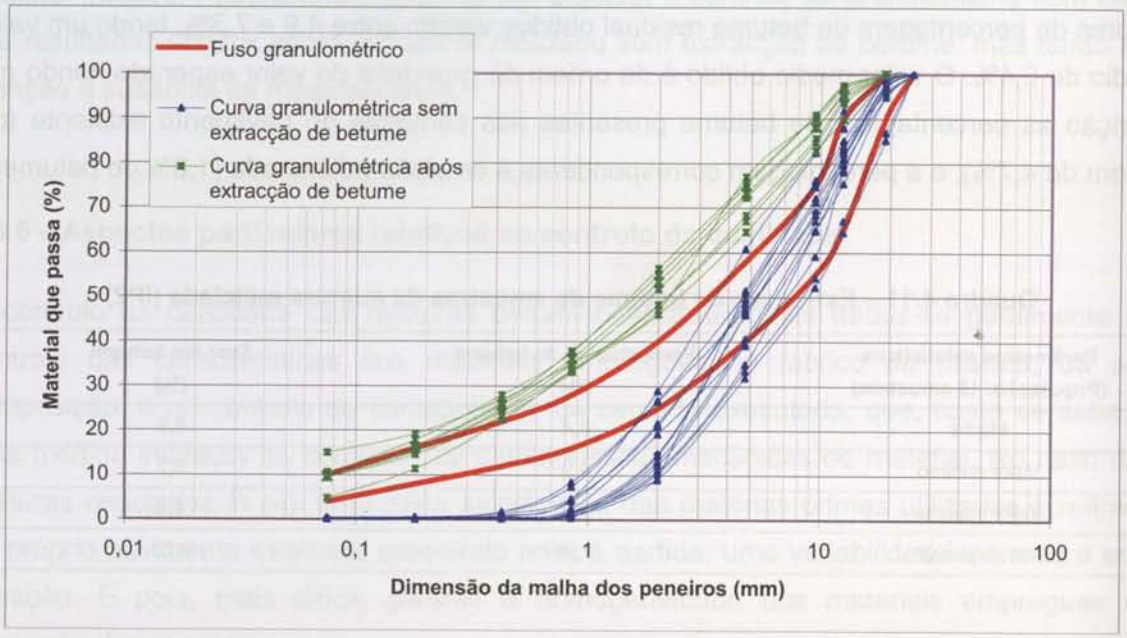


Fig. 4.47 – Curvas granulométricas de amostras de mistura reciclada (IP2)

As curvas obtidas sem extracção do ligante apresentam, tal com era esperado e à semelhança do observado no trecho experimental (*vd* Fig. 4.46), 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, também não são 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 (sem extracção do ligante) 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.

As famílias de curvas granulométriacas obtidas, quer num, quer noutro caso, assemelham-se às curvas obtidas no trecho experimental para condições semelhantes (*vd* Fig. 4.46). Deste modo, é admissível considerar que a granulometria do material desagregado pela acção da máquina recicladora se não fosse adicionada emulsão, também seria semelhante à obtida naquele trecho.

Tendo em atenção que se trata de uma mistura reciclada *in situ*, os resultados obtidos consideraram-se aceitáveis e permitiram confirmaram que a granulometria da mistura

reciclada é relativamente homogénea, e semelhante às obtidas no estudo de formulação e no trecho experimental, embora fora do fuso para misturas "novas" do tipo macadame betuminoso a frio.

4.6.6.3 - Compacidade da camada reciclada

Foram realizados ensaios para avaliação da compacidade 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. Os resultados obtidos apresentam-se graficamente na Fig. 4.48.

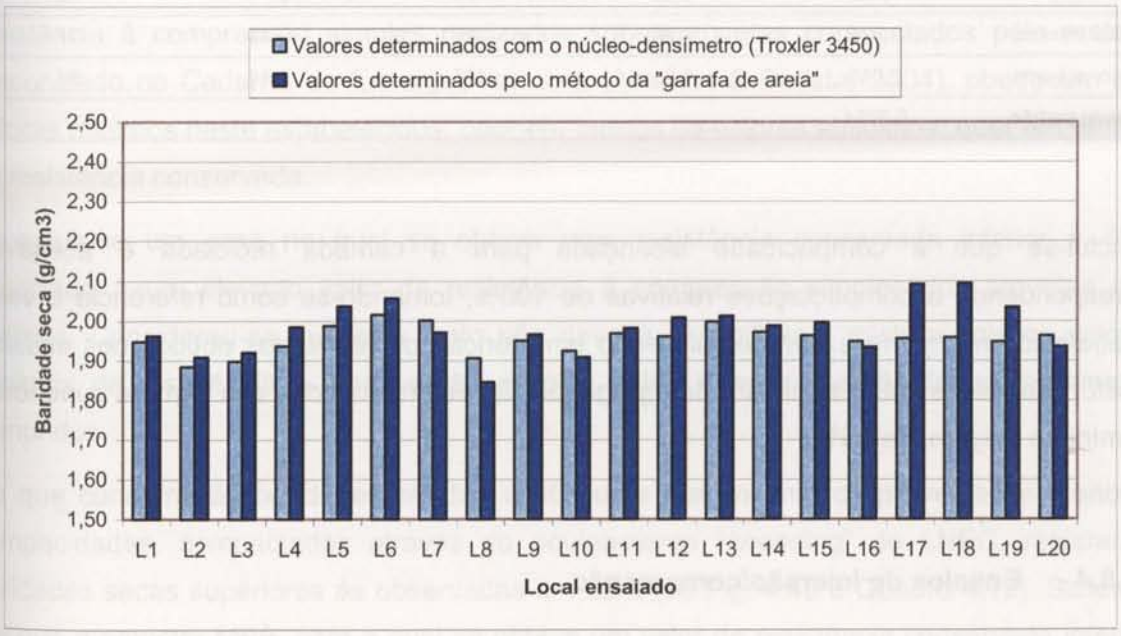


Fig. 4.48 – Baridades secas medidas "*in situ*" pelo método do núcleo-densímetro (Troxler 3450) e "garrafa de areia" (IP2)

Da análise dos resultados apresentados na Fig. 4.48 verifica-se que os valores de baridade seca determinados através do núcleo-densímetro são, em geral, semelhantes aos valores determinados pela "garrafa de areia", tendo, neste caso, sido até frequentemente conservativos. Este facto permite admitir que o controlo da compactação da camada

reciclada seja feito de uma forma sistemática pelo método mais expedito que é o do núcleo-densímetro.

No Quadro 4.12 resumem-se os resultados obtidos para a baridade da camada reciclada com este equipamento. Os valores de baridade comparam-se com o respectivo valor da baridade de referência determinada pelo ensaio *Proctor* modificado, bem como com o valor da baridade máxima teórica, determinada experimentalmente, de acordo com a especificação ASTM D 2041.

Quadro 4.12 – Compacidade da camada reciclada (IP2)

Parâmetros estatísticos (População: 636 ensaios)	Ensaios 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, $\gamma_{ref.}$ (g/cm^3)	Compactação relativa, $\gamma_d/\gamma_{ref.}$ (%)	Baridade máx. teórica, $\gamma_{máx.t.}$ (g/cm^3)	Compactação relativa, $\gamma_d/\gamma_{máx.t.}$ (%)
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	-	-	-	-

Conclui-se que a compacidade alcançada para a camada reciclada é aceitável, correspondendo a compactações relativas de 100%, tomando-se como referência o valor estabelecido no trecho experimental, tendo em atenção os resultados obtidos nos ensaios *Proctor* realizados sobre a mistura de agregados. Os valores obtidos são sempre superiores ao mínimo exigido, de 95%.

4.6.6.4 - Ensaios de imersão/compressão

No Quadro 4.13 resumem-se os resultados dos ensaios de "imersão-compressão" realizados segundo o método "Espanhol", sobre amostras de mistura reciclada recolhida em obra. No mesmo Quadro apresentam-se ainda resultados de ensaios de "imersão-compressão" realizados sobre provetes compactados e/ou condicionados por outros métodos estudados no âmbito do presente trabalho, por forma a estudar qual o melhor método para simular as condições de obra.

Quadro 4.13 – Ensaios de imersão-compressão (IP2)

Identificação da amostra	Nº de provetes moldados	Método de compactação	Cura dos provetes	Baridade da mistura (g/cm³)	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 60ºC	2,302	NLT162/84 (Procedimento 1)	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)	21 dias à temp.ambiente	2,240		18,9	13,1	69
MR9(LNEC)	3+3			2,234		19,1	10,2	53

Da leitura do Quadro 4.13 pode-se concluir que, em todos os ensaios, os valores de resistência à compressão simples realizados sobre provetes compactados pelo método preconizado no Caderno de Encargos da obra (Antunes & Batista, 2004), obedecem aos valores mínimos neste estabelecidos, quer em termos de valores absolutos, quer em termos de resistência conservada.

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. Considerou-se que este facto não deveria inviabilizar a mistura pois os valores mínimos de resistência à compressão simples antes e após imersão foram 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* Fig. 4.48 e Quadro 4.12). Salienta-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.

Os provetes moldados de acordo com a norma Espanhola NLT161/84 preconizada no Caderno de Encargos da obra, conduzem a baridades mais elevadas. Esta disparidade é atribuída ao facto de a compressão estática aplicada para preparação de provetes em laboratório, de acordo com esta norma, potenciar a expulsão de uma significativa quantidade de água presente na mistura, sendo que, em obra a quantidade de água expulsa durante a compactação é mais limitada. Por esta razão, no âmbito do presente trabalho de

tese, foram realizados estudos adicionais relativos a processos de compactação de provetes de misturas a frio em laboratório que se apresentam no Capítulo 5.

4.6.7 - 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, por forma a que a eliminação de água não seja dificultada pela presença da camada superior.

No que concerne à abertura ao tráfego, no início da obra, optou-se conservativamente por abrir os troços reciclados apenas 48h após a sua conclusão. Mais tarde verificou-se que, após 24h, para as condições da obra em apreço, os troços reciclados poderiam estar sujeitos ao tráfego sem que daí resultassem degradações na superfície da camada, o que em termos de condicionamento do tráfego foi bastante benéfico.

No que respeita à programação da execução das camadas de reforço sobrejacentes à camada reciclada, foi monitorizada a evolução do teor em água das misturas recicladas ao longo do tempo, tal como se representa graficamente na Fig. 4.49.

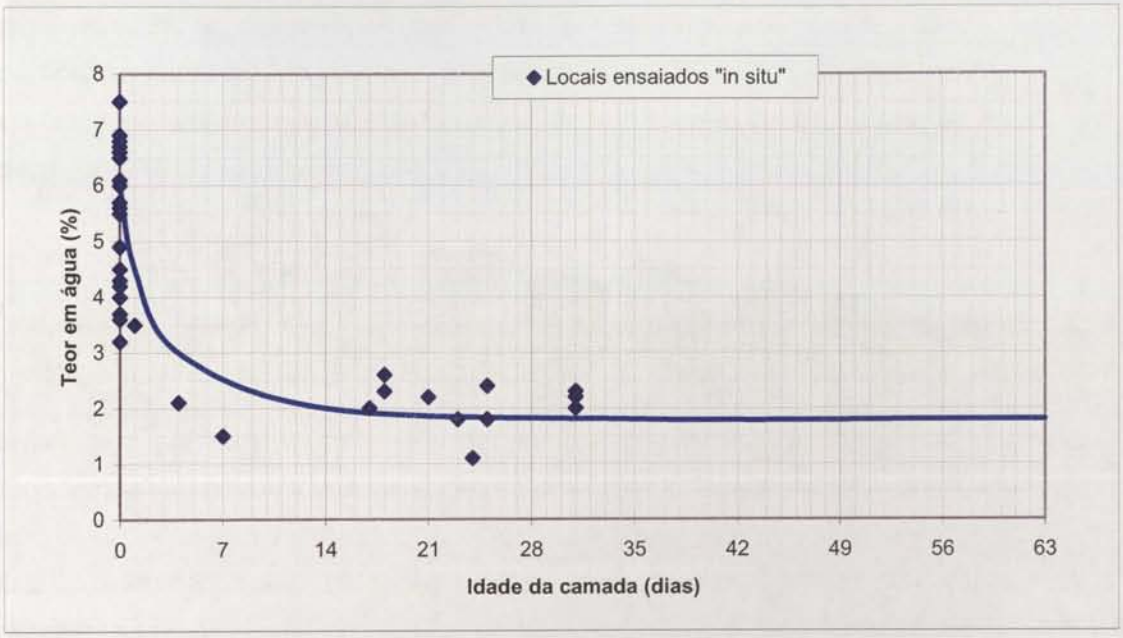


Fig. 4.49 – Evolução do teor em água da mistura reciclada com a idade da camada (IP2)

Os resultados obtidos permitiram verificar que, para o caso particular desta obra, realizada em condições climatéricas 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, tal como exposto na secção 4.5, que já na obra de reabilitação da EN 120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro, realizada no Verão, em que também se havia monitorizado a evolução do teor em água de uma camada em macadame betuminoso a frio, o período necessário para a estabilização do teor em água foi semelhante.

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, um 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 duas 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. Na Fig. 4.50 retratam-se alguns desses tarolos e relacionam-se com a idade da camada reciclada.

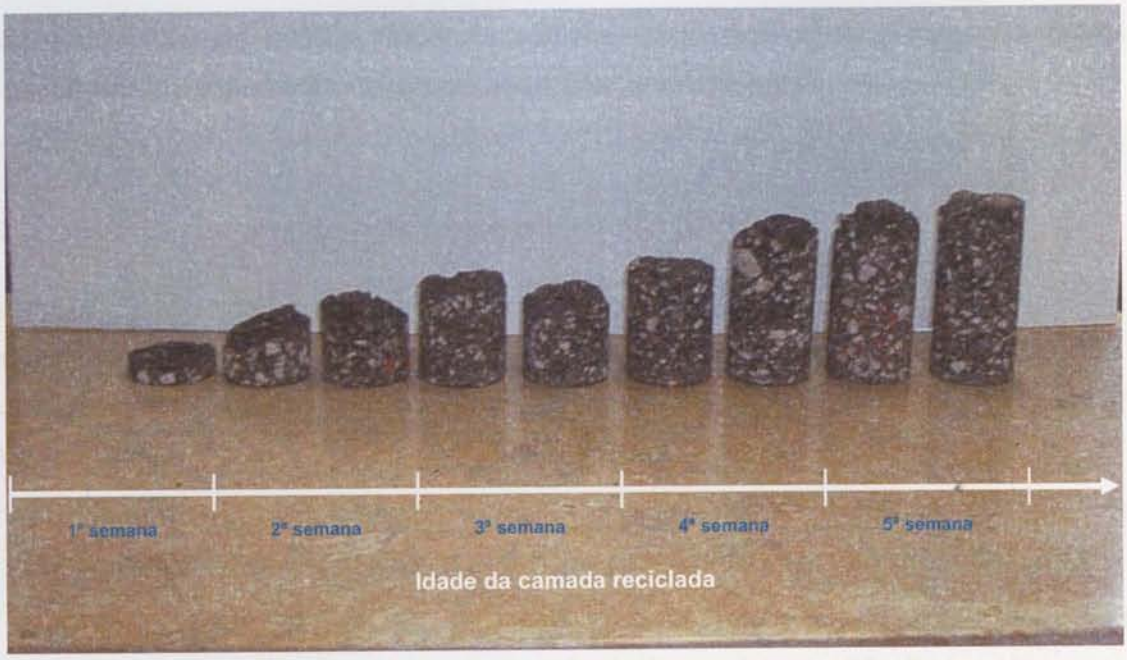


Fig. 4.50 – Evolução da altura dos tarolos extraídos com a idade da camada reciclada (IP2)

Verificou-se que para idades jovens, de cerca de uma semana, praticamente não foi possível extrair tarolos, pois a mistura ainda não apresentava resistência suficiente. A obtenção de tarolos íntegros em toda a espessura da camada reciclada (15cm), só começou a ser possível, em geral, ao fim de cerca quatro a oito semanas. Anota-se que, os resultados obtidos quando do acompanhamento da obra da EN 120 também apontavam nesse sentido (Antunes & Batista, 2002).

4.7 - Apreciação sucinta dos resultados obtidos durante o acompanhamento das obras

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

Neste trabalho procurou-se salientar alguns aspectos particulares das misturas densas a frio, tais como as misturas do tipo macadame betuminoso a frio e as misturas recicladas a frio *in situ*, nomeadamente no que concerne à sua execução em obra e ao respectivo controlo da qualidade. Como resultado da experiência adquirida, apontam-se seguidamente

alguns aspectos a desenvolver com vista ao aperfeiçoamento de especificações para cadernos de encargos de obras e à obtenção de parâmetros de dimensionamento mais adequados, procurando-se desta forma contribuir para a futura utilização deste tipo de técnicas com sucesso.

4.7.1 - Viabilidade

A realização de trabalhos de reabilitação recorrendo a técnicas a frio deve ser precedida de estudos de viabilidade, que incluam a caracterização do pavimento a reabilitar, nomeadamente no que concerne à drenagem (zonas de acumulação de água, etc); onde sejam equacionados aspectos construtivos como seja o equipamento de compactação a utilizar, as condições atmosféricas durante e após a execução das camadas (período de cura), bem como os condicionamentos de tráfego durante e após a realização dos trabalhos de pavimentação.

No caso particular de se recorrer à técnica de reciclagem de pavimentos *in situ*, é ainda mais importante a realização de estudos de viabilidade que incluam para além dos aspectos focados, uma caracterização detalhada da estrutura do pavimento a reabilitar e dos materiais que o constituem; devendo também ser equacionada a metodologia de execução da obra, tendo em atenção a largura do pavimento a reciclar e a largura do equipamento.

Neste tipo de técnica é essencial prestar especial atenção aos riscos envolvidos, por forma a não comprometer o seu sucesso, devendo para tal ser tomadas as seguintes medidas e/ou observados os seguintes aspectos:

- Na fase de projecto:
  - Caracterização detalhada do pavimento (espessura e natureza das camadas, contaminação, eventuais heterogeneidades provocadas pela existência de reparações pontuais);
  - Caracterização detalhada das fundações (tipo de solos, estado hídrico, susceptibilidade a água).
- Na fase de obra:
  - Adequabilidade dos equipamentos de reciclagem (face às características das camadas a reciclar);
  - Adequabilidade dos equipamentos de compactação;
  - Riscos ambientais (materiais correctivos);

- Condições atmosféricas.

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-se 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.

4.7.2 - Estudos laboratoriais

4.7.2.1 - Caracterização dos materiais

Para a análise granulométrica das amostras de materiais fresados do pavimento antigo contendo ligante betuminoso, devem-se adaptar as normas geralmente seguidas em Portugal para esse efeito (Especificações LNEC E 233 e LNEC E 235), ou a norma europeia EN 933-1: 2000, modificada no que concerne à secagem dos materiais, que deve ser efectuada à temperatura máxima de 30/35ºC não aquecendo os materiais a 110±5ºC da amostra, com vista à sua secagem.

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.

4.7.2.2 - Estudos de formulação

Como é habitual, antes da execução da obra, deverão ser submetidos à aprovação estudos de formulação das misturas densas a frio com emulsão betuminosa

No caso particular das misturas recicladas *in situ*, estes estudos deverão ser efectuados utilizando materiais recolhidos do pavimento pela acção do equipamento de reciclagem que irá ser utilizado na obra. Caso o equipamento não esteja disponível antes do início da obra,

poderá recorrer-se a uma máquina fresadora para recolher o material, devendo então os resultados ser reconfirmados quando da realização do trecho experimental.

4.7.3 - Trecho experimental

A execução de um trecho experimental antes da execução de uma obra de reabilitação é um procedimento que faz parte integrante das boas técnicas construtivas.

No caso das técnicas 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 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.

A execução do trecho experimental deverá também ser utilizada 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) no caso da reciclagem a frio e, no caso geral das misturas a frio, também no que concerne ao controlo da compactação.

Tratando-se de misturas recicladas *in situ* a frio, é também durante a execução de um trecho experimental que se deve ajustar o avanço do equipamento de reciclagem face à granulometria que se pretende obter.

4.7.4 - Compacidade das misturas

Embora no Caderno de Encargos da JAE (1998) 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, através do ensaio

cujos resultados se apresentaram na Fig. 4.35, que a compactação da mistura é muito afectada pela presença da emulsão.

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.

Tendo em atenção o exposto, considerou-se que deviam prosseguir estudos no sentido de determinar qual o método mais adequado para o estabelecimento da baridade de referência com vista ao controlo da compactação. De facto, no âmbito do presente trabalho, realizaram-se estudos neste sentido, conforme será descrito no capítulo seguinte.

4.7.5 - Cura das misturas

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

Por esta razão, em duas das obras referidas 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 duas obras nos quais foi monitorizada a evolução do teor em água das camadas a frio ao longo do tempo. Paralelamente, foram recolhidos, através de sondagens à rotação, tarolos dessas camadas.

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.

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%(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 e 15 cm) (cerca de 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.

Cabe aqui referir que alguns autores (Task Force 38 Report, 1998) recomendam igualmente que a colocação de uma camada sobrejacente a camadas recicladas a frio com emulsão betuminosa não seja efectuada até que tenham decorrido um número mínimo de dias de cura da mistura ou que o teor em água não tenha reduzido numa determinada percentagem pré-definida. O período de cura varia tipicamente de uma a duas semanas, dependendo da localização geográfica, condições atmosféricas, época do ano e espessura da camada. Quanto ao controlo do tráfego, no mesmo relatório indica-se que o tráfego não é geralmente permitido até terem decorrido um mínimo de duas horas após todas as operações de compactação estarem concluídas.

4.7.6 - Evolução do módulo de deformabilidade das misturas

A "cura" deste tipo de misturas envolve uma evolução das propriedades mecânicas do ligante betuminoso (Asphalt Institute, MS-19). Por esta razão, são também de esperar mudanças no comportamento estrutural das camadas de misturas betuminosas a frio durante o processo de cura dessas misturas.

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 (Antunes, 1993).

Da apreciação dos resultados que têm sido obtidos em diversas obras. em que foram realizadas camadas em misturas betuminosas a frio, tem-se podido comprovar que, tal como se esperava, o módulo de deformabilidade dessas camadas aumenta com a idade das mesmas. A Fig. 4.51 e Fig. 4.52 ilustram alguns dos resultados obtidos.

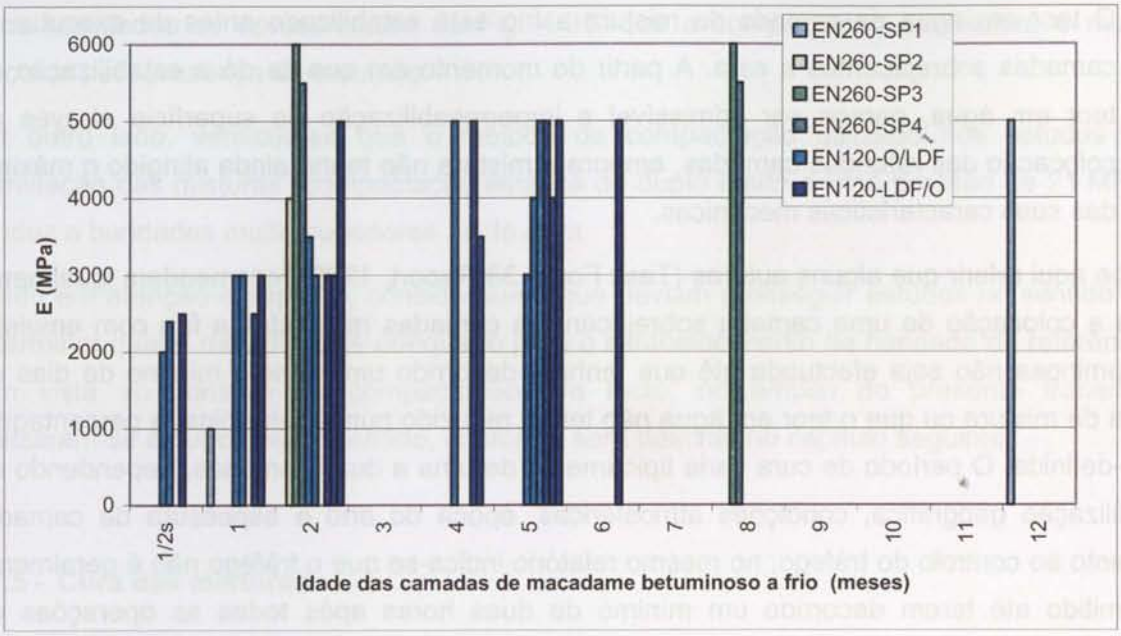


Fig. 4.51 – Módulos de deformabilidade das camada de macadame betuminoso a frio

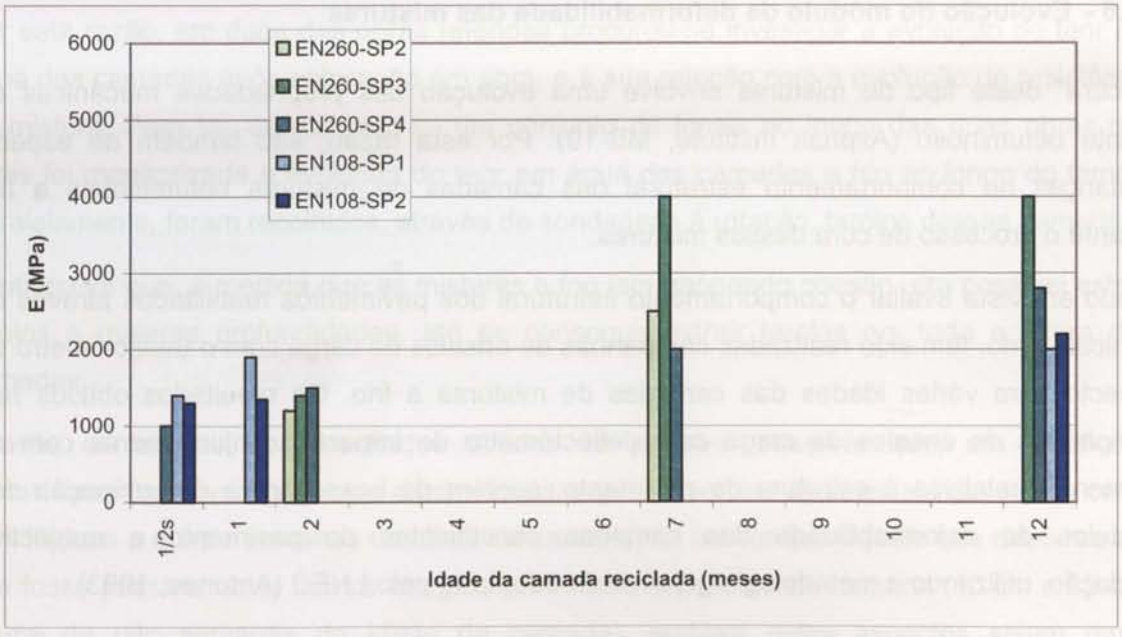


Fig. 4.52 – Módulos de deformabilidade das camada recicladas

De referir, no entanto, que os valores de módulos que constam da Fig. 4.51 e da Fig. 4.52 correspondem a ensaios de carga com deflectómetro de impacto realizados a diversas temperaturas.

No caso concreto da obra da EN 120 anteriormente referida, verificou-se que o módulo de deformabilidade da camada em macadame betuminoso a frio, após dois meses da construção da camada, é em geral mais do dobro do módulo obtido para idades iniciais (menos de um mês). A partir de dois meses após colocação em obra, parece haver uma estabilização do módulo de deformabilidade deste tipo de misturas. O valor atingido nessa altura (misturas novas aplicadas na EN 120), para temperaturas da ordem dos 20 a 25ºC, situa-se acima dos 3 000 MPa. No caso desta obra, a estabilização do módulo ao fim de cerca de dois meses de execução da camada coincide com o tempo que foi necessário para que tivesse sido possível extrair tarolos íntegros em toda a altura da mesma camada.

Quanto às camadas recicladas (*vd* Fig. 4.52), por casualidade, a gama de temperaturas a que foram realizados os ensaios na EN 108 é superior à gama a que foram realizados os ensaios na EN 260. Conforme tem sido exposto ao longo do deste trabalho não existiam à data da realização dos ensaios com deflectómetro de impacto dados suficientes relativamente à sensibilidade deste tipo de materiais à temperatura, pelo que não foi possível efectuar comparações directas entre os conjuntos de módulos obtidos nas duas obras. No entanto, com base nos resultados obtidos nestas duas obras, tem-se recomendado, para efeitos de dimensionamento dos pavimentos através de métodos baseados na análise estrutural, adoptar valores de 2 000 MPa para os módulos de deformabilidade das camadas recicladas, correspondentes a temperaturas entre 20 e 25 °C.

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.

4.7.7 - Controlo da qualidade

Para além da verificação da composição das misturas fabricadas a frio e da compactação das camadas, o controlo da qualidade deverá incluir a verificação da resistência mecânica da mistura e respectiva susceptibilidade à água, nomeadamente através de ensaios de "imersão-compressão".

No concerne à reciclagem de pavimentos *in situ*, o controlo da camada através da verificação da resistência mecânica da mistura, poderá, em particular, compensar os efeitos do acréscimo de variabilidade na composição das misturas, inerente a este tipo de trabalhos.

Da experiência adquirida ao longo dos casos de obra referidos, bem como de outros mencionados no Capítulo 3, tem-se podido observar que a regularidade obtida nas camadas

efectuadas em misturas densas a frio, em particular, em camadas recicladas, os valores obtidos distanciam-se dos valores recomendados no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998). No entanto, há que considerar que os referidos valores foram estabelecidos para construções novas. Por outro lado, considera-se que a este tipo de camadas deve sobrepor-se em geral, outras camadas, de regularização e/ou de desgaste, por forma a proporcionar níveis de regularidade mais elevados e adequados aos níveis de exigência de qualidade actuais.

5 - REPRODUÇÃO EM LABORATÓRIO DA COMPACTAÇÃO E CURA DAS MISTURAS

5.1 - Introdução

Para prever o comportamento dos materiais empregues em obra e optimizar a sua formulação, procura-se estudar, em laboratório, sob condições controladas e bem conhecidas, a resposta desses materiais à simulação das acções a que serão submetidos no decorrer da sua vida útil. No caso das misturas betuminosas a aplicar em camadas de pavimentos rodoviários, as principais acções a considerar são as induzidas pelo tráfego, em particular, os veículos pesados, e as acções induzidas pelos agentes atmosféricos. Assim é desejável que se procure ensaiar em laboratório os materiais tal como serão aplicados em obra, e em condições que simulem as condições de serviço.

Os ensaios de laboratório permitem conhecer o comportamento dos materiais em condições controladas e possibilitam a especificação de parâmetros mínimos para a sua colocação em obra. Em laboratório deve-se ter em atenção a necessidade de simular as situações passíveis de ocorrer em obra e após a entrada em serviço. Deve-se pois, adaptar, tanto quanto possível, as condições que, num ambiente controlado de laboratório se podem obter, às resultantes de um balanço entre as condições ideais "de serviço", e as limitações de ordem prática na obra.

Do exposto ao longo do presente trabalho, ficou patente que as misturas fabricadas a frio têm um comportamento diferente das misturas a quente, em particular no que concerne à sua aplicação em obra e à cura, factor que há que ter em conta no seu estudo e formulação em laboratório.

As misturas a frio apresentam, após a sua colocação em obra, um período de cura inicial, durante o qual a mistura vai ganhando resistência e a água, quer proveniente da rotura da emulsão, quer a adicionada para fins de envolvimento dos materiais e de compactação, vai sendo eliminada. Este período de cura e as características finais da mistura variam consoante as condições de aplicação em obra e as condições climatéricas da zona.

Para que os resultados dos estudos laboratoriais sejam representativos, a preparação laboratorial dos provetes deve reproduzir o melhor possível não só as operações realizadas em obra, tais como o fabrico, o espalhamento e a compactação, mas também o processo de cura das misturas.

No âmbito do acompanhamento de obras de pavimentação em que foram empregues misturas a frio, procurou-se aprofundar os conhecimentos neste domínio, tendo-se avaliado as condições de aplicação e o comportamento dos pavimentos reabilitados desde a sua aplicação, e ao longo do processo de cura.

Em paralelo, levaram-se a cabo estudos laboratoriais com o objectivo de se averiguar quais os métodos disponíveis de moldagem e condicionamento de provetes em laboratório que melhor simulariam as condições de obra.

Visavam-se assim dois objectivos: contribuir para o aperfeiçoamento dos métodos de formulação das misturas, e seleccionar um método de preparação de provetes para o estudo do desempenho de misturas betuminosas a frio em laboratório. Anota-se que, no primeiro caso, deverá ser previligiada a exequibilidade dos ensaios e a obtenção de resultados num prazo razoável tendo em vista a tomada de decisões em obra, sem perder de vista o objectivo de simular razoavelmente as condições de serviço. Já no segundo caso, deverá ser previligiada a simulação das condições de serviço.

Para a realização dos referidos estudos laboratoriais optou-se por se utilizar uma única composição no fabrico da mistura de macadame betuminoso a frio, fazendo variar diversos factores que se pretendiam avaliar, como sejam, a compactação e a cura da mistura.

Nas secções que se seguem abordar-se-ão estes aspectos, descrevendo-se os materiais utilizados no estudo, os trabalhos efectuados, e os principais resultados alcançados.

5.2 - Fabrico das misturas

5.2.1 - Materiais empregues no fabrico das misturas

Os materiais utilizados no estudo experimental realizado no âmbito da presente dissertação foram os aplicados na obra de reabilitação do pavimento da EN 120, ente Odemira e o Limite do Distrito de Faro, descrita na secção 4.5, no âmbito da qual foi realizada uma camada de reforço em macadame betuminoso a frio.

Os materiais utilizados foram pois, os seguintes:

- Mistura de agregados:
  - gravilha 12/20 mm
  - gravilha 6/12 mm
  - pó 0/6 mm
- Emulsão betuminosa:
  - emulsão catiónica de rotura lenta do tipo ECL-1h, de denominação comercial *GRAVAMUL* (PROBISA)

Estes materiais foram entregues pela PROBISA ao LNEC, para efeitos do presente estudo. Os agregados foram entregues num só carregamento, quando do início dos trabalhos experimentais. Já a emulsão betuminosa, sendo um material que não deve ser armazenado por períodos longos, foi entregue em dois fornecimentos distintos. De facto, conforme descrito no capítulo 3, as emulsões betuminosas, mesmo as mais estáveis, ou seja, as de rotura lenta, tendem a romper ao fim de um certo período de tempo, principalmente se se mantiverem armazenadas em recipientes sem agitação.

Previamente à utilização dos materiais no fabrico em laboratório das misturas a frio, foram recolhidas amostras com vista à sua caracterização, nomeadamente, quanto às diversas propriedades preconizados no Caderno de Encargos tipo da JAE para misturas do tipo ABGETE. Os resultados assim obtidos foram comparados com os que se haviam obtido em ensaios realizados sobre amostras recolhidas em obra.

Quanto às fracções granulométricas de agregados, recolheram-se duas amostras (A1 e A2) de cada uma, e efectuou-se a análise granulométrica, cujos resultados podem observar na Fig. 5.1. Nesta figura representam-se também as curvas granulométricas de cada uma das fracções de agregados, consideradas no estudo de formulação (EF) da mistura aplicada em obra (PROBISA, 2000).

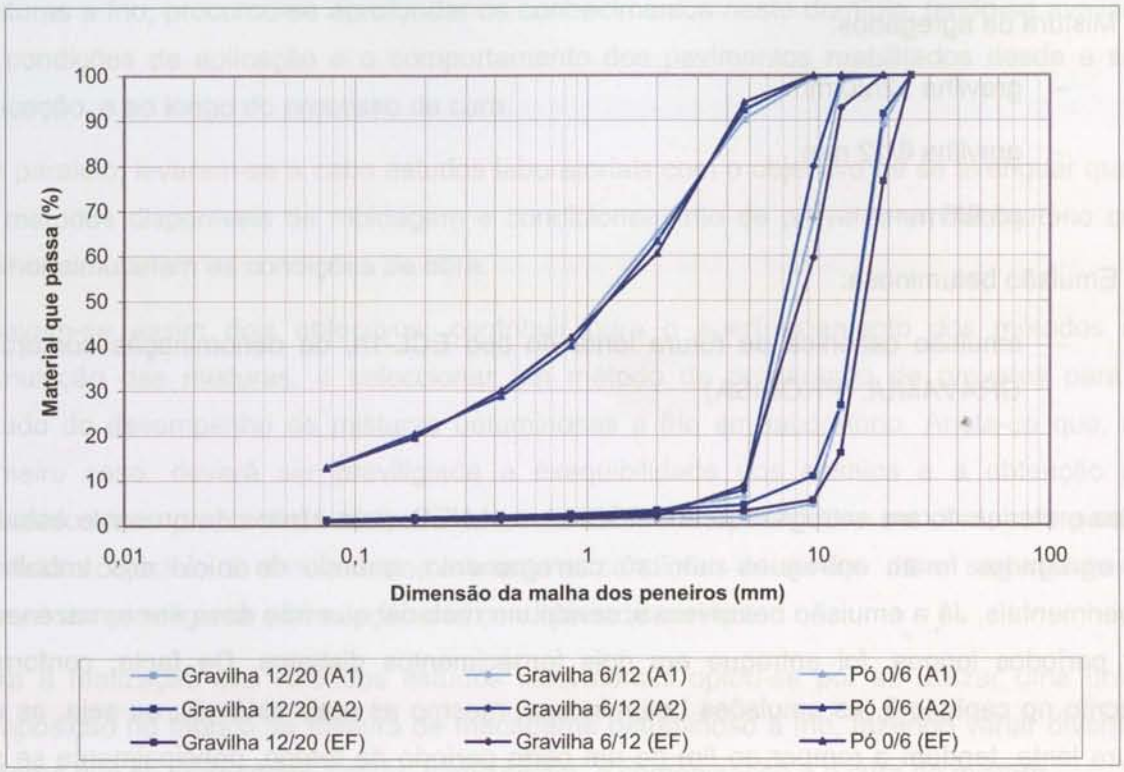


Fig. 5.1 – Curvas granulométricas das fracções de agregados utilizados em laboratório (A1 e A2) e na obra (EF)

Da observação da Fig. 5.1 verifica-se que as amostras laboratoriais das três fracções de agregados que constituem a mistura apresentam curvas granulométricas semelhantes às consideradas no estudo de formulação da PROBISA.

No que concerne à emulsão betuminosa, recolheram-se amostras de cada um dos fornecimentos efectuados. Sobre cada uma das amostras de emulsão, do mesmo tipo da utilizada no fabrico do macadame betuminoso a frio no âmbito da reabilitação da EN 120--O/LDF, ou seja, emulsão de rotura lenta do tipo ECL-1h, realizaram-se no Núcleo de Química do Departamento de Materiais de Construção[7] do LNEC, ensaios que incidiram na determinação das características referidas na actual especificação LNEC E 354-1984. No Quadro 5.1 resumem-se os resultados obtidos.

[7] Actual Núcleo de Materiais Plásticos e Compósitos do Departamento de Materiais

Quadro 5.1 – Características da emulsão betuminosa utilizada nos ensaios

Propriedades		Características das emulsões ensaiadas		Emulsão ECL-1h GRAVAMUL PROBISA		Especificação LNEC E354-1984
		Amostra de Fevereiro/2002	Amostra de Julho/2002	Estudo de fromulação	Ficha técnica	"ECL-1h"
Viscosidade Saybolt Furol (25°C), s		33	36	22	≤ 50	20 – 100
Sedimentação aos 7 dias, %		16	-	3	5	≤ 7
Peneiração, %		0,01	0,01	0,03	≤ 0,1	-
Rotura com cimento, %		103	Rotura total	-	-	≤ 2,0
Carga da partícula		Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
pH		-	-	2,8	2,5 – 3,5	-
Destilação	Resíduo, % (m/m)	57	62	60	≥ 57	≥ 57
Resíduo de destilação	Penetração (25°C, 100g, 5s), 10^{-1} mm	71	94	88	80 – 100	40 – 90 60 – 100 (1)
	Temperatura de amolecimento, °C	-	45,8	-	-	-
	Ductibilidade, (25°C, 5 cm/min), cm	> 100	> 100	-	-	≥ 40
	Solubilidade no tolueno, %	99,64	99,94	-	-	≥ 97,5

(1) O Caderno de Encargos tipo da JAE permite a utilização de emulsões com resíduo de destilação mais moles que os preconizados na especificação LNEC.

Os resultados obtidos sobre cada uma das amostras foram semelhantes aos obtidos sobre a amostra de emulsão recolhida em obra. Assim, os valores obtidos em cada um dos ensaios realizados enquadram-se dentro dos valores especificados, à excepção dos da sedimentação e de rotura com cimento.

Uma vez que através do ensaio de sedimentação se concluiu que a emulsão apresentava uma deficiente estabilidade ao armazenamento, foram tomados cuidados acrescidos com a sua agitação e homogeneização antes da sua aplicação no fabrico da mistura betuminosa a frio em laboratório.

Para o fabrico da mistura densa a frio, utilizou-se a mesma fórmula de trabalho que a adoptada na obra da EN 120-O/LDF, 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)

- 2.5 % de água de adição

Os resultados obtidos na análise granulométrica (especificações LNEC E 233 e LNEC E 235) das composições das misturas de agregados, bem como a fórmula de trabalho estabelecida no estudo realizado pela PROBISA e o fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos tipo da JAE (1998) para misturas do tipo ABGETE, apresentam-se na Fig. 5.2.

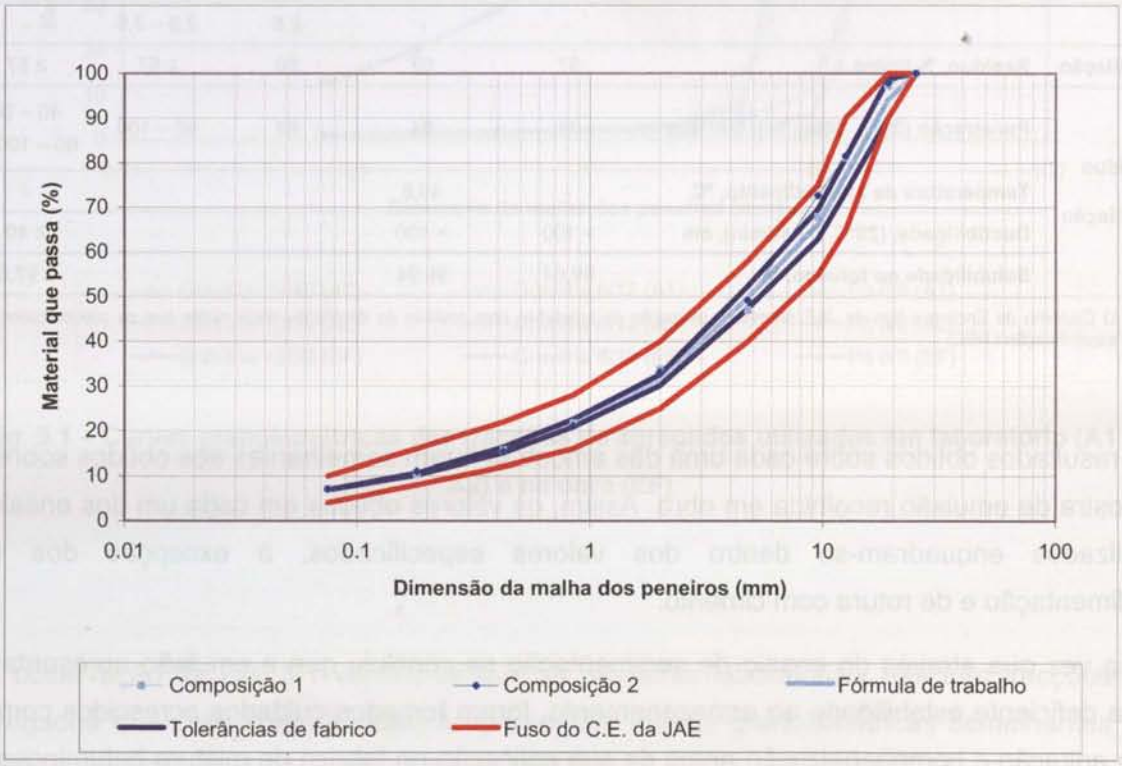


Fig. 5.2 – Curvas granulométricas das misturas de agregados utilizadas no fabrico das misturas betuminosas a frio

No que diz respeito à mistura de agregados realizaram-se também ensaios para determinar a perda por desgaste na máquina de *Los Angeles*, o equivalente de areia e a absorção de água e compararam-se os valores obtidos com os preconizados no Caderno de Encargos tipo da JAE para o tipo de misturas em apreço. No Quadro 5.2 apresentam-se estes valores.

Quadro 5.2 – Características da mistura de agregados (EN 120 – O/LDF)

Designação do ensaio		Valores	
		Amostra ensaiada no LNEC	Caderno de Encargos tipo da JAE
Perda por desgaste na máquina de *Los Angeles* (LNEC E 237)		21% (Granulometria B)(1)	≤ 40% (Granulometria A)
Equivalente de areia (LNEC E 199)		45%	≥ 40%
Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes (NP 954, NP 581)	Gravilha 12/20	0,92%	≤ 3%
	Gravilha 6/12	1,12%	≤ 3%
	Pó 0/6	2,94	≤ 3%

(1) Os agregados recebidos no LNEC não permitiram a realização do ensaio de desgaste de Los Angeles com a granulometria A, conforme preconizado no Caderno de Encargos tipo da JAE, pelo que o ensaio foi realizado com a granulometria B.

Da apreciação dos resultados apresentados na Fig. 5.2 e no Quadro 5.2 considera-se que os agregados da mistura cumprem os requisitos mínimos exigidos no Caderno de Encargos tipo da JAE.

5.2.2 - Amassadura da mistura

No fabrico da mistura em laboratório tentou-se simular o mesmo processo de fabrico seguido em obra. Assim, as etapas seguidas, realizadas à temperatura ambiente, foram as seguintes:

- Preparação dos vários materiais

  Primeiramente procede-se à preparação das massas dos diversos materiais, como sejam, as fracções de agregados, a emulsão betuminosa e a água a adicionar à mistura, na quantidade calculada para o fabrico de uma amassadura de mistura betuminosa a frio de acordo com a composição estabelecida.

  Esquartelam-se as amostras de cada fracção de agregados até obter a quantidade de agregado necessária para uma amassadura.

  Quanto à emulsão betuminosa, o material que está armazenado num recipiente é previamente bem homogeneizado por agitação (*vd* Fig. 5.3), sendo então extraída a quantidade necessária para o fabrico de uma amassadura.

- Mistura das várias fracções de agregados

  Preparação da mistura de agregados através da junção e mistura das diversas fracções de agregados.

- "Pré-molhagem" dos agregados

  À mistura de agregados junta-se a quantidade de água de adição estabelecida procedendo-se à mistura dos materiais.

- Adição da emulsão betuminosa

  Aos agregados húmidos junta-se a emulsão betuminosa na proporção estabelecida e mistura-se bem. Para a "amassadura" da mistura a frio utilizou-se no presente estudo uma misturadora mecânica eléctrica, cuja cuba tem uma capacidade de 25 L. Esta misturadora retrata-se na Fig. 5.4.

  Durante a mistura da emulsão deve-se confirmar que existe uma boa afinidade entre a emulsão e os agregados, caso contrário deve-se averiguar os motivos que levaram a que tal acontecesse. Se se concluir que a emulsão já não estava em boas condições, o respectivo lote deve ser rejeitado, devendo ser utilizado outro lote.



Fig. 5.3 – Homogeneização da emulsão betuminosa a utilizar na amassadura

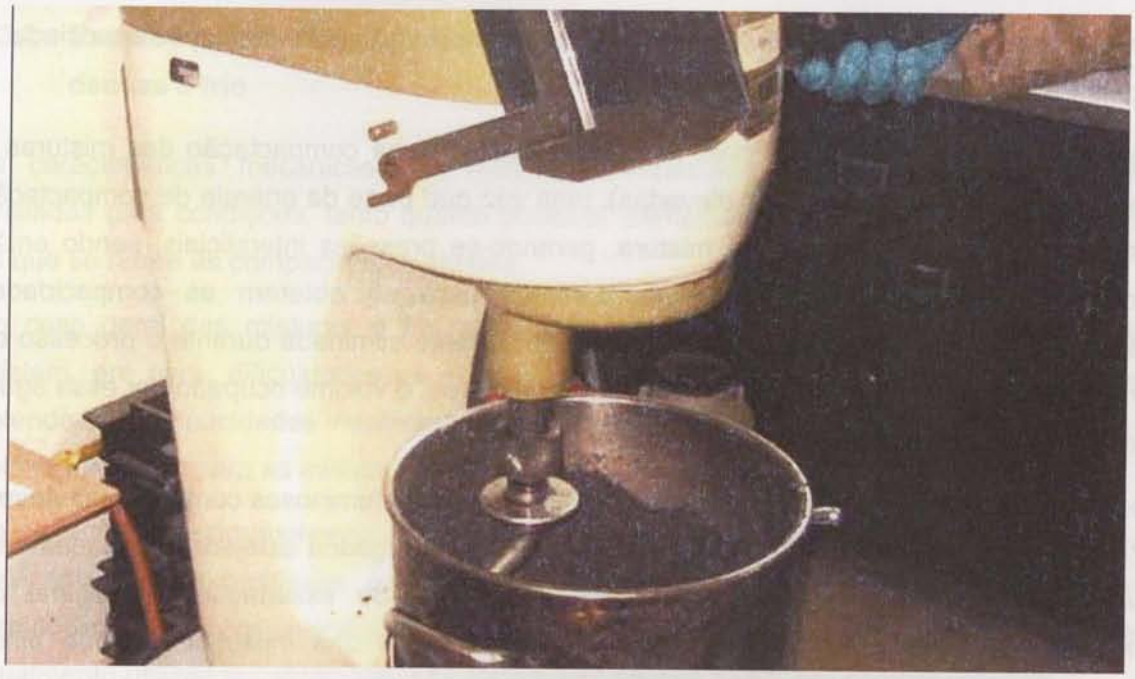


Fig. 5.4 – Misturadora mecânica utilizada no fabrico das misturas em laboratório

Após feita a "amassadura" moldam-se os provetes de acordo com o processo de compactação seleccionado.

5.3 - Compactação das misturas

5.3.1 - Generalidades

Como se sabe, a compactação influencia profundamente as propriedades dos materiais que incorporam materiais granulares, nomeadamente as misturas betuminosas e, em particular, as misturas a frio. Por exemplo, a resistência, a deformabilidade e a durabilidade são dependentes da compacidade obtida após o processo de compactação.

A compactação é o processo de densificação, ou seja, diminuição dos vazios[8], de uma mistura, por acção mecânica. É neste processo que reside uma das grandes diferenças entre as misturas betuminosas fabricadas a quente e as misturas fabricadas a frio. Enquanto que para as misturas a quente, a densificação resulta fundamentalmente da expulsão do ar, da reorientação das partículas do agregado e da alteração dos contactos entre o agregado e

[8] Neste contexto, considera-se como volume de vazios, o volume de água e ar.

o mastique betuminoso, nas misturas a frio a densificação está também associada à expulsão da água presente na mistura.

Portanto, é compreensível que haja maiores dificuldades na compactação das misturas a frio (obtenção de baridades mais elevadas), uma vez que parte da energia de compactação é absorvida pela fase aquosa da mistura, gerando-se pressões intersticiais, sendo então necessário utilizar equipamentos mais potentes para se obterem as compacidades desejadas. Por outro lado, como a água não é totalmente eliminada durante o processo de compactação, sendo-o só (progressivamente) *a posteriori*, o volume ocupado por essa água, corresponderá no futuro, a volume de ar.

No entanto, conforme exposto na secção 3.2, as misturas betuminosas compactadas devem ter sempre alguns vazios, de modo a permitir que os agregados estejam adequadamente revestidos pelo betume sem que ocorram fenómenos de exsudação de betume ou deformações permanentes excessivas. No caso particular das misturas a frio é ainda desejável a manutenção de alguns vazios por forma a permitir a evaporação da água após a compactação efectuada em obra.

O facto de as misturas manterem alguma trabalhabilidade durante várias horas possibilita o prolongamento das operações em obra, como seja a correcção de eventuais erros e a sua recompactação, se necessário. Note-se que a trabalhabilidade se relaciona com a facilidade com que se realizam as operações de mistura, colocação, espalhamento e compactação. Em oposição, no caso de se tratar de misturas a quente (*vd* secção 2.3.2.1), a trabalhabilidade da mistura está condicionada ao tempo em que esta se mantém numa determinada gama de temperaturas por forma a garantir uma adequada viscosidade do betume.

Após a primeira fase de densificação da mistura betuminosa / diminuição da porosidade[9] que ocorre durante as operações de compactação em obra, segue-se uma segunda fase, em que o processo de densificação continua devido à acção do tráfego rodoviário, em particular, do tráfego pesado. Naturalmente que quanto menor for a porosidade após o processo de compactação, menores serão as deformações volumétricas no período de serviço, dado que à diminuição dos vazios das misturas estão normalmente associadas deformações deste tipo. Por esta razão, e também pelo facto de a mistura a frio manter a sua trabalhabilidade durante mais tempo, na fase de densificação pelo tráfego, é de esperar uma maior diminuição da porosidade após entrada em serviço nas misturas a frio do que nas misturas a quente (Santana, 1992).

[9] Percentagem volumétrica de vazios

5.3.2 - Estudos preliminares relativos à compactação de misturas betuminosas densas a frio

As características mecânicas das misturas compactadas em laboratório devem ser avaliadas para condições, tanto quanto possível, semelhantes às de obra, nomeadamente no que se refere às compacidades obtidas.

No caso geral das misturas a frio, quer novas, quer recicladas, tem-se verificado que existem, em obra, dificuldades de compactação de camadas onde estas são aplicadas, obtendo-se compacidades relativamente reduzidas quando comparadas com as que se obtêm, em geral, para as misturas fabricadas a quente.

No decurso do acompanhamento de obras em que são aplicadas misturas a frio, tem-se verificado que as baridades obtidas para provetes cilíndricos moldados em laboratório segundo os processos associados aos métodos de formulação de misturas densas a frio usualmente utilizados (*vd* secção 3.4), distanciam-se das baridades obtidas em obra.

Como referido anteriormente, ao método de formulação da Universidade de Illinois (EUA) está associado o método de compactação *Marshall*, método este largamente utilizado na compactação de misturas a quente em laboratório.

No que concerne quer ao método de formulação "Espanhol", quer ao método AFNOR, estão associadas compactações estáticas de duplo efeito, embora, a pressão de compactação, bem como a velocidade e tempo de aplicação da carga, sejam diferentes para ambos os métodos.

Segundo o método de formulação "Espanhol", recorre-se também a ensaios *Proctor* modificado realizados sobre a mistura de agregados, apenas para a determinação do teor em líquidos de compactação e fixação da baridade de referência para efeitos de controlo de compactação. No âmbito dos presentes estudos realizaram-se também ensaios *Proctor* modificado sobre a mistura de agregados e emulsão.

Dos estudos comparativos efectuados entre os três métodos acima referidos (*vd* subsecção 3.4.3), verificou-se que as baridades obtidas para os provetes cilíndricos moldados em laboratório, eram, consoante o método usado na sua preparação, ou significativamente superiores, ou inferiores às obtidas em obra, após os trabalhos de compactação da camada de macadame betuminoso a frio.

Por esta razão, estudaram-se diversos procedimentos alternativos de preparação de provetes em laboratório, por forma a avaliar o que melhor simulava a compactação conseguida *in situ* quando boas práticas construtivas são seguidas.

No âmbito destes estudos, realizou-se primeiramente, uma análise dos resultados obtidos entre os vários processos de compactação preconizados nos métodos de formulação das misturas a frio tendo-se, para o caso do método "Espanhol", feito variar a energia de compactação preconizada na norma NLT 162/84 por forma a obterem-se baridades mais próximas das obtidas na obra.

Na Fig. 5.5 apresentam-se alguns dos resultados obtidos neste estudo, no qual se utilizaram misturas fabricadas em obra, e recolhidas na central (*vd* Quadro 4.7), e comparam-se as baridades obtidas em laboratório com a gama de valores medidos durante a obra, pelo método da garrafa de areia (*vd* Quadro 4.8).

No Quadro 5.3 e na Fig. 5.6 apresentam-se as correspondentes características de resistência obtidas no ensaio de "imersão-compressão", realizado de acordo com o método usualmente seguido em Espanha (Procedimento 1 da NLT162/84).

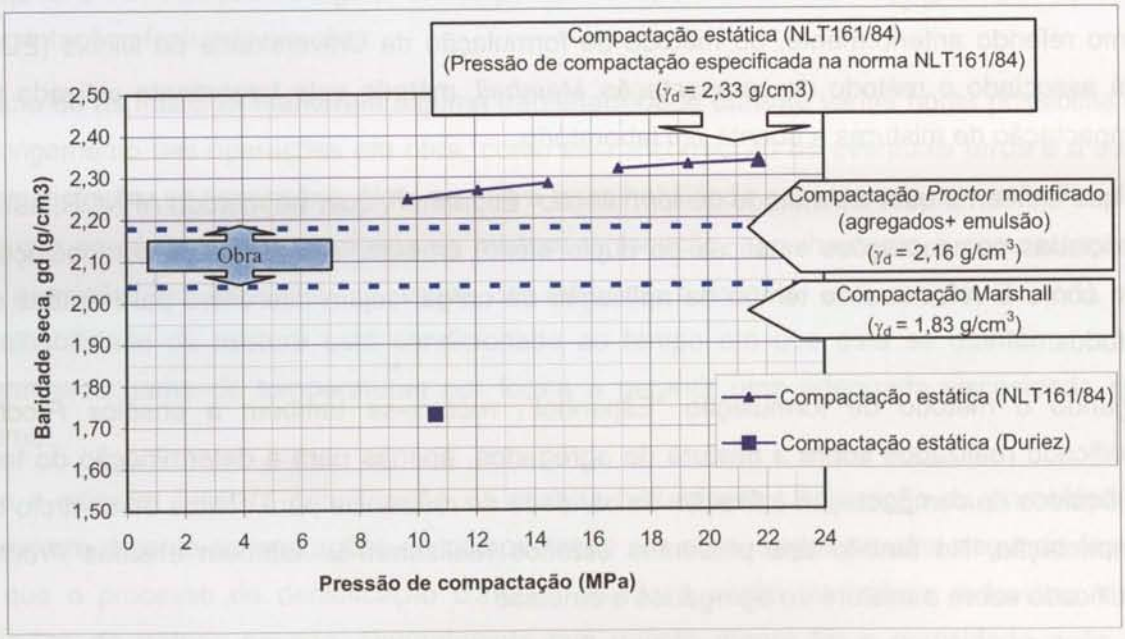


Fig. 5.5 - Baridade seca de misturas compactadas segundo diferentes processos de compactação

Os ensaios realizados e a análise dos resultados obtidos permitiram extrair as seguintes conclusões principais:

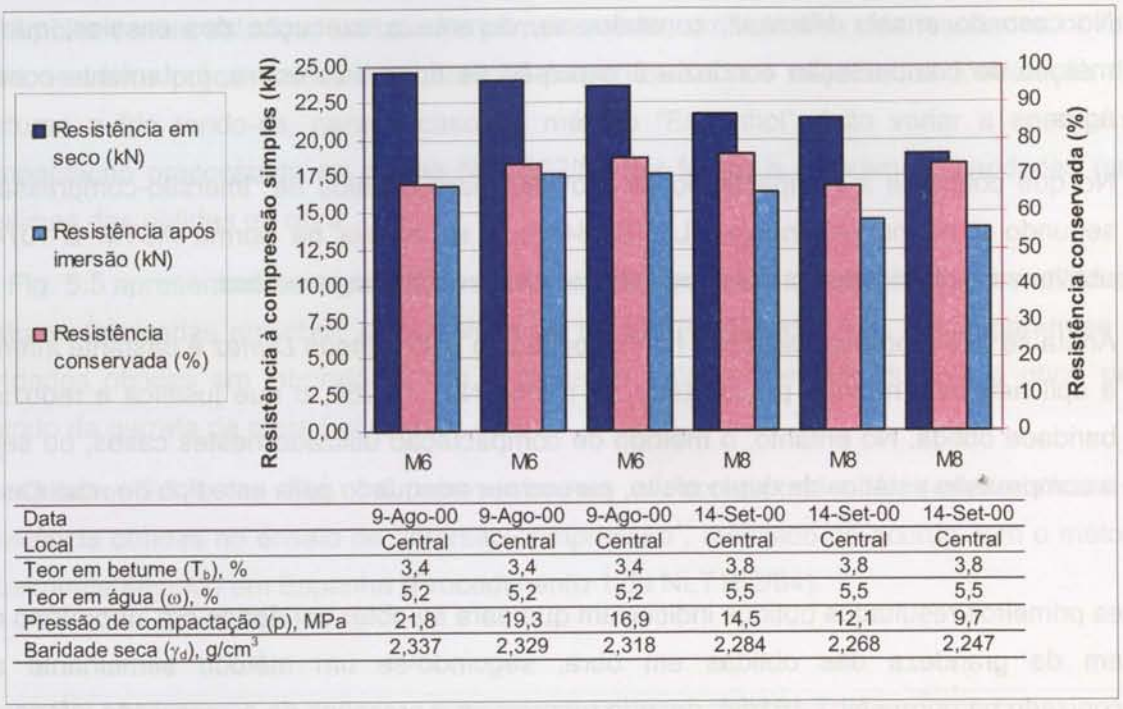
- As baridades secas dos provetes obtidas pelo método *Marshall*, bem como pelo método AFNOR (compactação Duriez/estática) são baixas quando comparadas com os valores obtidos em obra;

- No caso do ensaio *Marshall*, constatou-se, durante a execução dos ensaios, que o método de compactação conduzia à expulsão de finos da mistura, juntamente com a água;
- No que concerne à compactação de provetes para ensaios de "imersão-compressão" segundo a norma espanhola NLT 161/84 (que se baseia na norma ASTM D 1074), obtiveram-se baridades muito superiores aos valores obtidos em obra;
- Anota-se que a pressão aplicada na compactação pelo método *Duriez* é bastante inferior à aplicada pelo método preconizado na norma NLT 161/84, o que justifica a reduzida baridade obtida. No entanto, o método de compactação utilizado nestes casos, ou seja, a compressão estática de duplo efeito, parece ser adequado para este tipo de misturas.

Estes primeiros resultados obtidos indiciavam que para se obter baridades em laboratório da ordem de grandeza das obtidas em obra, seguindo-se um método semelhante ao preconizado na norma NLT 161/84, deveria recorrer-se a pressões de compressão inferiores a 10 MPa para a compactação dos provetes em laboratório. Assim, utilizando amostras retiradas da obra, moldaram-se provetes de macadame betuminoso a frio com diferentes pressões de compactação e avaliou-se, entre outros, a variação da baridade dos provetes daí resultantes. Os resultados obtidos apresentar-se-ão no Capítulo 5.

Quadro 5.3 – Ensaios de "imersão-compressão" realizados com base no método "Espanhol", com variação da pressão de compactação dos provetes

Mistura ensaiada	Moldagem dos provetes (NLT161, exceptuando a pressão de compactação)		Nº de provetes ensaiados	Baridade da mistura compactada (γ_d, g/cm^3)	Cura dos provetes	Ensaio de imersão-compressão (NLT162-Procedimento1)		
	Tipo de compactação	Pressão aplicada				Resistência "em seco"	Resistência após imersão	Resistência conservada
M6	Compactação estática	21,8 MPa	3+3	2,337	1dia à temp. ambiente + 3dias a 60°C	24,63 kN	16,77 kN	68%
M6		19,3 MPa		2,329		24,04 kN	15,58 kN	73%
M6		16,9 MPa		2,318		23,57 kN	17,66 kN	75%
M8		14,5 MPa		2,284		21,74 kN	16,45 kN	76%
M8		12,1 MPa		2,268		21,50 kN	14,48 kN	67%
M8		9,7 MPa		2,247		18,99 kN	13,94 kN	73%



Data	9-Ago-00	9-Ago-00	9-Ago-00	14-Set-00	14-Set-00	14-Set-00
Local	Central	Central	Central	Central	Central	Central
Teor em betume (T_b), %	3,4	3,4	3,4	3,8	3,8	3,8
Teor em água (ω), %	5,2	5,2	5,2	5,5	5,5	5,5
Pressão de compactação (p), MPa	21,8	19,3	16,9	14,5	12,1	9,7
Baridade seca (γ_d), g/cm^3	2,337	2,329	2,318	2,284	2,268	2,247

Fig. 5.6 – Ensaios de "imersão-compressão" (método "Espanhol"), realizados sobre provetes moldados a diferentes pressões, com misturas recolhidas em obra

Através da observação do Quadro 5.3 e da Fig. 5.6, pode-se ainda constatar que para os valores de pressão de compressão utilizados nestes estudos preliminares de compactação (entre cerca de 10 e 22 MPa), se verifica uma ligeira diminuição da resistência "a seco" para os provetes compactados a pressões mais baixas. Já quanto às resistências conservadas (relação entre a resistência após imersão e resistência a seco) os valores mantêm-se na mesma ordem de grandeza. No entanto, não é possível afirmar se esta conclusão é geral ou se apenas se aplica a um número restrito de casos podendo haver outros factores que influenciem estes resultados.

Pode-se também verificar que todos os provetes submetidos a ensaio de "imersão--compressão", incluindo aqueles que foram compactados a pressões mais baixas e apresentam baridades inferiores, satisfazem com larga margem aos requisitos mínimos preconizados no Caderno de Encargos tipo da JAE, o que reforça o exposto em 4.5.5, relativamente à eventual necessidade de rever os referidos requisitos.

A compacidade das camadas em misturas betuminosas obtidas em obra resulta, como já se disse, primeiramente das operações de compactação durante a execução da obra e, posteriormente, da acção do tráfego. Esta última acção, quando se faz sentir, é

predominantemente nas camadas mais próximas da superfície. Dadas as características inerentes às misturas densas a frio, estas devem permanecer expostas ao ar, ou apenas protegidas com uma camada fina (por exemplo, uma rega de protecção), até cerca de um mês após a sua execução por forma a que verifique a estabilização do teor em água ainda presente na mistura após os trabalhos de compactação da camada. Durante este período, em que o processo de cura está em curso, e portanto, a camada em mistura a frio ainda não atingiu a resistência final para a qual foi formulada, é expectável que o tráfego tenha uma acção importante na compactação da camada.

Na obra de reabilitação da EN 120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro, extraíram-se tarolos através de sondagens à rotação no pavimento, cerca de um ano e meio após a conclusão da camada de macadame betuminoso a frio.

Na vizinhança do local designado por L7 (*vd* Quadro 4.8 e Fig. 4.36), onde se obtiveram maiores baridades imediatamente após a conclusão da obra, foram avaliadas as compacidades nos tarolos recolhidos um ano e meio depois da abertura ao tráfego, representando-se graficamente os resultados obtidos na Fig. 5.7. Nesta zona verificou-se um aumento da baridade seca da camada de macadame betuminoso a frio de cerca de 2% devido à acção do tráfego, a que correspondem valores de baridades secas superiores a 2,20 g/cm^3.

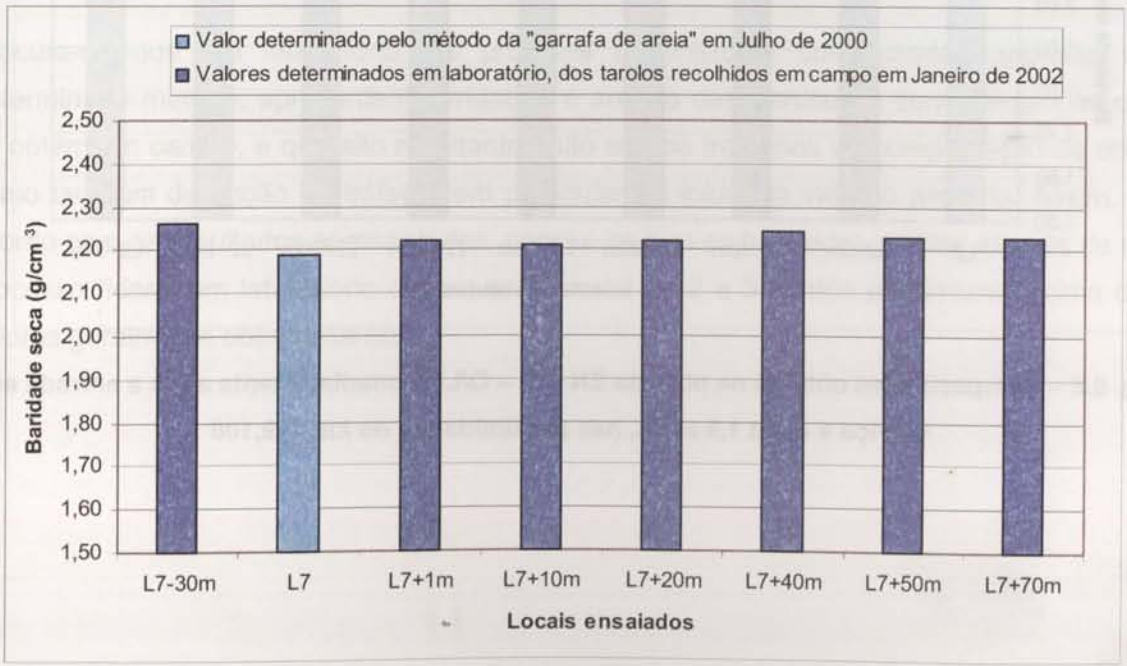


Fig. 5.7 – Compacidades obtidas na obra da EN 120 – O/LDF imediatamente após a entrada em serviço e após 1,5 anos, nas proximidades do km 113,530

De igual forma recolheram-se tarolos nas vizinhanças dos locais designados por L2 e L8 (*vd* Quadro 4.8 e Fig. 4.36), tendo-se avaliado as compacidades nos tarolos recolhidos um ano e meio depois da abertura ao tráfego. Os resultados obtidos representam-se graficamente na Fig. 5.8 e na Fig. 5.9. Nestas zonas verificou-se um aumento da baridade seca da camada de macadame a frio de cerca de 3%.

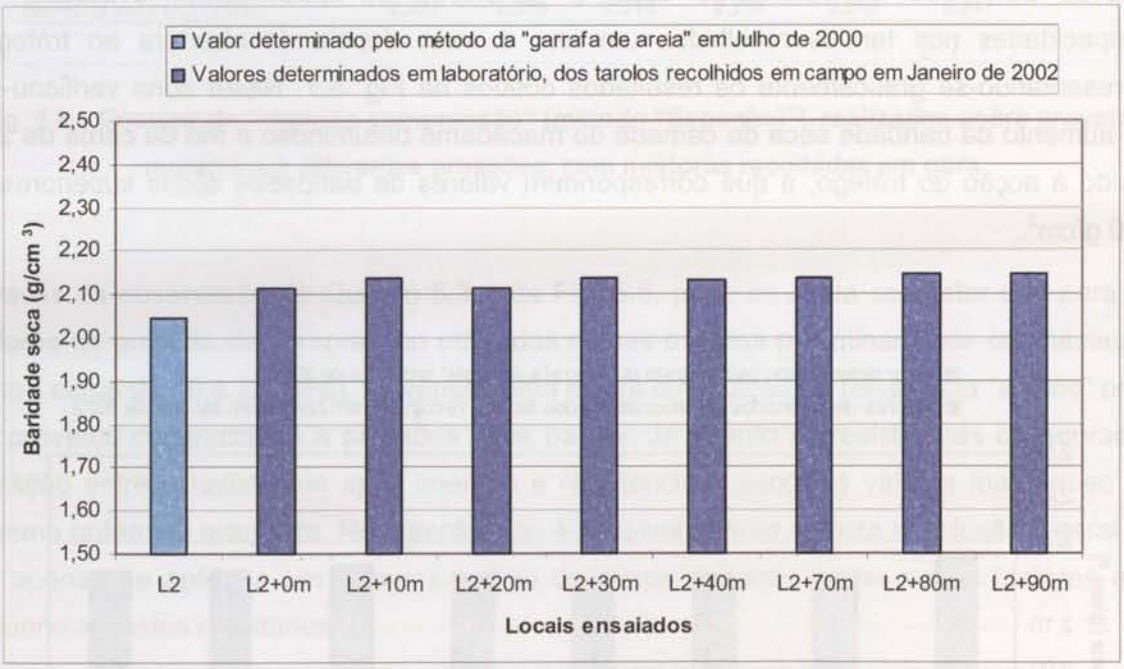


Fig. 5.8 – Compacidades obtidas na obra da EN 120 – O/LDF imediatamente após a entrada em serviço e após 1,5 anos, nas proximidades do km 119,100

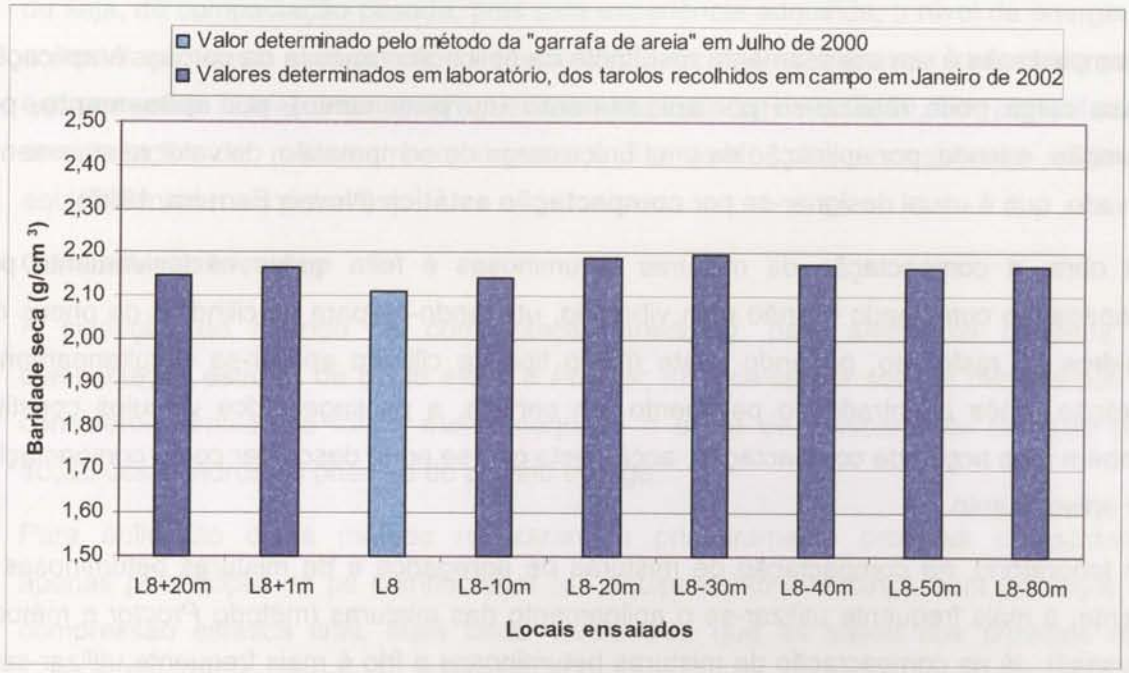


Fig. 5.9 – Compacidades obtidas na obra da EN 120 – O/LDF imediatamente após a entrada em serviço e após 1,5 anos, nas proximidades do km 112,180

Procura-se que em laboratório, os provetes de misturas compactadas segundo um determinado método, apresentem baridades e arranjo das partículas, semelhantes às que se obtêm em campo, e que são resultantes não só dos trabalhos de compactação da obra, como também da acção do tráfego, em particular no início da vida do projecto. Assim, de acordo com os resultados apresentados, conclui-se que as baridades a obter através de um processo "ideal" em laboratório devem estar cerca de 2 a 3 pontos percentuais acima dos valores geralmente obtidos na obra.

5.3.3 - Breve descrição dos métodos de compactação seleccionados

A compactação é um adensamento resultante da aplicação repetida de cargas. A aplicação dessa carga pode realizar-se por **apisoamento** (ou pisoamento), por **apiloamento**, por **vibração**, e ainda, por aplicação de uma única carga de compressão, de valor relativamente elevado, que é usual designar-se por **compactação estática** (Novais Ferreira, 1997).

Em obra, a compactação de misturas betuminosas é feita quase exclusivamente por apisoamento combinado ou não com vibração, utilizando-se para tal cilindros de pneus ou cilindros de rasto liso, podendo neste último tipo de cilindro aplicar-se simultaneamente vibração. Após a entrada do pavimento em serviço, a passagem dos veículos constitui também uma acção de compactação, acção esta que se pode descrever como compactação por apisoamento.

Em laboratório, na compactação de misturas de agregados e de misturas betuminosas a quente, é mais frequente utilizar-se o apiloamento das misturas (método *Proctor* e método *Marshall*). Já na compactação de misturas betuminosas a frio é mais frequente utilizar-se a compactação estática e, nalguns casos, também a compactação por apisoamento (compactação *kneading*).

A eficácia relativa de cada um dos métodos referidos e o arranjo final das partículas, são função do tipo de mistura a compactar. No caso das misturas betuminosas a frio, o arranjo final das partículas é, por exemplo, relativamente sensível ao teor em água da mistura.

Na sequência dos resultados apresentados na secção anterior, optou-se, após um estudo geral dos métodos de compactação disponíveis em laboratório para provetes cilíndricos, por estudar mais pormenorizadamente os métodos de compactação seguidamente descriminados:

- Compactação estática de duplo efeito (baseada na norma NLT 161/84 ou na norma ASTM D 1074-96)

  No que concerne a este método, foram moldados provetes não só aplicando a pressão de compactação (p) preconizada nas referidas normas, no valor de 21 MPa, mas também diminuindo este valor para 8 MPa, por forma a avaliar o efeito sobre as características das misturas. Assim, foram moldados provetes com os seguintes procedimentos:

  - Compactação estática de duplo efeito à pressão de 21 MPa
  - Compactação estática de duplo efeito à pressão de 8 MPa

- Compactação *Proctor* modificado (compactação pesada)

Quanto ao método de compactação *Proctor*, optou-se por se utilizar a versão modificada, ou seja, de compactação pesada, pois pela experiência adquirida, o nível de energia de compactação desta modalidade do ensaio, reproduz melhor a energia transmitida pelos equipamentos actualmente empregues em obras de pavimentação, em particular, na compactação de misturas betuminosas a frio (onde são normalmente utilizados equipamentos mais potentes).

- Compactação *kneading*

  A selecção do método de compactação *kneading*, para além dos métodos de compactação estática de duplo efeito e *Proctor*, justifica-se por ser um método que se considerou simular de forma mais adequada o efeito de apisoamento induzido pela acção dos cilindros de pneus e do próprio tráfego.

  Para aplicação deste método realizaram-se primeiramente provetes compactados apenas pela acção do pé compactador (do equipamento *kneading*), sem aplicação da compressão estática final. Mais tarde verificou-se que as bases dos provetes nem sempre ficavam devidamente niveladas e paralelas entre si, pelo que se decidiu seguir integralmente os procedimentos da norma ASTM D 1561-92, isto é, compactação com o equipamento *kneading* seguindo-se uma leve compactação estática para nivelamento dos provetes. Note-se porém, que as baridades obtidas pelo cumprimento desta norma resultaram ligeiramente superiores às que se obtinham em campo, e daí que se tenha tentado inicialmente a primeira abordagem.

  Assim, e em resumo, foram moldados provetes com o equipamento kneading através dos seguintes procedimentos:

  - Compactação *kneading* sem compressão estática final;
  - Compactação *kneading* com compressão estática final (p=7MPa), para nivelamento dos provetes.

Seguidamente faz-se uma breve descrição de cada um dos métodos de compactação seleccionados.

5.3.3.1 - Compactação estática de duplo efeito

Para a compactação estática de duplo efeito seguiu-se o procedimento estabelecido na norma espanhola NLT-161/84, que é em tudo semelhante ao procedimento preconizado na norma ASTM D 1074-96. Estas normas foram desenvolvidas para determinação da resistência à compressão simples de misturas betuminosas fabricadas a quente, pelo que

houve que ajustar algumas operações por forma a ter em consideração as especificidades das misturas a frio, para as quais não é necessário aquecer os materiais a empregar na mistura, nem tão pouco aquecer os equipamentos utilizados.

Seguidamente descrevem-se sucintamente os passos seguidos:

- Preparação dos provetes

  No caso geral, os provetes cilíndricos moldados devem apresentar uma dimensão de 101,6 mm de diâmetro por 101,6 mm de altura.

  A norma permite que se fabriquem provetes com dimensões distintas, variando as dimensões dos provetes entre um mínimo de 50,8 mm de diâmetro e igual altura, até um máximo de 203,2 mm de diâmetro e igual altura. A dimensão dos provetes tem que ser pelo menos quatro vezes superior ao diâmetro máximo nominal do agregado grosso empregue. No entanto, quando da utilização de provetes com outras dimensões que não as recomendadas, há que ter em atenção que este aspecto tem influência nos resultados do ensaio de resistência à compressão.

  Uma vez que o diâmetro máximo nominal dos agregados empregues no presente estudo é de 20 mm, utilizaram-se no fabrico dos provetes, moldes de diâmetro interior de 101,6 mm tal como é recomendado na norma NLT-161/84.

- Preparação dos agregados

  Preparam-se em separado as diversas fracções de agregados a utilizar no fabrico da mistura betuminosa, e combinam-se posteriormente por forma a obter-se a granulometria especificada.

- Preparação das misturas

  Preparam-se as quantidades de água e de emulsão betuminosa necessárias para uma amassadura, por forma a que os provetes fiquem, no final da compactação, com a altura desejada de 101,6 mm±2,5%. Pré-misturam-se manualmente a água e os agregados, seguindo-se a adição da emulsão betuminosa.

  Seguidamente, coloca-se a cuba na misturadora mecânica e mistura-se bem.

- Compactação dos provetes

  A compactação estática de duplo efeito consiste na aplicação de uma carga em cada uma das bases do provete cilíndrico, sendo para tal o molde colocado na vertical, numa prensa capaz de aplicar a carga axial estabelecida no pistão inferior e no pistão superior situados nas bases do provete.

Uma vez fabricada a mistura, coloca-se o molde sobre o pistão inferior, intercalando duas varetas de suporte, e transfere-se para dentro do molde cerca de metade da quantidade de mistura betuminosa necessária para a moldagem de um provete. Distribui-se o material dentro do molde através da aplicação, com uma espátula de bordos arredondados, de 25 golpes, sendo os quinze primeiros aplicados no bordo do provete e os restantes distribuídos ao acaso. Seguidamente, adiciona-se a restante quantidade de mistura a frio e aplicam-se de forma similar outros tantos golpes com a espátula. Finalmente dá-se um acabamento ligeiramente cónico ou esférico à parte superior da mistura por forma a facilitar o assentamento do pistão superior, que é então devidamente colocado sobre a mistura.

Coloca-se o molde contendo o provete na prensa e aplica-se sobre a mistura uma pressão inicial no valor de 1 MPa. A aplicação desta pré-carga, tem como objectivo proporcionar um assentamento inicial da mistura para que quando da aplicação da carga propriamente dita não haja "espaços" por preencher entre o provete e os pratos da prensa e o provete mantenha a verticalidade. No final desta operação retiram-se os dois apoios verticais, para compactar pelo sistema de duplo efeito, e dá-se inicio à compactação definitiva da mistura mediante a aplicação de uma carga crescente, regulando a velocidade o mais uniformemente possível, até se atingir, num intervalo de 2 a 3 minutos, uma pressão máxima estabelecida (21 MPa no caso de a pressão ser a preconizada na norma), mantendo esta pressão sobre a mistura durante 2 minutos. Para os provetes normalizados de 101,6 mm de diâmetro, as pressões utilizadas no presente estudo, no valor de 21 MPa e de 8 MPa, correspondem respectivamente, a uma carga de 170 kN e de 65 kN.

- Desmoldagem dos provetes

  A desmoldagem dos provetes realiza-se 2 h depois da sua compactação, através de um dispositivo que permita deslizar de uma forma suave e uniforme o provete através do molde.

Na Fig. 5.10 retratam-se as operações de compactação estática dos provetes em misturas betuminosas a frio.



Fig. 5.10 – Moldagem de provetes em misturas a frio através de compactação estática de duplo

5.3.3.2 - Compactação *Proctor*

O ensaio de compactação *Proctor* destina-se a determinar a relação entre o teor em água e a baridade seca dos solos.

Trata-se de um ensaio usado para o estabelecimento do teor em água que conduz à baridade seca máxima de um solo, sendo esta baridade usada como referência no controlo da baridade de campo de solos compactados.

Uma vez que os materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas a frio são essencialmente agregados, água e emulsão betuminosa, ou seja, agregados e fluido (água e emulsão), o ensaio *Proctor* tem sido utilizado também na compactação deste tipo de misturas. Na subsecção 4.5.6 do capítulo 4, concluiu-se que, naturalmente, a presença da emulsão na mistura afecta a sua compactação.

Para a compactação pelo método *Proctor* das misturas betuminosas a frio fabricadas em laboratório no âmbito do presente estudo, seguiram-se os procedimentos estabelecidos na especificação LNEC E 197-1967, da qual se faz seguidamente uma breve descrição.

Podem ser consideradas quatro variantes deste ensaio correspondentes a dois níveis de energia de compactação e a duas dimensões dos provetes. No que respeita aos níveis de energia, pode-se recorrer à "compactação leve" ou á "compactação pesada". Já no que concerne à dimensão dos provetes cilíndricos a compactar a distinção entre a utilização do "molde pequeno" ou do "molde grande" é feita em função da granulometria do solo.

Assim, de entre os tipos de compactação existentes, especificam-se os seguintes:

- Compactação leve em molde pequeno;
- Compactação pesada em molde pequeno;
- Compactação leve em molde grande;
- Compactação pesada em molde grande.

Os moldes preconizados na referida norma devem ter as seguintes dimensões:

- Molde pequeno: Molde cilíndrico de aço, com 102 mm de diâmetro interior e 117 mm de altura, munido de alonga e base;
- Molde grande: Molde cilíndrico de aço, com 152 mm de diâmetro interior e 178 mm de altura, munido de alonga, base e espaçador, podendo em alternativa, utilizar-se um molde de menor altura (114 mm), sem espaçador.

Para efeitos do presente estudo optou-se por se utilizar o molde pequeno no fabrico de provetes através do método de compactação *Proctor.* As razões desta opção prenderam-se não só com o facto de o molde pequeno ter um diâmetro interior de 102 mm o que permitiria a moldagem de provetes com a dimensão preconizada na norma NLT 161/84 para o ensaio dos provetes à compressão simples, mas também porque se pretendia que a única variável na moldagem dos provetes fosse o método de compactação e não outros factores, tais como a sua dimensão, por forma a não dificultar a interpretação dos resultados.

No que concerne à energia de compactação, na especificação LNEC E 197-1966 estabelece-se que, consoante o tipo de compactação seja leve ou pesada, se utilize respectivamente, um pilão com 2,49 kg de massa, 305 mm de altura de queda e base de compactação de 50 mm de diâmetro e um pilão com 4,54 kg de massa, 457 mm de altura de queda e base de compactação de 50 mm de diâmetro.

Quando se trata da compactação laboratorial através do método *Proctor* de materiais para pavimentação de estradas, utiliza-se na maioria das vezes a compactação pesada, pois é a que mais se aproxima dos níveis de energia de compactação actualmente proporcionados pelos equipamentos empregues em obra. Neste estudo foi, de igual modo, seleccionada a compactação pesada para a moldagem dos provetes.

As etapas seguidas na moldagem dos provetes através do método *Proctor* modificado (compactação pesada em molde pequeno) foram as seguintes:

- Preparação dos agregados e das misturas

  A preparação da mistura de agregados e posteriormente da mistura betuminosa a frio com emulsão é feita seguindo os procedimentos já descritos para o método anterior.

- Compactação dos provetes

  Primeiramente aperta-se o molde com a alonga fixada à base.

  Seguidamente dispõe-se em cordão a quantidade de mistura betuminosa a frio necessária para o fabrico de um provete e divide-se em cinco partes sensivelmente iguais.

  A compactação do provete é feita em cinco camadas, realizando-se cada camada, deitando-se no molde cada uma das partes em que se dividiu o cordão de mistura, seguindo-se a aplicação de 25 pancadas do pilão pesado, distribuídas uniformemente sobre a superfície. Na Fig. 5.11 apresenta-se esta fase da operação dos trabalhos.

  Terminada a compactação, retira-se a alonga e rasa-se cuidadosamente o molde, preenchendo qualquer concavidade eventualmente formada, retira-se o molde da base, extraindo-se de seguida o provete do molde.



Fig. 5.11 – Equipamento de compactação *Proctor* do LNEC

5.3.3.3 - Compactação *kneading*

O processo de compactação através do "*California kneading compactor*", ou, como é habitualmente designado compactador "*kneading*", está associado ao método *Hveem* de formulação de misturas betuminosas (norma ASTM D 1560-92, *Asphalt Institute*—MS2, 1993).

Existem duas variantes deste processo de compactação, associadas a duas formas de provetes: cilíndricos ou prismáticos. O processo de compactação associado a cada uma das variantes é semelhante.

De forma genérica, trata-se da compactação de provetes, através da colocação da mistura no molde em várias camadas e da sua compactação pela acção de um pé compactador. Durante o processo de compactação, o molde com o provete tem um movimento de rotação ou de translacção consoante seja cilíndrico ou prismático, enquanto o pé compactador, accionado num movimento ascendente e descendente, vai exercendo uma determinada pressão durante um determinado tempo sobre a mistura betuminosa que adensa por acção da pressão exercida.

No âmbito da realização do presente trabalho foram moldados com o equipamento *kneading* do LNEC, provetes cilíndricos com duas alturas distintas e provetes prismáticos de uma única dimensão. Para a realização dos estudos apresentados neste capítulo foram apenas produzidos provetes cilíndricos para efeitos de ensaio de "imersão-compressão", com as dimensões preconizadas na norma espanhola NLT 161-84 (101,6 mm de diâmetro e igual altura). No entanto, para a realização dos estudos que se apresentarão no capítulo subsequente, moldaram-se também provetes cilíndricos de dimensões diferentes (101,6 mm de diâmetro e 64 mm de altura) e provetes prismáticos. Por esta razão optou-se por descrever seguidamente, não só o processo de compactação seguido para a preparação dos provetes utilizados nos ensaios apresentados neste capítulo, mas também para os outros provetes, a que se refere o capítulo 6.

No que concerne à preparação das misturas betuminosas a compactar, esta foi feita de acordo com o descrito anteriormente, ou seja, recolhem-se as diversas fracções de agregados e compõe-se a mistura de agregados, junta-se a água e mistura-se bem, e finalmente junta-se a emulsão betuminosa e mistura-se novamente. A mistura é realizada manualmente em primeiro lugar, e depois na misturadora mecânica.

A preparação dos provetes cilíndricos com o *kneading* foi feita com base na norma ASTM D 1561-92, fazendo as devidas adaptações no que concerne à dimensão dos provetes (para um dos casos), tendo em conta que esta norma foi desenvolvida para o

fabrico de provetes em misturas betuminosas com 101,6 mm de diâmetro e cerca de 64 mm de altura. Assim, os principais passos seguidos foram os que se descrevem a seguir.

Em primeiro lugar coloca-se o molde no suporte.

Seguidamente procede-se à preparação dos provetes em três fases distintas:

- 1ª fase: Colocação do material no molde

  A colocação do material no molde é feita em duas parcelas correspondendo cada uma delas a cerca de metade da mistura necessária para um provete. Após colocar no molde cada uma das parcelas em que se dividiu a mistura, são aplicados manualmente ao material, com a ajuda de uma vareta, 20 golpes no centro e 20 golpes à volta do bordo, por forma a garantir a sua distribuição homogénea.

- 2ª fase: Compactação *kneading*

  Coloca-se o molde (com o provete) no equipamento *kneading* por forma a dar-se início à compactação (vd Fig. 5.12).

  O pé compactador do equipamento *kneading* do LNEC para a compactação de provetes cilíndricos, tem a forma de um sector circular com 60º, e um raio de 50 mm. Durante o processo de compactação, o molde com o provete cilíndrico roda no sentido retrógado enquanto o pé compactador é animado de um movimento ascendente e descendente.

  A moldagem dos provetes no equipamento *kneading* é efectuada em duas etapas. A primeira de pré-compactação, corresponde à aplicação de aproximadamente 20 carregamentos a 1,7 MPa (250 psi) cada um. A segunda etapa correspondente à compactação propriamente dita, é conseguida pela aplicação de 150 carregamentos a 3,4 MPa (500 psi).

- 3ª fase: Nivelamento dos provetes

  A preparação do provete termina com a fase de nivelamento das bases dos provetes, efectuada através de compactação estática de duplo efeito para uma carga de 56 kN, e para uma velocidade de de aplicação da mesma de 6 mm/min. Para os provetes cilíndricos com diâmetro de 101,6 mm a carga axial de 56 kN corresponde a uma pressão de cerca de 7 MPa.

Finalmente, passadas duas horas da compactação dos provetes procede-se à sua desmoldagem pelo processo já descrito.

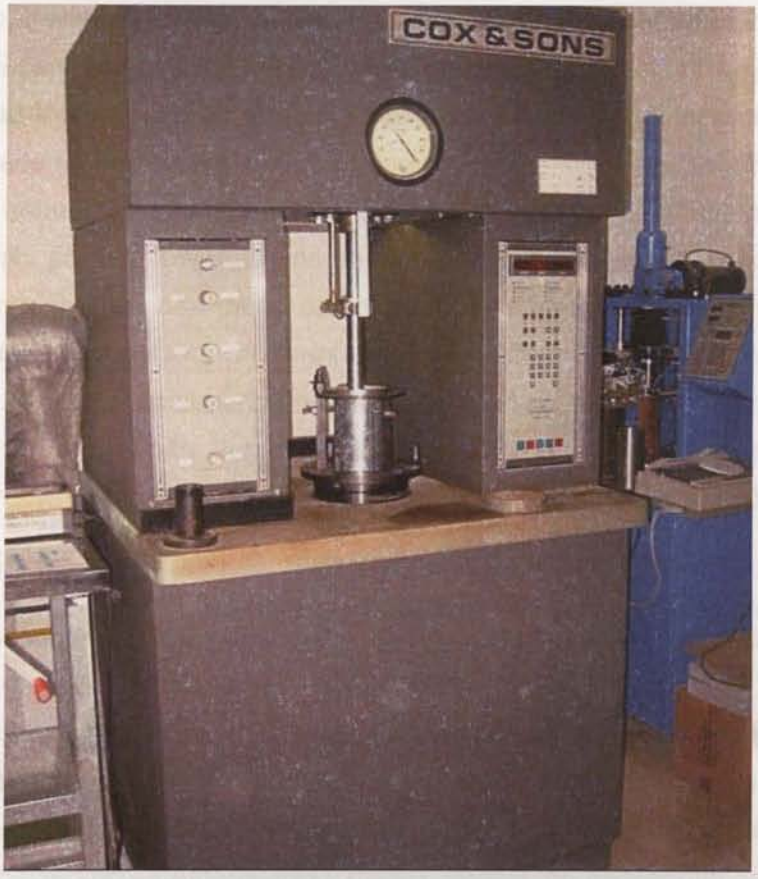


Fig. 5.12 – Compactação de provetes cilíndricos com o equipamento *kneading*

Como se referiu, este processo de compactação permite ainda produzir em laboratório provetes em forma de viga prismática, de secção constante. Neste caso, o pé compactador tem a forma rectangular e o movimento do provete, de translação para a frente e para trás, processa-se de forma a permitir a compactação em toda a extensão da viga.

A preparação de provetes prismáticos foi feita com base nos procedimentos estabelecidos na norma ASTM D 3202-94. No entanto, nesta norma preconizam-se moldes prismáticos, cujas dimensões interiores são de 381 mm de comprimento, 82,6 mm de largura e 114,3 mm de altura, enquanto que no LNEC existem para este equipamento dois tipos de moldes prismáticos apresentando ambos dimensões distintas, um mais pequeno e outro maior.

Uma vez que no âmbito do presente trabalho se pretendia moldar vigas para ensaios no equipamento servo-hidráulico do LNEC, onde são exigidos provetes com dimensões minímas de 90X90X600 mm^3, foi utilizado o molde de maiores dimensões, ou seja, com 760 mm de comprimento, 150 mm de largura e 165 mm de altura. Para tal, foi necessário adaptar os procedimentos preconizadas na norma ASTM referida, à dimensão dos provetes a preparar no equipamento *kneading* do LNEC, nomeadamente quanto ao número de aplicações de carga a realizar, tendo também em atenção que as dimensões do pé compactador com forma rectangular utilizado neste caso, são de 150 mm de largura por 35 mm de comprimento. Neste sentido foi primeiramente efectuado um estudo prévio em que se moldou uma viga e se determinou a baridade conseguida. Uma vez que o resultado foi satisfatório procedeu-se à moldagem de mais três vigas, não tendo sido possível moldar outras por limitações de matéria prima.

O processo de preparação destes provetes com dimensão de 150x150x760 mm^3 é igualmente feito em três fases, conforme a seguir se sintetiza.

- 1ª fase: Colocação do material no molde

  De acordo com o especificado na norma ASTM D 3202-94, a compactação no equipamento *kneading* dos provetes prismáticos faz-se em três camadas, sendo cada uma delas constituida por um terço da quantidade de mistura necessária para moldar um provete com as dimensões desejadas. Assim, previamente à compactação dos provetes propriamente ditos, prepara-se a mistura betuminosa necessária para a moldagem de um provete e divide-se em três partes sensivelmente iguais.

  Após a colocação de cada terço de material no molde prismático numa camada uniforme, regulariza-se a mistura com a ajuda de uma vareta, aplicando cerca de 70 golpes no centro da massa e 40 golpes nos bordos, procedendo-se de seguida à sua compactação no equipamento *kneading*.

- 2ª fase: Compactação *kneading*

  Cada uma das três camadas é compactada em três fases distintas, com níveis de energia de compactação crescentes, conforme se sintetiza no Quadro 5.4.

  Na Fig. 5.13 apresenta-se esta fase da operação dos trabalhos.

Quadro 5.4 – Níveis de energia de compactação aplicados na moldagem de provetes prismáticos no equipamento *kneading*

Camada	Nível de energia de compactação	Pressão de aplicação da carga	Número de aplicações da carga
1ª camada	1º	515 kPa (75 psi)	60
	2º	1035 kPa (1035 psi)	40
	3º	2070 kPa (2070 psi)	40
2ª camada	1º	515 kPa (75 psi)	60
	2º	1035 kPa (1035 psi)	60
	3º	2070 kPa (2070 psi)	60
3ª camada	1º	515 kPa (75 psi)	60
	2º	1035 kPa (1035 psi)	80
	3º	2070 kPa (2070 psi)	80

- 3ª fase: Nivelamento dos provetes

  Após a compactação no equipamento kneading , coloca-se uma barra de nivelamento no topo do provete e aplica-se aplica-se uma carga estática no provete, à velocidade de cerca de 6,4 mm/min. até ser atingida uma pressão de 2074 kPa. Para a dimensão dos provetes moldados (de 150x760 mm^2 de superfíce do topo), esta pressão axial corresponde a uma carga de 23 tf. Esta carga foi aplicada através de um macaco hidráulico, tendo a barra de nivelamento sido especialmente executada para o efeito, por forma a permitir a aplicação da referida carga e distribui-la uniformemente por toda a superfície do provete sem flectir.



Fig. 5.13 – Compactação de provetes prismáticos no equipamento *kneading*

5.4 - Evolução do processo de cura das misturas

5.4.1 - Generalidades

Um dos aspectos que requer particular atenção relativamente à execução de obras com misturas betuminosas densas a frio, relaciona-se com o processo de eliminação da água contida nas camadas, e respectiva cura. Com efeito, no decurso do acompanhamento de obras tem-se observado a importância deste aspecto no comportamento dos pavimentos, pelo que se procurou investigar a evolução do teor em água das camadas após colocação em obra, e a sua relação com a evolução da resistência da mistura.

A eliminação da água das misturas betuminosas resulta de dois mecanismos distintos. Numa primeira fase, a eliminação da água deve-se à compressão resultante do processo de compactação e, numa segunda fase, diferida no tempo, à evaporação.

No fim do processo de cura o agregado encontra-se envolvido por uma película coesiva que o mantém na sua posição definitiva. O material nestas condições possui então as características para que foi projectado.

O comportamento das misturas betuminosas a frio é fortemente condicionado pelas condições de cura.

5.4.2 - Estudos preliminares relativos à cura de misturas betuminosas densas a frio

Por ser fundamental conhecer a evolução das propriedades do material ao longo do processo de cura, o presente trabalho dedica-se em boa medida à caracterização da variação da resistência e da deformabilidade com a idade das misturas.

O estudo da evolução das características do pavimento incidiu sobre duas vertentes distintas. Por um lado, em duas das obras apresentadas no capítulo 4 foi feito o acompanhamento da evolução do teor em água da camada de mistura a frio durante um período de cerca de dois meses após construção. Por outro lado, e em paralelo, essa evolução foi acompanhada em laboratório através da medição da mesma grandeza em amostras moldadas com os métodos descritos na secção anterior e curadas em condições diversas. O objectivo das condições de cura diversificadas, como se descreve de seguida, foi o de avaliar qual seria o melhor processo de simular, em laboratório as condições de cura em obra.

A par da determinação dos teores em água, foram extraídos tarolos por sondagem à rotação nos pavimentos em apreço e verificou-se que a profundidade máxima até à qual era possível extrair tarolos se relacionava bem com a idade da mistura. Além disso, para idades inferiores a sete dias, não foi possível extrair qualquer amostra por sondagem à rotação indicando claramente que a coesão da mistura não era suficiente para esta poder ser considerada como material "ligado".

As amostras fabricadas em laboratório foram, então, curadas com as seguintes condições:

- Amostra cilíndrica, cura ao ar, à temperatura ambiente
- Amostra cilíndrica envolvida em película de polietileno (excepto no topo), cura ao ar, à temperatura ambiente.

Neste último grupo de amostras pretendeu-se simular o efeito de continuidade que um volume de mistura a frio tem quando colocado no pavimento. Na verdade um cilindro isolado totalmente exposto ao ar apresenta condições de cura mais favoráveis que um mesmo volume no interior de uma camada do pavimento.

A mistura colocada em obra encontra-se integrada num espaço, aproximadamente semi-infinito, facto que dificulta a ocorrência de trocas de humidade pela face lateral (Fig. 5.14). Neste caso, portanto, o mecanismo predominante de cura implica a saída de humidade predominantemente pelo topo da camada, como é também simulado pelas condições de laboratório, quando o provete se encontra envolvido pela película de polietileno.

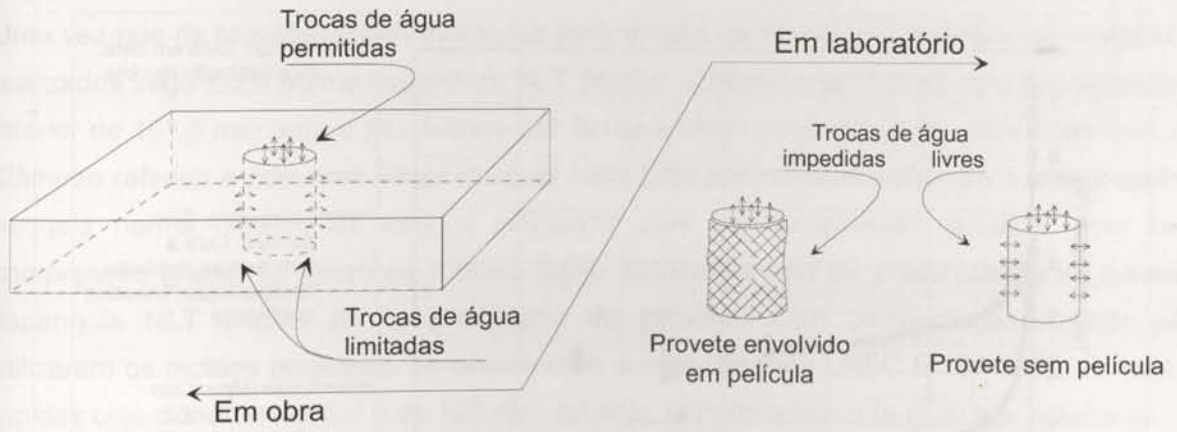


Fig. 5.14 – Condições de cura dos provetes

Na realidade verifica-se que a cura *in situ* se encontra a meio termo quando comparada com a cura das amostras de laboratório, com e sem película. Por outro lado, a diferença entre as amostras curadas em laboratório e as colhidas *in situ* esvanece-se para idades superiores

da camada, validando o processo de controlo através de amostras de laboratório especialmente para a situação de longo prazo. No limite, admite-se quando o teor em água estabiliza, é praticamente irrelevante a forma como se deu o processo de cura.

Após a construção da camada de reforço em macadame betuminoso a frio no lanço da EN 120 situado entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro, foi monitorizada a evolução do teor em água das misturas em locais seleccionados ao longo de todo o troço (*vd* Fig. 4.37). Para o estudo laboratorial da evolução do teor em água das misturas compactadas, moldaram-se provetes em laboratório segundo os métodos atrás descritos, envolvendo a superfície lateral de um grupo de provetes em película e deixando outro grupo com a superfície totalmente exposta ao ar. Este estudo descrever-se-á mais pormenorizadamente nas secções que se seguem.

No âmbito da obra de reabilitação do IP2 (*vd* secção 4.6) foi também monitorizada a evolução do teor em água da mistura reciclada ao longo do tempo, tal como se apresentou na Fig. 4.49. Paralelamente, moldaram-se no LNEC, com o equipamento *kneading*, provetes com material da amostra MR9 (*vd* Quadro 4.13) de mistura reciclada recolhida em obra. Na Fig. 5.15 representa-se a evolução do teor em água dos provetes moldados no LNEC e que foram acondicionados à temperatura ambiente. Destes provetes, houve um que se envolveu lateralmente com película de polietileno, deixando-se apenas a face superior livre para a evaporação da água presente na mistura.

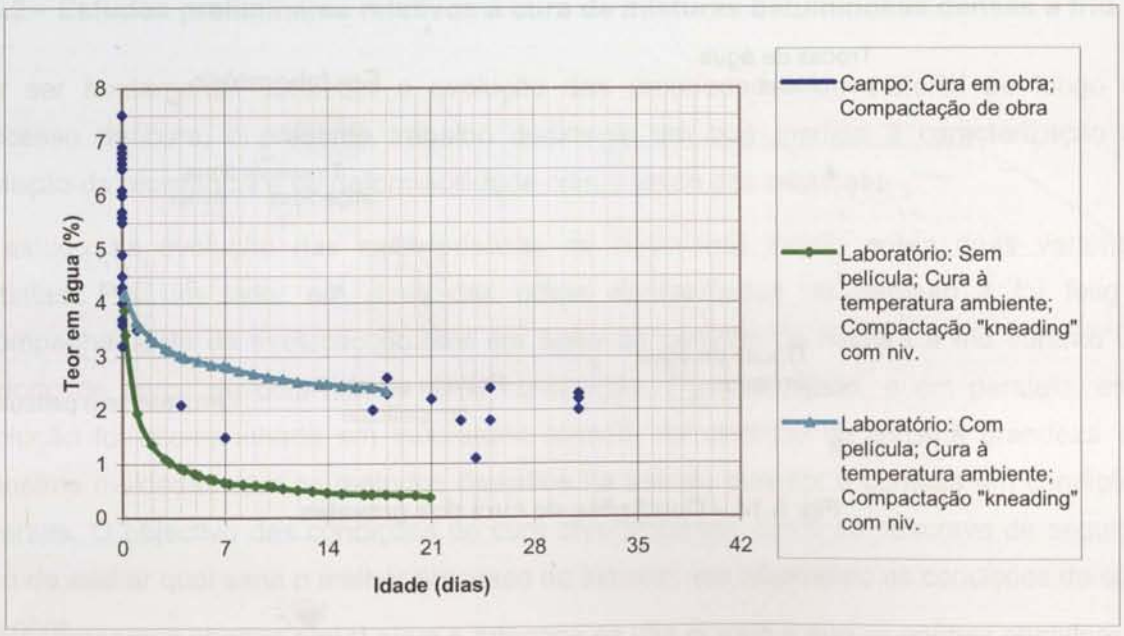


Fig. 5.15 – Evolução do teor em água da mistura reciclada na obra do IP2 com a idade da camada

Os resultados obtidos permitiram verificar que, de uma forma geral, a evolução do teor em água "*in situ*" se situou entre os dois grupos de provetes "curados" em laboratório, um com possibilidades de eliminar a água apenas através da face superior e o outro também lateralmente, aproximando-se mais do primeiro grupo.

5.5 - Estudos relativos aos diversos tipos de compactação e condições de cura dos provetes

5.5.1 - Descrição da metodologia adoptada

Realizaram-se estudos laboratoriais com vista a averiguar quais os métodos disponíveis de moldagem e condicionamento de provetes em laboratório que melhor simulariam as condições de obra.

Para tal, moldaram-se vários lotes de provetes cilíndricos segundo os métodos mencionados na secção 5.3, submetidos a diversas condições de cura, de acordo com o descrito na secção 5.4. Cada lote de provetes foi fabricado utilizando uma mesma amassadura, tendo-se moldado sete provetes por cada lote. Seis destes provetes foram utilizados para realização de ensaios de "imersão-compressão" (três provetes ensaiados à compressão simples "a seco" e três "após imersão"), sendo o sétimo provete utilizado para avaliação de outras características, tal como a avaliação da variação da baridade do provete ao longo da sua altura.

Uma vez que os provetes foram moldados para efeitos de ensaio de "imersão-compressão" realizados segundo a norma espanhola NLT 162/84, utilizaram-se moldes com um diâmetro interior de 101,6 mm para o seu fabrico por forma a obterem-se amostras cilíndricas com o diâmetro referido e com uma altura de igual valor (101,6 mm) de acordo com o preconizado naquela norma. Assim, os moldes utilizados quer na compressão estática, quer na compressão *kneading*, foram os moldes cujas dimensões são as preconizadas na norma espanhola NLT 161/84. Já na moldagem de provetes com compactação *Proctor* se utilizaram os moldes pequenos de acordo com a especificação LNEC E 197-1966, ou seja, moldes cujo diâmetro interior é de 102 mm, ou seja, aproximadamente igual aos anteriores.

Uma vez que a quantidade total necessária para o fabrico dos sete provetes é de cerca 14 kg (aproximadamente 10), foi possível efectuar uma única amassadura por cada lote de provetes moldados.

Acrescenta-se que na norma espanhola NLT 162/84 para determinação da resistência à compressão simples de provetes com e sem imersão, se estabelecem dois procedimentos

alternativos para o condicionamento dos provetes. No âmbito do presente estudo realizaram-se ensaios pelos dois procedimentos, com vista a avaliar as resistências obtidas em cada um.

Para cada lote de provetes moldados foram ainda realizadas as seguintes acções:

- Determinação das correspondentes baridades;
- Acompanhamento da evolução do teor em água para diversas condições de cura.

Nos Quadros 5.5 a 5.7 identificam-se os diversos lotes de provetes moldados, o tipo de compactação utilizado, o tipo de cura a que foram submetidos, bem como o tipo de condicionamento para efeitos de ensaios de "imersão-compressão".

Quadro 5.5 – Provetes moldados para efeitos de "imersão-compressão", submetidos a cura acelerada e a condicionamento segundo o Procedimento 1 da NLT162/84

Lotes de provetes moldados	Número de provetes moldados (1)	Compactação dos provetes	Cura da mistura compactada	Condicionamento dos provetes para ensaios de "imersão-compressão"		Ensaio de rotura
				Provetes "sem imersão"	Provetes "com imersão"	
I.1 Prov. 100 a 106	7 (3+3+1)	Compactação estática, à pressão de 21MPa	• 2h no molde • 1dia ao ar, à temperatura ambiente • 3dias em estufa a 60ºC	• 4dias em estufa a 25ºC • 2h em água a 25ºC	• 4dias em água a 49ºC • 2h ao ar, à temp. ambiente • 2h em água a 25ºC	Ensaio à compressão simples (NLT161/84)
I.2 Prov. 58 a 64	7 (3+3+1)	Compactação estática, à pressão de 8MPa				
I.3 Prov. 79 a 85	7 (3+3+1)	Compactação *Proctor* modificado				
I.3a' (2) Prov. 51 a 57	7 (3+3+1)					
I.4 Prov.29 a 35	7 (3+3+1)	Compactação *Kneading* (sem nivelamento)				
I.4a Prov.36 a 42	7 (3+3+1)					
I.4b Prov.93 a 99	7 (3+3+1)					
I.4' Prov. 185 a 190	7 (3+3)	Compactação *Kneading* com nivelamento				

(1) O sétimo provete de cada lote não foi ensaiado à "imersão-compressão"

(2) Provetes que no período incial de cura ficaram 48 h à temperatura ambiente

Quadro 5.6 – Provetes moldados para efeitos de "imersão-compressão", submetidos a cura acelerada e a condicionamento segundo o Procedimento 2 da NLT162/84

Lotes de provetes moldados	Número de provetes moldados (1)	Compactação dos provetes	Cura da mistura compactada	Condicionamento dos provetes para ensaios de "imersão-compressão"		Ensaio de rotura
				Provetes "sem imersão"	Provetes "com imersão"	
II.1 Prov. 107 a 113	7 (3+3+1)	Compactação estática, à pressão de 21MPa	• 2h no molde • 1dia ao ar, à temperatura ambiente • 3dias em estufa a 60ºC	• 1dia em estufa a 25ºC • 2h em água a 25ºC	• 1dia em água a 60ºC • 2h ao ar, à temp. ambiente • 2h em água a 25ºC	Ensaio à compressão simples (NLT161/84)
II.2 Prov. 15 a 21	7 (3+3+1)	Compactação estática, à pressão de 8MPa				
II.3 Prov. 72 a 78	7 (3+3+1)	Compactação *Proctor* modificado				
II.4 Prov. 86 a 92	7 (3+3+1)	Compactação *Kneading* (sem nivelamento)				
II.4' Prov. 192 a 198	7 (3+3+1)	Compactação *Kneading* com nivelamento				

(1) O sétimo provete de cada lote não foi ensaiado à "imersão-compressão"

Quadro 5.7 – Provetes moldados para efeitos de "imersão-compressão", submetidos a cura de 21 dias à temperatura ambiente e a condicionamento segundo o Procedimento 1 da NLT162/84

Lotes de provetes moldados (1)	Número de provetes moldados (1)	Compactação dos provetes	Cura da mistura compactada	Condicionamento dos provetes para ensaios de "imersão-compressão"		Ensaio de rotura
				Provetes "sem imersão"	Provetes "com imersão"	
III.1 Prov. 1 a 6 e 7	7 (3+3+1)	Compactação estática, à pressão de 21MPa	• 2h no molde • 21 dias à temperatura ambiente	• 4dias em estufa a 25ºC • 2h em água a 25ºC	• 4dias em água a 49ºC • 2h ao ar, à temp. ambiente • 2h em água a 25ºC	Ensaio à compressão simples (NLT161/84)
III.2 Prov. 8 a 13 e 14	7 (3+3+1)	Compactação estática, à pressão de 8MPa				
III.3 Prov. 22 a 27 e 28	7 (3+3+1)	Compactação *Proctor* modificado				
III.4 Prov. 65 a 70 e 71	7 (3+3+1)	Compactação *Kneading* (sem nivelamento)				
III.4' Prov. 178 a 183 e 184	7 (3+3+1)	Compactação *Kneading* com nivelamento				

(1) O sétimo provete de cada lote não foi ensaiado à "imersão-compressão"

Na Fig. 5.16 retratam-se alguns dos provetes moldados, alguns dos quais estão envoltos em película de polietileno.



Fig. 5.16 – Condicionamento à temperatura ambiente de provetes moldados em laboratório

Paralelamente à moldagem de provetes em laboratório, recolheram-se também provetes em obra cerca de um ano e meio após a sua conclusão, tendo-se igualmente determinado as correspondentes baridades (*vd* subsecção 5.3.2).

Após a conclusão da camada em macadame betuminoso a frio, acompanhou-se ainda a evolução a evolução do teor em água das misturas (*vd* subsecção 4.5.7).

5.5.2 - Compactação das misturas

No que concerne às baridades obtidas segundo os métodos de compactação acima referidos, no Quadro 5.8 resumem-se os resultados obtidos, que se representam graficamente na Fig. 5.17.

Quadro 5.8 – Baridade dos provetes moldados (g/cm^3)

	Método de compactação utilizado				
	Compressão estática		Compactação Proctor modificado	Compactação *kneading*	
	p = 21 MPa	p = 8 MPa		Sem compactação estática final	Com compactação estática final
Lotes	I.1/II.1/III.1	I.2/I.2a,b,c/II.2/III.2	I.3/I.3a/II.3/III.3	I.4/I.4a,b,c,d/II.4/III.4	I.4' II.4'/III.4'
Valor mínimo	2,316	2,243	2,181	2,180	2,256
Valor máximo	2,344	2,279	2,348	2,236	2,293
Média	2,33	2,27	2,23	2,21	2,28
Desvio padrão	0,0064	0,0099	0,0373	0,0143	0,0086

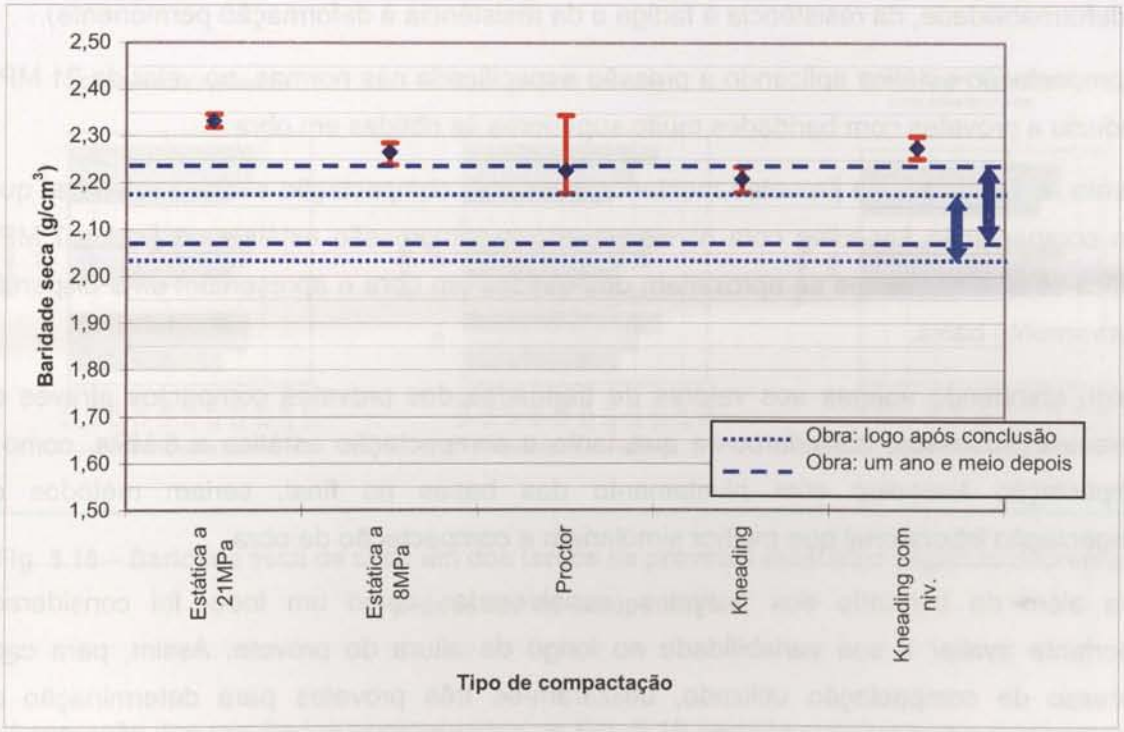


Fig. 5.17 – Baridade seca de misturas compactadas segundo diferentes processos de compactação

Da análise do Quadro 5.8 e da Fig. 5.17 conclui-se que os provetes cujas baridades se enquadram melhor dentro da gama de valores obtidos em obra, após cerca de um ano e meio da sua conclusão, são os provetes moldados com compactação *Proctor* e com compactação *kneading* sem nivelamento final das faces dos provetes.

Quanto à compactação *Proctor* confirmou-se que a opção feita quanto à energia de compactação a utilizar, ou seja, compactação pesada, foi correcta. No entanto, para este tipo de compactação verificou-se haver uma dispersão de valores de baridades relativamente elevada. Note-se que este grupo de provetes apresenta o maior valor de desvio padrão.

Já para a compactação *kneading* se considerou que o nível de dispersão seria aceitável. Este foi pois o método de compactação laboratorial que *a priori* foi considerado como melhor simulando a compacidade obtida em obra. Mais tarde, constatou-se que as faces dos provetes não apresentavam entre si o paralelismo necessário para que os provetes fossem utilizados em ensaios ao comportamento mecânico (ensaios para determinação do módulo de deformabilidade, da resistência à fadiga e da resistência à deformação permanente).

A compactação estática aplicando a pressão especificada nas normas, no valor de 21 MPa, conduziu a provetes com baridades muito superiores às obtidas em obra.

Quanto às baridades de provetes moldados quer com compactação estática a 8 MPa, quer com compactação *kneading* com nivelamento por compressão estática no final a 7 MPa, verifica-se que os valores se aproximam dos obtidos em obra e apresentam uma dispersão relativamente baixa.

Assim, atendendo apenas aos valores de baridades dos provetes compactos através de diferentes processos, considerou-se que tanto a compactação estática a 8 MPa, como a compactação *kneading* com nivelamento das bases no final, seriam métodos de compactação laboratorial que melhor simulariam a compactação de obra.

Para além da baridade dos provetes, considerados como um todo, foi considerado importante avaliar a sua variabilidade ao longo da altura do provete. Assim, para cada processo de compactação utilizado, utilizaram-se três provetes para determinação da variação em altura da sua baridade seca, tendo-se para o efeito serrado cada provete em três cilindros de dimensões semelhantes (diâmetro interior de 102 mm e uma altura após corte de aproximadamente 30 mm):

- terço superior;
- terço intermédio;
- terço inferior.



Na Fig. 5.18 apresentam-se graficamente os resultados obtidos.

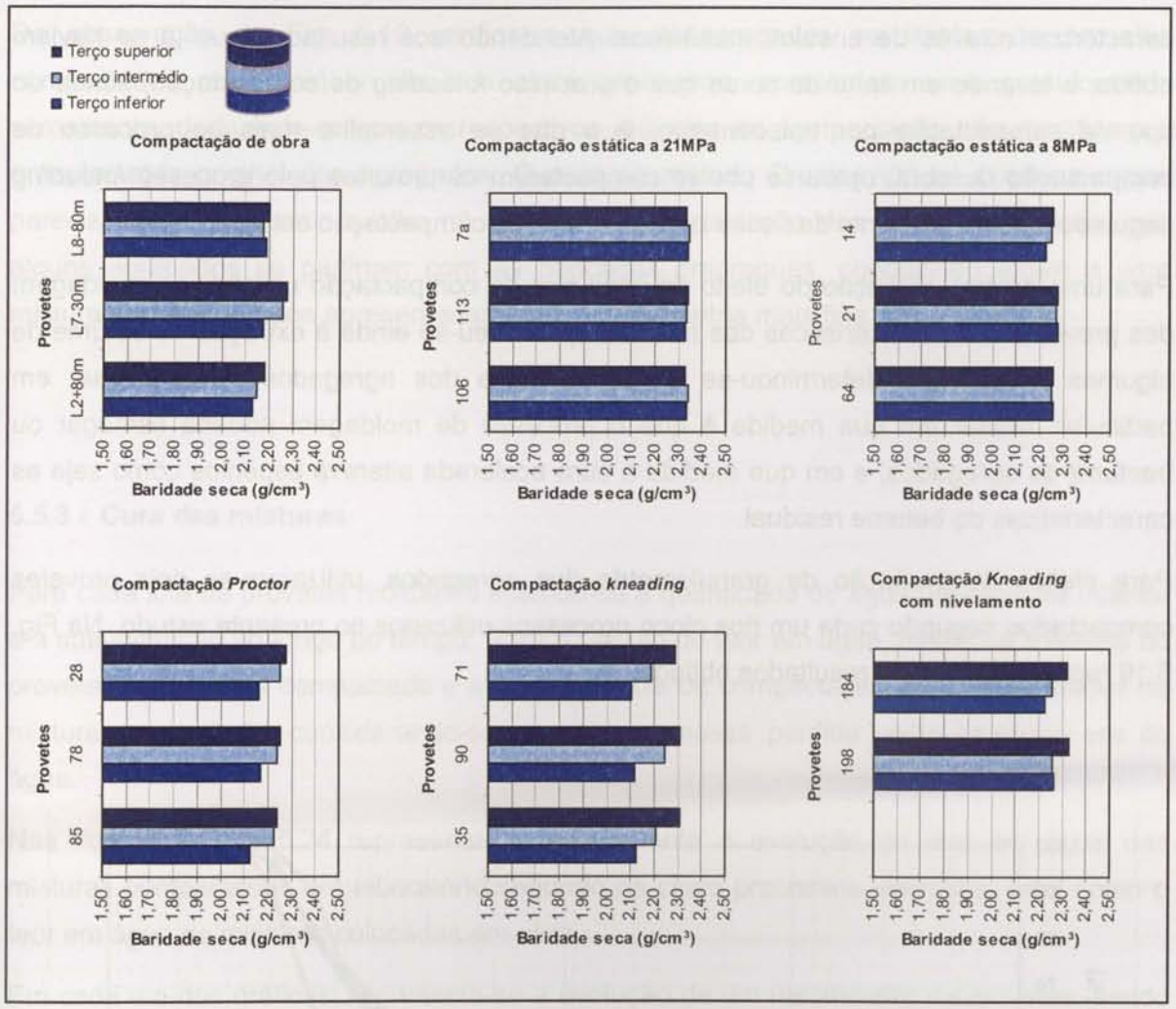


Fig. 5.18 – Baridade seca de cada um dos terços de provetes moldados segundo diferentes processos de compactação

A observação dos resultados apresentados na Fig. 5.18 permite concluir que a compactação estática de duplo efeito conduz a provetes cilíndricos com baridades mais homogéneas ao longo da sua altura, quer para os 21 MPa, quer para os 8 MPa. Relativamente ao método *Proctor* modificado e *kneading* com ou sem nivelamento, a baridade parece decrescer do topo para a base dos mesmos. No entanto, os provetes recolhidos em obra apresentam geralmente a mesma variação.

Cabe aqui referir que a operação de serragem em altura dos provetes em terços semelhantes, só foi possível realizar cerca de dois meses depois de terem sido compactados, quando a mistura já estaria numa fase de cura avançada. Para não comprometer o programa de trabalhos estabelecido, houve entretanto que tomar uma decisão quanto ao processo de compactação a adoptar para a preparação de provetes a

caracterizar através de ensaios mecânicos. Atendendo aos resultados que já se haviam obtido, e levando em linha de conta que o processo *kneading* de compactação, sendo do tipo de compactação por apisoamento, é o que se assemelha mais ao processo de compactação de obra, optou-se por se compactarem os provetes pelo processo *kneading* seguindo-se o nivelamento das suas bases através de compactação estática.

Para uma melhor avaliação do efeito de cada tipo de compactação utilizada na moldagem dos provetes nas características das misturas, procedeu-se ainda à extração de betume de algumas amostras e determinou-se a granulometria dos agregados. Pretendia-se, em particular, avaliar em que medida é que o processo de moldagem poderia esmagar ou fracturar os agregados, e em que medida a cura acelerada alterava aspectos como seja as características do betume residual.

Para efeitos de avaliação da granulometria dos agregados, utilizaram-se dois provetes compactados segundo cada um dos cinco processos utilizados no presente estudo. Na Fig. 5.19 representam-se os resultados obtidos.

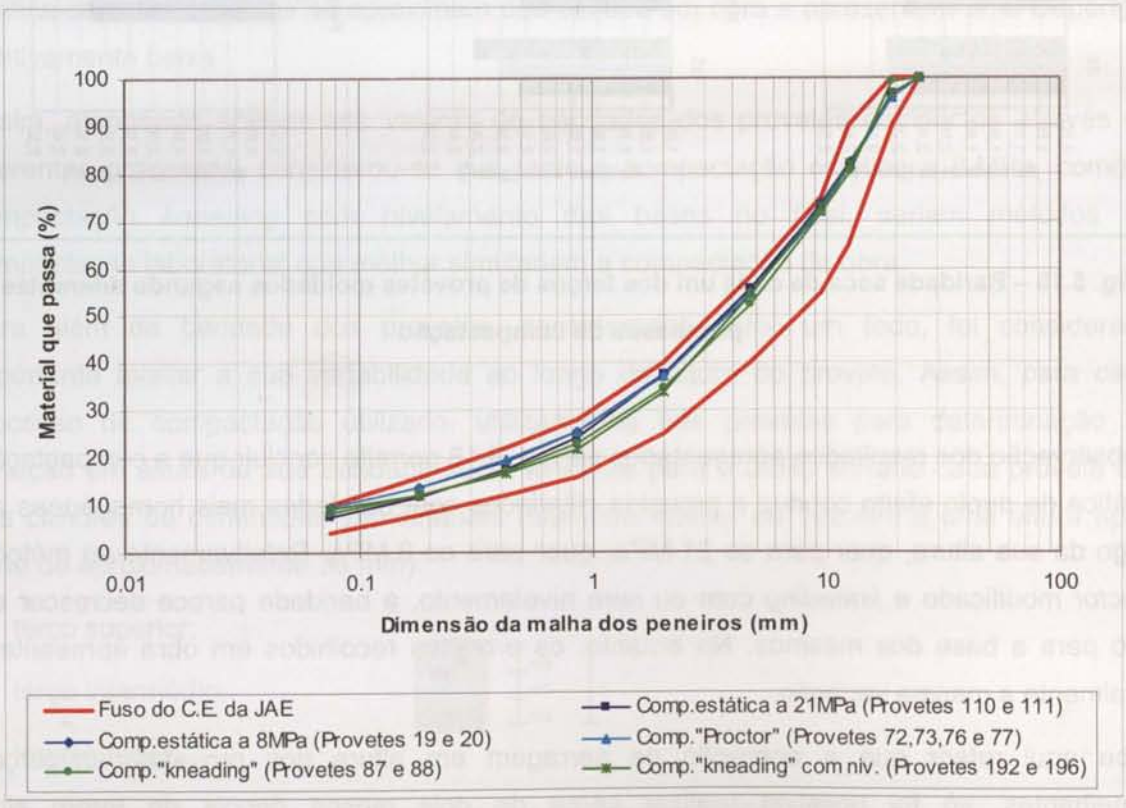


Fig. 5.19 – Curvas granulométricas de provetes moldados com diferentes tipos de compactação, após extracção do betume

Da observação da Fig. 5.19 verifica-se que os agregados resultantes de provetes compactados por qualquer um dos cinco processos, apresentam uma granulometria semelhante, deduzindo-se que os respectivos métodos de compactação não modificam a granulometria original dos agregados. Quanto ao método *Proctor* não se confirma o que parecia ter-se observado a olho nú quando da compactação dos provetes, ou seja, que alguns agregados se partiriam com as pancadas empregues, conduzindo assim a uma mistura cujos agregados apresentariam uma granulometria mais fina que a original.

5.5.3 - Cura das misturas

Para cada lote de provetes moldados estimou-se a quantidade de água presente na mistura e a sua evolução ao longo do tempo. Para o cálculo do teor em água, mediu-se a massa do provete antes de ser compactado e a massa depois de compactação para várias idades da mistura compactada, considerando-se que toda a massa perdida neste processo era de água.

Nas figuras 5.20 a 5.24 representa-se graficamente a evolução do teor em água das misturas compactadas em laboratório segundo os cinco processos utilizados, bem como o teor em água de misturas colocadas em obra.

Em cada um dos gráficos, representa-se a evolução de um mesmo lote de provetes, sendo apresentada a média dos seis provetes curados à temperatura ambiente até aos 21 dias, altura em que foram ensaiados à "imersão-compressão" e os valores do provete curado à temperatura ambiente com película de polietileno a envolver lateralmente.

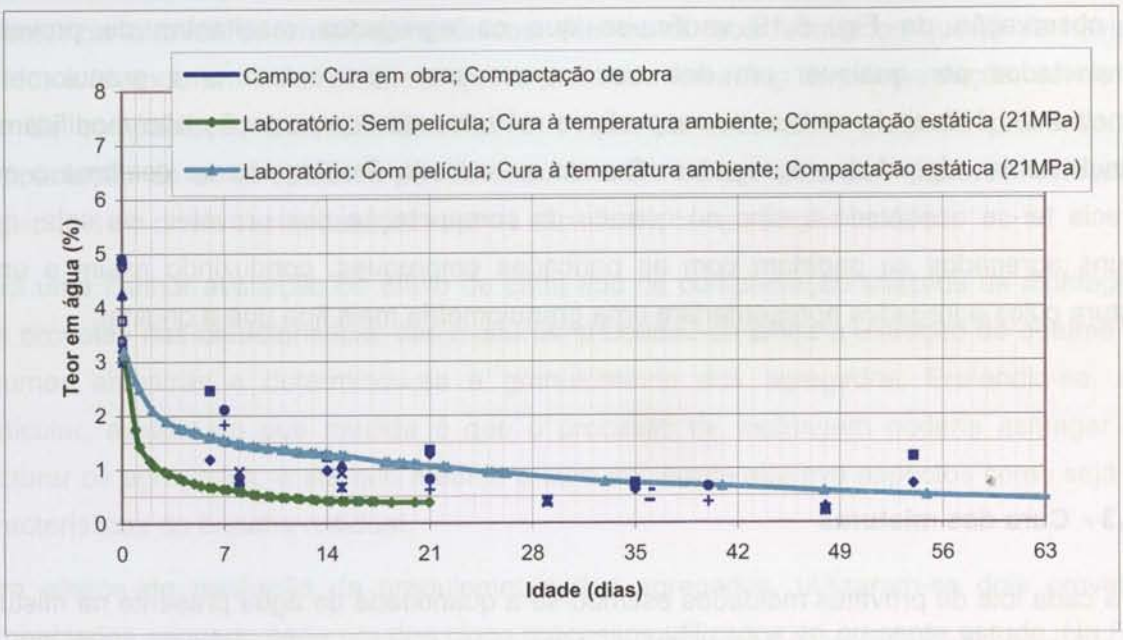


Fig. 5.20 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação estática a 21 MPa)

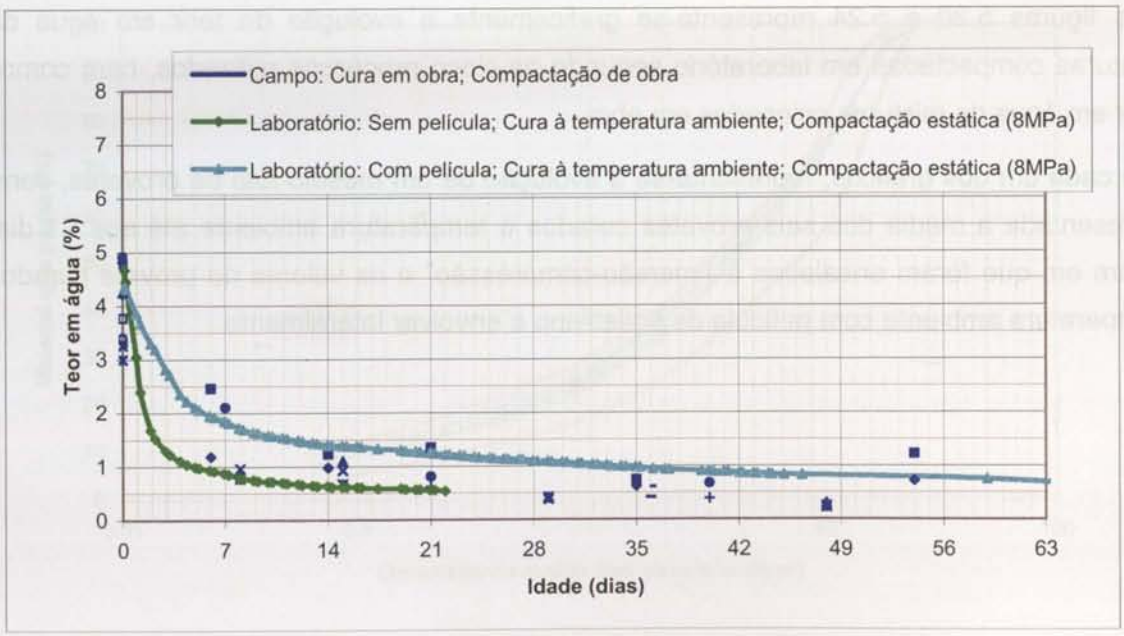


Fig. 5.21 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação estática a 8 MPa)

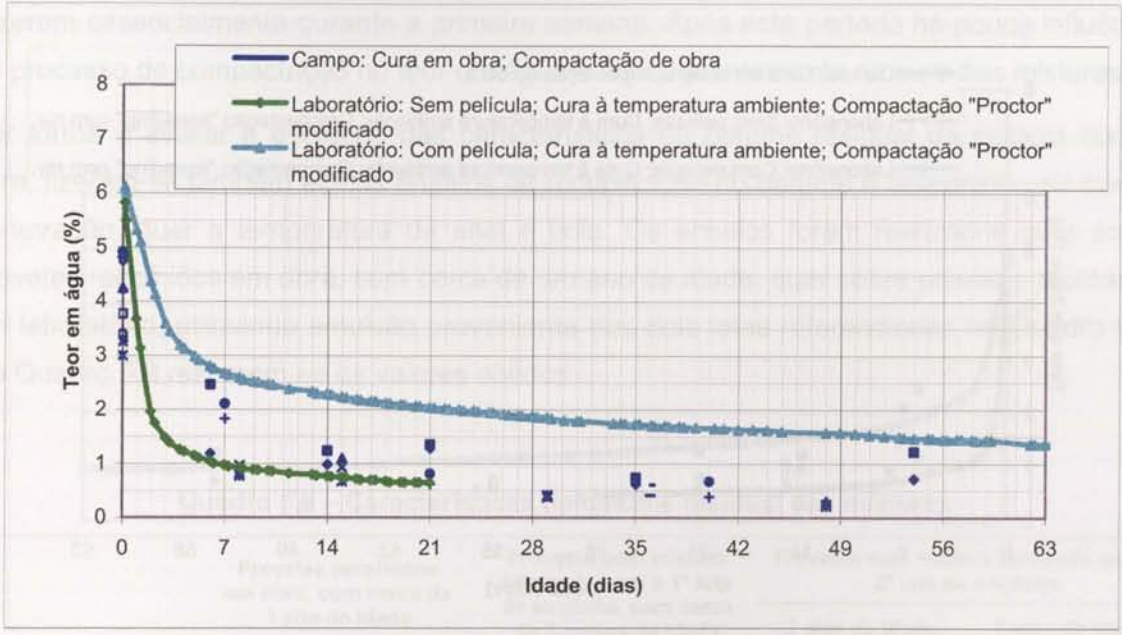


Fig. 5.22 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação *Proctor* modificado)

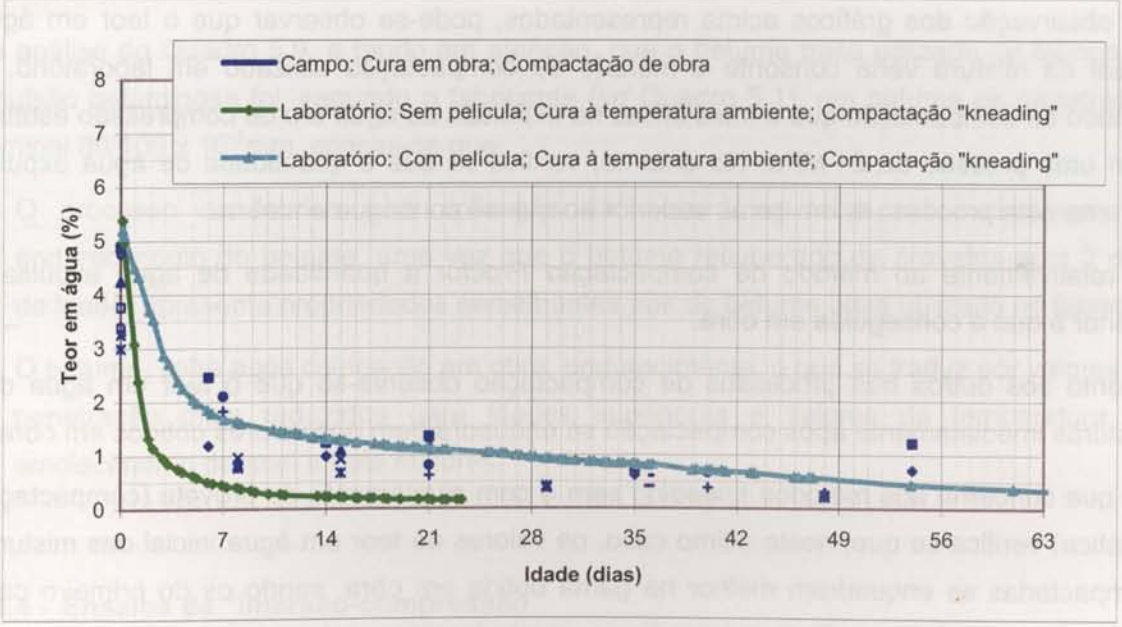


Fig. 5.23 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação *kneading*)

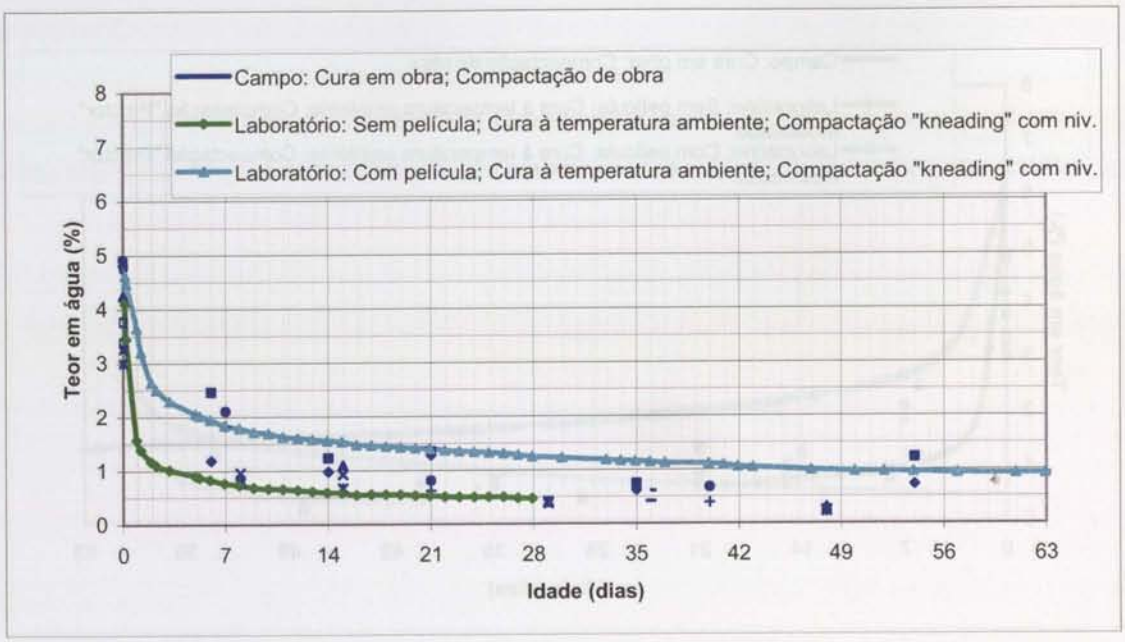


Fig. 5.24 – Evolução do teor em água das misturas compactadas em obra (EN120-O/LDF) e em laboratório (compactação *kneading* com nivelamento/compactação estática)

Da observação dos gráficos acima representados, pode-se observar que o teor em água inicial da mistura varia consonte o método de compactação utilizado em laboratório. O método de compactação que é mais eficaz na expulsão da água é o de compressão estática com uma pressão de 21 MPa. No entanto, verifica-se que a quantidade de água expulsa durante este processo é, em geral, superior ao que se consegue em obra.

Já relativamente ao método de compactação *Proctor* a quantidade de água expulsa é inferior à que é conseguida em obra.

Quanto aos outros três processos de compactação observa-se que o teor em água das misturas imediatamente após compactação se enquadra bem nos valores obtidos em obra.

No que concerne aos métodos *kneading* sem e com nivelamento do provete (compactação estática) verifica-se que, neste último caso, os valores de teor em água inicial das misturas compactadas se enquadram melhor na gama obtida em obra, sendo os do primeiro caso ligeiramente superiores. Para o *kneading* sem nivelamento, o teor em água das misturas compactadas sofre nos primeiros dias uma redução maior, o que se justifica pelo maior volume de vazios que os moldados sem nivelamento apresentam (*vd* Quadro 5.8).

Conclui-se ainda que as diferenças que se podem estabelecer entre a evolução do teor em água das misturas compactadas em laboratório com diferentes métodos de compactação,

ocorrem essencialmente durante a primeira semana. Após este período há pouca influência do processo de compactação no teor em água e consequentemente na cura das misturas.

Por forma a avaliar a evolução das características do betume residual da mistura com a cura, fizeram-se também alguns ensaios de recuperação do betume e determinou-se quer a penetração, quer a temperatura de anel e bola. Os ensaios foram realizados quer sobre provetes recolhidos em obra, com cerca de um ano de idade, quer sobre provetes moldados em laboratório, utilizando emulsão proveniente dos dois lotes referenciados no Quadro 5.1. No Quadro 5.9 resumem-se os valores obtidos.

Quadro 5.9 – Características do betume residual das misturas

	Provetes recolhidos em obra, com cerca de 1 ano de idade	Provetes com mistura fabricada com o 1º lote de emulsão, com cerca de 3 meses de idade	Provetes com mistura fabricada com o 2º lote de emulsão	
			2 dias de idade	8 dias de idade
Penetração (25ºC, 100g, 5s), 10^{-1} mm	36	42 - 48	103	87
Temperatura de amolecimento, ºC	54	51,8 - 52,8	42,6	44,8

Da análise do Quadro 5.9, e tendo em atenção, que o betume base utilizado no fabrico da emulsão betuminosa foi, segundo o fabricante (*vd* Quadro 5.1), um betume de penetração nominal 80/100 x 10^{-1}mm, conclui-se que:

- O processo de fabrico e a aplicação da mistura em obra, não conduzem ao endurecimento do betume, uma vez que o betume recuperado de provetes com 2 dias de idade, apresenta propriedades semelhantes aos do betume base utilizado no fabrico;
- O betume, sofre após colocação em obra, endurecimento, o que se traduz por valores de penetração mais reduzidos para idades superiores e valores de temperatura de amolecimento de anel e bola maiores.

5.5.4 - Ensaios de "imersão-compressão"

Com cada lote de provetes moldados por um dado método e submetidos a um determinado processo de cura, foram realizados ensaios de "imersão-compressão" segundo a norma espanhola NLT 162/84. Esta norma preconiza dois procedimentos alternativos para a imersão dos provetes (Procedimento 1 e 2), tendo sido realizados ensaios segundo ambos os procedimentos. Nos quadros 5.3 a 5.5 da subsecção 5.5.1 identificaram-se os lotes de

provetes que foram ensaiados segundo as diversas variantes consideradas no presente estudo.

Nos Quadros 5.10 a 5.14 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de "imersão--compressão".

Quadro 5.10 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação estática, à pressão de 21 MPa

Lote de provetes	Compacta--ção dos provetes	Cura dos provetes	Nº de provetes ensaiados	Baridade da mistura compactada (g/cm³)	Ensaio de imersão-compressão			
					Tipo de procedi--mento	Resistência "em seco"	Resistência após imersão	Resistência conservada
I.1	Compactação estática, à pressão de 21 MPa	1dia à temp. ambiente + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,33	1	2609 kN	1321 kN	51 %
II.1			3 + 3	2,33	2	2234 kN	1667 kN	75 %
III.1		21 dias à temp. ambiente	3 + 3	2,34	1	2142 kN	986 kN	46 %

Quadro 5.11 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação estática, à pressão de 8 MPa

Lote de provetes	Compacta--ção dos provetes	Cura dos provetes	Nº de provetes ensaiados	Baridade da mistura compactada (g/cm³)	Ensaio de imersão-compressão			
					Tipo de procedi--mento	Resistência "em seco"	Resistência após imersão	Resistência conservada
I.2a	Compactação estática, à pressão de 8 MPa	1dia na câmara húmida(1) + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,27	1	1809 kN	1066 kN	59 %
I.2		1dia à temp. ambiente + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,24	1	1730 kN	1068 kN	62 %
I.2b			3 + 3	2,27	1	1703 kN	1070 kN	63 %
II.2			3 + 3	2,27	2	2154 kN	1222 kN	57 %
III.2		21 dias à temp. ambiente	3 + 3	2,27	1	1605 kN	800 kN	50 %

(1) Pretendeu-se com este ensaio adicional avaliar as eventuais consequências de ocorrência de tempo húmido após a colocação em obra das misturas

Quadro 5.12 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação *Proctor* modificado

Lote de provetes	Compacta-ção dos provetes	Cura dos provetes	Nº de provetes ensaiados	Baridade da mistura compactada (g/cm³)	Ensaio de imersão-compressão			
					Tipo de procedi-mento	Resistência "em seco"	Resistência após imersão	Resistência conservada
I.3a	Compactação *Proctor* modificado	2 dia à temp. ambiente + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,21	1	1537 kN	796 kN	52 %
I.3		1dia à temp. ambiente + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,02	1	1229 kN	825 kN	67 %
II.3			3 + 3	2,22	2	1512 kN	1014 kN	67 %
III.3		21 dias à temp. Ambiente	3 + 3	2,27	1	974 kN	527 kN	54 %

Quadro 5.13 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação *kneading*

Lote de provetes	Compacta-ção dos provetes	Cura dos provetes	Nº de provetes ensaiados	Baridade da mistura compactada (g/cm³)	Ensaio de imersão-compressão			
					Tipo de procedi-mento	Resistência "em seco"	Resistência após imersão	Resistência conservada
I.4c	Compactação *Kneading* (sem compactação estática)	1dia na câmara húmida(1) + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,23	1	1341 kN	819 kN	61 %
I.4		1dia à temp. ambiente + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,21	1	1639 kN	1067 kN	65 %
I.4a			3 + 3	2,21	1	1496 kN	686 kN	46 %
I.4b			3 + 3	2,21	1	1099 kN	778 kN	71 %
I.4d			3 + 3	2,22	1	1220 kN	609 kN	50 %
II.4			3 + 3	2,19	2	1100 kN	774 kN	70 %
III.4		21 dias à temp. Ambiente	3 + 3	2,19	1	761 kN	535 kN	70 %

(1) Pretendeu-se com este ensaio adicional avaliar as eventuais consequências de ocorrência de tempo húmido após a colocação em obra das misturas

Quadro 5.14 – Ensaios de imersão-compressão realizados sobre provetes moldados com compactação *kneading* com nivelamento

Lote de provetes	Compacta-ção dos provetes	Cura dos provetes	Nº de provetes ensaiados	Baridade da mistura compactada (g/cm³)	Ensaio de imersão-compressão			
					Tipo de procedi-mento	Resistência "em seco"	Resistência após imersão	Resistência conservada
I.4'	Compactação *Kneading* com nivelamento	1dia à temp. ambiente + 3dias a 60ºC	3 + 3	2,30	1	2633 kN	1299 kN	49 %
II.4'			3 + 3	2,28	2	1473 kN	949 kN	64 %
III.4'		21 dias à temp. ambiente	3 + 3	2,28	1	2159 kN	1018 kN	47 %

Os resultados apresentados nos Quadros 5.10 a 5.14 permitem concluir que o processo de compactação utilizado tem uma grande influência nos resultados obtidos nos ensaios de "imersão-compressão".

No caso geral verifica-se que os processos que conduzem a baridades dos provetes inferiores, apresentam valores absolutos de resistência à compressão simples igualmente inferiores.

A resistência conservada não parece ser suficiente para caracterizar a mistura na medida em que se verifica que existem provetes que apresentam um valor relativamente baixo da resistência conservada, mas apresentam valores absolutos de resistência à compressão simples, quer em seco, quer após imersão, relativamente elevados (veja-se provetes I.4'). O contrário também pode ocorrer, ou seja, que a resistências conservadas relativamente elevadas correspondam valores à compressão simples relativamente baixos, tal como aconteceu nos provetes II.4'.

No que concerne ao processo de cura, verifica-se que 21 dias à temperatura ambiente não são suficientes para atingir a cura "acelerada" que se obtém ao fim de um dia à temperatura ambiente e de três dias em estufa a 60ºC. Note-se que nos métodos de formulação das misturas a frio se recorre geralmente a um processo de cura "acelerada".

Relativamente aos dois processos alternativos de condicionamento dos provetes para efeitos de ensaio de "imersão-compressão" segundo a norma NLT 162-84 (Procedimento 1: imersão em água 4 dias a 49ºC ou Procedimento 2: imersão em água 1 dia a 60ºC), obtêm-se para os provetes moldados segundo ambos os procedimentos, resistências da mesma

ordem de grandeza (vejam-se por exemplo, os resultados obtidos para os provetes I.4b e provetes II.4), não se podendo tirar conclusões acerca de eventuais têndencias, tanto mais que se regista alguma variabilidade entre os ensaios realizados por um mesmo processo.

Considera-se, por estes motivos, que as exigências quanto aos resultados a obter em ensaios de "imersão-compressão" devem ser adaptadas ao processo de compactação utilizado na moldagem dos provetes.

5.6 - Síntese das principais conclusões alcançadas

Os primeiros resultados obtidos conduziram a que se considerasse que a compactação com o equipamento *kneading*, seria a que melhor simularia as condições de obra. A compactação com o equipamento *kneading* seguindo-se o nivelamento da base dos provestes foi pois o método de compactação seleccionado para a moldagem de provetes cilíndricos em laboratório para efeitos de estudo das características mecânicas das misturas.

Com o desenvolvimento dos estudos, verificou-se numa fase posterior dos trabalhos que a compactação estática através da aplicação de uma pressão de 8 MPa em ambos as bases dos provetes, conduzia igualmente a resultados satisfatórios.

Cabe ainda referir que o equipamento *kneading* apenas está disponível em Portugal no LNEC, o que reforça a utilidade da compactação estática a 8 MPa como método alternativo de compactação em laboratório, adequado para efeitos de formulação das misturas a frio, nomeadamente noutros laboratórios.

No que concerne aos ensaios de "imersão-compressão", os resultados obtidos conduziram a que se considerasse que os parâmetros a preconizar para aceitação das misturas deveriam ser a resistência à compressão simples a seco e após imersão em água. O estabelecimento dos valores mínimos deve ser efectuado tendo em atenção o método de compactação utilizado na preparação dos provetes, bem como a cura a que os mesmos foram sujeitos.

Relativamente à cura das misturas em laboratório verificou-se que a evolução do teor em água das misturas compactadas por compressão estática de duplo efeito a uma pressão de 8 MPa, bem como das misturas compactadas pelo *kneading* com e sem nivelamento final dos provetes, se enquadrava bem dentro da gama de valores que se obteve em obra.



6 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS BETUMINOSAS A FRIO

6.1 - Introdução

O conhecimento das características mecânicas dos materiais de pavimentação e da sua evolução ao longo da vida em serviço, é indispensável para a concepção e o dimensionamento da estrutura do pavimento, por forma a garantir que esta estrutura terá capacidade de carga suficiente para suportar o tráfego a que se destina. No caso da reabilitação de pavimentos, as novas camadas podem ser camadas recicladas e/ou camadas betuminosas de reforço. Na reciclagem de pavimentos, as características mecânicas do material uma vez reciclado, dependem, de entre outros factores, dos materiais a reciclar e consequentemente, da profundidade de reciclagem. Esta é uma das maiores dificuldades desta técnica, já que se parte de materiais relativamente heterogéneos e, por outro lado, não é possível conhecer bem *a priori* a desagregação que se obterá em obra (Jofré, 2003), ou seja, a composição granulométrica dos materiais que virão a ser incorporados na nova mistura.

Conforme se referiu no Capítulo 2, referente à conservação e reabilitação de pavimentos, um pavimento rodoviário vai sofrendo, ao longo da sua vida útil, perda de capacidade de carga, conduzindo ao aparecimento de degradações excessivas, caso não sejam tomadas medidas de conservação.

Os mecanismos mais frequentes de degradação em pavimentos flexíveis, associados à acção do tráfego, são o fendilhamento por fadiga nas camadas betuminosas e a acumulação de deformações permanentes nas diversas camadas do pavimento e no solo de fundação. No caso de se tratar de um pavimento reforçado através da colocação de novas camadas betuminosas, outro mecanismo que ocorre frequentemente, para além dos dois referidos, é o fenómeno de propagação das fendas existentes nas camadas subjacentes às novas camadas betuminosas de reforço, e o seu aparecimento à superfície do pavimento, conforme se descreveu na subsecção 2.3.2.6.

Este último mecanismo de ruína pode ser mitigado adoptando medidas retardadoras deste processo (fendilhamento das camadas betuminosas de reforço, por propagação das fendas existentes nas camadas subjacentes), tais como a colocação de interfaces entre as camadas existentes e as camadas de reforço.

O fendilhamento por fadiga das camadas ligadas (camadas betuminosas no caso dos pavimentos flexíveis) resulta da perda de resistência do material que ocorre pela repetição de ciclos de carga-descarga induzidos pela passagem dos rodados dos veículos.

As deformações permanentes à superfície dos pavimentos são resultantes do somatório das deformações permanentes induzidas nas suas camadas e no solo de fundação que se traduzem no aparecimento, à superfície do pavimento, de depressões longitudinais (cavados de rodeira) na zona de passagem dos rodados (rodeiras), e mesmo de elevações nas zonas laterais contíguas, conforme se representa esquematicamente na Fig. 6.1. Apesar de a generalidade dos critérios de dimensionamento de pavimentos às deformações permanentes ter apenas em consideração a contribuição do solo de fundação para a formação de cavados de rodeira, tem-se verificado que diversos factores, tais como, o aumento do tráfego e das cargas transportadas e o tipo de estruturas actualmente adoptadas, têm conduzido a que a contribuição das camadas betuminosas seja também muito importante. Daqui resulta a importância de conhecer o desempenho dos materiais betuminosos, não só do ponto de vista da resistência à fadiga, mas também do ponto de vista do comportamento às deformações permanentes.

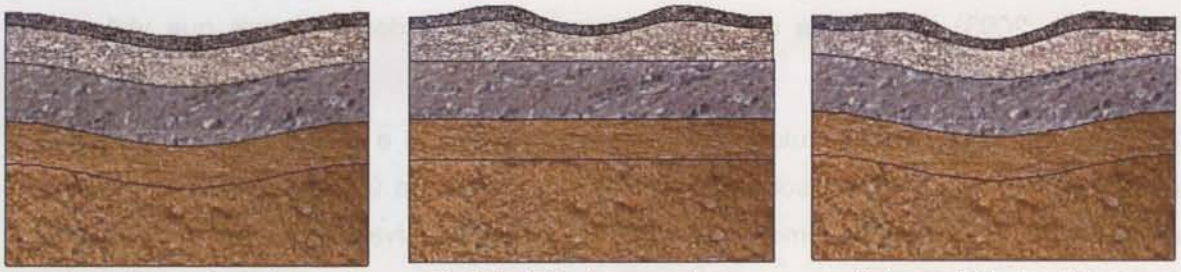


Fig. 6.1 – Deformações permanentes à superfície do pavimento

No caso particular das misturas fabricadas a frio, outro aspecto fundamental a considerar no que respeita à evolução no tempo das características mecânicas do material, é a sua "cura". Cabe aqui referir que, apesar da cura se processar durante um curto período de tempo na vida útil do pavimento reabilitado, é condicionante para as características mecânicas que esse pavimento apresentará durante o período restante.

Durante a "cura" das misturas betuminosas a frio dá-se o desenvolvimento das propriedades mecânicas do ligante betuminoso (*Asphalt Institute* MS-19). De facto, considerando os resultados apresentados no capítulo 4, no que concerne quer à possibilidade de extrair tarolos durante o processo de cura, quer aos módulos de deformabilidade estimados com

base nos resultados dos ensaios de carga, é possível inferir o mesmo. A evolução, com a cura da mistura, da profundidade cada vez maior a que vai sendo possível extrair tarolos das camadas, e dos módulos com valores cada vez mais elevados, são duas das manifestações evidentes da variação do comportamento mecânico dos materiais. No capítulo 5 pôde-se igualmente verificar que a cura das misturas influenciava os resultados obtidos em ensaios de "imersão-compressão" (resistências à compressão simples).

Assim, para uma caracterização adequada do comportamento destas misturas tem que se ter em linha de conta o efeito do período de cura e ensaiar a mistura nas suas diferentes fases.

Para caracterizar de forma detalhada a evolução das características mecânicas dos materiais, foi elaborado um vasto plano de ensaios laboratoriais, realizados sob condições controladas, abordando os seguintes aspectos:

- Evolução do módulo de deformabilidade ao longo do processo de cura da mistura;
- Influência da temperatura no módulo de deformabilidade das misturas;
- Resistência à fadiga e às deformações permanentes das misturas betuminosas a frio e sua evolução ao longo do processo de cura.

Um dos objectivos principais destes estudos foi o de contribuir para o estabelecimento de modelos de comportamento das camadas de misturas betuminosas a frio, tendo em vista a sua utilização no dimensionamento das estruturas de pavimentos que incorporem este tipo de materiais por métodos baseados na análise estrutural.

Nas secções seguintes apresentam-se, primeiramente, de forma resumida, os modelos disponíveis para a descrição do comportamento das misturas betuminosas, e posteriormente, os resultados obtidos nos ensaios realizados para a caracterização das misturas betuminosas densas a frio do tipo macadame betuminoso a frio.

6.2 - Aspectos relativos ao comportamento estrutural de pavimentos incorporando misturas betuminosas a frio

6.2.1 - Modelos reológicos de comportamento dos materiais

Nesta secção abordam-se os modelos reológicos e as equações geralmente utilizadas para traduzir o comportamento dos materiais, em particular, das misturas betuminosas.

Na teoria dos meios contínuos (Tovar de Lemos, 1990), o comportamento mecânico dos materiais reais é modelado com base em comportamentos típicos da matéria, como sejam, a elasticidade, a plasticidade e a viscosidade. A combinação destes comportamentos, origina outros mais complexos, como por exemplo, a viscoelasticidade e a viscoelastoplasticidade.

A deformação elástica de um sólido, caracteriza-se por uma completa recuperação de forma depois de retiradas as forças exteriores. Sucede todavia, que em muitos casos tal não se verifica, ocorrendo então deformações inelásticas, ou seja, entra-se no domínio da plasticidade e/ou viscosidade. As deformações plásticas são irreversíveis e independentes do tempo de aplicação da carga. Já as deformações viscosas dependem do tempo de aplicação da carga (Ullidtz, 1998).

As características plásticas e viscosas dos materiais betuminosos dão origem às deformações permanentes (Drescher *et al.*, 1993).

Observa-se que as misturas betuminosas aplicadas em camadas de pavimentos rodoviários, quando em serviço, apresentam, ao fim de um determinado período de tempo, a que correspondem ciclos de carga e descarga provocados pela passagem do tráfego rodoviário, deformações permanentes.

Nas misturas betuminosas pode-se observar uma combinação dos comportamentos referidos, sendo difícil separar a deformação total observada nas suas várias componentes, em particular para algumas histórias de carregamento.

Os modelos mais simples para simular o comportamento dos materiais, tal como são estudados em Reologia, são a mola (modelo de *Hooke*), o amortecedor viscoso (modelo de *Newton*) e o elemento atrítico (modelo de *Saint-Venant*), sendo a mola característica do comportamento elástico, o amortecedor do comportamento viscoso e o elemento atrítico do comportamento plástico (*vd* Fig. 6.2).

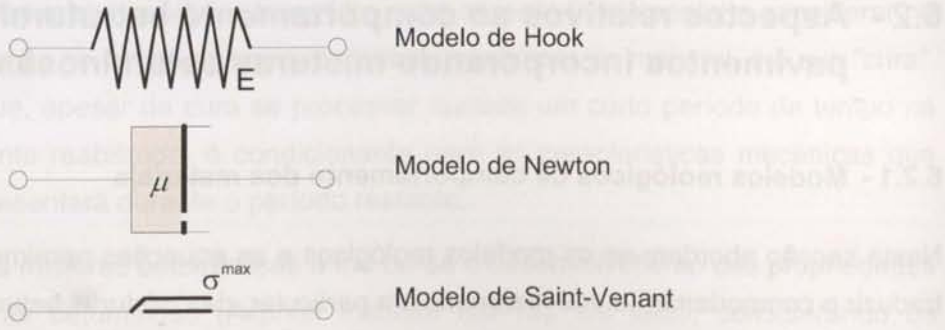


Fig. 6.2 – Modelos reológicos de *Hook*, *Newton* e *Saint-Venant*

O primeiro destes modelos, designado por modelo de *Hooke*, pode ser representado por uma mola de comportamento elástico linear, que uma vez submetida a uma tensão σ apresenta uma deformação ε, tal que:

$$\sigma = \varepsilon E \quad \text{, sendo } E \text{ o módulo de elasticidade} \qquad \textbf{(6.1)}$$

O modelo de *Newton*, consiste num amortecedor, ou seja, pode ser representado por um cilindro cheio de óleo, com um êmbolo munido de um furo por onde o óleo pode escoar. Uma vez submetido a uma tensão σ, o seu comportamento traduz-se pela seguinte expressão:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{, representando } \mu \text{ a viscosidade} \qquad \textbf{(6.2)}$$

O elemento atrítico de *Saint-Venant* traduz um comportamento rígido-plástico no qual não há deformações até um determinado nível de tensão – tensão de cedência – e, para tensões iguais a esse nível, a deformação é indeterminada. Este elemento não permite a instalação de tensões superiores à tensão de cedência.

$$\begin{array}{ll} \varepsilon = 0 & \sigma < \sigma^{máx.} \\ \varepsilon \neq 0 & \sigma = \sigma^{máx.} \end{array} \quad \text{, onde } \sigma^{máx.} \text{ representa a tensão de cedência} \qquad \textbf{(6.3)}$$

Os modelos reológicos que se utilizam para simular o comportamento viscoelástico ou visco-elastoplástico são associações mais ou menos complexas daqueles três modelos.

Apesar de, nos últimos anos, se terem estudado intensamente os problemas relacionados com a reologia das misturas betuminosas, o seu comportamento não se encontra totalmente dominado.

Diversos autores têm considerado que as misturas betuminosas exibem, por aproximação, um comportamento viscoelástico, ou seja, traduzido pela combinação de dois modelos reológicos elementares: o sólido elástico de *Hooke* e o fluido viscoso *newtoniano*.

Se a associação entre estes dois modelos for feita em paralelo, obtém-se o chamado modelo de *Kelvin-Voigt*, tal como se ilustra na Fig. 6.3, onde também se representa o diagrama deformação/tempo correspondente a esse modelo.

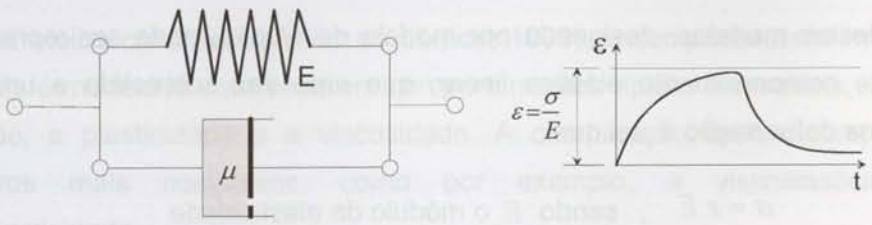


Fig. 6.3 – Modelo de *Kelvin-Voigt* e diagrama de deformação/tempo

Se a associação daqueles dois modelos for feita em série, obtém-se o modelo de *Maxwell*, conforme se esquematiza na Fig. 6.4.

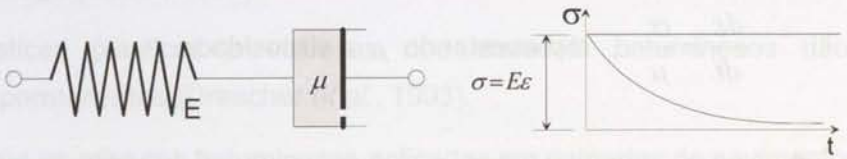


Fig. 6.4 – Modelo de *Maxwell* e diagrama de tensão-tempo

No entanto, os corpos de *Kelvin* e de *Maxwell* não são, em geral, adequados para representar o comportamento viscoelástico dos materiais reais, nomeadamente, o comportamento das misturas betuminosas, o que obriga a considerar modelos mais complexos.

Para a representação do comportamento das misturas betuminosas, pode considerar-se, de forma simplificada, a associação em série do modelo de *Kelvin* com o modelo de *Maxwell*, designado por modelo de *Burgers*, tal como se representa na Fig. 6.5.

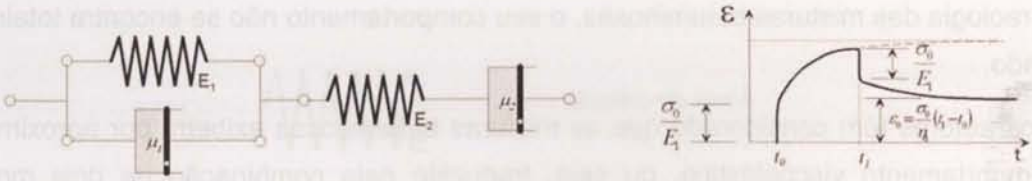


Fig. 6.5 – Modelo de *Burgers* e diagrama de tensão-tempo

Este é um dos modelos reológicos mais utilizados para representar o comportamento de misturas betuminosas (Freire, 2002; Vale & Sousa Melo, 2004). Com efeito, embora haja autores que preconizam outros modelos como sendo mais adequados para descrever o

comportamento das misturas (Huet, 1967; Sayegh, 1967; Jongepier & Kuilman, 1969; Franken & Clauwaert, 1987; Huang, 1993), o modelo de *Burgers* é frequentemente adoptado por ser relativamente simples, e descrever de forma adequada o comportamento de misturas betuminosas durante uma fase representativa de uma grande parte da vida útil das misturas (fase linear, *vd* subsecção 6.4.1).

6.2.2 - Mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis

No estudo do comportamento das misturas betuminosas como materiais viscoelásticos há que considerar que os factores principais que influenciam as suas características (mais ou menos próximas de um comportamento elástico ou de um comportamento viscoso), são a temperatura e a duração do tempo de aplicação da carga, tal como se ilustra esquematicamente na Fig. 6.6. Assim, para temperaturas altas e/ou elevados tempos de aplicação da carga (velocidades dos veículos muito reduzidas ou nulas), o comportamento das misturas pode considerar-se mais próximo do de um fluido viscoso. No entanto, a mesma mistura, apresentará um comportamento mais próximo do de um sólido elástico, para temperaturas baixas e/ou tempos de aplicação da carga reduzidos (circulação dos veículos a velocidades mais altas).

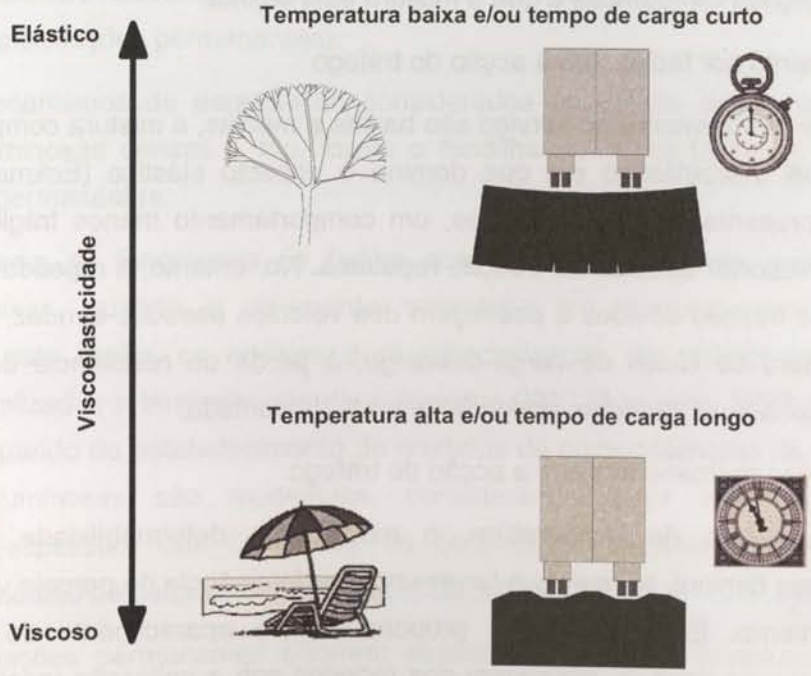


Fig. 6.6 – Comportamento viscoelástico das misturas betuminosas (adaptado de Eckmann, 1999)

De uma forma geral, podem distinguir-se quatro mecanismos de degradação associados ao comportamento das misturas betuminosas na estrutura do pavimento (*vd* Fig. 6.7):

I. Fendilhamento que ocorre sob baixas temperaturas ou sob tempos de aplicação da carga reduzidos

Quando a temperatura é muito baixa, e em particular, no caso de o tempo de aplicação da carga ser reduzido, a mistura pode considerar-se como um material elástico, com um elevado módulo de deformabilidade, mas com um comportamento frágil. Se a tensão de tracção induzida pela acção do tráfego for demasiado importante, formar-se--ão fendas;

II. Fendilhamento por contracção sob acções devidas a variações térmicas

Quando a temperatura baixa as misturas tendem a sofrer uma diminuição de volume, ou seja, movimento de retracção. Uma vez que as misturas, ao serem colocadas sem juntas, se encontram impedidas de movimentos horizontais, as variações térmicas conduzem a tensões de tracção. Por outro lado, o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas aumenta à medida que a temperatura baixa, o que conduz a tensões mais elevadas em resultado dessas deformações. Estas tensões, se suficientemente elevadas, conduzirão à ocorrência de fendas.

A importância deste aspecto depende da sensibilidade da mistura a variações térmicas e das condições climatéricas a que a mistura está sujeita.

III. Fendilhamento por fadiga sob a acção do tráfego

Quando as temperaturas de serviço são baixas e médias, a mistura comporta-se como um material viscoelástico em que domina o aspecto elástico (Eckmann, 1999). A mistura apresenta, nestas condições, um comportamento menos frágil, sendo pois, capaz de suportar tensões de tracção repetidas. No, entanto, a repetida instalação de tensões de tracção devidas à passagem dos veículos pesados conduz, ao fim de um certo número de ciclos de carga-descarga, à perda de resistência da mistura por fadiga, e consequentemente, ao fendilhamento da camada.

IV. Deformações permanentes sob a acção do tráfego

Com o aumento da temperatura, o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas diminui, passando a haver uma predominância da parcela viscosa no seu comportamento. Estas condições proporcionam o aparecimento de deformações permanentes na zona de passagem dos rodados sob a aplicação repetida de cargas devida à passagem dos veículos pesados, contribuindo para a formação de cavados de rodeira.

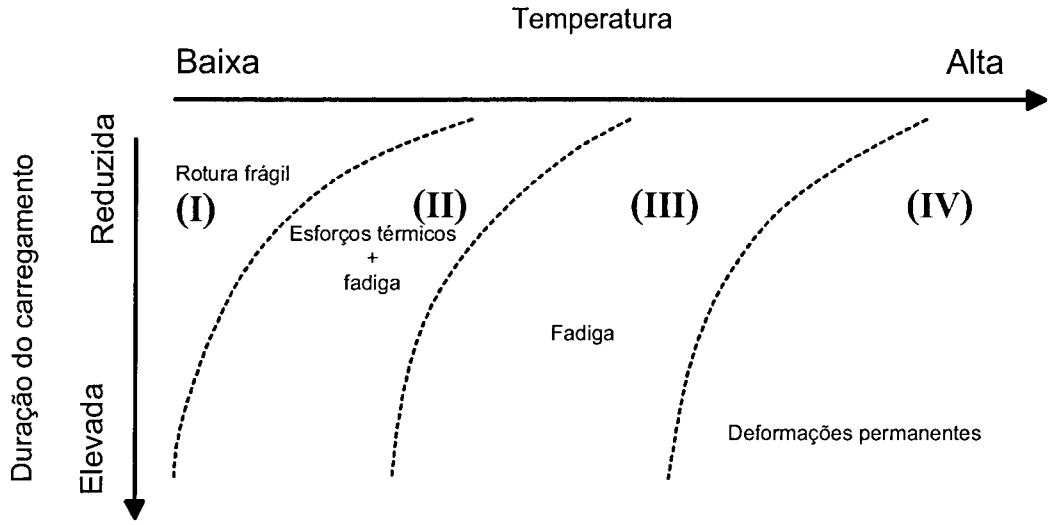


Fig. 6.7 – Principais mecanismos de degradação associados ao comportamento das misturas betuminosas (adaptado de Eckmann, 1999)

Dadas as condições climatéricas verificadas no nosso país, os mecanismos de fendilhamento devidos, quer à ocorrência de baixas temperaturas, quer a variações térmicas importantes, não são relevantes face aos dois últimos mecanismos referidos (fendilhamento por fadiga e deformações permanentes).

Assim, os mecanismos de degradação considerados no estudo do comportamento das misturas betuminosas densas a frio, foram o fendilhamento por fadiga e a formação de deformações permanentes.

Como se referiu, os fenómenos de fadiga ocorrem essencialmente para temperaturas moderadas/baixas, quando o pavimento apresenta um comportamento praticamente elástico. Por esta razão, os ensaios para caracterização da resistência à fadiga são geralmente realizados a temperaturas da ordem dos 20ºC (Azevedo, 1993; Capitão, 2003). Neste caso, quando do estabelecimento de modelos de comportamento de pavimentos, as camadas betuminosas são modeladas, considerando, para além dos parâmetros geométricos (espessura das camadas), os parâmetros mecânicos correspondentes à elasticidade (módulo de deformabilidade e coeficiente de *Poisson*).

Já as deformações permanentes ocorrem essencialmente para temperaturas elevadas, quando o pavimento apresenta um comportamento viscoelástico, com a componente viscosa preponderante. Os ensaios para caracterização da resistência às deformações

permanentes são pois, realizados a temperaturas da ordem dos 50/60°C (Freire, 2002). Neste caso, não se pode desprezar a componente viscosa do material betuminoso, pelo que no estabelecimento de modelos de comportamento estrutural destas misturas é usual recorrer à utilização de modelos de comportamento dos materiais mais complexos, como seja, o modelo de *Burgers*, sendo então necessária a determinação de outros parâmetros para descrever o seu comportamento mecânico, para além do módulo de deformabilidade e do coeficiente de *Poisson*, como seja, o coeficiente de viscosidade.

6.2.3 - Consideração da cura das misturas

Conforme exposto no capítulo anterior, um dos aspectos que condiciona de forma assinalável o comportamento das misturas betuminosas a frio relaciona-se com o fenómeno da cura das mistura. 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.

Por ser fundamental conhecer a evolução das propriedades do material ao longo do processo de cura, um dos objectivos deste trabalho relaciona-se com a caracterização da variação das características mecânicas - resistência e deformabilidade – com a idade da mistura.

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

Tendo em atenção os resultados obtidos nos estudos relativos ao método de compactação laboratorial e ao processo de cura descritos no capítulo 5, moldaram-se em laboratório cerca de 200 provetes cilíndricos, com 101,6 mm de diâmetro e cerca de 64 mm de altura, segundo o método *kneading* (ASTM D 1561-92).

Os provetes moldados em laboratório foram seguidamente curados em condições diversas, 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, envolvido lateralmente em película de polietileno (excepto no topo);
- 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.

Conforme se descreveu detalhadamente na secção 5.4 do capítulo anterior, no segundo grupo de amostras pretendeu-se simular o efeito de continuidade a que um volume de mistura a frio está sujeito quando colocado no pavimento, através do envolvimento lateral da amostra por película de polietileno, para evitar que se realize evaporação de água através das paredes laterais do provete.

Os ensaios de caracterização mecânica das misturas foram efectuados considerando as várias condições de cura referidas, para diversas idades. No Quadro 6.1 resumem-se as condições de cura consideradas no presente estudo.

Quadro 6.1 – Condições de cura dos provetes

Temperatura de armazenamento	Acondicionamento	Idade
Temperatura ambiente	Envolto lateralmente com película	1 dia
		2 dias
		1 semana
		2 semanas
		1 mês
		2 meses
	Totalmente expostos ao ar	2 meses
	Envolto lateralmente com película (1ª fase) + Totalmente expostos ao ar (2ª fase)	4 meses (2 meses com película + 2 meses sem película)
Temperatura ambiente + Estufa a 60°C	Totalmente expostos ao ar	4 dias (1 dia à temperatura ambiente + 3 dias a 60°C)

6.2.4 - Consideração do comportamento das misturas betuminosas a frio "novas" e recicladas relativamente ao das misturas betuminosas a quente

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 (*vd* secção 4.6), para ensaios de caracterização mecânica.

Por outro lado, tendo em atenção que os conhecimentos actuais sobre o comportamento mecânico de misturas betuminosas e os correspondentes métodos de dimensionamento de pavimentos se reportam essencialmente às misturas betuminosas a quente, havia que comparar o comportamento das misturas a frio em apreço, com o de misturas a quente equivalentes. Para este efeito, optou-se por tomar como referência as misturas a quente do tipo *"grave-bitume"* (GB) que haviam sido estudadas por Azevedo (1993).

O objectivo principal do trabalho de investigação desenvolvido por Azevedo (*op. cit.*) foi o de contribuir para o conhecimento mecânico de misturas betuminosas fabricadas a quente para camadas de base. À época de realização dos referidos estudos, não havia uma grande experiência em Portugal da utilização de misturas betuminosas em camadas de base, razão pela qual, a autora decidiu seleccionar, para além das misturas tipo macadame betuminoso (MBJ) cujo uso era recente no nosso país, os materiais *grave-bitume* (GB) e *dense bitumen macadam* (DBM), em uso respectivamente, em França e no Reino Unido.

De entre as composições granulométricas destas três misturas (MBJ, GB e DBM), a que mais se aproxima da composição da mistura tipo macadame betuminoso a frio em estudo no presente trabalho, é a da mistura em GB. Por exemplo, enquanto a dimensão máxima dos agregados das misturas de composição MBJ e DBM é de cerca de 37,5 mm, a das misturas GB é de 25,4 mm.

No que concerne à quantidade de betume das misturas a quente, para as misturas em MBJ, GB e DBM foi empregue para o seu fabrico respectivamente 4,9%, 4,0% e 4,4 a 4,7% (em relação ao peso total). Para o fabrico do macadame betuminoso a frio foi empregue um teor em emulsão de 6,5% (em relação à massa dos inertes), o que representa uma percentagem em betume residual de cerca de 3,8% (em relação ao peso total), donde se conclui que, também quanto à quantidade de betume, a mistura a quente GB é aquela que mais se aproxima do macadame betuminoso a frio.

Assim, de entre as três misturas betuminosas a quente estudadas por Azevedo, optou-se por seleccionar a tipo GB para análise comparativa do seu comportamento em relação às misturas a frio em estudo no presente trabalho.

Importa pois conhecer a composição das mistura a quente GB, para o que se fará seguidamente uma breve descrição das mesmas.

Para o seu fabrico utilizaram-se agregados britados de natureza calcária, e betume com penetração nominal 60/70 ($x10^{-1}$ mm).

Na Fig. 6.8 representa-se esquematicamente a composição granulométrica considerada no estudo de formulação da mistura a quente GB, bem como a fórmula de trabalho, as tolerâncias de fabrico e o fuso granulométrico preconizado para a mistura em macadame betuminoso a frio (MBF) em estudo.

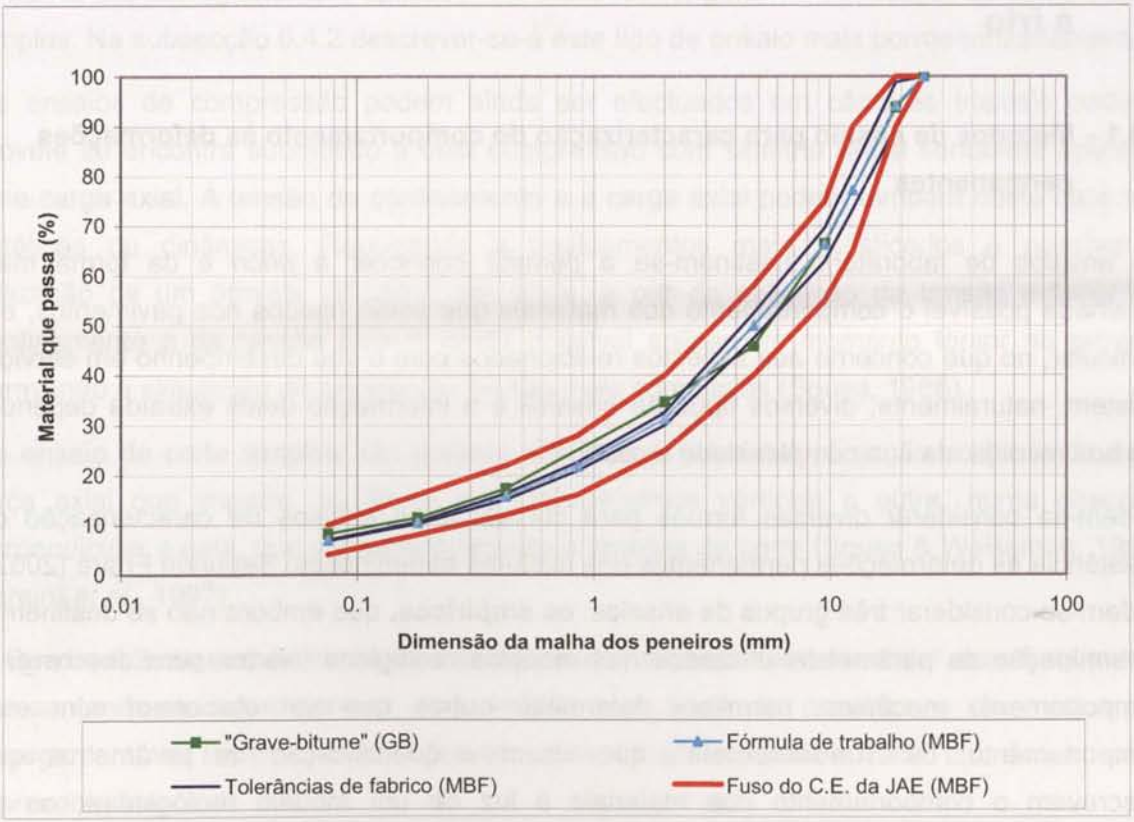


Fig. 6.8 – Curvas granulométricas das composições da mistura *grave-bitume* (GB) e do macadame betuminoso a frio (MBF)

Em finais de 1990, foi realizado um trecho piloto com cerca de 400 m, localizado no IP2 – Variante a Castro Verde, onde foi aplicada, em camada de base, a mistura do tipo GB (Azevedo, 1993). Deste trecho piloto foram então extraídas amostras para a execução de ensaios para avaliação do comportamento dos materiais às deformações permanentes e à fadiga. Foram, em particular, retirados por sondagem à rotação provetes cilíndricos, com

150 mm de diâmetro, e serradas lajetas, a partir das quais se obtiveram em laboratório, vigotas com 120x120 mm^2 de secção transversal. Das amostras extraídas, houve algumas que se mantiveram intactas até à data de realização do presente trabalho, pelo que foram utilizadas para a execução de ensaios para a caracterização do comportamento mecânico e comparação dos resultados obtidos com os das misturas a frio em apreço.

6.3 - Caracterização do comportamento das misturas betuminosas a frio

6.3.1 - Métodos de ensaio para caracterização do comportamento às deformações permanentes

Os ensaios de laboratório destinam-se a permitir conhecer *a priori* e da forma mais detalhada possível o comportamento dos materiais que serão usados nos pavimentos, em particular, no que concerne aos aspectos relacionados com o seu desempenho em serviço. Existem, naturalmente, diversos tipos de ensaios e a informação deles extraída depende, em boa medida, da sua complexidade e custo.

Podem-se considerar diversas formas para classificar os ensaios de caracterização da resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas. Segundo Freire (2002), podem-se considerar três grupos de ensaios: os **empíricos**, que embora não se destinem à determinação de parâmetros utilizados nos modelos reológicos usados para descrever o comportamento mecânico, permitem determinar outros que se relacionam com este comportamento; os "**fundamentais**", que visam a quantificação de parâmetros que descrevem o comportamento dos materiais à luz de um modelo reológico e; os de **simulação**, que procuram simular, eventualmente afectadas por um factor de escala, as condições que se verificam nos pavimentos em serviço, emboram não permitam a determinação dos parâmetros anteriormente referidos, de uma forma directa.

No primeiro grupo de ensaios, destacam-se os ensaios *Marshall* e *Hveem*. O ensaio *Marshall* é geralmente utilizado em Portugal, para a formulação das misturas e para determinar outros parâmetros, como por exemplo, a baridade de referência usada no controlo da qualidade das misturas betuminosas a quente.

No conjunto de ensaios fundamentais, enquadram-se todos aqueles que visam a determinação de parâmetros das misturas que intervêm num dado modelo reológico utilizado para descrever o comportamento dos materiais.

Dentro destes ensaios destacam-se os ensaios de compressão (uniaxial ou triaxial), em que podem ser aplicados carregamentos estáticos ou dinâmicos (de cargas repetidas) consoante a(s) grandeza(s) a determinar e a natureza do estudo, e os ensaios de corte.

Os ensaios de compressão uniaxial são actualmente muito usados nos estudos relativos às deformações permanentes de misturas betuminosas. Trata-se de um ensaio simples em que o carregamento pode ser estático ou dinâmico. Os provetes têm habitualmente a forma cilíndrica e o carregamento é aplicado nas suas bases, gerando um estado de compressão simples. Na subsecção 6.4.2 descrever-se-á este tipo de ensaio mais pormenorizadamente.

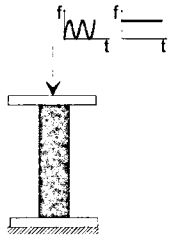
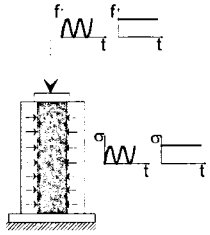
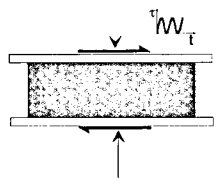
Os ensaios de compressão podem ainda ser efectuados em câmaras triaxiais onde o provete se encontra submetido a uma compressão com simetria radial sendo-lhe aplicada uma carga axial. A tensão de confinamento e a carga axial podem também neste caso ser estáticas ou dinâmicas. Recorrendo a equipamentos mais sofisticados é possível a utilização de um provete cilíndrico oco onde, a par da aplicação da tensão exterior de confinamento e da tensão axial é ainda possível aplicar um momento torsor no provete permitindo a simulação de estados de tensão mais complexos (Sousa, 1986).

No ensaio de corte simples, um provete cilíndrico é submetido à acção conjunta de uma força axial que impede, ou limita, os deslocamentos verticais e outra, numa direcção perpendicular a esta, que submete o provete a tensões de corte (Sousa & Weissman, 1994; Pereira *et al.*, 1997).

O Quadro 6.2 resume de forma sucinta alguns dos ensaios "fundamentais" mais frequentes, apresentando-se um diagrama esquemático dos tipos de provetes e de modos de carregamento e também alguns breves comentários relativos a cada um dos ensaios representados.

A descrição mais pormenorizada destes ensaios, bem como a análise das suas vantagens relativas, modos de operação e campo de aplicação sai fora do âmbito do presente trabalho e encontra-se vastamente abordada na literatura da especialidade. A título de exemplo referem-se os trabalhos de Brown (1990), Brunton (1990) e Azevedo (1993). Podem ser encontrados resumos mais extensos em diversos trabalhos, destacando-se pela sua actualidade, Freire (2002) e Capitão (2003).

Quadro 6.2 – Ensaios "fundamentais" para avaliação do comportamento à deformação permanente dos materiais betuminosos

	**Ensaio de compressão uniaxial** Os ensaios de compressão estáticos ou dinâmicos são relativamente simples de executar. O estado de tensão gerado no provete quando submetido a carregamento, é um estado de compressão simples, fácil de interpretar.
	**Ensaio de compressão triaxial** Na modalidade estática é um ensaio relativamente simples de executar e não muito dispendioso. O estado de tensão, sendo triaxial, tem sempre simetria radial. No caso de cargas repetidas a complexidade e custo do equipamento é bastante superior.
	**Ensaio de corte simples** Nos ensaios de corte o dispositivo de ensaio é normalmente complexo e dispendioso embora os provetes sejam simples de preparar. Na modalidade de corte simples, estes ensaios simulam bem as deformações a volume constante que ocorrem nos pavimentos.

Relativamente aos ensaios de simulação de tráfego são de destacar os ensaios de simulação em pista de laboratório, *wheel tracking* na terminologia inglesa. Como já se referiu, nestes ensaios não se determinam propriedades "fundamentais" das misturas, mas fazem-se estudos comparativos do comportamento dos pavimentos quando submetidos à passagem repetida de um rodado em condições de ensaio controladas.

Existem diversas variantes deste tipo de ensaio onde se consideram diferentes dimensões do provete, tipo de rodado, frequência do carregamento, pressão aplicada, temperatura, entre outros, mas todos partilham o mesmo princípio de funcionamento. Neste ensaio, as acções a que o provete está submetido são do mesmo tipo que as que se verificam no pavimento em serviço, embora as restantes características sejam diversas (dimensões, valor das cargas, etc.). Na maioria dos casos, e à semelhança dos ensaios anteriormente descritos, estes ensaios realizam-se a temperaturas relativamente elevadas, sendo o seu objectivo essencialmente a caracterização do comportamento às deformações permanentes.

Os ensaios podem ser conduzidos de diversas formas e os seus resultados sujeitos a várias interpretações, mas em todos os casos se mede a deformação permanente no provete, sujeito ou não a imersão em água, causada pela passagem de um rodado, decorridos

determinados intervalos de tempo ou determinados números de passagens. Na subsecção 6.4.3 descreve-se um ensaio deste tipo.

Nalguns países, existem ainda instituições, normalmente grandes laboratórios, que dispõem também de pistas de ensaio de simulação à escala real. Nestas instalações é estudado o desempenho dos pavimentos e as degradações associadas à passagem dos veículos com a particularidade de a estrutura ensaiada, os processos adoptados na sua construção e as acções aplicadas serem semelhantes às verificadas nos pavimentos em serviço. No entanto, mesmo neste tipo de instalações, existem algumas limitações. A primeira é, naturalmente, o custo e a logística associados, prendendo-se outros factores por exemplo, com as limitações que existem relativamente à dificuldade em estudar mecanismos de degradação relacionados por exemplo com o envelhecimento dos materiais constituintes do pavimento.

Uma descrição alargada deste tipo de ensaios de simulação pode ser encontrada em Freire (*op. cit.*).

Complementarmente às instalações laboratoriais, podem-se realizar de troços experimentais em estradas em serviço muito embora, neste caso, não se trate de um ensaio laboratorial no sentido estrito do termo. Estes procedimentos têm como desvantagens principais, o elevado tempo necessário para a obtenção de resultados e a dificuldade de controlar e quantificar os parâmetros que são susceptíveis de afectar os resultados.

6.3.2 - Métodos de ensaio para caracterização do módulo de deformabilidade e do comportamento à fadiga

A caracterização das misturas betuminosas quanto ao módulo de deformabilidade e quanto à sua resistência à fadiga é geralmente efectuada com recurso ao mesmo tipo de ensaios laboratoriais.

De entre estes ensaios destacam-se os ensaios de flexão, os ensaios de compressão diametral, também designados por ensaios de tracção indirecta e os ensaios de tracção directa. Apesar de para a determinação do módulo de deformabilidade poderem ser aplicados carregamentos estáticos, é mais frequente aplicarem-se cargas repetidas por forma a determinar o módulo em condições próximas das condições de serviço, possibilitando ainda a avaliação do comportamento das misturas à fadiga.

Os ensaios de flexão podem ser efectuados sobre vigas apoiadas pontualmente ou com apoio contínuo. No primeiro caso, consoante as condições de apoio, gera-se um estado de flexão simples ou composta que induz tensões de tracção/compressão cuja quantificação

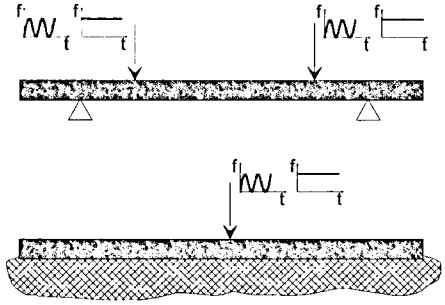
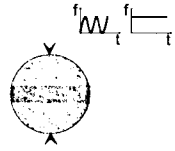
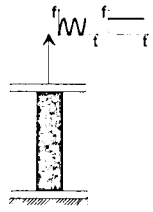
pode ser feita à luz da teoria das peças lineares (*vd* subsecção 6.5.3). No segundo caso, em que se simula de forma mais correcta a existência de uma "fundação" sob as camadas betuminosas, o estado de tensão no provete aproxima-se mais daquele que existe na realidade, sendo, no entanto, um ensaio mais complexo, principalmente pela maior dificuldade na preparação e montagem do provete.

Nos ensaios de compressão diametral ou de tracção indirecta, a tracção no provete, normalmente cilíndrico, é resultante de um estado de tensão bidimensional que se gera quando este é carregado segundo duas geratrizes diametralmente opostas. Uma abordagem mais detalhada deste ensaio, pode ser encontrada na subsecção 6.5.2.

Menos frequente é a utilização dos ensaios de tracção directa, onde o provete é submetido a um estado de tracção simples. Trata-se de uma modalidade de ensaio menos usada porque os procedimentos de ensaio são complexos, nomeadamente na solidarização do provete ao dispositivo de ensaio.

No Quadro 6.3 esquematizam-se os ensaios anteriormente referidos e tecem-se alguns breves comentários relativos a cada um dos ensaios representados.

Quadro 6.3 – Ensaios para avaliação do comportamento dos materiais

	**Ensaio de flexão** Consoante as condições de apoio, as cargas aplicadas podem induzir estados de tensão diversos mas, em geral, são predominantemente uniaxiais; a determinação das tensões, deformações e módulos de deformabilidade é normalmente feita recorrendo à teoria das peças lineares.
	**Ensaio de compressão diametral/tracção indirecta** Na modalidade de ensaio estática, o equipamento pode ser muito simples. Na modalidade de cargas repetidas, o equipamento é mais complexo, mas a preparação e montagem continuam a ser acessíveis.
	**Ensaio de tracção directa** Os ensaios de tracção directa são, regra geral, difíceis de realizar em especial por questões relacionadas com a montagem (solidarização dos provetes aos topos, etc.).

6.3.3 - Condições de serviço das camadas betuminosas em pavimentos

As características mecânicas das misturas compactadas em laboratório devem ser avaliadas para condições semelhantes às de obra. Estas condições referem-se não só aos aspectos que afectam as características dos materiais, como por exemplo as condições ambientais, mas também às acções impostas.

Uma vez que o presente estudo experimental se aplica a materiais usados em pavimentos rodoviários, incidindo sobre a camada em macadame betuminoso realizada no âmbito da obra de reabilitação do pavimento da EN 120, entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro (*vd* secção 4.5), optou-se por se estimar as tensões e extensões a que o pavimento reabilitado da EN 120 estaria sujeito sob a acção do eixo padrão de 80 kN por forma a avaliar as condições a utilizar nos ensaios.

Para o cálculo dos estados de tensão e de deformação induzidos pela acção do eixo padrão utilizou-se um modelo para o pavimento constituído por camadas horizontais semi-infinitas, homogéneo, com comportamento elástico linear.

A estrutura do pavimento foi estabelecida tendo em consideração os dados resultantes dos ensaios descritos na subsecção 4.5.7 bem como os dados relativos à constituição do pavimento existente antes da reabilitação (Antunes & Batista, 2002).

Como solução de reabilitação considerou-se, para além da execução da camada de reforço em macadame betuminoso a frio, com 10 cm de espessura, a execução de uma camada de desgaste em betão betuminoso, com 5 cm de espessura. No entanto, e uma vez que após a conclusão das camadas a frio, estas devem ter um período de tempo (cerca de um mês) em que não são aplicadas camadas sobrejacentes, consideraram-se duas estruturas de pavimento, a primeira correspondente à situação do pavimento antes da execução da camada de desgaste em betão betuminoso e a segunda após a execução da referida camada.

Na Fig. 6.9 resumem-se as estruturas de pavimento consideradas.



Fig. 6.9 – Estrutura do pavimento reabilitado da EN 120-O/LDF em duas fases distintas

No que concerne à camada em macadame betuminoso a frio levou-se ainda em conta que após a conclusão da camada e durante o processo de cura, o comportamento mecânico das misturas vai evoluindo. Por este facto, no estabelecimento do modelo de comportamento estrutural do pavimento, tomaram-se valores do módulo entre 500 e 5 000 MPa para os módulos de deformabilidade desta camada, correspondendo o valor mais baixo à idade inicial da camada, e o valor mais alto ao valor estimado para quando o processo de cura das misturas estiver completo.

Quanto à camada em betão betuminoso, tomou-se conservativamente, um valor de 4 000 MPa para o módulo de deformabilidade da camada.

Os módulos de deformabilidade estabelecidos quer para as camadas existentes no pavimento (essencialmente granulares), quer para o solo de fundação, foram valores médios obtidos da interpretação dos ensaios de carga com o deflectómetro de impacto realizados pelo LNEC (Antunes & Batista, 2002).

Assim, para a camada granular considerou-se um módulo de deformabilidade de 200 MPa. A camada de solo de fundação subdividiu-se em duas zonas: uma superior e uma inferior, mais "rígida" e semi-infinita, tendo sido estimados módulos de deformabilidade respectivamente, de 100 e 1000 MPa.

Relativamente aos coeficientes de *Poisson* das camadas, fixaram-se valores considerados típicos dos respectivos materiais constituintes: 0,40 para camadas de misturas betuminosas a quente, e 0,35 para camadas de misturas betuminosas a frio, materiais granulares e solos.

No Quadro 6.4 e no Quadro 6.5 apresentam-se os parâmetros dos modelos de comportamento estrutural considerados.

Quadro 6.4 – Modelos de comportamento estrutural do pavimento da EN 120-O/LDF reforçado com uma camada em macadame betuminoso a frio

Camada		Características geométricas e mecânicas						
		h (cm)	ν	E (MPa)				
Macadame betuminoso a frio		10	0,35	500	1000	2000	3000	5000
Materiais granulares		20	0,35	200				
Solo de fundação	Camada superior	250	0,35	100				
	Camada inferior	∞	0,35	1000				

LEGENDA: h – espessura das camadas; ν – coeficiente de Poisson; E – módulo de deformabilidade

Quadro 6.5 – Modelos de comportamento estrutural do pavimento da EN 120-O/LDF reforçado com uma camada em macadame betuminoso a frio e uma camada de desgaste em betão betuminoso

Camada		Características geométricas e mecânicas					
		h (cm)	ν	E (MPa)			
Betão betuminoso		5	0,40	4000			
Macadame betuminoso a frio		10	0,35	1000	2000	3000	5000
Materiais granulares		20	0,35	200			
Solo de fundação	Camada superior	250	0,35	100			
	Camada inferior	∞	0,35	1000			

LEGENDA: h – espessura das camadas; ν – coeficiente de *Poisson*; E – módulo de deformabilidade

Uma vez estabelecida a estrutura do pavimento, calcularam-se as tensões e extensões a que a camada em macadame betuminoso a frio estaria sujeita sob a acção do eixo padrão de 80 kN, utilizando o programa de cálculo automático ELSYM 5. Neste programa

considera-se que o pavimento é constituído por múltiplas camadas, com resposta elástica linear e em equilíbrio axi-simétrico (AMADEUS Report, 1999).

No Anexo II apresentam-se os resultados obtidos para cada estrutura do pavimento considerada.

Os resultados mais desfavoráveis obtidos são naturalmente para o caso do pavimento reforçado com uma única camada de macadame betuminoso a frio e para idade jovem da mistura (E = 500 MPa). Nestas condições, e sob a acção do eixo padrão, a tensão máxima de compressão na camada em mistura a frio é de cerca de 700 kPa e extensão máxima de tracção de aproximadamente 500 μm/m.

6.3.4 - Programa de ensaios

A caracterização das propriedades mecânicas das misturas betuminosas a frio foi efectuada através de um plano de ensaios cuja descrição detalhada e cujos resultados se apresentam de seguida.

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 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.

Assim, embora em número inferior, foram também realizados ensaios de cargas repetidas à flexão com o equipamento servo-hidráulico do LNEC, e ensaios de simulação em pista de laboratório (*Wheel tracking*) com o equipamento do LNEC.

Os ensaios de cargas repetidas à flexão realizados no equipamento servo-hidráulico referido, destinaram-se a complementar os ensaios efectuados no NAT, permitindo a avaliação do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga de provetes prismáticos submetidos à flexão. O equipamento do LNEC apenas permite a utilização de provetes de dimensões relativamente elevadas (cerca de 120X120X700 mm), o que por um lado permite que se ensaiem misturas com agregados de maiores dimensões, mas dificulta ou inviabiliza a utilização de amostras recolhidas em obra, consoante as espessuras das camadas. Este equipamento foi utilizado para a realização de ensaios sobre provetes prismáticos moldados em laboratório com o equipamento *kneading* (*vd* subsecção 5.3.3.3).

Para a avaliação da resistência às deformações permanentes foram realizados ensaios de simulação em pista de laboratório (*Wheel tracking*) em complemento aos ensaios de compressão uniaxial realizados no NAT, tendo sido para este efeito moldados em laboratório provetes prismáticos de 300x300x50 mm^3. Foram também recolhidos provetes em obra e ensaiados com este equipamento.

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, que foram ensaiados com o equipamento NAT quer em compressão uniaxial com cargas repetidas, quer em compressão diametral.

Com o objectivo de comparar o desempenho das misturas a frio em apreço com o de misturas a quente equivalentes, foram também realizados ensaios com provetes em mistura a quente do tipo *grave-bitume* (GB), que foram estudadas num trabalho de investigação realizado em 1993 por Azevedo. Conforme referido na subsecção 6.2.4, no trabalho desenvolvido por Azevedo estudaram-se misturas betuminosas a quente para camadas de base de pavimentos rodoviários.

Uma vez que estavam disponíveis no LNEC tarolos cilíndricos da referida mistura, estes foram ensaiados no NAT, nas mesma condições de ensaio que as utilizadas para as misturas a frio, por forma a poder-se comparar directamente os resultados obtidos para os três tipos de misturas (misturas a frio "novas" e recicladas, e misturas a quente).

No Anexo I apresenta-se o plano de trabalhos seguido. No Quadro 6.6 e no Quadro 6.7 descreve-se a nomenclatura utilizada para identificar os tipos de ensaios, bem como o tipo de provetes usados (moldados em laboratório ou recolhidos em obra, tipo de compactação laboratorial, condições de cura).

Quadro 6.6 – Nomenclatura utilizada na programação dos ensaios para determinação da resistência às deformações permanentes das misturas

Designação	Ensaio de caracterização mecânica	Provetes	
		Fabrico dos provetes (Local/forma/tipo de compactação em laboratório)	Cura (Idade/acondicionamento/temperatura)
D1	Ensaio de compressão uniaxial (NAT do IST)	Laboratório/moldes cilíndricos/*Kneading* com nivelamento	1 dia / com película / temperatura ambiente
D2			2 dias / com película / temperatura ambiente
D3			1 semana / com película / temperatura ambiente
D4			2 semanas / com película / temperatura ambiente
D5			1 mês / com película / temperatura ambiente
D6			2 meses / com película / temperatura ambiente
D6a			2 meses / totalmente exposto ao ar / temperatura ambiente
D7			4 dias / sem película / cura acelerada (1 dia à temperatura ambiente e 3 dias a 60°C)
D8			4 meses / com película / temp. ambiente
D8a			4 meses / 2 meses com película e 2 meses totalmente exposto ao ar / temp.ambiente
D_{EN120}		Obra da EN120-O/LDF/tarolos cilíndricos	2 anos / condições de obra
D_{IP2}		Obra do IP2/tarolos cilíndricos	6 meses / condições de obra
D_{GB}		Obra *(grave-bitume)*/ tarolos cilíndricos	14 anos / em laboratório (totalmente exposto ao ar / temperatura ambiente)
WT1	Ensaio de simulação em pista de laboratório (Equipamento do LNEC)	Laboratório/moldes prismáticos/compactação por vibro-compactação	1 dia / temperatura ambiente
WT3			1 semana / temperatura ambiente
WT5			1 mês / temperatura ambiente
WT6			2 meses / temperatura ambiente
WT7			4 dias / cura acelerada (1 dia à temperatura ambiente e 3 dias a 60°C)
WT8			4 meses / temperatura ambiente
$WTc_{(EN120)}$		Obra da EN120-O/LDF/provetes prismáticos	2 anos / condições de obra

Quadro 6.7 – Nomenclatura utilizada na programação dos ensaios para determinação do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga das misturas

Designação	Ensaio de caracterização mecânica	Provetes	
		Fabrico dos provetes (Local/forma/tipo de compactação em laboratório)	Cura (Idade/acondicionamento/temperatura)
M1	Ensaio de compressão diametral (NAT do IST)	Laboratório/moldes cilíndricos/*Kneading* com nivelamento	1 dia / com película / temperatura ambiente
M2			2 dias / com película / temperatura ambiente
M3			1 semana / com película / temperatura ambiente
M4			2 semanas / com película / temperatura ambiente
M5			1 mês / com película / temperatura ambiente
M6			2 meses / com película / temperatura ambiente
M6a			2 meses / totalmente exposto ao ar / temperatura ambiente
M7			4 dias / sem película / cura acelerada (1 dia à temperatura ambiente e 3 dias a 60°C)
M8			4 meses / com película / temp. ambiente
M8a			4 meses / 2 meses com película e 2 meses totalmente exposto ao ar / temp.ambiente
M_{EN120}		Obra da EN120-O/LDF/tarolos cilíndricos	2 anos / condições de obra
M_{IP2}		Obra do IP2/tarolos cilíndricos	6 meses / condições de obra
M_{GB}		Obra *(grave-bitume)*/ tarolos cilíndricos	14 anos / em laboratório (totalmente exposto ao ar / temperatura ambiente)
V9	Ensaio de flexão simples (Equipamento servo-hidráulico do LNEC)	Laboratório/moldes prismáticos/*Kneading* com nivelamento	1 ano / sem película / temp.ambiente

6.4 - Caracterização do comportamento às deformações permanentes

6.4.1 - Generalidades

Para a descrição da resposta das misturas betuminosas, quando submetidas a ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas, adoptam-se frequentemente, por simplificação, modelos de comportamento viscoelástico que não consideram a componente plástica da resposta do material, como seja, o modelo de *Burgers* (Tanner & Walkers, 1998; Lakes, 1998; Barnes *et al.*, 1998).

Conforme se pode observar na Fig. 6.5 apresentada na subsecção 6.2.1, no modelo de *Burgers* são consideradas as seguintes componentes de comportamento dos materiais:

- Componente elástica, representada por uma mola com módulo de deformabilidade E_1;
- Componente elástica retardada, representada por uma mola com módulo de deformabilidade E_2 e um amortecedor com coeficiente de viscosidade μ_2 associados em paralelo;
- Componente viscosa, representada por um amortecedor com coeficiente de viscosidade μ_1.

De entre os quatros parâmetros do modelo de *Burgers* (E1, E2, μ_1, μ_2) o coeficiente de viscosidade do amortecedor em série (μ_1), é o mais importante no que concerne ao desenvolvimento das deformações permanentes. Este coeficiente pode ser calculado pela seguinte expressão (Quaresma *et al.*, 2000; Freire, 2002):

$$\mu_1 = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \sigma(t)dt}{\Delta\varepsilon_{permanente}(t_0, t_1)} \quad \text{onde} \tag{6.4}$$

$\sigma(t)$ - história das tensões aplicadas entre o instante t_0 e t_1

$\Delta\varepsilon_{permanente}(t_0, t_1)$ - extensão permanente obtida entre o instante t_0 e t_1

A curva que representa a extensão permanente acumulada em função do número de ciclos tem geralmente o andamento do tipo representado esquematicamente na Fig. 6.10, podendo distinguir-se as seguintes três fases principais (Kuhn & Mitchell, 1993):

- Fase 1 ou fase primária, correspondente à fase inicial em que ocorrem variações das características viscoelásticas do material em estudo, observando-se um rápido aumento da deformação do provete, com velocidade de deformação decrescente;
- Fase 2 ou fase secundária, também designada por fase linear por corresponder à fase em que a velocidade de deformação permanece constante, assim como as características viscoelásticas do material;
- Fase 3 ou fase terciária, correspondente à fase em que ocorre a eventual rotura do provete, verificando-se deformações plásticas da mistura, com um acentuado aumento da velocidade de deformação.

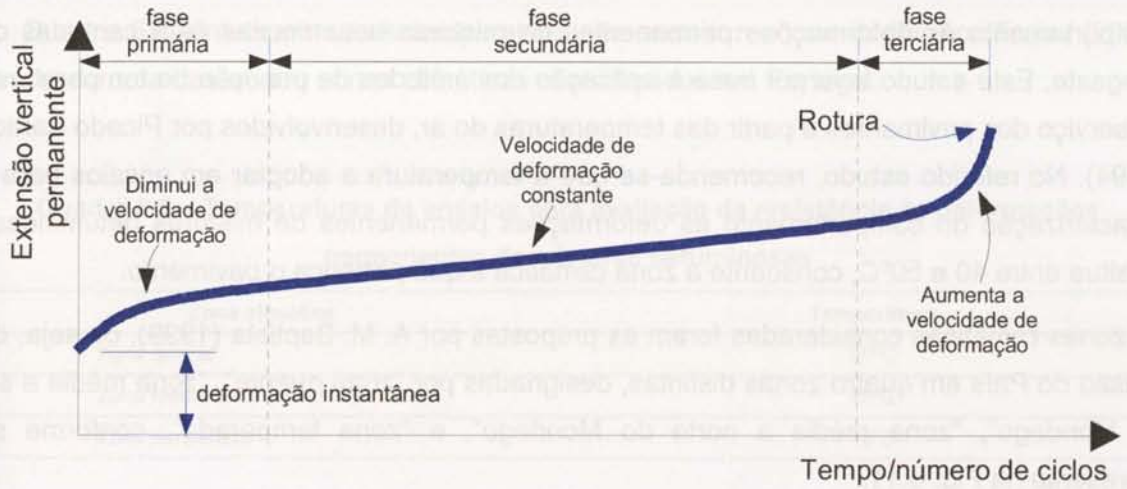


Fig. 6.10 – Relação entre a extensão permanente vertical acumulada e o número de ciclos em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas

Considera-se que o comportamento descrito na Fig. 6.10 tem uma relação directa com a formação de cavados de rodeira nos pavimentos flexíveis sujeitos à acção do tráfego rodoviário (Freire, 2002). Assim, admite-se que a fase 1 corresponde a uma densificação do material em que se dá um rearranjo das partículas de agregado, finda a qual a mistura betuminosa apresenta uma melhoria significativa do comportamento às deformações permanentes, traduzida por uma estabilização da velocidade de deformação, k (fase 2). Este parâmetro, ou seja, a velocidade de deformação que ocorre durante a fase linear (k), tem sido tomado como uma medida indicadora do comportamento às deformações permanentes das misturas betuminosas em serviço.

Conforme exposto na subsecção 6.2.2, a temperatura das misturas betuminosas tem grande influência no seu comportamento às deformações permanentes, sendo que, quanto mais alta for a temperatura, menor é a resistência das misturas às deformações permanentes. Assim, por forma a simular as condições mais gravosas a que as camadas betuminosas estão sujeitas quando em serviço, diversos autores recomendam que os ensaios realizados em laboratório sejam conduzidos a temperaturas da ordem de grandeza das mais elevadas das registadas nos pavimentos, ou mesmo acima destes valores. Em França, por exemplo, adoptam-se temperaturas de ensaio de 60ºC para as misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste e de 50ºC para as misturas aplicadas em camadas subjacentes (Bonnot, 1986). Já no Reino Unido, se considera uma temperatura de 45ºC como temperatura de ensaio para misturas betuminosas colocadas em camadas de desgaste (Nunn *et al.*, 2000). Para Portugal, Freire (2002) desenvolveu um estudo sobre as temperaturas adequadas para a execução de ensaios para a caracterização do

comportamento às deformações permanentes de misturas betuminosas para camadas de desgaste. Este estudo teve por base a aplicação dos métodos de previsão de temperaturas de serviço dos pavimentos a partir das temperaturas do ar, desenvolvidos por Picado Santos (1994). No referido estudo, recomenda-se que a temperatura a adoptar em ensaios para a caracterização do comportamento às deformações permanentes de misturas betuminosas se situe entre 40 e 50°C, consoante a zona climática a que pertença o pavimento.

As zonas climáticas consideradas foram as propostas por A. M. Baptista (1999), ou seja, de divisão do País em quatro zonas distintas, designadas por "zona quente", "zona média a sul do Mondego", "zona média a norte do Mondego", e "zona temperada", conforme se representa na Fig. 6.11.

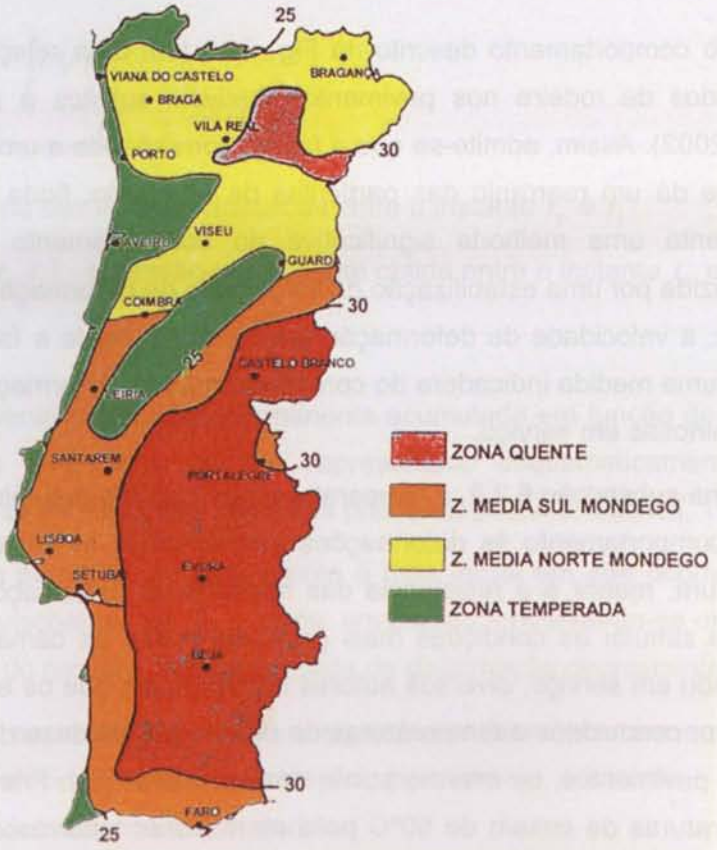


Fig. 6.11 – Zonas climáticas em Portugal Continental (adaptado de A. M. Baptista, 1999)

No Quadro 6.8 sintetizam-se as temperaturas de ensaio recomendadas por Freire (2002) para cada uma das quatro zonas climáticas consideradas em Portugal.

Quadro 6.8 – Temperaturas de ensaios para avaliação da resistência às deformações permanentes de misturas betuminosas

Zona climática	Temperatura
Zona quente	50ºC
Zona média Sul e zona média Norte	45ºC
Zona temperada	40ºC

No presente trabalho optou-se por se realizarem os ensaios à compressão uniaxial de cargas repetidas, a uma temperatura de 50ºC, por ser esta a temperatura que representa condições em serviço mais desfavoráveis no que concerne ao comportamento das misturas às deformações permanentes.

De referir que o pavimento de referência, ou seja, o lanço da EN 120 entre Odemira e o Limite de Distrito de Faro, se localiza na zona climática "média a sul do Mondego".

6.4.2 - Ensaios de compressão uniaxial com o *Nottingham Asphalt Tester*

6.4.2.1 - Descrição do método de ensaio

O *Nottingham Asphalt Tester* é um equipamento que foi desenvolvido na Universidade de Nottingham para a caracterização laboratorial de misturas betuminosas submetidas a cargas repetidas. 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 (*vd* Fig. 6.12).

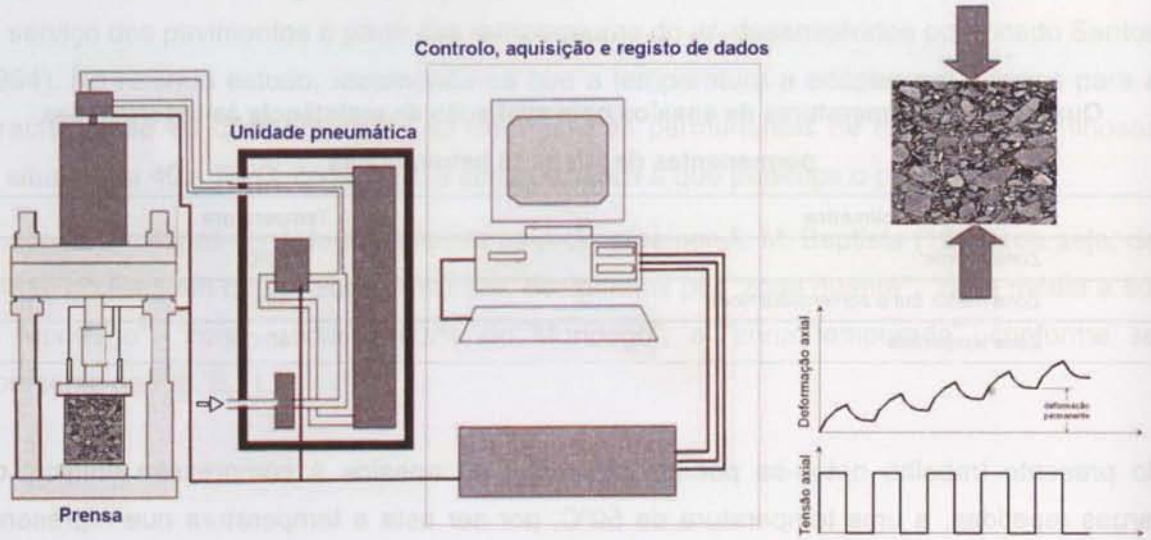


Fig. 6.12 – Provete cilíndrico submetido a ciclos de cargas de compressão uniaxial

O equipamento NAT permite cumprir integralmente a norma inglesa BS DD 226:1996, permitindo também alterar alguns dos parâmetros, nomeadamente a tensão aplicada e a temperatura de ensaio.

Esta norma de ensaio aplica-se para a avaliação do comportamento às deformações permanentes de misturas betuminosas, e contempla a utilização de provetes cilíndricos ou prismáticos com uma espessura compreendida entre 40 e 100 mm. No primeiro caso podem ser usados diâmetros de 100, 150 ou 200 mm, havendo em qualquer um dos casos uma tolerância de ±5 mm nesta dimensão. Quanto aos provetes prismáticos, a norma indica que as dimensões devem ser similares às referidas, embora não seja claro, se se deve procurar igualar a área das bases, ou a dimensão lateral do provete prismático ao diâmetro do cilindro.

Em qualquer dos casos, os pratos de aplicação da carga, devem obrigatoriamente ter um diâmetro que exceda entre 10 a 15% a dimensão relevante (diâmetro ou aresta) do provete, pelo que a pressão aplicada considera uniforme em toda a face carregada do provete. O carregamento a aplicar é do tipo "onda rectangular", com 1 s de pressão constante e 1 s de repouso, sendo a tensão recomendada de 100 kPa (±2 kPa). O ensaio de cargas repetidas é precedido de um período de précondicionamento a uma tensão de 10 kPa, durante 10 min., durante o qual se processa uma parcela significativa da fase primária da deformação permanente, tal como foi acima apresentada.

A pré-norma europeia prEN 12697-25: 2003 especifica o uso de provetes cilíndricos, com 150 mm de diâmetro, mantidos à temperatura pretendida para o ensaio. No procedimento de ensaio, o provete é colocado entre duas placas planas e paralelas entre si, tendo a superior um diâmetro de 100 mm, através da qual é aplicada a carga. O facto de a placa superior ter um diâmetro inferior ao do provete, implica que a zona carregada tenha algum confinamento proporcionado pela continuidade do próprio provete para além da dimensão da área carregada. Por outro lado, nestas condições, são também induzidos esforços de corte na superfície do provete, o que simula melhor o efeito da passagem de um veículo no pavimento. As cargas aplicadas são do tipo "onda rectangular", com 1 s de aplicação de uma pressão de 100±2 kPa, seguido de um intervalo de 1 s. A frequência de carregamento é pois de 0,5 Hz. O período de précondicionamento preconizado por esta norma é, em tudo, semelhante ao especificado na BS DD 226:1996.

De acordo com pré-norma referida, o ensaio não permite uma previsão quantitativa dos cavados de rodeira formados à superfície de um pavimento em serviço, mas permite classificar relativamente diferentes misturas e avaliar a sua adequabilidade. A norma preconiza que os resultados sejam apresentados num diagrama que relacione a extensão axial acumulada em função do número de ciclos aplicados, do tipo do representado na Fig. 6.10.

Para a realização deste tipo de ensaio, o provete cilíndrico é colocado entre duas placas rígidas, sendo imperioso que as mesmas sejam previamente lubrificadas. Este conjunto (provete e duas placas) é então colocado sobre o apoio horizontal, dentro da câmara de realização do ensaio.

No caso do NAT (*vd* Fig. 6.13), o estado de tensão de compressão simples que se gera no provete é conseguido através da aplicação da carga no centro da placa superior, que a distribui uniformemente pela superfície da face do provete.



Fig. 6.13 – Ensaio de compressão uniaxial no equipamento NAT do IST

A lubrificação das placas a que se fez referência, tem como objectivo não restringir, por atrito, qualquer movimento horizontal do provete causando o seu "embarrilamento", por forma a não comprometer o estado de compressão uniaxial pretendido. Este efeito representa-se esquematicamente na Fig. 6.14.

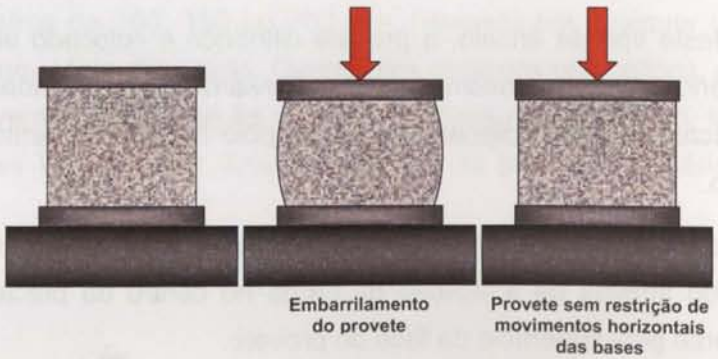


Fig. 6.14 – Esquematização do efeito de "embarrilamento" dos provetes quando não lubrificação das placas

O comportamento às deformações permanentes das misturas betuminosas é naturalmente influenciado pelo estado de tensão/extensão induzido pela acção da passagem dos veículos. Para a realização dos ensaios em laboratório procurou-se que, na definição das características de aplicação da carga, se simulassem, na medida do possível, as condições observadas *in situ*.

No caso dos ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas realizados com o equipamento NAT, a forma de aplicação da carga ("onda rectangular"), bem como o tempo de carga/tempo de repouso (1 s de carregamento a tensão constante, 1 s de repouso) ou frequência (0,5 Hz), estão definidos *a priori*, sendo unicamente permitida a definição do valor da tensão aplicada.

Assim, é necessário determinar o valor da tensão a aplicar por forma a manter constante uma grandeza com significado físico. Considerou-se adequado calcular o impulso da força aplicada pelo equipamento ao provete, nas condições de "onda rectangular", e o impulso da função *haversine*, considerada como representativa do andamento das tensões induzidas nas camadas em condições reais.

O impulso de uma força é dada pelo produto escalar da força pelo tempo em que ela actua:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(t)dt \quad \text{onde} \tag{6.5}$$

I - Impulso da força F

$F(t)$ - Força aplicada entre o instante t_1 e t_2

Mais simplificadamente, e dado que o provete tem uma área constante (diâmetro da face superior de 101,6 mm), equivale a igualar as áreas dos diagramas tensão *versus* tempo das funções seleccionadas, tal como se representa esquematicamente na Fig. 6.15.

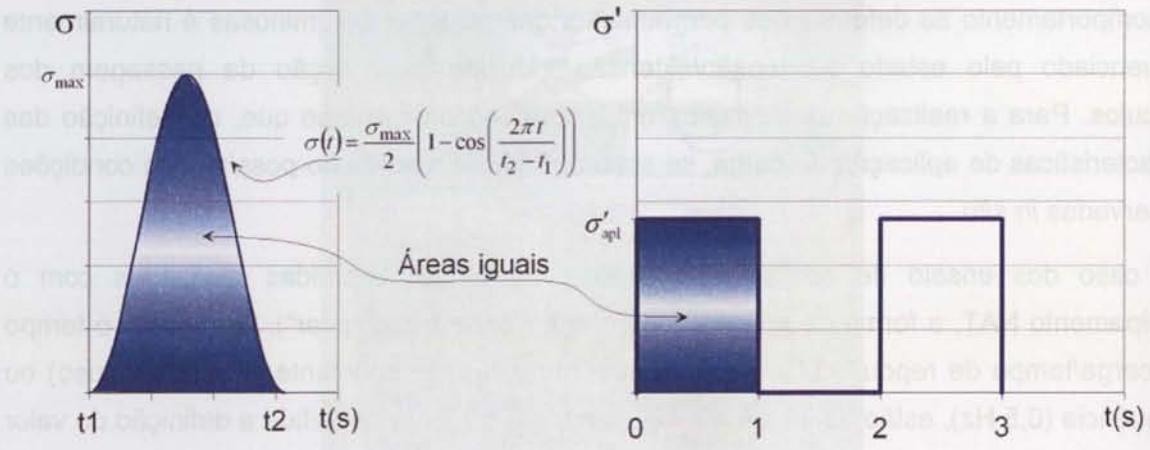


Fig. 6.15 – Representação gráfica das funções de aplicação de carga tipo *haversine* e *onda quadrática*

Para o cálculo do tempo de carregamento de um veículo, adoptaram-se condições desfavoráveis, ou seja, considerou-se que este circularia a uma velocidade muito reduzida. A velocidade adoptada no cálculo foi de 3 km/h. A adopção deste valor para a velocidade prende-se não só com o facto de corresponder às condições mais desfavoráveis, e desta forma cobrir situações de pavimentos com travessias em zonas urbanas, nas quais os veículos são frequentemente obrigados a parar, como também por esta velocidade ser da ordem de grandeza da usada no ensaio de simulação de tráfego em pista de laboratório (*vd* subsecção 6.4.3.1).

Segundo diversos autores, pode admitir-se, por aproximação, que a passagem de um rodado a uma velocidade de 3 km/h induz num dado ponto do provete, durante um período estimado de cerca de 0,33 s , uma tensão de compressão vertical σ com uma variação sinusoidal modificada (*haversine* na designação inglesa), traduzida pela seguinte expressão:

$$\text{Para } t_0 \le t(s) \le t_0 + 0{,}33 \quad \text{tem-se que} \quad \sigma = \frac{\sigma_{máx.}}{2}\left(1 - \cos\frac{2\pi t}{0{,}33}\right) \qquad \textbf{(6.6)}$$

No ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas realizado no equipamento NAT, a expressão que traduz a tensão de compressão vertical σ' induzida no provete pela aplicação de uma dada tensão durante 1 s, é dada pela seguinte expressão:

$$\text{Para } t_0 \le t(s) \le t_0 + 1 \quad \text{tem-se que} \quad \sigma' = \sigma'_{apl.} \qquad \textbf{(6.7)}$$

Igualando os impulsos provocados pela aplicação de ambos os carregamentos, obtém-se:

$$\int_0^1 \sigma'_{apl.}\,dt = \int_0^{0,33} \frac{\sigma_{máx.}}{2}\left(1-\cos\frac{2\pi t}{0,33}\right)dt \Leftrightarrow \sigma'_{apl.} = \frac{\sigma_{máx.}}{2}\left[0,33-\left(\frac{2\pi}{0,33}\right)sen2\pi\right]$$

$$\Leftrightarrow \sigma'_{apl.} \approx 0,17\sigma_{máx.} \qquad \textbf{(6.8)}$$

Da análise do estado de tensão/extensão induzido pela passagem do eixo padrão de 80 kN (*vd* subsecção 6.3.3), verificou-se que a tensão de compressão máxima na camada em macadame betuminoso a frio seria da ordem dos 700 kPa. Assim, aplicando a expressão (6.8), ou seja, fazendo $\sigma_{máx.} = 700\,kPa$ tem-se que a tensão a aplicar nos ensaios de compressão uniaxial deve ser de aproximadamente 100 kPa.

Tendo em atenção este aspecto, bem como o facto de quer a norma BS DD 226:1996 segundo a qual existe uma larga experiência de realização deste tipo de ensaios, quer a pré-norma europeia prEN 12697-25: 2003 recomendarem uma tensão de compressão de 100 kPa, optou-se, neste caso por se aplicar o mesmo nível de tensão.

Assim, os ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas realizados no NAT foram executados de acordo com os seguintes parâmetros:

- Dimensão dos provetes (valores médios):
  - Moldados em laboratório com o equipamento *kneading*: diâmetro de 102 mm, altura de 64 mm;
  - Extraídas da obra por sondagem à rotação: diâmetro de 100 mm, altura de 64 mm;
- Temperatura de ensaio: 50°C;
- Condicionamento dos provetes: durante 4h à temperatura de ensaio;
- Período de pré-condicionamento: 10 min. À pressão constante de 10 kPa;
- Aplicação de cargas repetidas
  - Tipo de carregamento: "onda rectangular", consistindo na aplicação alternada de 1 s de carga e de 1 s de repouso;
  - Duração do ensaio: 3600 ciclos (2h).

Cabe aqui referir que, regra geral, em ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas com a duração de 2 h (3 600 ciclos de aplicação de carga), como é o caso, realizados em condições que simulem os níveis de tensão e de temperatura observados *in situ*, apenas são observáveis as fases 1 e 2 representadas esquematicamente na Fig. 6.10. Para as condições referidas, a ocorrência da fase 3, significa que a mistura não apresenta um bom comportamento às deformações permanentes.

6.4.2.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios

Nas Figuras 6.16 a 6.25 representam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios realizados com o NAT sobre provetes moldados em laboratório, para diferentes idades dos provetes.

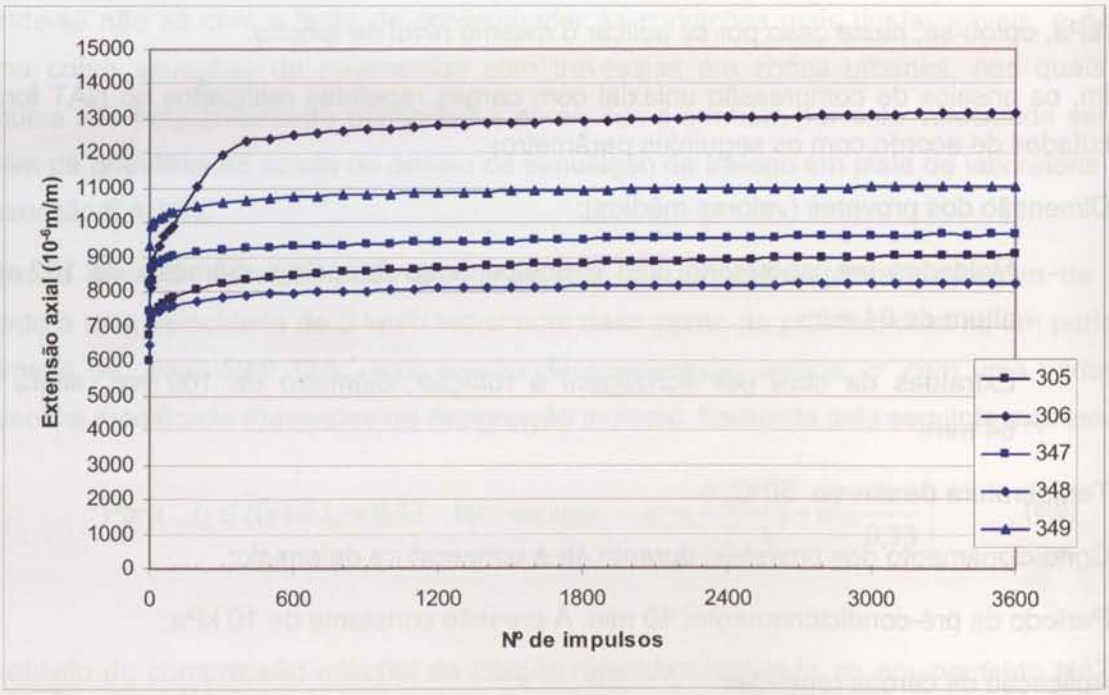


Fig. 6.16 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 1 dia de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente

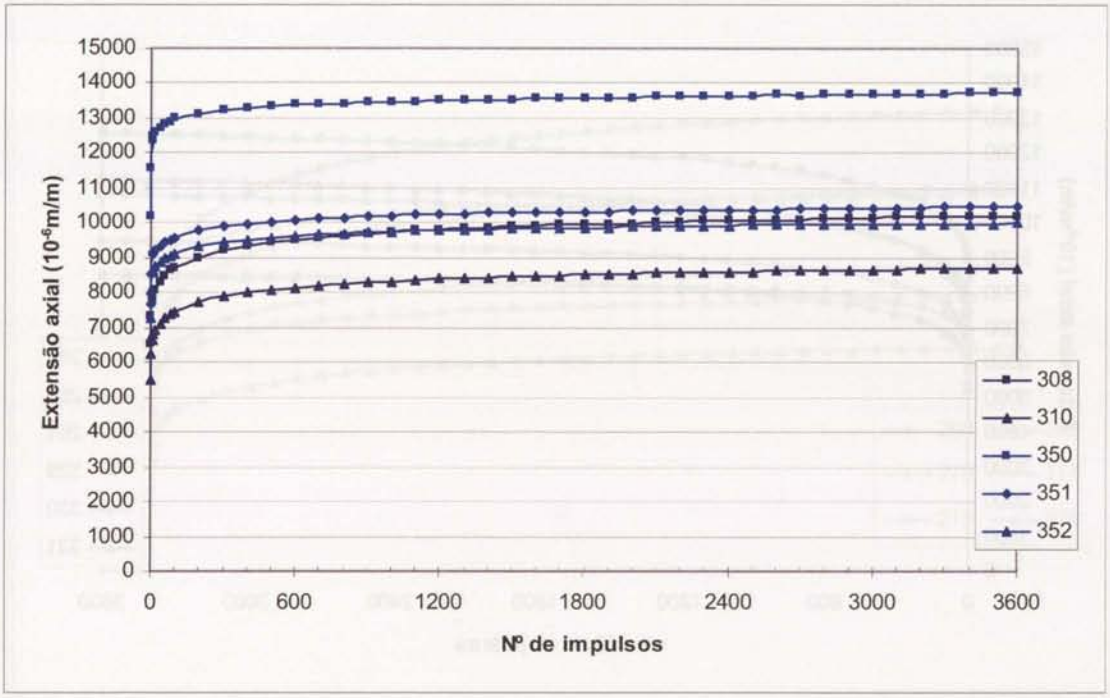


Fig. 6.17 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 2 dias de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente

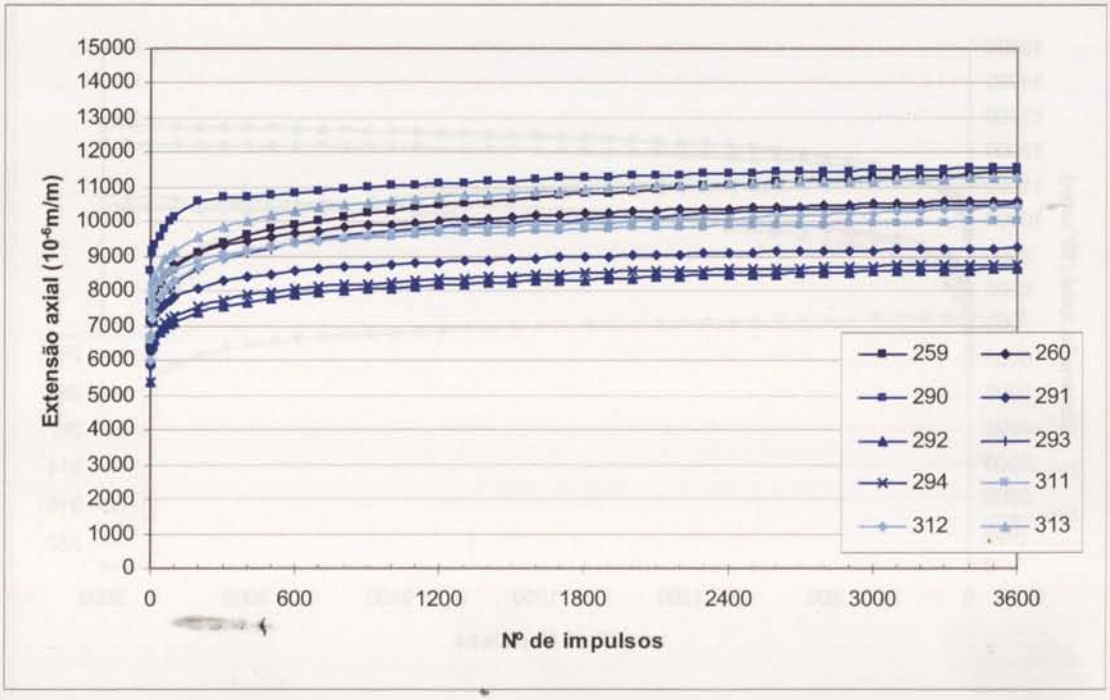


Fig. 6.18 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 7 dias de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente

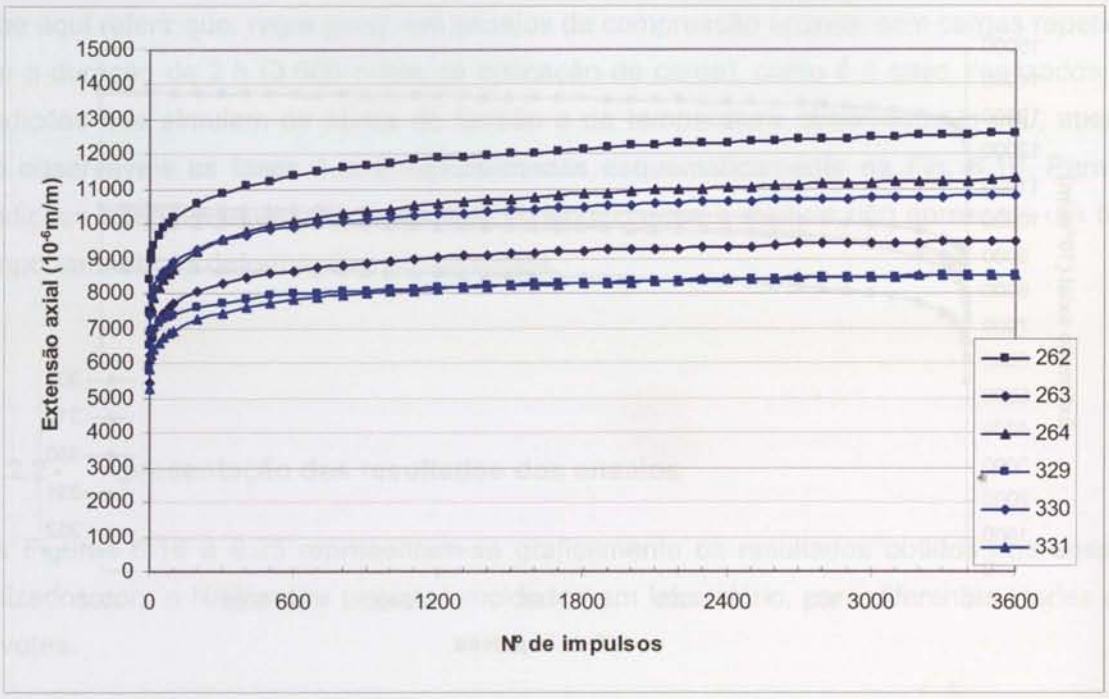


Fig. 6.19 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 14 dias de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente

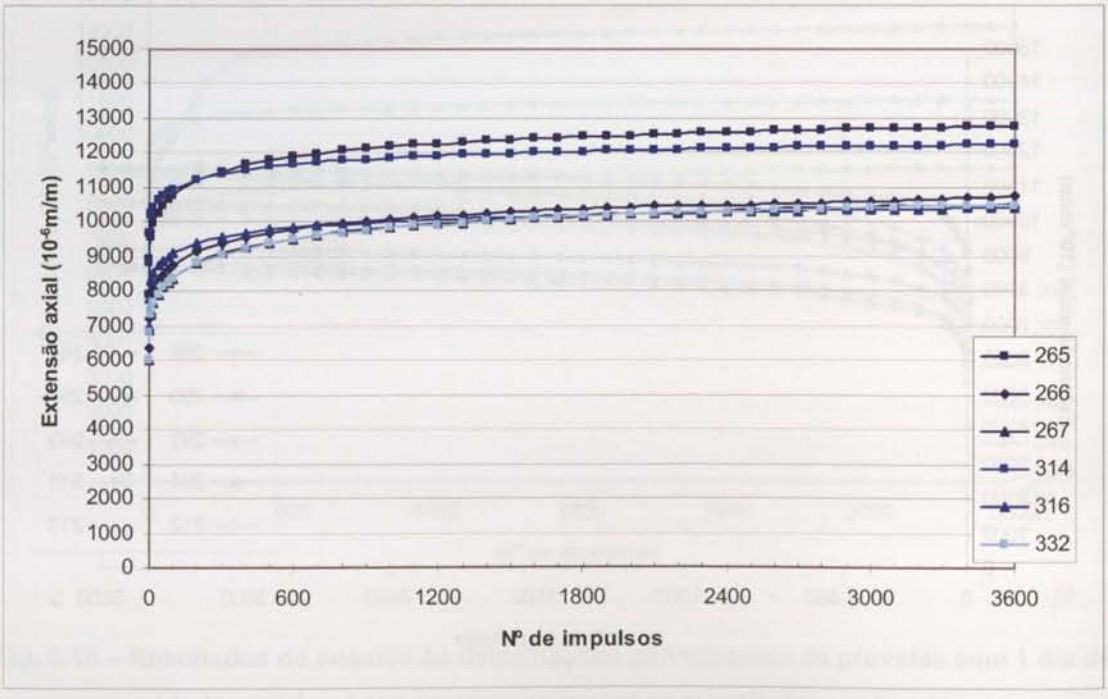


Fig. 6.20 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 1 mês de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente

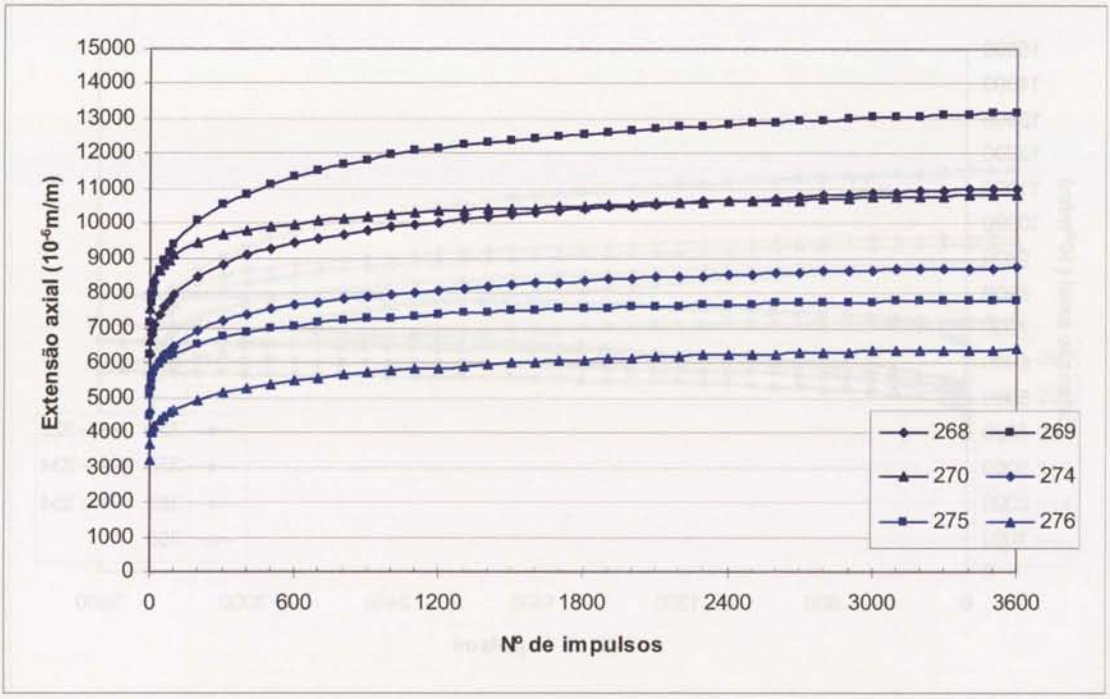


Fig. 6.21 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 2 meses de idade curados à temperatura ambiente com película envolvente

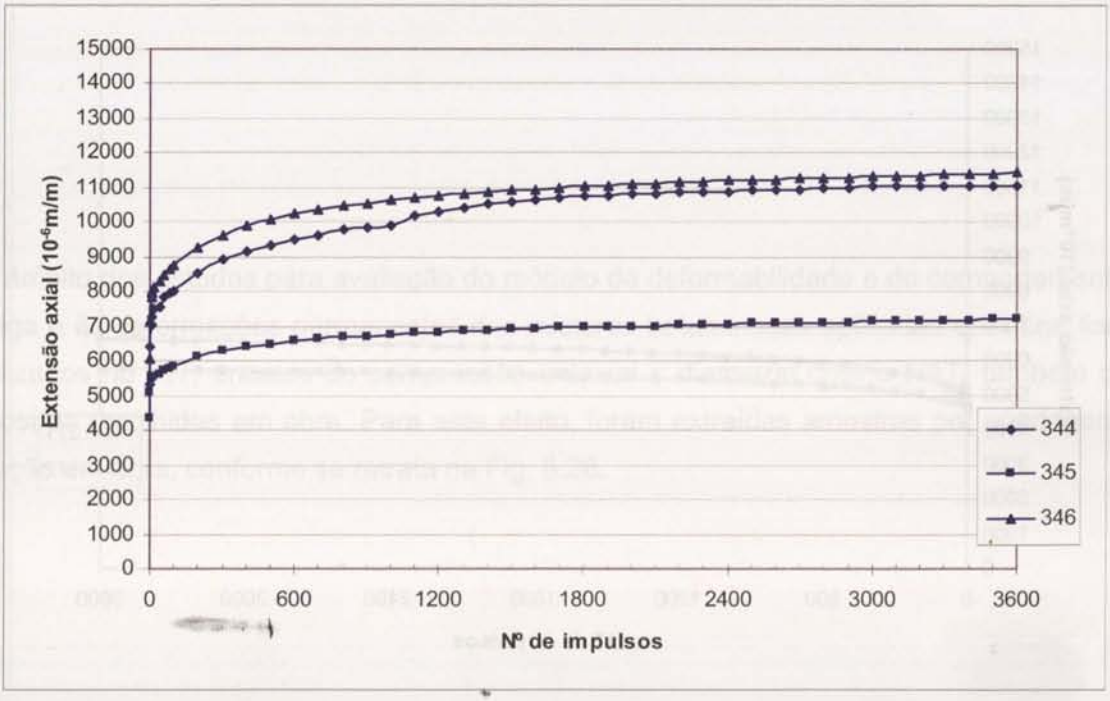


Fig. 6.22 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 2 meses de idade curados à temperatura ambiente sem película

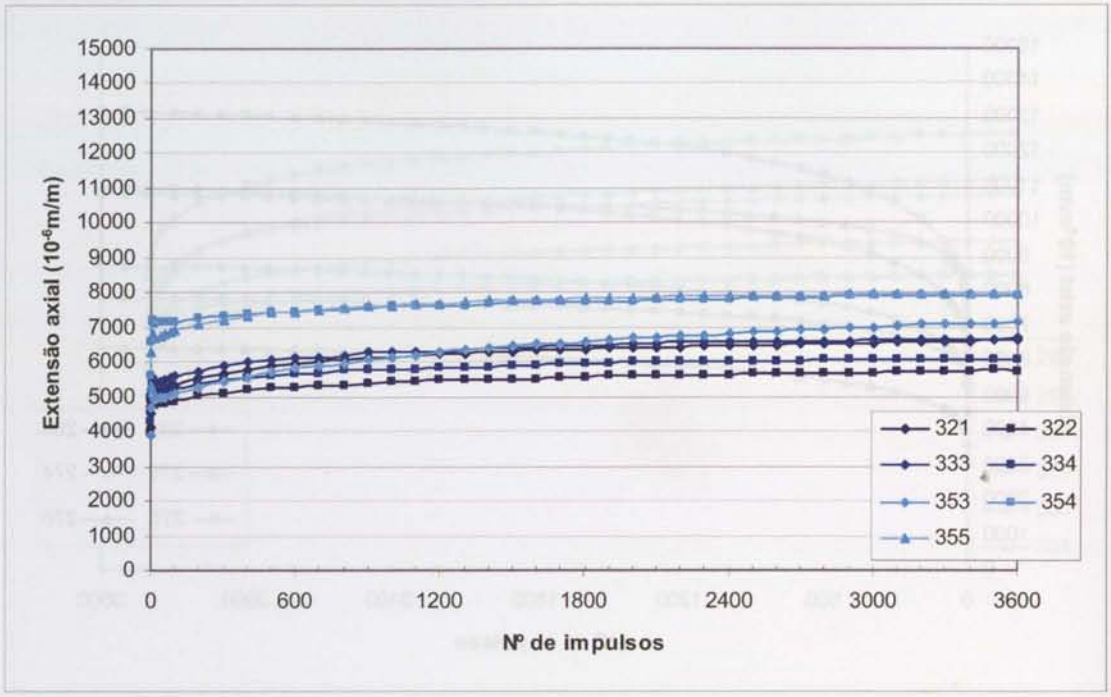


Fig. 6.23 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 4 meses de idade curados à temperatura ambiente, 2 meses com película e 2 sem película

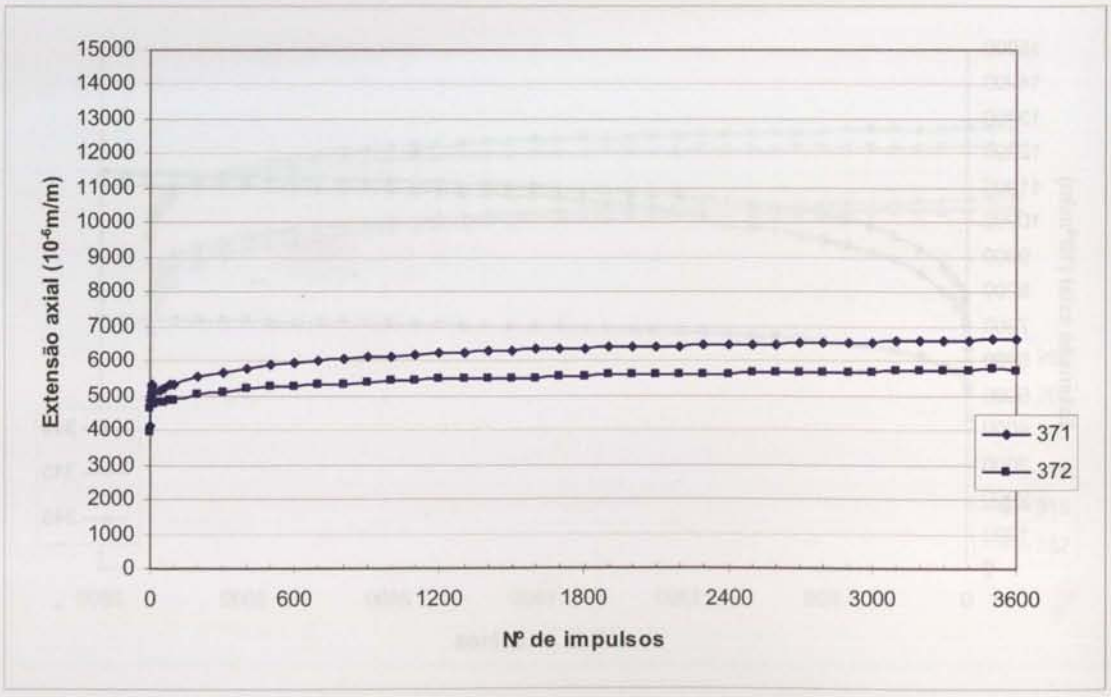


Fig. 6.24 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 4 meses de idade curados à temperatura ambiente sem película envolvente

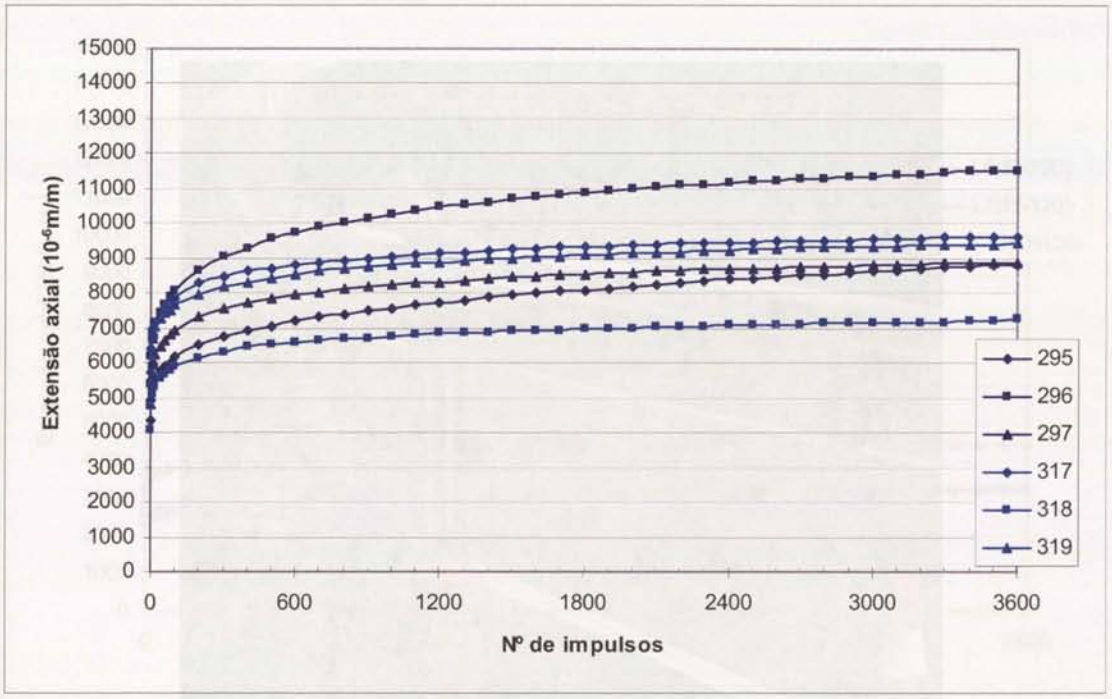


Fig. 6.25 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes com 4 dias de idade com cura acelerada (1 dia à temperatura ambiente e 3 dias a 60ºC)

No âmbito dos estudos para avaliação do módulo de deformabilidade e do comportamento à fadiga e às deformações permanentes das misturas betuminosas aplicadas em obra, foram realizados no IST, ensaios de compressão uniaxial e diametral com o NAT, também com amostras recolhidas em obra. Para este efeito, foram extraídas amostras por sondagens à rotação em obra, conforme se retrata na Fig. 6.26.

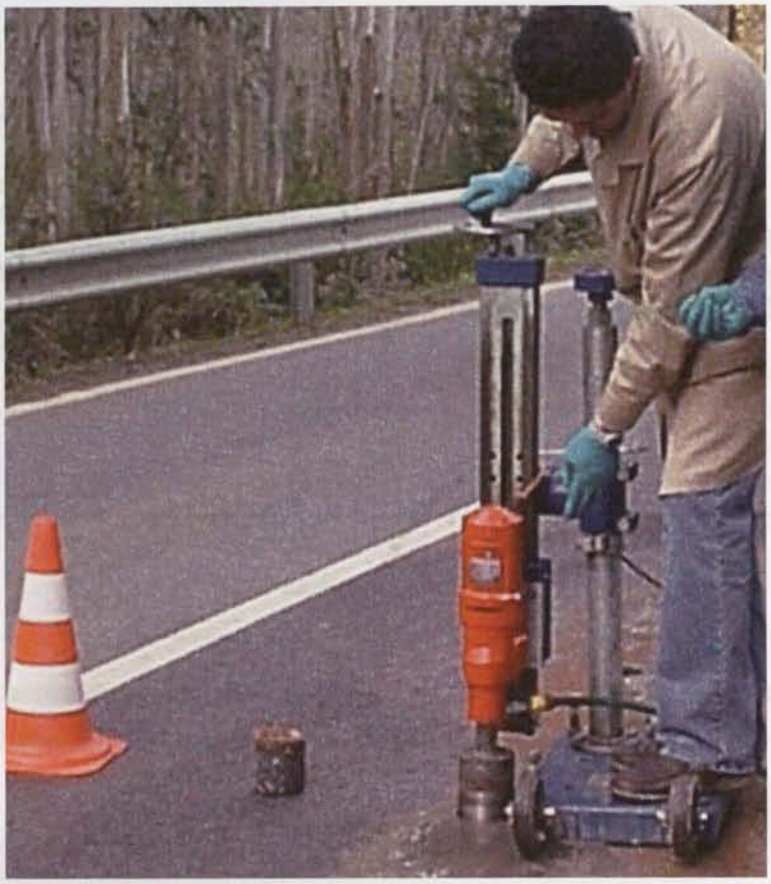


Fig. 6.26 – Extracção de tarolos na obra da EN 120 – O/LDF

Na Fig. 6.27 apresentam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas realizados sobre provetes recolhidos em obra.

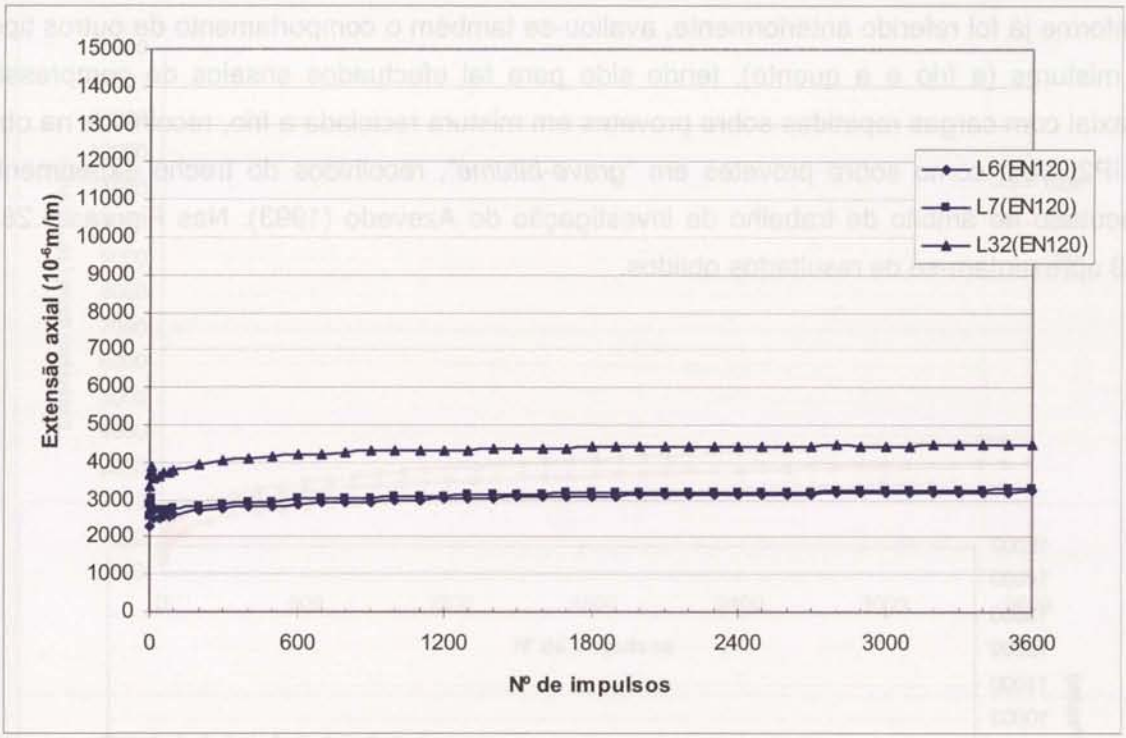


Fig. 6.27 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes de campo (EN120–O/LDF) com dois anos de idade

Da observação das Figuras 6.16 a 6.25 e da Fig. 6.27 pode-se verificar que existe uma certa variabilidade entre os resultados obtidos para os provetes submetidos a condições de cura semelhantes. No entanto regista-se uma tendência geral para o aumento da resistência às deformações permanentes à medida que o processo de cura vai progredindo, traduzido pela diminuição da velocidade de deformação.

As deformações permanentes dos provetes submetidos a cura acelerada parecem ser da mesma ordem de grandeza das medidas nos provetes moldados em laboratório com dois meses de idade, mantidos à temperatura ambiente, com ou sem película envolvente.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados sobre os provetes extraídos da obra são da mesma ordem de grandeza dos obtidos para os ensaios realizados sobre os provetes com quatro meses de idade.

Conforme já foi referido anteriormente, avaliou-se também o comportamento de outros tipos de misturas (a frio e a quente), tendo sido para tal efectuados ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas sobre provetes em mistura reciclada a frio, recolhidos na obra do IP2, bem como sobre provetes em "*grave-bitume*", recolhidos do trecho experimental executado no âmbito de trabalho de investigação de Azevedo (1993). Nas Figuras 6.28 e 6.29 apresentam-se os resultados obtidos.

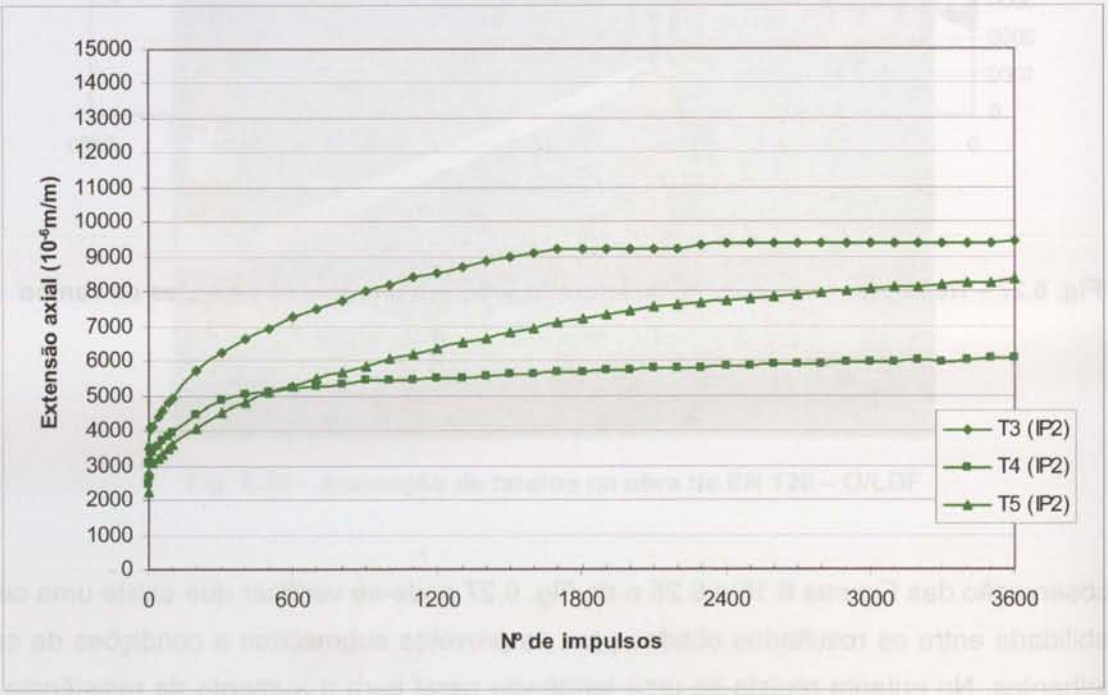


Fig. 6.28 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes de campo (IP2) com seis meses de idade

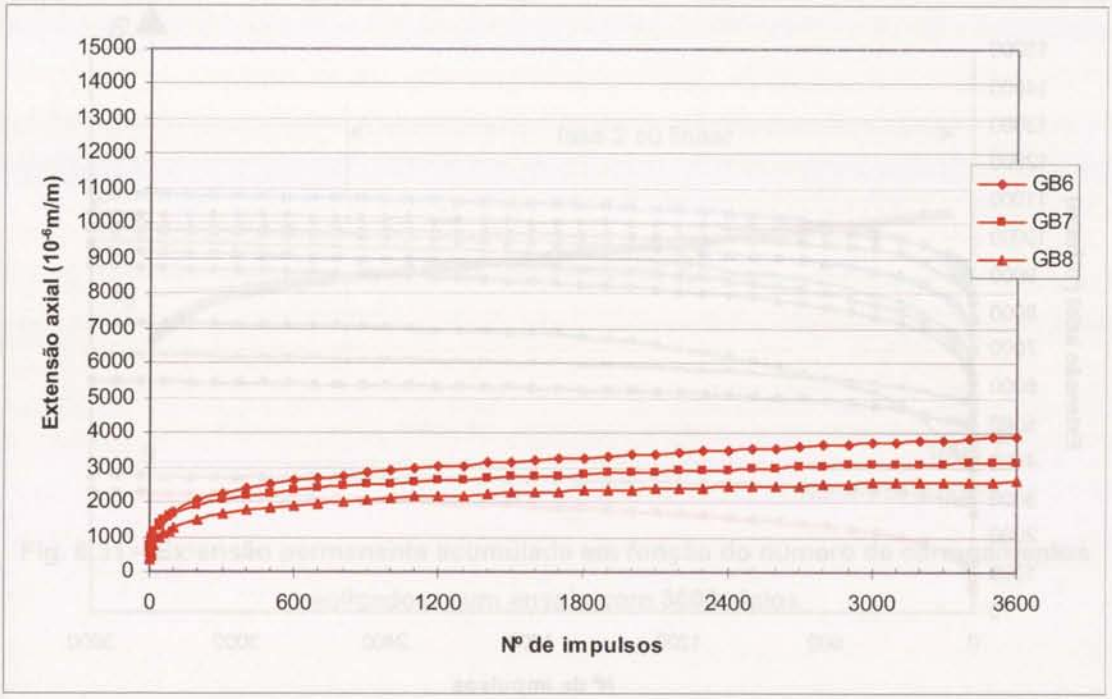


Fig. 6.29 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes de campo em mistura betuminosa a quente tipo *"grave-bitume"*

Para facilitar a interpretação dos resultados, e a título meramente indicativo, representam-se na Fig. 6.30 os resultados correspondentes à média de cada grupo de provetes ensaiados com as mesmas características.

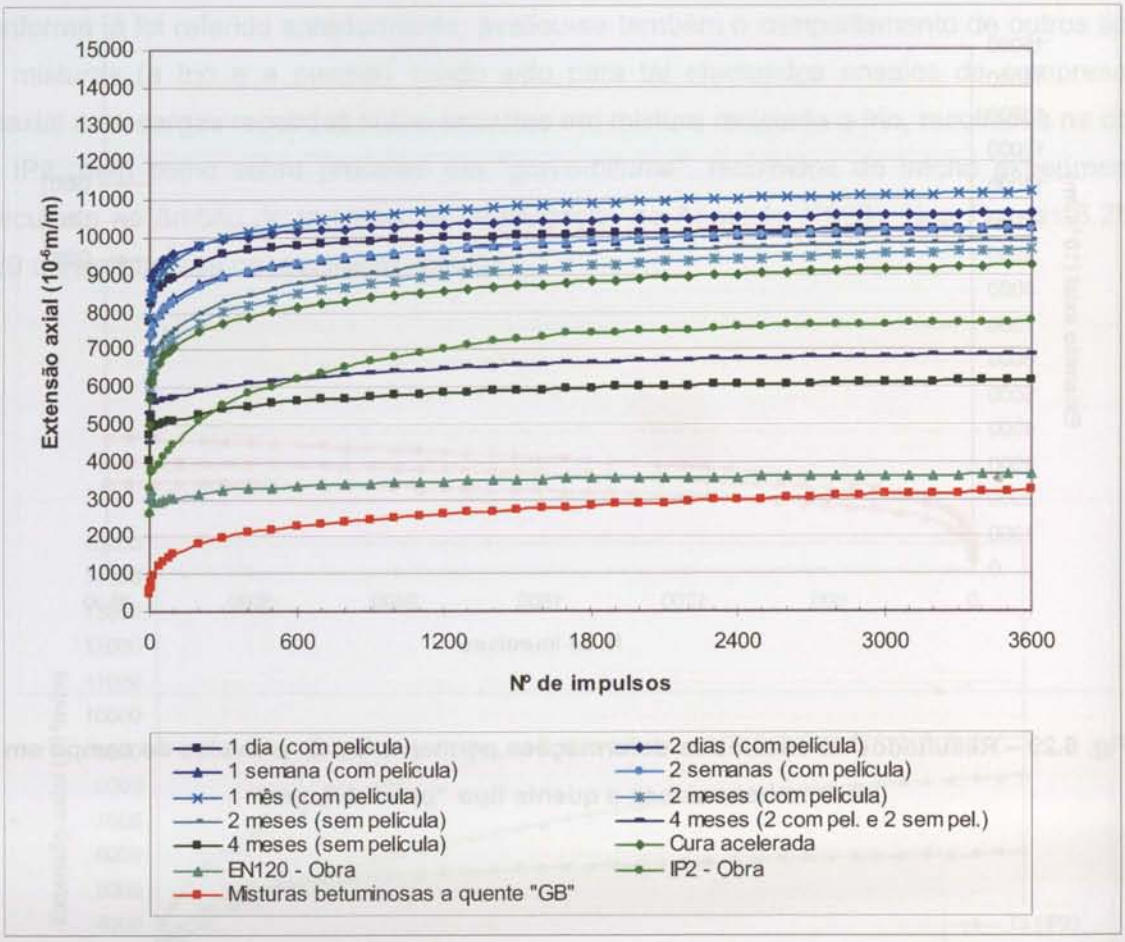


Fig. 6.30 – Resultados de ensaios às deformações permanentes de provetes fabricados e curados em diferentes condições

No Quadro 6.9 apresentam-se alguns dos valores medidos nos ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas realizados, bem como alguns dos parâmetros calculados para a fase linear da curva de evolução das deformações permanentes, com base nos resultados obtidos naqueles ensaios (*vd* Fig. 6.31).

De referir que o parâmetro do modelo de *Burgers* correspondente ao coeficiente de viscosidade do amortecedor em série (μ_1), foi calculado através da aplicação da expressão (6.4) anteriormente apresentada.

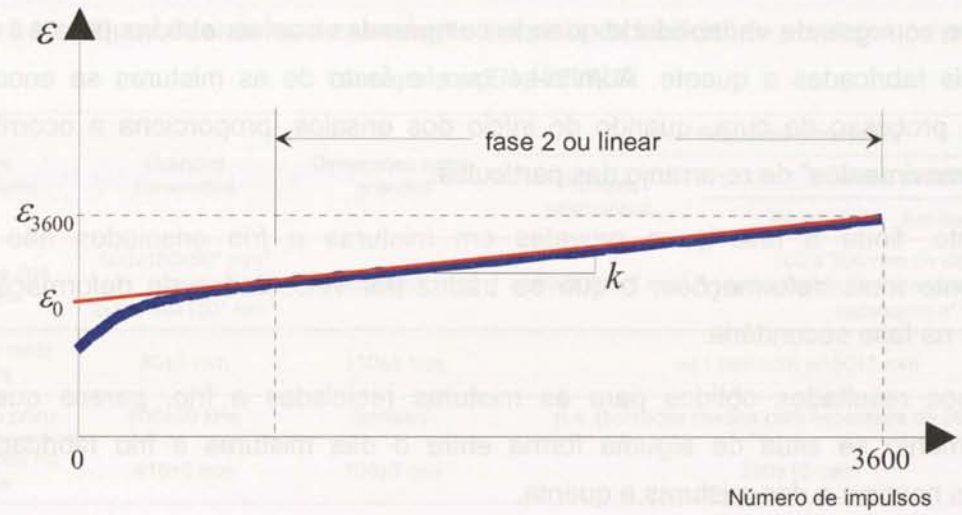


Fig. 6.31 – Extensão permanente acumulada em função do número de carregamentos aplicados, num ensaio com 3600 ciclos

Quadro 6.9 – Valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas

Designação (Provetes de laboratório ou de obra, idade)	Número de ensaios	Fase 2 ou fase linear							
		Valores medidos				Valores calculados			
		ε_{3600} (x10^{-6}m/m)		k (x10^{-6}/s)		ε_0 (x10^{-6}m/m)		μ_1 (GPa.s)	
		Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
D1 (laboratório, 1 dia)	5	10 252	1 931	0,107	0,039	9 885	1 876	1 042	359
D2 (laboratório, 2 dias)	4	10 783	2103	0,121	0,034	10 366	2 178	874	240
D3 (laboratório, 1 semana)	10	10 255	1 065	0,222	0,043	9 485	954	485	125
D4 (laboratório, 2 semanas)	6	10 227	1 622	0,210	0,060	9 501	1 435	510	146
D5 (laboratório, 1 mês)	6	11 200	1 035	0,182	0,042	10 569	1 085	579	157
D6 (laboratório, 2 meses)	6	9 659	2 475	0,262	0,098	8 762	2 215	427	149
D6a (laboratório, 2 meses)	3	9 902	2 343	0,205	0,047	9 206	2 186	508	133
D8 (laboratório, 4 meses)	7	6 873	841	0,146	0,089	6 377	892	822	289
D8a (laboratório, 4 meses)	2	6 188	617	0,135	0,022	5 721	534	715	121
D7 (laboratório, 4 dias)	6	9 248	1 386	0,267	0,119	8 332	1 229	434	166
D_{EN120} (obra da EN20-O/LDF)	3	3 655	704	0,065	0,012	3 427	746	1 565	291
D_{IP2} (obra do IP2)	2 (1)	7 758	2 401	0,231	0,006	6 983	2 428	432	11
D_{GB} (obra – *Grave-bitume*)	3	3 230	639	0,251	0,092	2 353	321	433	142

(1) Não foi considerado um dos resultados obtidos por se considerar anómalo

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.

6.4.3 - Ensaios de simulação em pista de laboratório

6.4.3.1 - Descrição do equipamento

Por forma a complementar os estudos de avaliação do comportamento às deformações permanentes das misturas betuminosas a frio, realizaram-se ensaios de simulação em pista de laboratório, designados geralmente por ensaios de *wheel tracking* na terminologia inglesa.

Este ensaio consiste em submeter um provete, normalmente prismático (lajeta), a passagens sucessivas de uma roda, medindo-se periodicamente a deformação vertical máxima produzida na amostra. Os resultados obtidos são função do número de passagens da roda (número de ciclos de carga), da velocidade da roda, da pressão de contacto, da temperatura de ensaio e da espessura da amostra submetida a ensaio.

Na pré-norma europeia prEN 12697-22 especificam-se cinco modalidades de ensaios de simulação, conforme se sintetiza no Quadro 6.10.

Quadro 6.10 – Tipos de ensaios de simulação em pista de laboratório previstos na pré-norma europeia prEN 12697-22

Tipo de equipamento	Grandes dimensões	Dimensões extra-grandes	Pequenas dimensões		
			Provetes prismáticos	Provetes cilíndricos	
				Ao ar	Em banho de água
Dimensões dos provetes	500x180x50* mm^3 ou 500x180x100* mm^3	700x500x60* mm^3	≥260x300x*e*** mm^3	200 a 300 mm de diâmetro, dependendo da dimensão da mesa; e espessura *e***	
Largura do rasto da roda	80±5 mm	110±5 mm	w±1 mm com w=50±5 mm		
Pressão do pneu	600±30 kPa	(omisso)	n.a. (borracha maciça com espessura de 20±2 mm)		
Curso da roda no provete	410±5 mm	700±5 mm	230±10 mm		
Carga aplicada	5 000±50 N	10 000±100 N	$700\frac{w}{50}\pm 10$ N		
Frequência de carregamento (ida e volta)	1,0±0,1 Hz	2,5±0,5 Hz	26,5±1,0ciclos/60s		

* Salvo outras indicações, que podem depender da máxima dimensão do agregado, da espessura da camada;

** Espessura nominal em função da espessura da camada e/ou da dimensão máxima do agregado.

Neste caso, os ensaios de simulação em pista de laboratório foram realizados com o equipamento do LNEC, de acordo com a norma de ensaio espanhola NLT 173/84. O método preconizado nesta norma é o habitualmente utilizado no nosso país. Esta modalidade de ensaio não é coincidente em todos os aspectos, nomeadamente no que concerne à largura dos provetes, com os contemplados na última versão da pré-norma europeia prEN 12697–22, apesar de se aproximar em diversos aspectos dos ensaios para provetes de pequenas dimensões (*vd* Quadro 6.10).

Segundo a norma NLT 173/84, os provetes de ensaio são lajetas paralelepipédicas cuja dimensão é de 300x300x50 mm^3. Os provetes podem ser obtidos por serragem em obra ou compactados em laboratório com um equipamento específico, contendo um prato vibratório de compactação.

O ensaio de simulação em pista de laboratório consiste, conforme referido anteriormente, no deslocamento contínuo, para a frente e para trás e ao longo de uma linha na superfície da lajeta a ser ensaiada, de uma roda de borracha especial, com dimensões específicas, neste caso, com 2 cm de espessura e 5 cm de largura. A frequência do movimento desta roda corresponde a 42±1 passagens por minuto, sendo a pressão de contacto de 900 kN/m^2 e o curso da roda no provete de 23±0,5 cm.

A deformação permanente resultante na superfície da lajeta é medida e registada a determinados intervalos de tempo, durante 120 minutos. O ensaio é realizado numa câmara

de temperatura controlada, usualmente a 60ºC. No presente estudo, optou-se por realizar também ensaios a 50ºC, por ter sido esta a temperatura utilizada nos ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas. Por outro lado, e conforme foi referido anteriormente, esta temperatura é recomendada por Freire (2002) para a caracterização do comportamento às deformações permanentes de misturas betuminosas aplicadas em pavimentos situados na zona climática quente.

O condicionamento dos provetes à temperatura especificada, foi efectuado numa câmara de controlo da temperatura durante um período de 4h antes do ensaio, mantendo-se a mesma temperatura durante a realização do ensaio.

Na Fig. 6.32 retrata-se um ensaio de simulação em pista de laboratório.

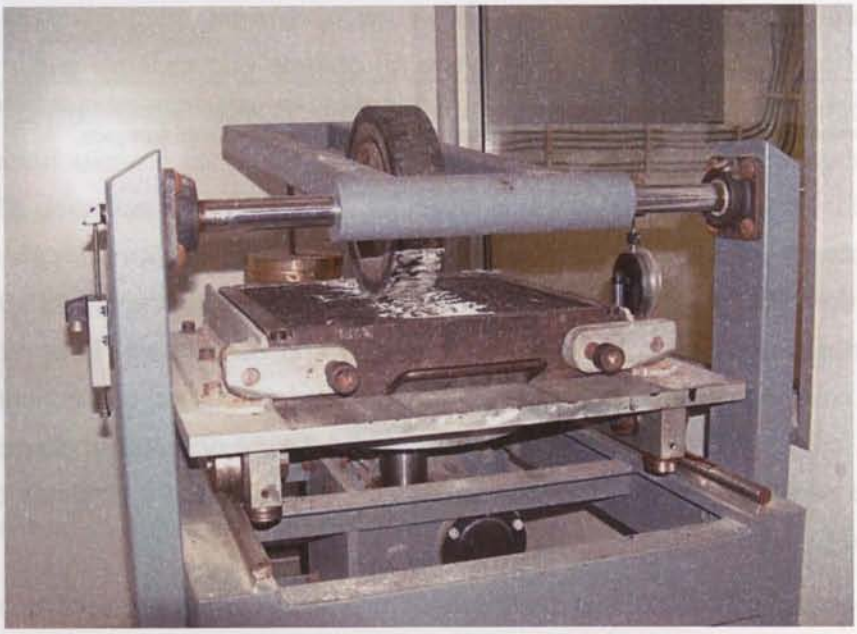


Fig. 6.32- Ensaio de simulação em pista de laboratório com o equipamento do LNEC

De acordo com a especificação seguida, os resultados do presente ensaio são expressos das seguintes formas:

- Gráfico da evolução da deformação permanente vertical medida ao longo do tempo

  De acordo com a experiência adquirida (de Hilster & Van de Loo, 1977; Freire, 2002) na curva da evolução da deformação medida em ensaios de simulação, é possível, à semelhança do que ocorre com as curvas que relacionam a evolução das deformações medidas em ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas com o tempo,

distinguir três fases. Para ensaios de simulação com a duração de 120 minutos geralmente não é atingida a última fase em que se dá a rotura do provete.

- Velocidade de deformação durante os seguintes intervalos de tempo:
  - Entre 30 e 45 minutos ($v_{30\text{-}45min.}$);
  - Entre 75 e 90 minutos ($v_{75\text{-}90min.}$);
  - Entre 105 e 120 minutos ($v_{105\text{-}120min.}$).

Em Espanha, no Caderno de Encargos Tipo da Administração Rodoviária (PG-3 – Art.542, 2001) estabelecem-se limites a cumprir para misturas betuminosas a quente em camadas de desgaste e intermédias, ensaiadas por este método a 60ºC, em função da zona térmica estival e da categoria de tráfego pesado definidas na norma 6.1-IC "Secciones de firmes" (2003). Os valores especificados referem-se à velocidade de deformação no intervalo de 105 a 120 minutos ($v_{105\text{-}120min.}$). No Quadro 6.11 indicam-se os valores máximos considerados nesse caderno de encargos.

Quadro 6.11 – Velocidade máxima de deformação (μm/min.) no intervalo de 105 a 120 min. (NLT 173/84)

Classes de tráfego (Espanha)	Zona térmica estival		
	Quente	Média	Temperada
T00 (TMDp≥4000) e T0 (2000≤TMDp<4000)	12	15	15
T1 (800≤TMDp<2000)	15	15	20
T2 (200≤TMDp<800)	15	20	20
T3 (50≤TMDp<200)	20	20	–
T4 (TMDp<50)	–	–	–

LEGENDA: TMDp – Tráfego médio diário de veículos pesados previsto para a via de projecto no ano de entrada em serviço

No caso da obra da EN120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro, estar-se-á dentro da classe de tráfego T3, segundo a classificação espanhola. No que concerne à zona térmica estival admite-se que a EN120 se localiza numa zona "quente", pelo que uma mistura a aplicar numa camada de desgaste ou de regularização em tais condições, não deveria apresentar, no ensaio realizado conforme a norma NLT173/84, uma velocidade de deformação entre os 105 e 120 min. Superior a $20x10^{-3}$mm/min.

6.4.3.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios

Foram usados provetes moldados em laboratório pelo método habitualmente utilizado para a compactação destes provetes, ou seja, por vibro-compressão, bem como provetes extraídos da obra.

As misturas betuminosas preparadas em laboratório foram fabricadas utilizando a composição adoptada na obra, tendo sido ensaiados provetes com diferentes idades, acondicionados à temperatura ambiente, tal como se retrata na Fig. 6.33.



Fig. 6.33 – Provetes prismáticos para ensaios em pista de laboratório

Os resultados obtidos nos ensaios em pista de laboratório realizados sobre provetes moldados em laboratório, apresentam-se no Quadro 6.12 e nas Figuras 6.34 a 6.39.

Quadro 6.12 – Ensaios de simulação em pista de laboratório realizados sobre provetes preparados em laboratório: baridades dos provetes e resumo dos resultados obtidos

Identificação dos provetes		Baridade seca γ_d (g/cm^3)	Temperatura de ensaio	Velocidade de deformação (x 10^{-3} mm/min.)		
Lote	Número			$V_{30\text{-}45min}$	$V_{75\text{-}90min}$	$V_{105\text{-}120min}$
WT1	375	2.127	50ºC	5	1	1
	376	2.129		85	46	28
	377	2.127		6	1	1
	397	2.150	60ºC	57	124	120
	398	2.159		8	1	2
	399	2.151		6	1	1
WT3	362	2.167	50ºC	19	11	7
	380	2.173		9	4	3
	381	2.132		27	15	10
	387	2.156	60ºC	14	11	11
	388	2.131		27	16	14
	396	2.140		4	6	10
WT5	403	2.150	50ºC	12	7	5
	404	2.176		10	5	5
	408	2.159		39	9	12
	405	2.158	60ºC	21	11	10
	406	2.176		5	1	1
	407	2.160		4	3	2
WT6	378	2.152	50ºC	4	5	4
	379	2.146		17	8	7
	385	2.138		12	6	4
	382	2.126	60ºC	16	9	5
	383	2.164		17	7	5
	384	2.155		16	7	1
WT8	389	2.145	50ºC	23	11	7
	409	2.149		11	6	5
	410	2.163		15	6	5
	393	2.129	60ºC	17	7	12
	394	2.126		12	7	6
	395	2.155		11	6	2
WT7	390	2.133	50ºC	19	9	13
	391	2.139		12	6	9
	392	2.138		11	6	5
	400	2.140	60ºC	8	5	5
	401	2.165		17	12	7
	402	2.183		8	4	3

A observação dos valores apresentados no Quadro 6.12 permite verificar que as baridades obtidas nos provetes compactados em laboratório por vibro-compressão são da ordem de grandeza das baridades obtidas em obra (*vd* subsecções 5.3.2 e 5.5.2).

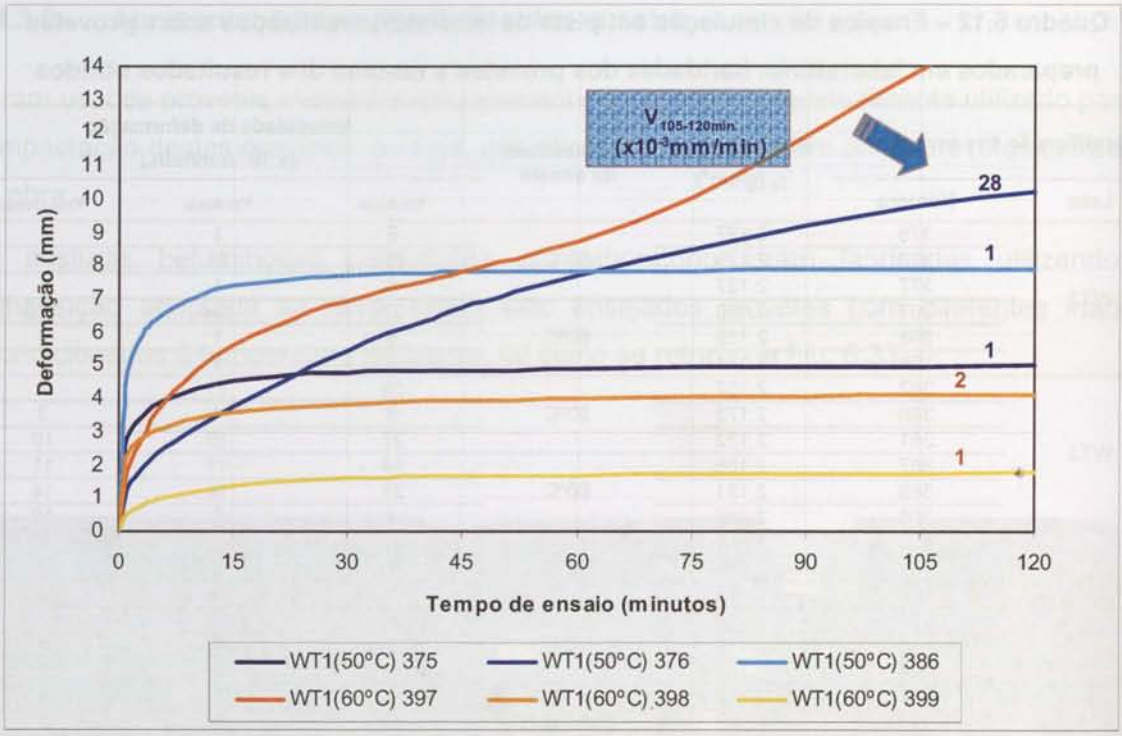


Fig. 6.34 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 1 dia

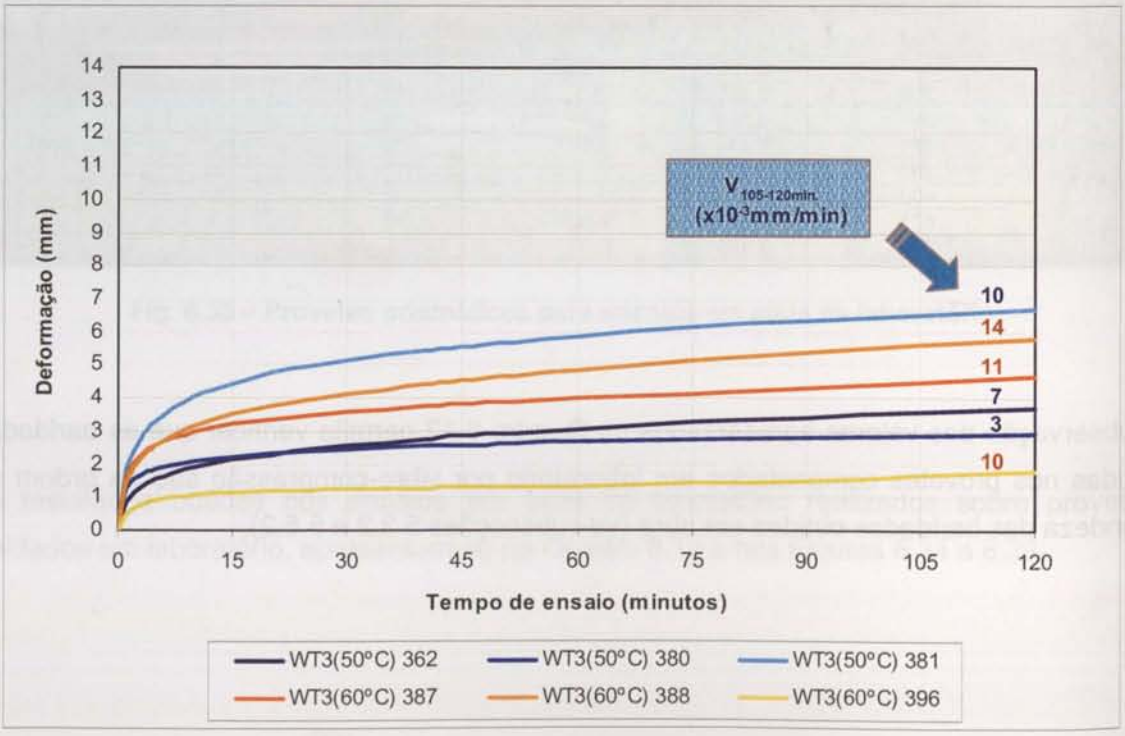


Fig. 6.35 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 1 semana

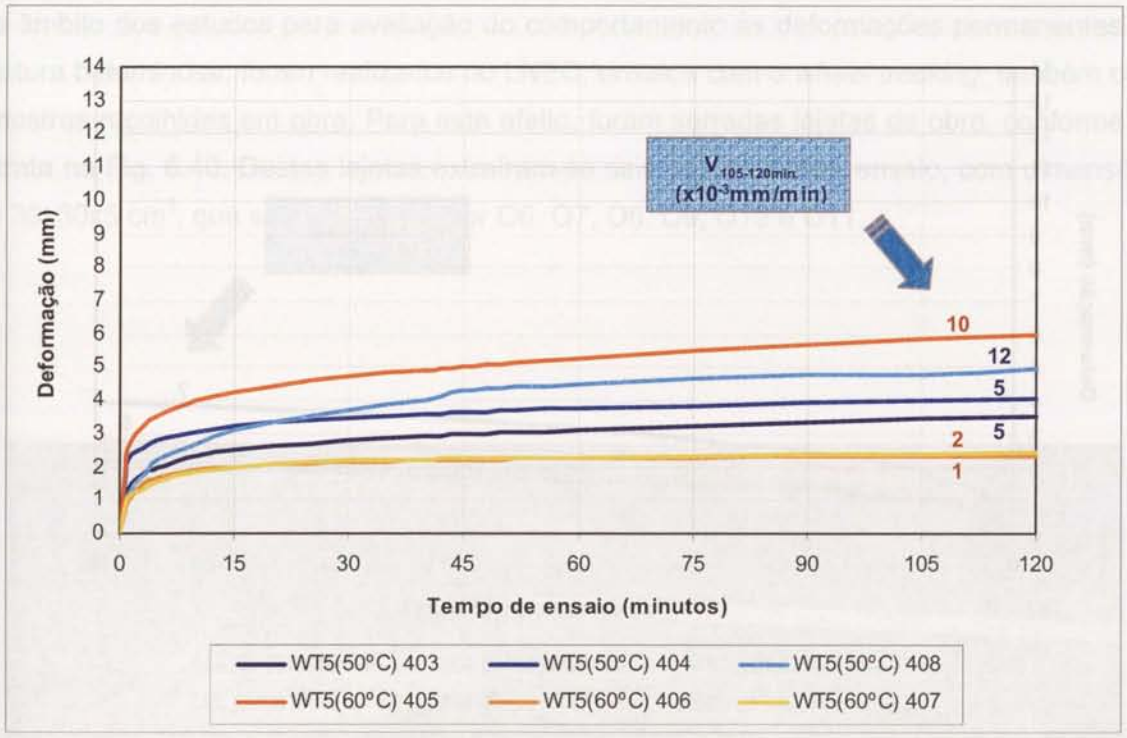


Fig. 6.36 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 1 mês

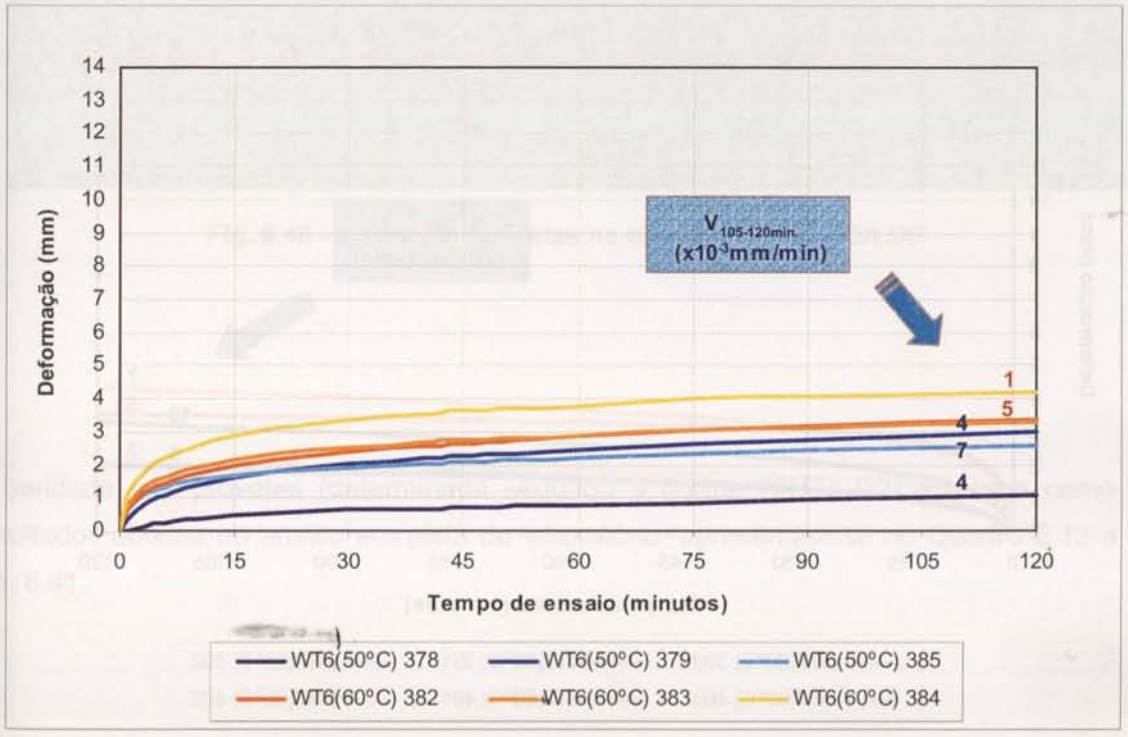


Fig. 6.37 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 2 meses

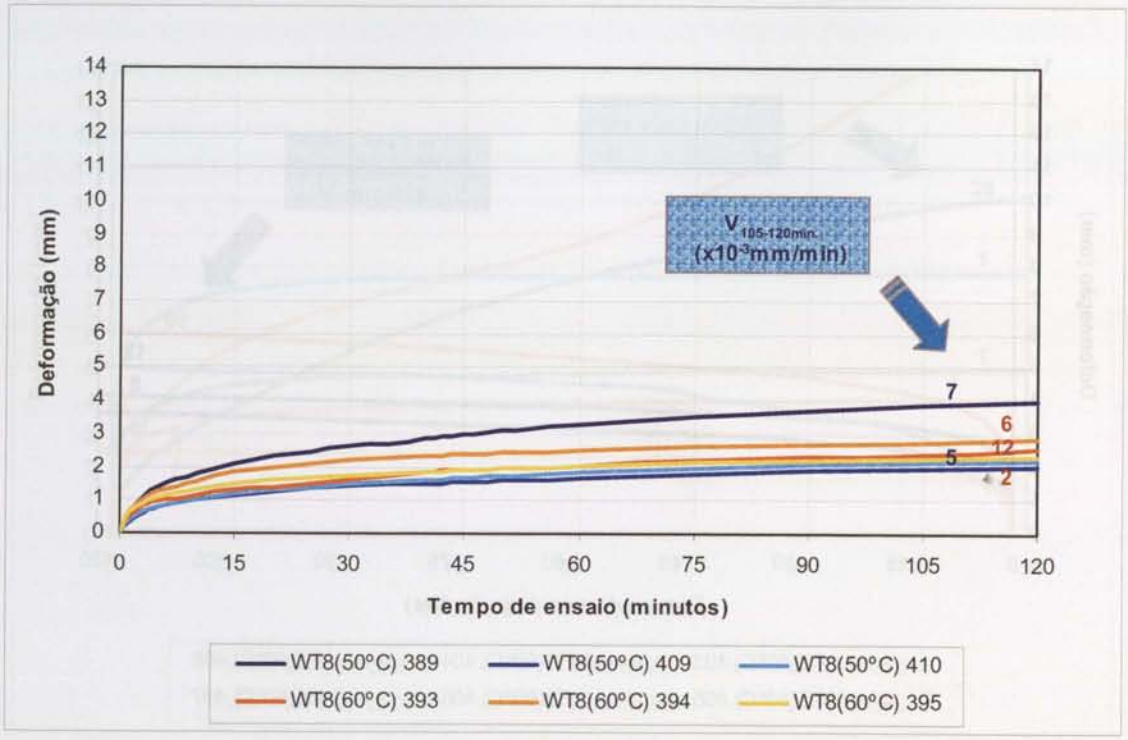


Fig. 6.38 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com 4 meses

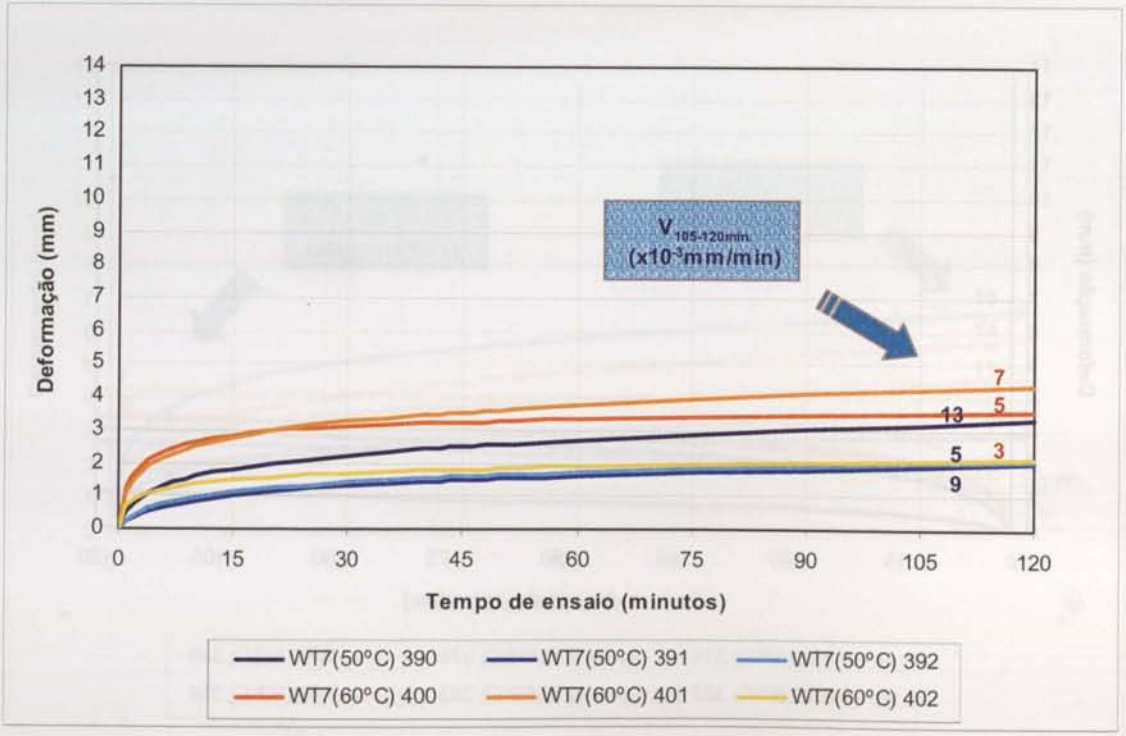


Fig. 6.39 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes com cura acelerada

No âmbito dos estudos para avaliação do comportamento às deformações permanentes da mistura betuminosa, foram realizados no LNEC, ensaios com o *wheel tracking*, também com amostras recolhidas em obra. Para este efeito, foram serradas lajetas da obra, conforme se retrata na Fig. 6.40. Destas lajetas extraíram-se seis provetes para ensaio, com dimensões de 30x30x5 cm^3, que se designaram por O6, O7, O8, O9, O19 e O11.



Fig. 6.40 – Extração de lajetas na obra da EN 120 – O/LDF

A baridade dos provetes (determinada segundo a norma ASTM D2726), bem como os resultados obtidos no ensaio em pista de laboratório, apresentam-se no Quadro 6.13 e na Fig. 6.41.

Quadro 6.13 – Ensaios de simulação em pista de laboratório realizados sobre provetes recolhidos em obra: baridades dos provetes e resumo dos resultados obtidos

Identificação dos provetes		Baridade seca γ_d (g/cm^3)	Temperatura de ensaio	Velocidade de deformação (x 10^{-3} mm/min.)		
Lote	Número			$V_{30-45min}$	$V_{75-90min}$	$V_{105-120min}$
WTc	O6	2.102	50°C	12	6	5
	O7	2.104		17	7	5
	O8	2.104		11	6	5
	O9	2.107	60°C	15	7	5
	O10	2.116		25	13	7
	O11	2.111		14	7	5

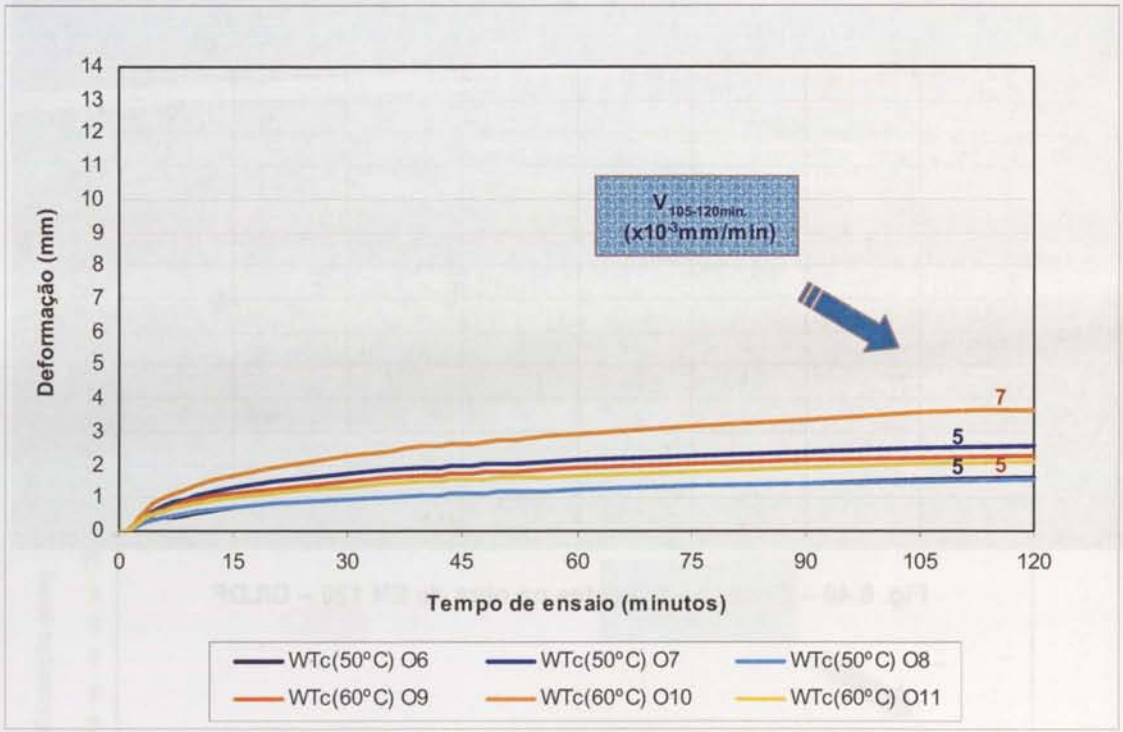


Fig. 6.41 – Resultados dos ensaios em pista de laboratório, provetes recolhidos em obra (EN120-O/LDF)

Da leitura do Quadro 6.12 e do Quadro 6.13 verifica-se que as baridades obtidas nos provetes compactados por vibro-compressão são ligeiramente superiores às dos provetes recolhidos em obra.

A observação das Figuras 6.34 a 6.39, bem como da Fig. 6.41 permite constatar que os diversos provetes ensaiados apresentam comportamentos às deformações permanentes semelhantes.

À excepção dos provetes com idades muito jovens (1 dia) todos os outros apresentam um bom desempenho. Para provetes com 1 dia de idade, verifica-se que o comportameto dos provetes ensaiados é muito variável, podendo mesmo vir a ocorrer a fase 3.

Como se referiu, uma mistura a aplicar numa camada de desgaste ou de regularização num pavimento de classe de tráfego T3, localizado numa zona de temperatura quente, não deve apresentar uma velocidade de deformação entre os 105 e 120 min. (norma NLT173/84), superior a $20x10^{-3}$mm/min.

Da leitura dos resultados obtidos, verificamos que os provetes ensaiados, à excepção dos mais jovens (1 dia de idade) apresentam velocidades de deformação inferiores à recomendada, pelo que se conclui que a mistura apresenta, neste ponto de vista, um bom comportamento às deformações permanentes em termos de velocidade de deformação na fase 2, confirmando os resultados já obtidos para os ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas.

Da mesma forma, para idades jovens das misturas, obtiveram-se deformações iniciais relativamente elevadas, mas que foram tendo cada vez menos significado para os provetes com idades mais avançadas.

6.5 - Determinação do módulo de deformabilidade

6.5.1 - Generalidades

Nos diversos modelos reológicos abordados na subsecção 6.2.1 o módulo de deformabilidade é um dos parâmetros que intervêm na descrição do comportamento dos materiais do pavimento.

Assim, um dos objectivos fundamentais dos ensaios de caracterização destes materiais consiste precisamente na determinação deste parâmetro e no estudo dos diversos factores que o afectam.

Os materiais betuminosos são, regra geral, muito sensíveis à temperatura podendo esta alterar o seu comportamento que variará entre predominantemente elástico, com uma relação directa e reversível entre as tensões aplicadas e as deformações resultantes para temperaturas mais baixas e o comportamento predominantemente viscoso em que a

deformação resultante da aplicação de cargas é função do tempo, no caso de temperaturas mais elevadas.

Assim, uma abordagem corrente na caracterização de misturas betuminosas, para ensaios realizados no domínio das pequenas deformações, consiste na consideração do módulo de deformabilidade ($E_{mist.}$) que corresponde à relação entre a amplitude de tensão aplicada e a correspondente extensão para determinadas condições de temperatura (T) e frequência do carregamento (f).

A caracterização dos materiais à luz desta abordagem consiste na aplicação de um carregamento cíclico (com uma dada velocidade angular $\omega = 2\pi f$) do tipo $\sigma(t) = \sigma_0 sen(\omega t)$ aos corpos de prova e na medição da resposta em termos de deformações. Essa resposta será, no caso geral do comportamento com componente viscosa, desfasada de um ângulo de fase (ϕ), relativamente à acção aplicada. Nestas condições as deformações obtidas serão dadas por $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 sen(\omega t - \phi)$.

Os materiais puramente elásticos têm resposta imediata (sem desfasamento), pelo que se terá $\phi = 0$. Já os materiais puramente viscosos têm $\phi = \pi / 2$. Neste caso, os máximos da resposta em termos de deformações corresponderão aos mínimos das cargas aplicadas e *vice-versa*.

Segundo este tipo de abordagem, define-se o módulo complexo (E^*) por $E^* = (\sigma_0 / \varepsilon_0) e^{i\phi}$, correspondendo o módulo de deformabilidade da mistura ao valor absoluto do módulo complexo, ou seja, $E_{mist.} = |E^*| = \sigma_0 / \varepsilon_0$.

Para a determinação do módulo de deformabilidade das misturas a frio em apreço realizaram-se não só ensaios de compressão diametral a tensão controlada sobre provetes cilíndricos, como também ensaios de flexão em extensão controlada sobre provetes prismáticos. Estes ensaios, bem como os resultados obtidos, descrevem-se nas secções que se seguem.

6.5.2 - Ensaios de compressão diametral com o *Nottingham Asphalt Tester*

6.5.2.1 - Descrição dos métodos de 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, que se retrata na Fig. 6.42.

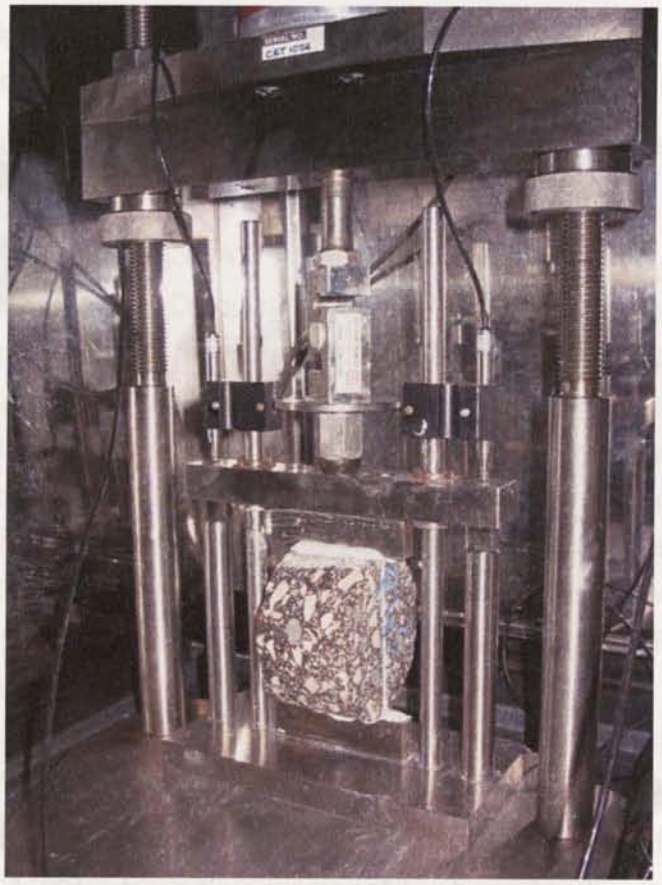


Fig. 6.42 – Ensaio de compressão diametral no NAT

Este equipamento, que permite, tal como referido em 6.4.2.1, a realização de ensaios de compressão uniaxial, permite também, através da adaptação do sistema de montagem do provete e de aplicação das cargas, a realização de ensaios de cargas repetidas em compressão diametral, tal como se ilustra na Fig. 6.43.

A adaptação do equipamento relativamente à configuração dos ensaios de compressão uniaxial, é feita de forma a acomodar e carregar os provetes cilíndricos segundo duas geratrizes diametralmente opostas. Assim, neste tipo de ensaios, o provete é colocado entre duas barras de aço, que têm uma das faces côncavas, de dimensões (largura e concavidade) ajustadas à dimensão da amostra a ensaiar. O provete apoia sobre a face côncava da barra inferior, e o carregamento é-lhe transmitido através da barra superior, cuja face côncava assenta sobre o mesmo.

Neste caso, o sistema de carregamento permite a aplicação de uma carga pulsante, como a que se ilustra na Fig. 6.43. 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-se-á o nome de "tempo de aumento de carga (t_{AC})".

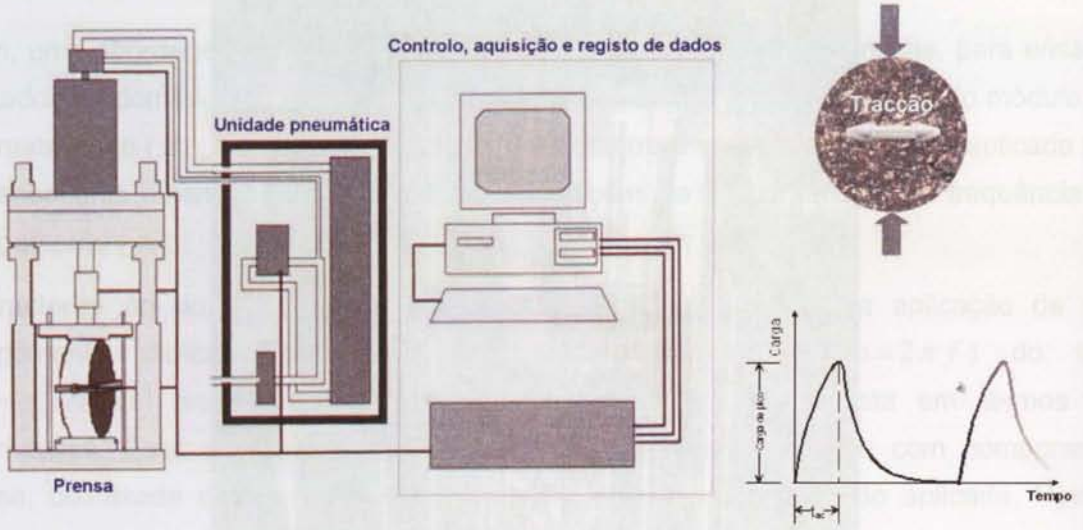


Fig. 6.43 – Equipamento de ensaio NAT

Para a realização deste tipo de ensaios, a norma britânica BS DD 213: 1993 prevê a utilização de provetes cilíndricos de diâmetros nominais de 100±5 mm, 150±5 mm ou 200±5 mm, e altura compreendida entre 30 e 80 mm. Esta norma preconiza que a forma de aplicação da carga seja tal como a representada na Fig. 6.43, com um t_{AC} de 124±4 ms. No que concerne à temperatura de ensaio, é recomendado um valor de 20±5ºC, sendo igualmente permitidos outros valores.

Na pré-norma europeia prEN 12697-23: 2003 relativa à determinação da resistência à fadiga de misturas betuminosas a quente, um dos ensaios contemplados é o de tracção indirecta sobre provetes cilíndricos. O ensaio consiste em submeter o provete cilíndrico a cargas repetidas de compressão, através do plano vertical diametral, com uma distribuição tipo *haversine* durante 0,1 s, seguida de um período de repouso de 0,4 s. A amplitude do carregamento (vertical) no início do ensaio deverá ser de 250 kPa, devendo no entanto este valor ser ajustado, caso a extensão medida nos primeiros 10 carregamentos, não se situe dentro do intervalo entre 100 e 400 μm/m.

As dimensões dos provetes cilíndricos a ensaiar segundo este procedimento são de 100±3 mm ou de 150±3 mm. A dimensão das barras de aço são, como no caso anterior, definidas em função da dimensão dos provetes a ensaiar, e a dimensão destes é função, entre outros factores, da dimensão máxima do agregado. No caso de se utilizarem provetes com 100 mm de diâmetro, a dimensão máxima do agregado é de 25 mm, pelo que a mistura

a frio em estudo pode ser estudada em provetes com estas dimensões. A espessura mínima dos provetes, neste caso, é de 40 mm.

Esta norma define que o módulo de deformabilidade "inicial" da mistura é o obtido ao fim de 100 ciclos de carga.

No caso dos ensaios realizados no NAT, foram utilizados provetes com cerca de 100 mm de diâmetro e 64 mm de espessura. O equipamento permite a aplicação de uma carga tal que a máxima tensão de tracção horizontal no centro do provete esteja compreendida entre 50 e 700 kPa, tendo-se adoptado um valor de 100 kPa para determinação do módulo de deformabilidade. Este valor, mais próximo do intervalo inferior da gama de valores permitidas, foi adoptado tendo em atenção que se pretendia ensaiar provetes com idades jovens, cujo módulo de deformabilidade se estimava ser reduzido. A aplicação de tensões demasiado elevadas poderia conduzir a deformações excessivas destes provetes e assim, inviabilizar a determinação do módulo de deformabilidade em condições adequadas, e seguidamente, a realização do ensaio de resistência à fadiga. No que concerne ao "tempo de aumento da carga" adoptou-se o valor de 124 ms. O número de ciclos do ensaio para determinação do módulo foi de 100 ciclos, excepto, para alguns provetes com 1 dia de idade, onde apenas se aplicaram 50 ciclos por forma a não danificar o provete.

O ensaio é conduzido em condições de tensão controlada, medindo-se a deformação resultante dos sucessivos impulsos de carga. O controlo dos impulsos é feito pelo *software* do equipamento, sendo necessário especificar qual a tensão máxima de tracção (indirecta) pretendida para o provete. O programa admite as seguintes simplificações para o cálculo do estado de tensão dentro do provete, e consequentemente, para a avaliação da carga que lhe é aplicada:

- O provete está submetido a um estado de tensão plana;
- O comportamento é elástico linear;
- O material é homogéneo e isotrópico;
- O coeficiente de *Poisson* é constante e conhecido (assume-se que para uma temperatura de 20ºC tem o valor de 0,35);
- O carregamento aplicado corresponde a uma carga de "faca".

De acordo com estas simplificações, a relação entre a carga aplicada e a tensão máxima de tracção é dada pela expressão:

$$\sigma_x(máx.)=\frac{2P}{\pi D h} \quad \text{onde} \tag{6.9}$$

$\sigma_x(máx.)$ - tensão máxima de tracção horizontal no centro do provete (Pa)

P - Carga aplicada (N)

D - Diâmetro do provete (m)

h - Espessura do provete (m)

Assim, para o caso concreto das condições de ensaio utilizadas ($\sigma_x(máx.)=100kPa$), bem como para as dimensões dos provetes ensaiados ($D=102mm$ e $h=64mm$), tem-se que a carga (P) tem o valor de 1 kN, a que corresponde uma pressão de cerca de 1000 kPa.

Para estudar a distribuição do campo de tensões, deformações e deslocamentos nos provetes cilíndricos da mistura betuminosa estariam submetidos neste tipo de ensaios, recorreu-se ao programa FLAC3D, no qual não é necessário admitir que o provete está sujeito a um estado plano de tensão.

Embora saia fora do âmbito deste trabalho a descrição detalhada do programa utilizado, refere-se que o programa FLAC3D permite a resolução de problemas de equilíbrio tridimensional através do método das diferenças finitas. O programa permite incorporar diversos modelos reológicos, desde os mais simples, elástico-linear, elástico bi-linear até modelos sofisticados dos quais se destacam os modelos de comportamento elasto-perfeitamento plástico com critérios de rotura de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager ou mesmo com endurecimento/amolecimento como seja o modelo Cam-clay (Itasca, 1997).

Os provetes ensaiados são cilíndricos e apresentam, em média, 102 mm de diâmetro e 64 mm de altura. O ensaio consiste, como já foi descrito, na aplicação de uma carga numa "faixa" centrada com a geratriz superior do cilindro, encontrando-se a "faixa" centrada na geratriz diametralmente oposta apoiada (*vd* Fig. 6.43). A ligação dos apoios ao provete é feita pela colocação de uma argamassa de gesso que, por um lado garante a solidarização entre o provete e os apoios metálicos e, por outro assegura a transmissão uniforme do carregamento.

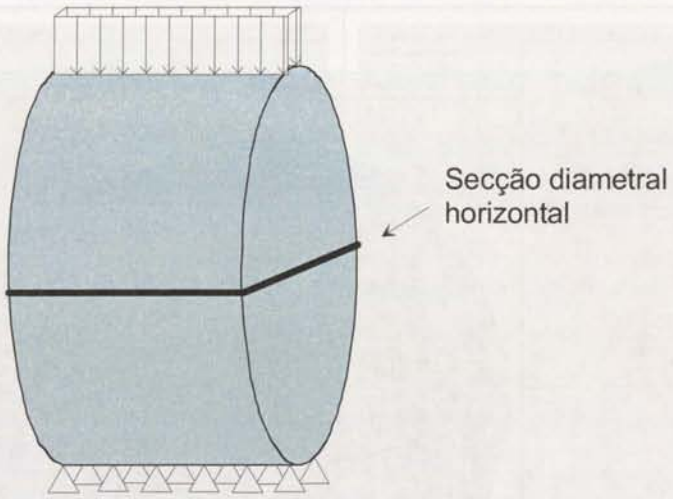


Fig. 6.44 – Localização da secção diametral horizontal do provete cilíndrico

O modelo geométrico para a resolução pelo método das diferenças finitas simula as condições em que se encontra o provete em ensaio, como se descreve seguidamente. Na Fig. 6.45 apresenta-se o modelo geométrico do provete no programa FLAC3D. O provete encontra-se discretizado em 6 000 elementos paralelepipédicos *("brick")* que interconectam 6 000 pontos da grelha de diferenças finitas.

No topo inferior da malha, as condições de apoio consideradas são de deslocamentos (x, y, z) impedidos de forma a simular o efeito do apoio do equipamento de ensaio e a colocação da argamassa de gesso. No topo superior, apenas são impedidos os deslocamentos horizontais (em x e y) sendo o deslocamento z permitido de forma a possibilitar a aplicação do carregamento.

Não obstante o modelo geométrico ser simétrico decidiu-se não simplificar a discretização da malha tirando partido dessas condições dado que se considera que a análise visual dos resultados (diagramas de tensões, etc.) se torna mais sugestiva com a totalidade do modelo.

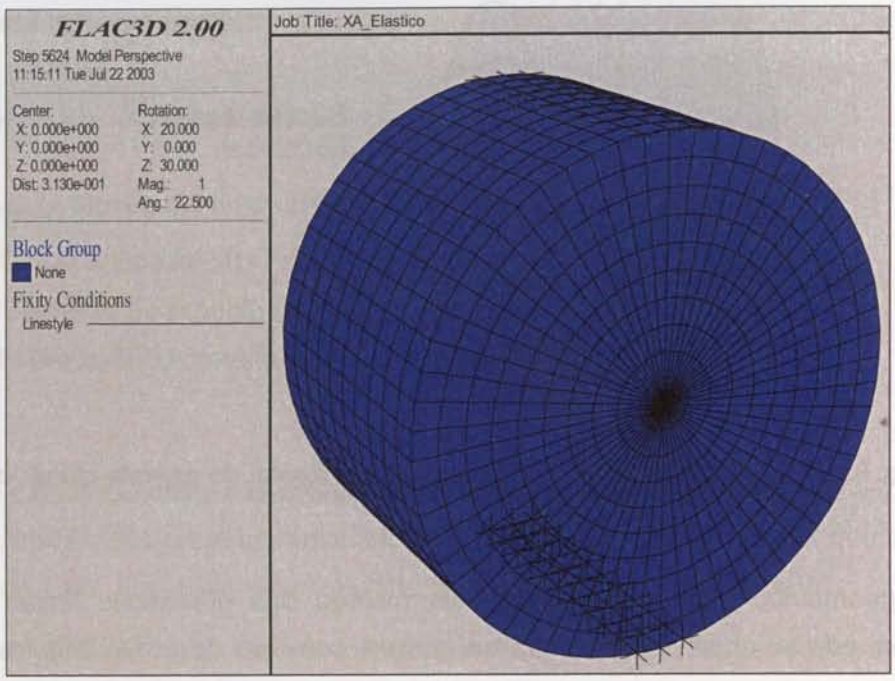


Fig. 6.45 – Modelo geométrico do provete

Para o estudo da distribuição de tensões no provete recorreu-se ao modelo elástico-linear que permite o estabelecimento da solução teórica e a determinação da distribuição das tensões máximas no provete.

Na Fig. 6.46 apresenta-se a distribuição espacial das tensões obtidas, apresentando-se ainda, em pormenor, a distribuição das tensões horizontais segundo o eixo dos *xx* segundo um plano horizontal que intersecta o provete. No modelo numérico foi aplicada uma carga de tensão vertical de 1000 kPa no topo da amostra.

Da análise dos resultados ressalta o andamento da distribuição de tensões no espaço tridimensional do provete. Em primeiro lugar, apesar de a carga aplicada ser de 1000 kPa, o carácter tridimensional do provete origina uma distribuição de tensões no topo com um valor máximo superior a esta tensão na zona central da "faixa" de aplicação da carga e com valores inferiores nas proximidades dos extremos do provete, onde não existe confinamento lateral.

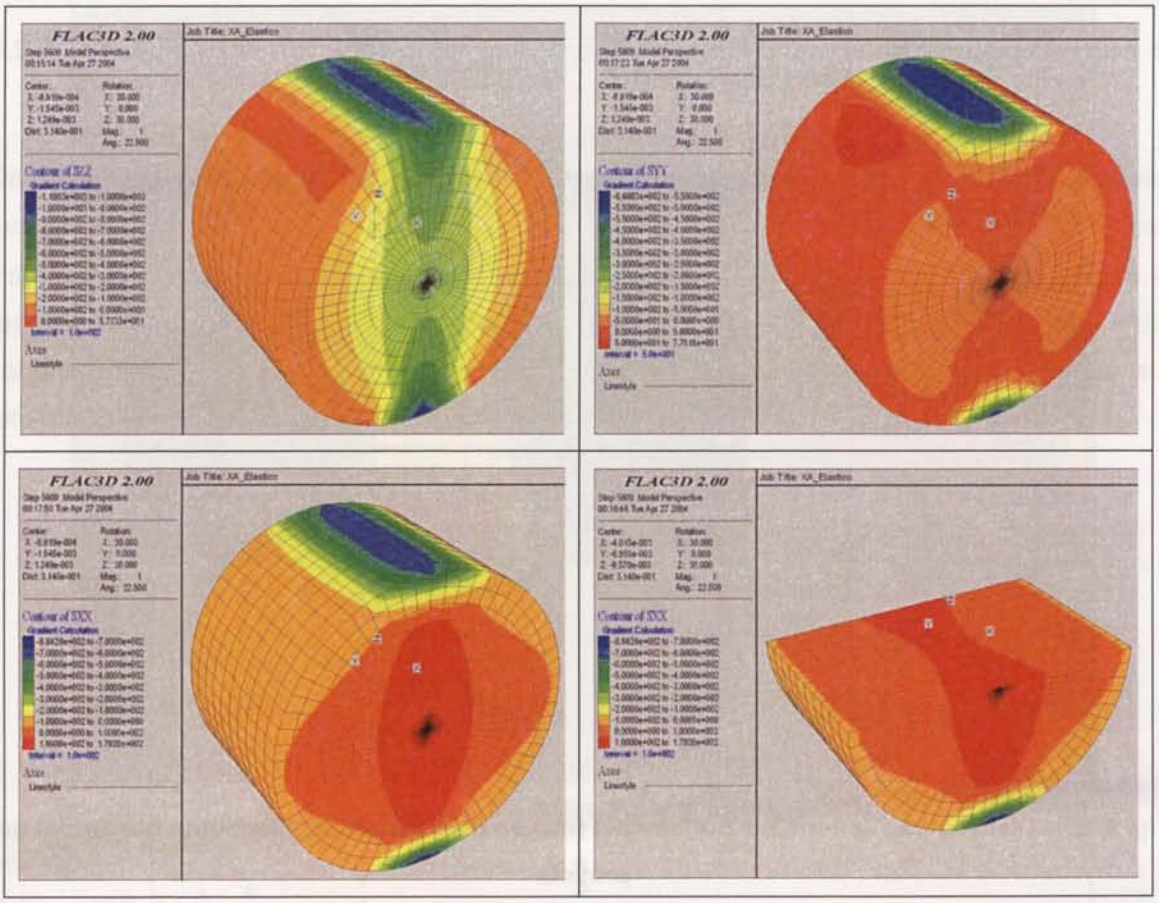


Fig. 6.46 – Distribuição de tensões no provete

Na Fig. 6.47 apresenta-se, em detalhe, a distribuição de tensões horizontais (pormenor da quarta imagem da Fig. 6.46) verificando-se que as zonas onde se registam as maiores tracções (cerca de 15,6% da carga aplicada) se localizam junto dos topos do provete (bases do cilindro). No interior a tensão máxima de tracção é de cerca de metade deste valor (8%).

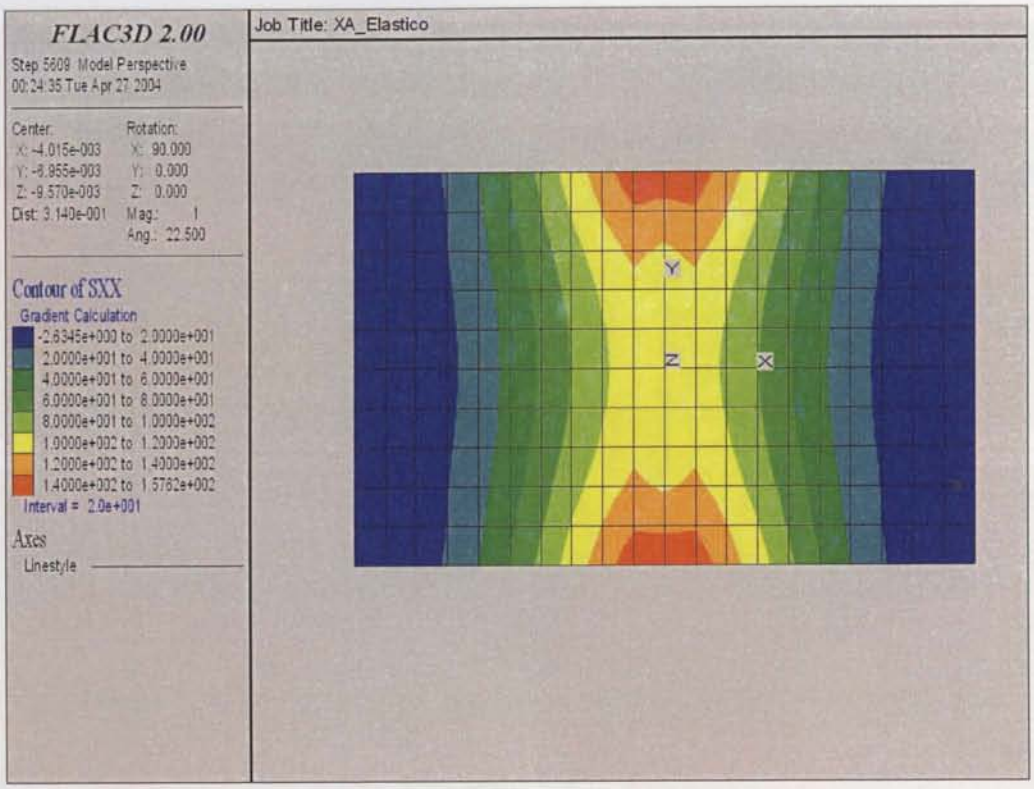


Fig. 6.47 – Distribuição de tensões horizontais (σ_{xx}) ao nível da secção diametral horizontal do provete

Da observação da Fig. 6.47 verifica-se que as tensões horizontais de tracção são, conforme previsto no modelo teórico em estado plano de tensão, de cerca de 100 kPa no centro do provete, mas apresentam valores de cerca de 150 kPa na vizinhança do eixo do provete junto aos bordos, onde não há continuidade. Sendo esta a zona de maior tensão será naturalmente por ela que se iniciará a formação de fendas e a rotura do provete.

Nos ensaios para determinação do módulo de deformabilidade de misturas a frio com diferentes idades e condições de cura, a temperatura de ensaio foi de 20ºC. Nestas condições, constatou-se que o número de ciclos de carga a aplicar até se obter uma estabilização dos deslocamentos medidos e das forças aplicadas, deveria ser, consoante a idade das misturas, no mínimo da ordem de 50 ou de 100, respectivamente, para misturas de idade jovem (um ou dois dias) ou com o processo de cura mais avançado (uma ou mais semanas).

Para avaliação da influência da temperatura no módulo de deformabilidade ensaiaram-se provetes com uma mesma idade e condições de cura e variou-se a temperatura entre 0 e 50ºC. Os ensaios realizados sobre um mesmo provete iniciaram-se pelas temperaturas mais baixas, por forma a não induzir deformações permanentes importantes no mesmo.

6.5.2.2 - Evolução do módulo de deformabilidade ao longo do processo de cura da mistura

De acordo com o programa de trabalhos estabelecido, ensaiaram-se no NAT provetes moldados em laboratório, com diversas idades, e com diferentes condições de cura, com vista a avaliar o modo de variação do módulo de deformabilidade das misturas. Na Fig. 6.48 representam-se graficamente os resultados obtidos, em função da idade dos provetes e das condições de cura a que estes foram submetidos. Estes resultados referem-se, na sua totalidade, a ensaios à temperatura de 20ºC.

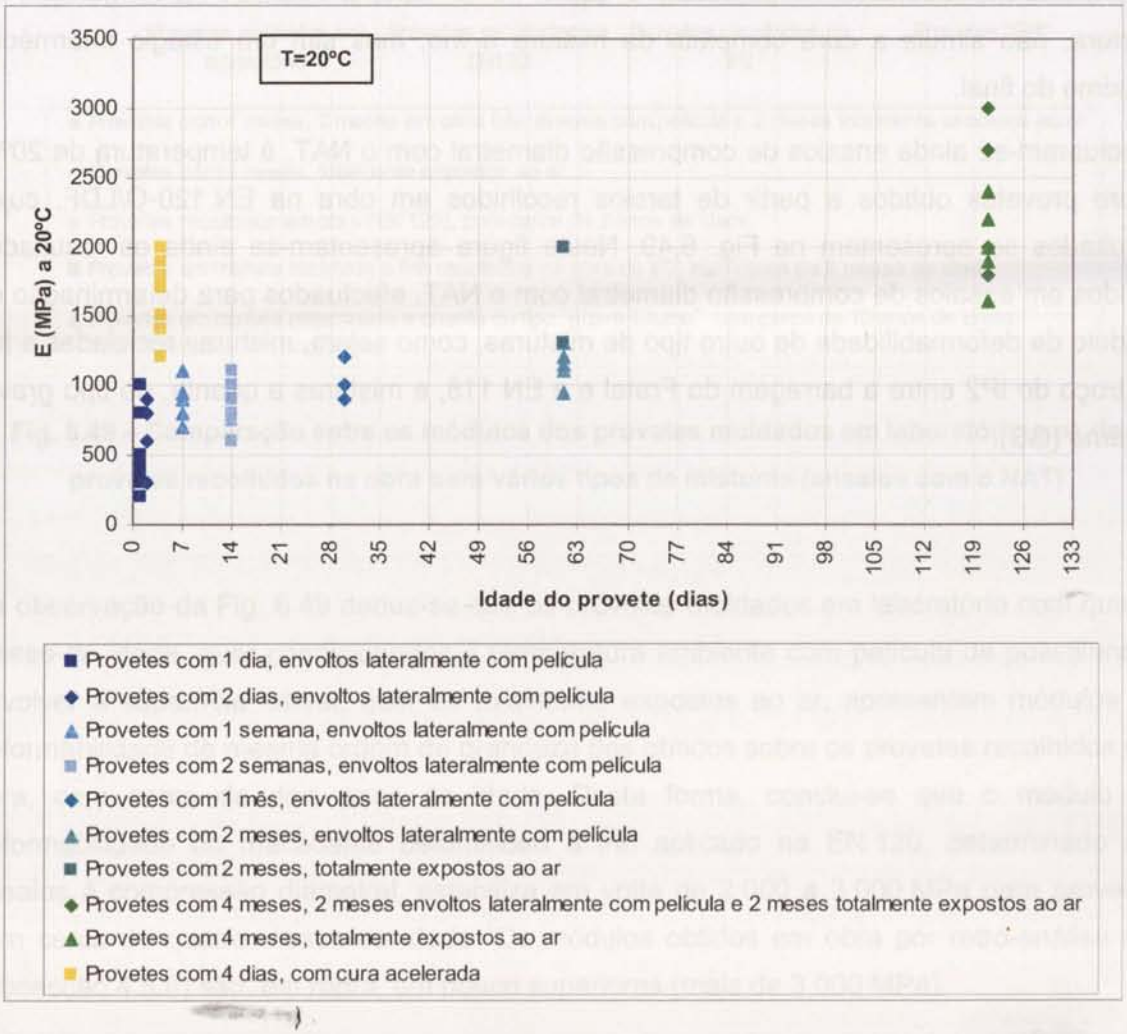


Fig. 6.48 – Módulos de deformabilidade de provetes de macadame betuminoso a frio moldados em laboratório, determinados em ensaios com o NAT

A análise dos resultados representados na Fig. 6.48 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.

O módulo de deformabilidade obtido para os provetes submetidos a cura acelerada é da mesma ordem de grandeza que o obtido para provetes com dois meses de idade, e inferior ao obtido para provetes com quatro meses de idade. Este facto revela que a cura acelerada a que foram submetidos os provetes, e que é semelhante à utilizada na formulação da mistura, não simula a cura completa da mistura a frio, mas sim um estágio intermédio, próximo do final.

Efectuaram-se ainda ensaios de compressão diametral com o NAT, à temperatura de 20ºC, sobre provetes obtidos a partir de tarolos recolhidos em obra na EN 120-O/LDF, cujos resultados se apresentam na Fig. 6.49. Nesta figura apresentam-se ainda os resultados obtidos em ensaios de compressão diametral com o NAT, efectuados para determinação do módulo de deformabilidade de outro tipo de misturas, como sejam, misturas recicladas a frio no troço do IP2 entre a barragem do Fratel e a EN 118, e misturas a quente, do tipo *grave--bitume* (GB).

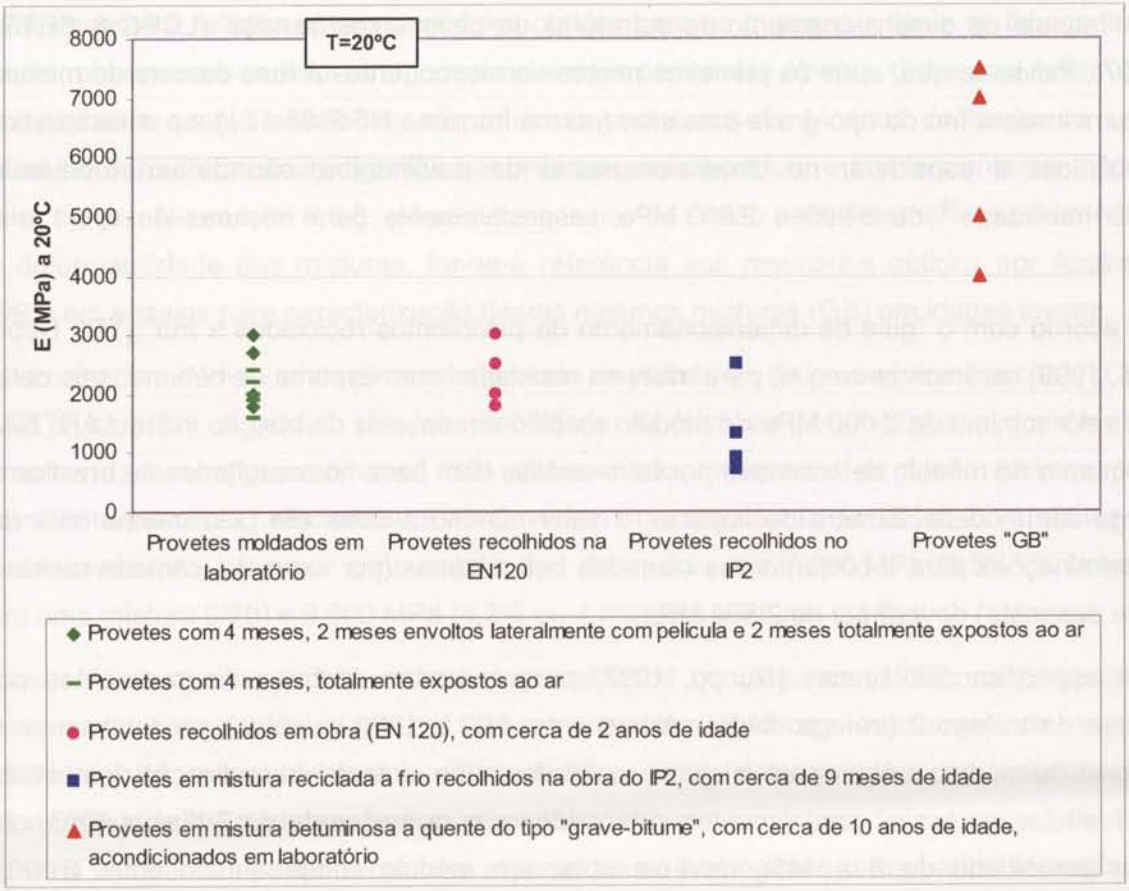


Fig. 6.49 – Comparação entre os módulos dos provetes moldados em laboratório e os de provetes recolhidos na obra para vários tipos de misturas (ensaios com o NAT)

Da observação da Fig. 6.49 deduz-se 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 (*vd* subsecção 4.5.8) são, em regra, um pouco superiores (mais de 3 000 MPa).

No "manual de dimensionamento de estruturas de pavimentos francês" (LCPC & SETRA, 1997), indica-se que, após os primeiros meses correspondentes à fase de cura de misturas betuminosas a frio do tipo *grave-émulsion* (norma francesa NF P 98-121), as características mecânicas a considerar no dimensionamento de pavimentos, são de um módulo de deformabilidade[10] de 3 000 e 2 000 MPa, respectivamente para misturas do tipo 1 e do tipo 2.

De acordo com o "guia de dimensionamento de pavimentos reciclados a frio" (TRL Report 386, 1999) recomenda-se que, para misturas recicladas com espuma de betume, seja obtido um valor mínimo de 2 000 MPa de módulo medido em ensaios de tracção indirecta no NAT. Já quanto ao módulo determinado por retro-análise com base nos resultados de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto, o valor mínimo a obter em pelo menos 85% das determinações para o conjunto das camadas betuminosas (por exemplo, camada reciclada e de desgaste) deverá ser de 2 500 MPa.

Nas especificações suecas (Ruopp, 1997) para camadas de base de pavimentos com classe de tráfego 2 (tráfego diário máximo entre 500 e 1500 veículos), preconizam-se os valores de módulo a obter para misturas recicladas a frio, quando da realização dos estudos de formulação. Assim, para provetes submetidos a cura acelerada de 7 dias a 40°C, com uma porosidade de 6 a 14%, deve-se obter um módulo compreendido entre 2 000 e 5 000 MPa.

Apesar dos valores preconizados nos documentos acima referidos, não serem directamente comparáveis com os obtidos no presente trabalho (condições de ensaio diferentes, misturas recicladas/novas), considera-se que os valores de módulo determinados em ensaios de compressão diametral das misturas do tipo macadame betuminoso a frio curadas, se enquadram nos valores preconizados nesses documentos.

Assim, e atendendo a que as condições de ensaios à compressão diametral de provetes cilíndricos tal como foram executados no âmbito do presente estudo, são mais desfavoráveis do que as condições de obra, onde por exemplo, existe confinamento lateral da mistura, considera-se razoável adoptar com segurança, quando do dimensionamento de camadas em macadame betuminoso a frio, um valor para o módulo de deformabilidade, à temperatura de 20°C, das misturas, de cerca de 3 000 MPa, após conclusão do processo de cura.

[10] Módulo de deformabilidade determinado em ensaios de flexão (dois pontos, provetes trapezoidais) conduzidos a 15°C, e com uma frequência de 10 Hz.

Relativamente à relação entre os módulos obtidos para as misturas a frio e as fabricadas a quente, observaram-se valores algo mais elevados para estas últimas. Cabe aqui referir que as misturas a quente ensaiadas, são misturas com cerca de 14 anos de idade, ou seja, tratam-se de materiais com ligantes betuminosos envelhecidos, e consequentemente com maior rigidez. Na secção 6.5.3, referente a ensaios de flexão para determinação do módulo de deformabilidade das misturas, far-se-á referência aos resultados obtidos por Azevedo (1993) em ensaios para caracterização destas mesmas misturas (GB) em idades jovens.

De acordo com o "manual de dimensionamento de estruturas de pavimentos francês" (LCPC & SETRA, 1997), o módulo de deformabilidade de misturas betuminosas a quente para camadas de base *("grave-bitume"*, GB), determinado em ensaios de flexão (dois pontos, provetes trapezoidais) efectuados a 15ºC, e com uma frequência de 10 Hz, para efeitos de dimensionamento, deve ser consoante o tipo de mistura, de 7 000 MPa (3,5% de betume para uma mistura 0/20) e 9 000 MPa (4,2% ou 4,5% para misturas 0/14).

Acrescenta-se que no âmbito de estudos realizados por Antunes (1993), se efectuaram ensaios de compressão diametral sobre provetes cilíndricos resultantes de tarolos recolhidos de um pavimento aeroportuário, para determinação do módulo de deformabilidade de misturas do tipo macadame betuminoso fabricado a quente (MB). Os provetes recolhidos apresentavam um aspecto pouco homogéneo, uma baridade média de 2,42 g/cm^2, um teor em betume recuperado da mistura de 2,0%, cuja penetração era de 38 x 10^{-1}mm e temperatura de amolecimento de anel e bola de 56ºC. Os valores obtidos para o módulo de deformabilidade, a uma temperatura de 20ºC, em quatro amostras ensaiadas variaram entre cerca de 6 000 MPa e 8 000 MPa, apresentando alguma variabilidade no seu comportamento.

Da mesma forma, refere-se que se observou no presente estudo, quer para ensaios realizados sobre provetes moldados em laboratório, em condições controladas, quer para ensaios realizados sobre os provetes recolhidos em obra, alguma dispersão dos valores obtidos. Considera-se pois, que na execução deste tipo de ensaios, o número mínimo de repetições deve ser de 5 provetes, tal com recomendado na pré-norma europeia.

6.5.2.3 - Influência da temperatura no módulo de deformabilidade das misturas

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 50ºC.

À semelhança do apresentado em 6.5.2.2, realizaram-se ensaios não só sobre provetes moldados em laboratório para duas condições de cura, mas também sobre provetes de mistura reciclada aplicada na obra de reabilitação do IP2, e ainda, sobre provetes em mistura a quente do tipo *grave-bitume* (Azevedo, 1993).

Paralelamente, utilizando as leis para previsão do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas a quente da Shell (1998), em função do tipo de betume, da composição volumétrica da mistura, da temperatura e do tempo de carga, estimou-se o módulo de deformabilidade de misturas com as mesmas características das misturas a frio em apreço, tal como se apresenta no Quadro 6.14. Para a definição das características do betume residual das misturas tomaram-se em linha de conta os resultados apresentados no Capítulo 5, referentes à caracterização do ligante recuperado em misturas com diferentes idades. Desta forma, consideraram-se três fases: a primeira em que o betume é mais brando (misturas com cerca de 1 semana de idade), a segunda correspondendo a uma fase intermédia, e uma terceira, em que o betume se apresenta mais duro (misturas com mais de 4 meses de idade), correspondendo à fase em que supostamente já foi concluído o processo de cura da mistura.

Quadro 6.14 – Módulos de deformabilidade previstos através da aplicação das leis da Shell

	Ensaio		Características do betume					Características da mistura						
			Pen											
	f (Hz)	T (°C)	Pen ($\times 10^{-1}$ mm)	T (°C)	T_{AB} (°C)	S_b (MPa)	T_b (%)	γ_{betume} (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	$\gamma_{máx.t.}$ (g/cm^3)	V_b (%)	V_a (%)	V_v (%)	$E_{mist.}$ (MPa)
Shell1	2,5	0	80	25	47	181	3,9	1,03	2,25	2,50	9	81	10	9840
		5				87,2								6690
		10				44,1								4440
		15				18,9								2670
		20				7,14								1490
		21,8				5,01								1200
Shell2	2,5	0	60	25	50	235	3,9	1,03	2,25	2,50	9	81	10	11200
		5				129								8270
		10				62								5450
		15				29,6								3490
		20				11,9								2020
		24,5				5,04								1210
Shell3	2,5	0	40	25	53	423	3,9	1,03	2,25	2,50	9	81	10	15200
		5				237								11300
		10				118								7900
		15				57,9								5230
		20				25,8								3220
		25				9,81								1800
		28,3				5,08								1210

LEGENDA: f – frequência do carregamento; T – temperatura de ensaio;
Pen – penetração do betume residual à temperatura T (25°C, 100g, 5s); T_{AB} – temperatura de amolecimento de anel e bola do betume residual;
S_b – módulo de rigidez do betume
T_b – teor de betume residual da mistura; γ_{betume} – baridade do betume; γ_d – baridade seca da mistura; $\gamma_{máx.t.}$ – baridade máxima teórica;
V_b – percentagem volumétrica de betume; V_a – percentagem volumétrica de agregados; V_V – percentagem volumétrica de vazios (porosidade);
$E_{mist.}$ – módulo de deformabilidade da mistura

Para uma avaliação da influência da temperatura no módulo de deformabilidade das misturas a frio, compararam-se ainda os valores obtidos, com os determinados, por retroanálise, num estudo levado a cabo por Antunes (1993) para avaliação do módulo de deformabilidade de uma mistura de macadame betuminoso a quente (MB). Os valores dos módulos de deformabilidade foram estimados com base em ensaios de carga com o deflectómetro de impacto num pavimento com uma camada de macadame betuminoso com 10 cm de espessura e duas camadas de betão betuminoso com uma espessura total de

15 cm. A relação entre módulos de deformabilidade deduzidos dos ensaios de carga com o deflectómetro de impacto (E_{DI}^{MB}) e as temperaturas do macadame betuminoso (T) obtida no referido estudo é a dada pela seguinte equação:

$$E_{DI}^{MB}(T) = 7242{,}0 - 160{,}4T \quad \text{(com } T \text{ compreendido entre 0 e 30ºC)} \qquad \textbf{(6.10)}$$

Nas Figuras 6.50 a 6.52 representam-se graficamente os módulos de deformabilidade obtidos em função da temperatura de ensaio, para os diversos tipos de misturas ensaiadas e consideradas.

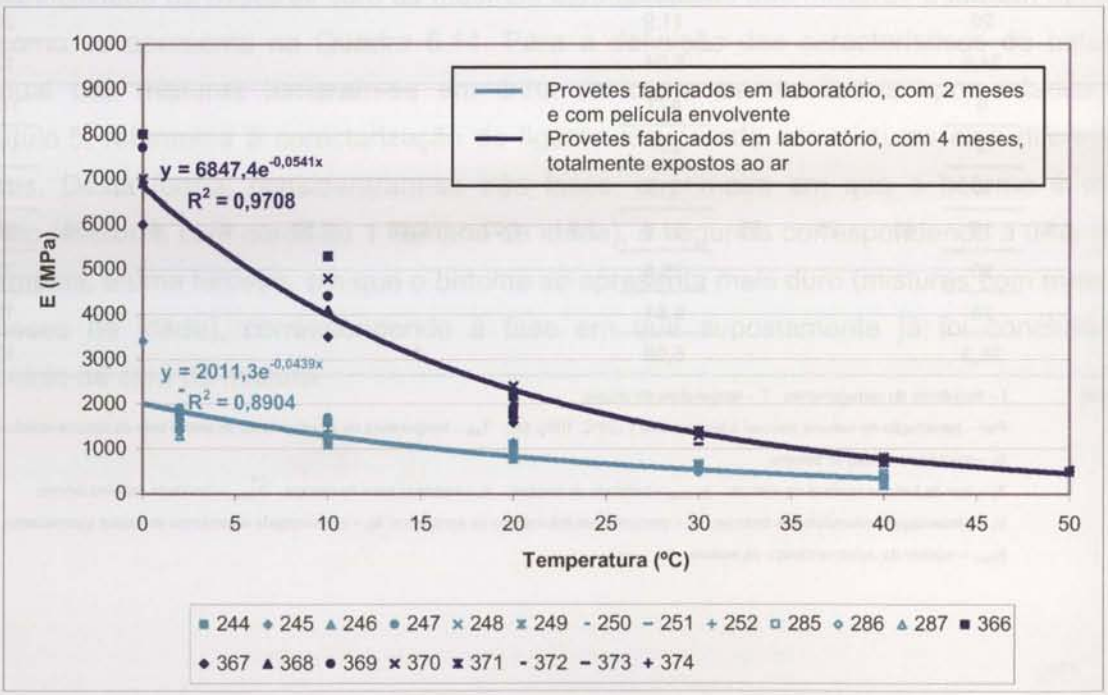


Fig. 6.50 – Variação do módulo de deformabilidade com a temperatura de provetes em macadame betuminoso a frio, submetidos a diferentes condições de cura

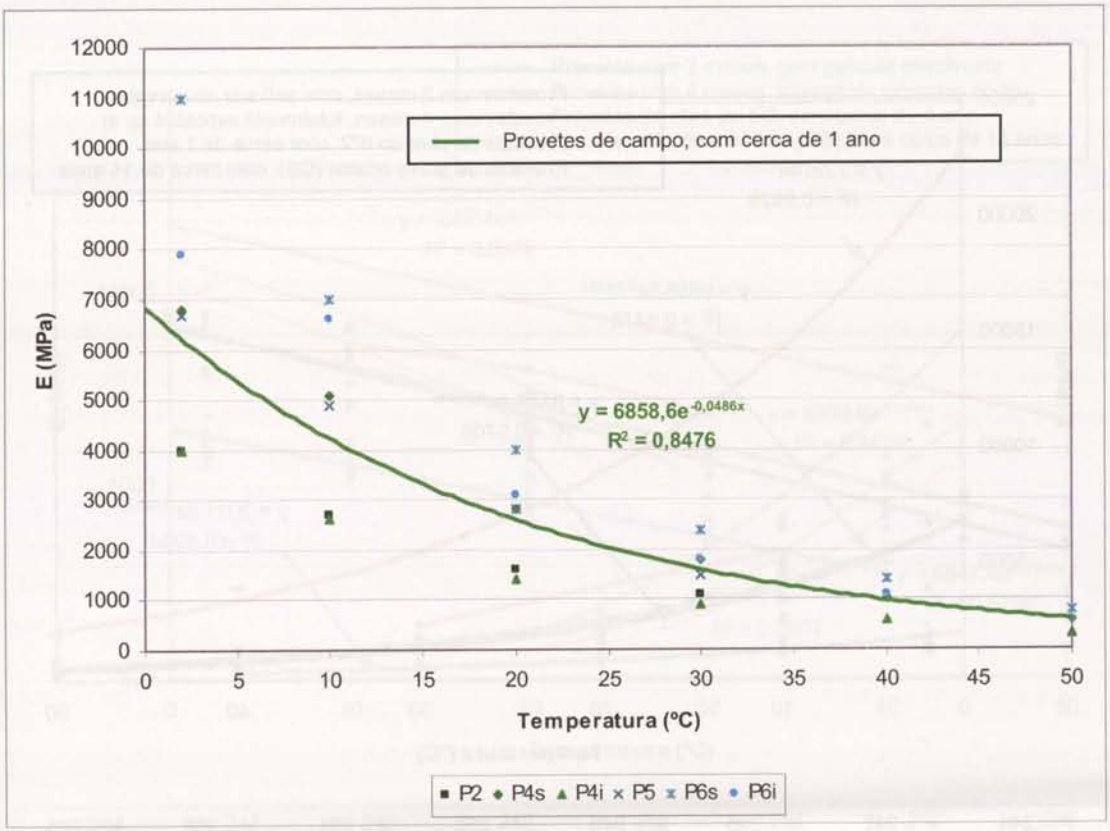


Fig. 6.51 – Variação do módulo de deformabilidade com a temperatura de provetes de mistura reciclada a frio (IP2)

Constatou-se que, em ensaios de compressão diametral, a correlação mais adequada para descrever a forma de variação do módulo (E_{CD}) com a temperatura de uma dada mistura betuminosa (T), dentro da gama de temperaturas de ensaio, era do tipo exponencial, podendo ser dada pela seguinte expressão:

$$E_{CD}(T) = a.e^{-bT} \quad \text{onde} \tag{6.11}$$

a - depende das características da mistura betuminosa e

b - traduz a inclinação da recta quando este tipo de varição está representada em escala logarítmica

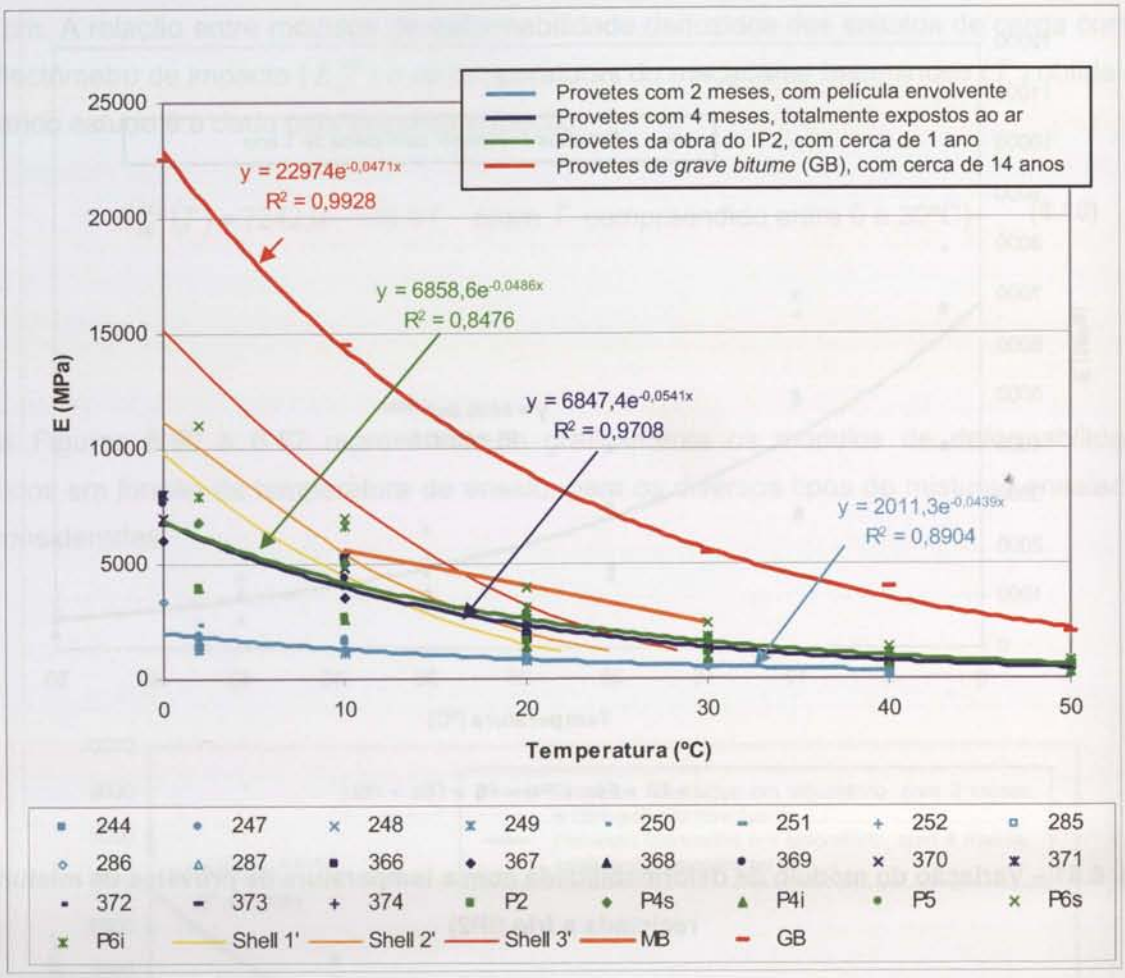


Fig. 6.52 – Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios para avaliação da influência da temperatura no módulo de deformabilidade e as leis da Shell (f=2,5Hz)

Na Fig. 6.53 apresenta-se um gráfico com os valores acima apresentados (Fig. 6.52), mas em que o eixo relativo ao módulo de deformabilidade está representado numa escala logarítmica, por forma a melhor se compararem os expoentes (b) de cada curva de variação deste parâmetro com a temperatura.

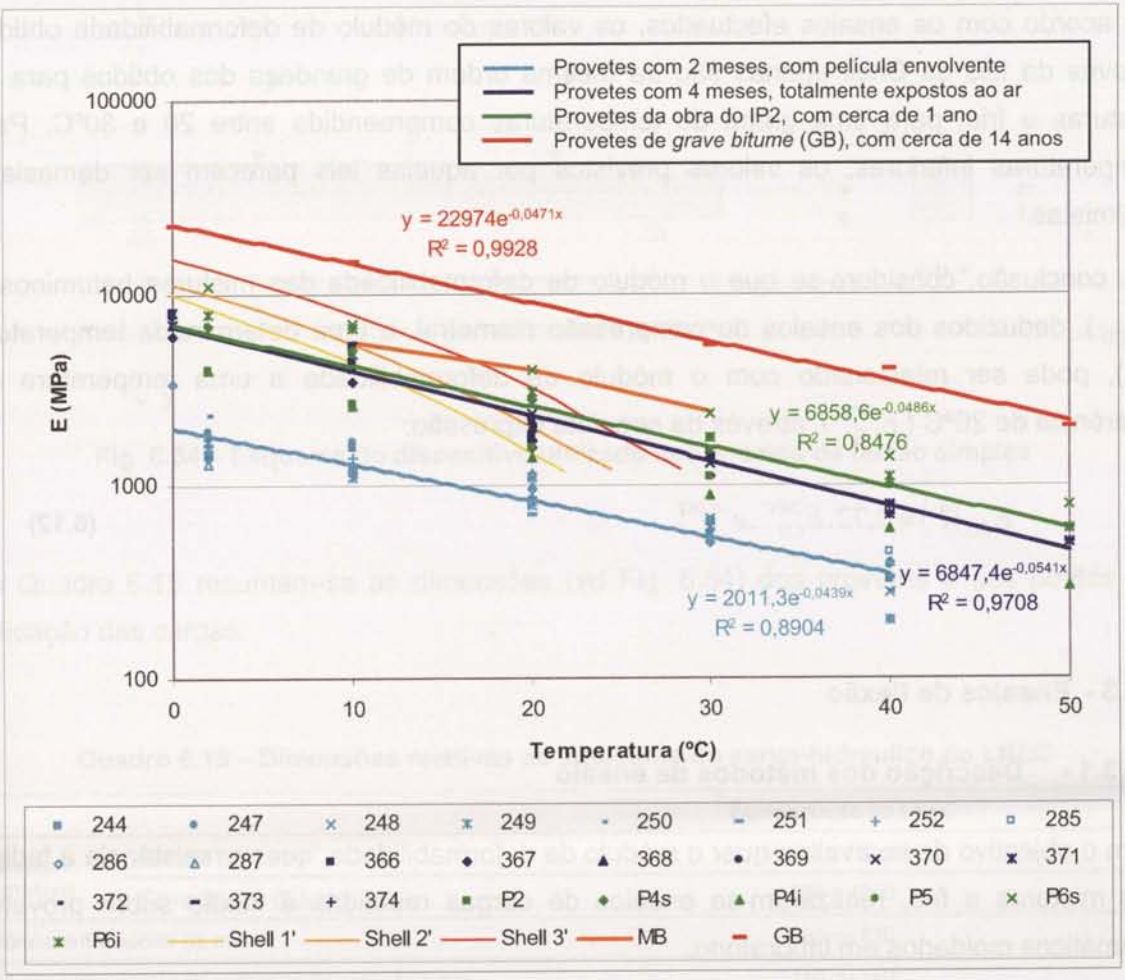


Fig. 6.53 – Comparação entre os resultados da influência da temperatura do módulo de deformabilidade obtidos e as leis da Shell (f=2,5Hz)

Da observação da Fig. 6.53 constata-se que as curvas de variação do módulo de deformabilidade com a temperatura obtidas através de ensaios à compressão diametral apresentam inclinações semelhantes, podendo-se concluir que a lei que traduz esta variação em função do módulo de deformabilidade a uma dada temperatura, é igual para todos os tipos de misturas ensaiadas.

O tipo de variação obtida é, para a gama de temperaturas entre 20 e 30ºC, semelhante ao obtido por Antunes (1993) para misturas tipo macadame betuminoso fabricado a quente.

De acordo com os ensaios efectuados, os valores do módulo de deformabilidade obtidos através da leis da Shell apenas são da mesma ordem de grandeza dos obtidos para as misturas a frio, para uma gama de temperaturas compreendida entre 20 e 30ºC. Para temperaturas inferiores, os valores previstos por aquelas leis parecem ser demasiado optimistas.

Em conclusão, considera-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 20ºC ($E_{CD}^{20ºC}$), através da seguinte expressão:

$$E_{CD}(T) = 2{,}72 . E_{CD}^{20ºC} . e^{-0{,}05T} \qquad \textbf{(6.12)}$$

6.5.3 - Ensaios de flexão

6.5.3.1 - Descrição dos métodos de ensaio

Com o objectivo de se avaliar, quer o módulo de deformabilidade, quer a resistência à fadiga das misturas a frio, realizaram-se ensaios de cargas repetidas à flexão sobre provetes prismáticos moldados em laboratório.

Existem vários tipos de equipamentos para a realização deste tipo de ensaios. No presente caso, foi utilizado para este efeito, o equipamento servo-hidráulico do LNEC.

O equipamento do LNEC permite a utilização de provetes de dimensões relativamente elevadas (cerca de 120X120X700 mm), pelo que foram ensaiados provetes preparados em laboratório no molde maior do equipamento *kneading*, já que a espessura da camada de macadame betuminoso a frio aplicada na EN 120 não era suficiente para a preparação de provetes a partir de lajetas extraídas em obra.

O ensaio consiste em submeter uma viga simplesmente apoiada, a um carregamento em dois pontos interiores aos pontos de apoio, tal como se representa esquematicamente na Fig. 6.54. Neste ensaio é pois, induzido um estado de flexão pura na parte do provete compreendida entre os dois pontos de aplicação da carga.

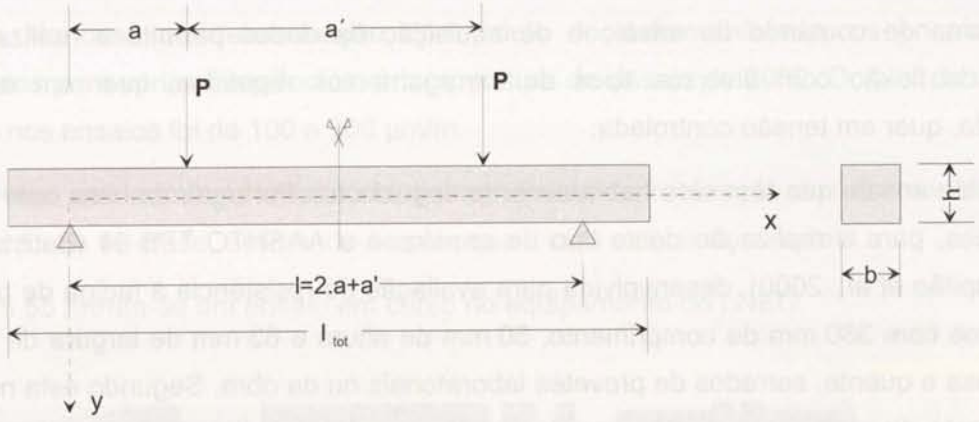


Fig. 6.54 – Esquema do dispositivo utilizado nos ensaios de flexão simples

No Quadro 6.15 resumem-se as dimensões (*vd* Fig. 6.54) dos provetes e dos pontos de aplicação das cargas.

Quadro 6.15 – Dimensões relativas ao equipamento servo-hidráulico do LNEC

		Equipamento do LNEC
Provetes prismáticos	Secção (bxh); mm^2	90x90 a 150x150
	Comprimento (l_{tot}); mm	600 a 1000
Distância entre apoios (l); mm		380 ou 610
Distância entre pontos de aplicação da carga (a'); mm		150 ou 180

A extensão máxima de tracção (ε_t) durante um ciclo, no centro da base do provete, calculada em função da carga aplicada (P), é dada pela expressão:

$$\varepsilon_t = \frac{6aP}{bh^2 E_{mist.}} \quad \text{onde} \qquad (6.13)$$

a - distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga P

b - largura do provete prismático

h - altura do provete prismático

$E_{mist.}$ - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa

O equipamento encontra-se instalado em ambiente de temperatura controlada, o que permite, se se pretender, avaliar o efeito da temperatura nas características mecânicas das misturas betuminosas.

O programa de comando do ensaio e de aquisição de dados permite a realização de ensaios de flexão com diversos tipos de carregamentos repetidos, quer em extensão controlada, quer em tensão controlada.

A norma de ensaio que tem sido habitualmente seguida em Portugal, embora com alguma adaptações, para a realização deste tipo de ensaios é a AASHTO TP8-94 (Batista *et al.*, 2000; Capitão *et al.*, 2000), desenvolvida para avaliação de resistência à fadiga de provetes prismáticos com 380 mm de comprimento, 50 mm de altura e 63 mm de largura de mistura betuminosa a quente, serrados de provetes laboratoriais ou da obra. Segundo esta norma, o equipamento de ensaio deve ser capaz de, em cada ciclo de aplicação da carga, ajustar o valor da carga aplicada por forma a que no provete se mantenha um determinado nível de extensão. O carregamento deve ser sinusoidal e ter uma frequência de 5 a 10 Hz. A temperatura de ensaio deve ser de 20,0 ± 0,5 Hz. A norma preconiza que o módulo inicial da mistura, que é tomado como referência para determinar a ruína do provete (redução do módulo para metade do inicial), seja o medido ao fim de 50 ciclos de aplicação da carga a uma extensão constante de 250 a 750 μm/m.

A realização deste tipo de ensaios encontra-se contemplada na pré-norma europeia prEN 12697-24: 2003. Nesta norma é preconizada a aplicação de uma carga com variação sinusoidal, com uma frequência compreendida entre 0 e 60 Hz, a deformação imposta ou a tensão imposta. O módulo de deformabilidade inicial da mistura é o medido ao fim de 100 ciclos de aplicação da carga. A norma preconiza que para a determinação do módulo de deformabilidade, para uma gama de frequências, previamente ao ensaio de fadiga, se devem varrer frequências nominais, por exemplo, de 1 Hz, 3 Hz, 5 z, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz e 60 Hz e seguidamente novamente de 1 Hz. O modo de carregamento deve ser por forma a manter-se uma deformação constante para uma extensão máxima de tracção inferior a 50 μm/m. Para cada frequência de carregamento, devem-se aplicar 200 repetições. Com o objectivo de evitar danos por fadiga prematura, o número total de aplicações de carga para todas as frequências não deve exceder as 3 000.

Alguns autores (Pais *et al.*, 2000) recomendam que a determinação do módulo de deformabilidade deve ser feita recorrendo a ensaios de flexão em quatro pontos, aplicando um carregamento sinusoidal correspondente a uma extensão máxima de tracção na base do provete de 100 μm/m, conduzidos em ordem decrescente de frequência (10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz até 0,1 Hz). Devem-se realizar 100 ciclos de carga para as primeiras 3 frequências, podendo-se aplicar apenas 10 ciclos para as restantes.

Optou-se, no presente estudo, por efectuar os ensaios de flexão em extensão controlada, ou seja, o provete prismático simplesmente apoiado foi solicitado através de uma deformação

imposta. No caso da determinação do módulo de deformabilidade, os ensaios foram conduzidos para várias frequências, à temperatura de ensaio de 20ºC. O valor da extensão imposta nos ensaios foi de 100 a 300 μm/m.

Os provetes moldados em laboratório, tinham à data de realização dos ensaios de flexão, cerca de 1 ano de idade, estimando-se pois que a cura estivesse completa.

Na Fig. 6.55 retrata-se um ensaio em curso no equipamento do LNEC.

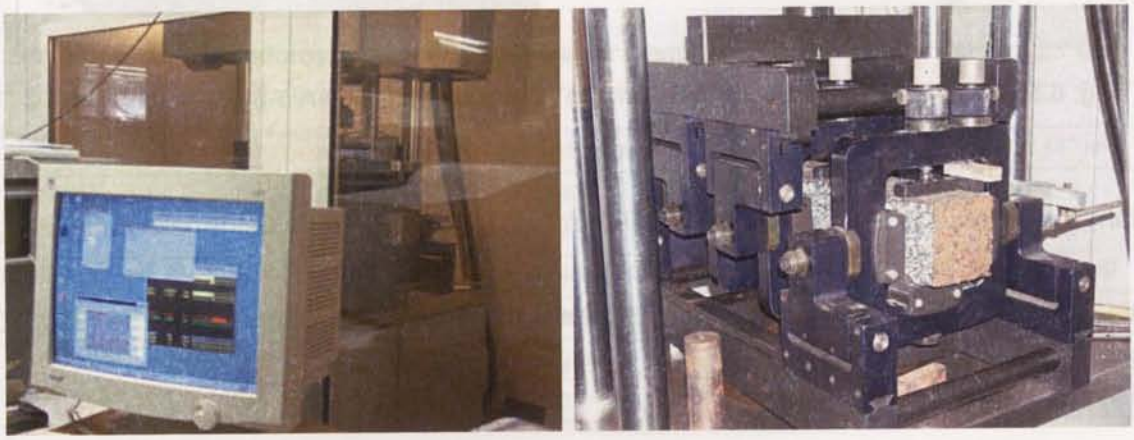


Fig. 6.55 – Ensaio de flexão simples realizado no equipamento servo-hidráulico do LNEC

6.5.3.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios de flexão com o equipamento servo-hidraúlico do LNEC

De acordo com o acima descrito, os provetes a ensaiar neste equipamento exigiam dimensões não compatíveis com as das amostras recolhidas em obra, pelo que foi necessário moldar provetes em laboratório. Para tal recorreu-se ao equipamento *kneading*, já descrito na subsecção 5.3.3.3. Os moldes prismáticos de maiores dimensões deste equipamento, têm uma dimensão interior de 150x165x760 mm^3.

Dadas as dimensões dos provetes, e por restrições de matéria prima, apenas foi possível preparar três provetes para ensaio. Por acidente, um destes provetes quebrou-se, pelo que apenas restaram duas vigas, que foram designadas por V1 e V2, cuja baridade determinada de acordo com a norma ASTM D2726, era de 2,20 g/cm^3 para ambas as vigas. A baridade destes provetes é pois da ordem de grandeza das obtidas em obra (*vd* 5.3.2 e 5.5.2).

Às vigas moldadas através do equipamento *kneading*, houve ainda que aparar os bordos por forma a obterem-se provetes com as dimensões pretendidas, ou seja, com uma secção transversal de 120x120 mm^2. Na Fig. 6.56 retratam-se os dois provetes referidos.

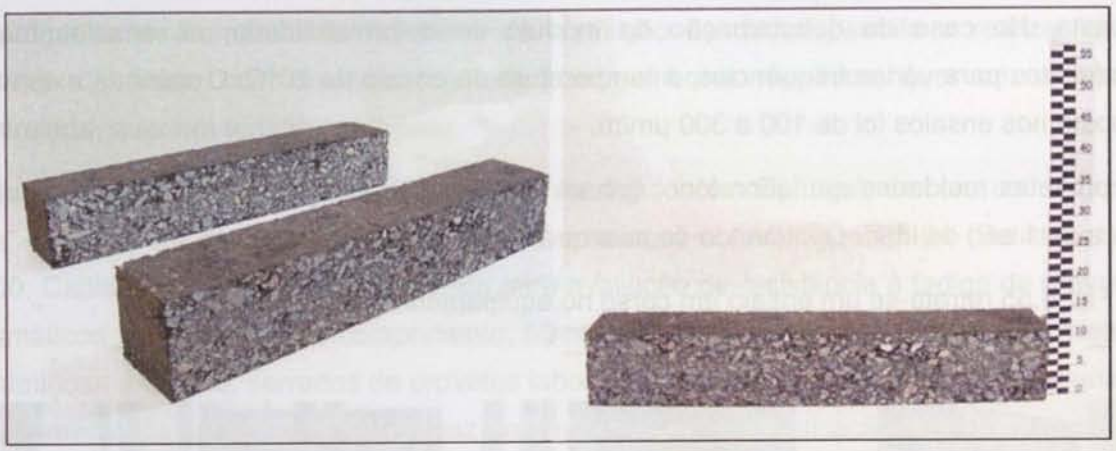


Fig. 6.56 – Provetes prismáticos para ensaio no equipamento servo-hidráulico do LNEC

Quando da realização dos ensaios para determinação do módulo de deformabilidade, a viga V1 quebrou-se por avaria do equipamento. Na Fig. 6.57 representam-se os resultados obtidos para a viga V2, para três níveis diferentes de extensão máxima de tracção (100, 150 e 300 μm/m) e frequências crescentes (1, 3, 5 e 10 Hz).

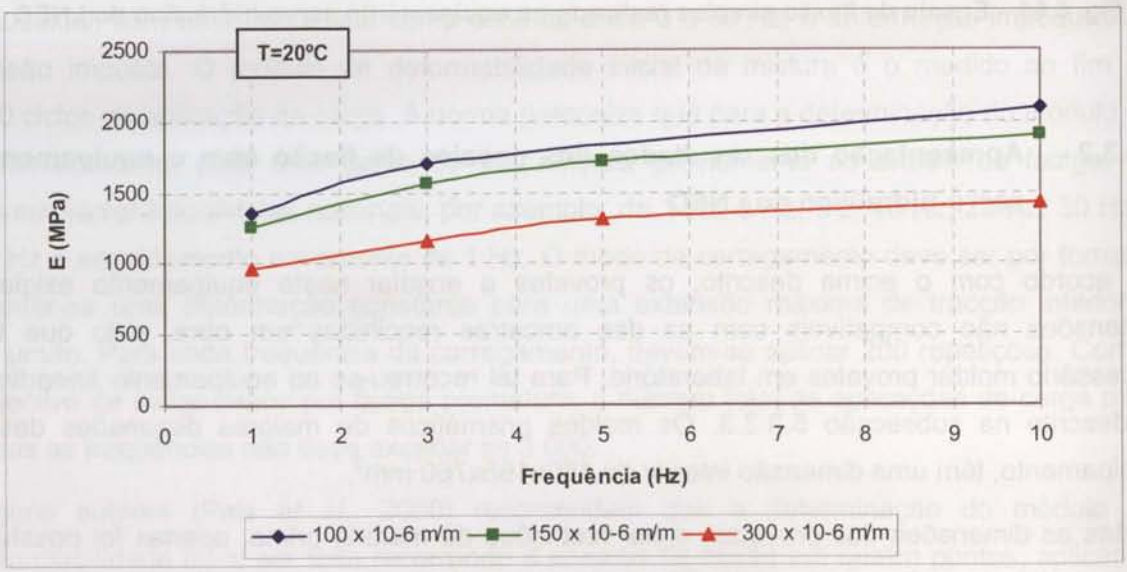


Fig. 6.57 – Módulo de deformabilidade de provetes prismáticos de macadame betuminoso a frio totalmente curados

No âmbito dos estudos efectuados por Azevedo (1993), realizaram-se ensaios de flexão a extensão controlada, com o mesmo equipamento servo-hidráulico do LNEC, para determinação do módulo de deformabilidade das misturas do tipo *"grave-bitume"* (GB), a

uma temperatura de 25ºC. Para este efeito foram utilizados provetes recolhidos em obra, nos trechos experimentais efectuados, com a mesma composição da mistura, mas com porosidades diferentes (5,0; 6,5 e 8,5%). Alguns dos resultados obtidos em ensaios realizados com a frequência de 2 Hz (próxima da frequência utilizada nos ensaios de compressão diametral) e 10 Hz apresentam-se no Quadro 6.16. Na Fig. 6.58 representam-se graficamente todos os resultados obtidos no referido estudo para misturas de *grave-bitume*.

Quadro 6.16 – Módulos de deformabilidade da mistura de *grave-bitume* (MPa) a 25ºC

Porosidade (V_V)	Frequencia	Extensão imposta		
		250 x 10^{-6} m/m	400 x 10^{-6} m/m	700 x 10^{-6} m/m
5,0 %	2	4 400	3 600	3 200
	10	6 700	6 200	5 800
6,5 %	2	3 400	2 300	1 500
	10	4 800	3600	3 100
8,5 %	2	2 200	1 900	1 300
	10	3 800	3 500	2 800

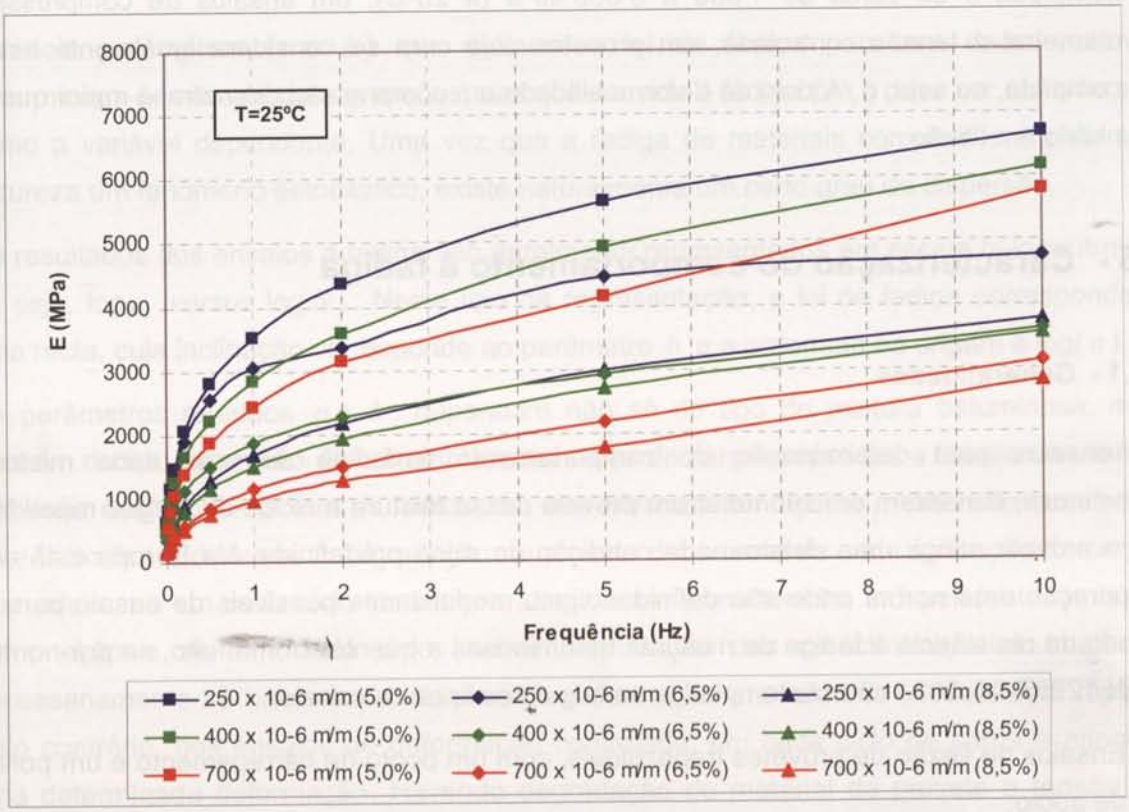


Fig. 6.58 – Módulo de deformabilidade de provetes prismáticos de *grave-bitume*

Da análise dos resultados obtidos verifica-se que:

- À medida que a frequência aumenta, o que corresponde a maiores velocidades de circulação, aumentam também os valores dos módulos de deformabilidade das misturas;
- À medida que a extensão de tracção máxima imposta aos provetes aumenta, diminuem os módulos, o que traduz o comportamento não-linear destes materiais;
- Para uma mesma composição ponderal das misturas de *grave-bitume*, os módulos são maiores para as misturas com menor porosidade;
- Para as misturas de *grave-bitume* tinham-se obtido, para frequências da ordem de 2/2,5 Hz, valores do módulo de deformabilidade, desde cerca de 1 300 a 4 400 MPa (a 25ºC), em ensaios de flexão a extensão controlada de provetes após a construção, e de cerca de 4 000 a 7 500 MPa (a 20ºC), em ensaios de compressão diametral a tensão controlada, em provetes com aproximadamente 14 anos de idade;
- Para as misturas de macadame betuminoso a frio obtiveram-se, para frequências da ordem de 2,5/3 Hz, valores do módulo de deformabilidade, entre cerca de 1 200 a 1 700 MPa (a 20ºC), em ensaios de flexão a extensão controlada de provetes com cura completa, e de cerca de 1 600 a 3 000 MPa (a 20ºC), em ensaios de compressão diametral a tensão controlada, em provetes cuja cura se considera igualmente estar completa, ou seja, o módulo de deformabilidade em compressão diametral é maior que o obtido em flexão.

6.6 - Caracterização do comportamento à fadiga

6.6.1 - Generalidades

Os ensaios para determinação do comportamento à fadiga de uma dada mistura betuminosa, consistem em submeter um provete dessa mistura a ciclos de cargas repetidas até o provete atingir uma determinada condição de ruína prédefinida. Na Europa está em preparação uma norma onde são definidas cinco modalidades possíveis de ensaio para o estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas a quente. Com efeito, na pré-norma prEN 12697-24: 2003 são contemplados os seguintes tipos de ensaio:

- Ensaios de flexão de provetes trapezoidais, com um ponto de carregamento e um ponto de apoio;

- Ensaios de flexão de provetes prismáticos, com um ponto de carregamento e um ponto de apoio;
- Ensaios de flexão de provetes prismáticos, com um ponto de carregamento e dois pontos de apoio;
- Ensaios de flexão de provetes prismáticos, com dois pontos de carregamento e dois pontos de apoio;
- Ensaios de tracção indirecta sobre provetes cilíndricos.

Como já se viu, no âmbito do presente estudo, foram realizados os dois últimos tipos de ensaios acima listados.

No que respeita à interpretação dos resultados, é habitual considerar que o comportamento à fadiga de um dado material pode ser traduzido por uma lei que relaciona o número de repetições de carga correspondente à condição de ruína por fadiga para esse material (N_f), com a extensão de tracção máxima aplicada em cada ciclo (ε_t):

$$\varepsilon_t = a.N_f^{-b} \tag{6.14}$$

Os dois parâmetros (a e b) que definem a lei de fadiga para um dado material, determinam–se através de regressões, nas quais a vida à fadiga (N_f) deve ser considerada como a variável dependente. Uma vez que a fadiga de materiais compósitos é pela sua natureza um fenómeno estocástico, existe naturalmente um certo grau de dispersão.

Os resultados dos ensaios à fadiga são geralmente representados em escala bi-logarítmica, ou seja, $\log \varepsilon_t$ *versus* $\log N_f$. Neste tipo de representação, a lei de fadiga corresponde a uma recta, cuja inclinação corresponde ao parâmetro b e a ordenada na origem a $\log(a)$.

Os parâmetros referidos a e b, dependem não só do tipo de mistura betuminosa, mas também do tipo de ensaio. Por exemplo, os ensaios de cargas repetidas a tensão constante, são mais desfavoráveis que os realizados, nas mesmas condições, a extensão constante. Este facto fica a dever-se à degradação no provete decorrente de cada aplicação da carga. Com efeito, se em cada ciclo for sempre atingida a mesma tensão, independentemente da deformação e se, em cada ciclo houver degradação das características do material, necessariamente irá haver um acréscimo de deformação e a ruína do provete será rápida. Pelo contrário, nos ensaios de deformação controlada, em cada ciclo de carga é atingida uma determinada deformação. Havendo degradação do material do provete a tensão de

cada ciclo irá ser inferior à do anterior. Assim, o provete é submetido a um processo de cargas sempre decrescentes e a ruína implica necessariamente um maior número de ciclos.

Considerando o trabalho realizado pela força aplicada é também imediato deduzir o mesmo. Nos ensaios a tensão controlada, o trabalho (produto da força pelo deslocamento) desenvolvido em cada ciclo é crescente já que a deformação cresce mantendo-se constante a tensão máxima aplicada. Já no caso dos ensaios de deformação controlada, o respectivo valor máximo é constante mas a amplitude da tensão aplicada diminui. Assim, o trabalho desenvolvido em cada ciclo é inferior ao precedente. Se a rotura só ocorrer para um dado nível de trabalho (cumulativo) realizado sobre o provete, serão necessários mais ciclos no caso em que o ensaio é conduzido para deformação controlada.

Às leis de fadiga das misturas betuminosas determinadas através de ensaios laboratoriais são aplicados factores de escala por forma a serem utilizadas no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Com efeito, através de estudos sobre o comportamento a longo prazo de pavimentos de estradas em serviço, submetidas às acções atmosféricas bem como às acções do tráfego, tem-se demonstrado que a vida em serviço é superior à prevista através da análise estrutural em que se recorre às referidas leis.

Em geral, considera-se pois, que não é adequado usar directamente as leis determinadas nos ensaios laboratoriais para efeitos de dimensionamento, apontando-se diversos factores como contribuindo para as diferenças de comportamento entre os resultados obtidos em laboratório e o comportamento das misturas em obra. Por exemplo, Claessen *et al.* (1977) recomendam a utilização dos seguintes factores de escala em relação às leis de fadiga desenvolvidas pela Shell com base em ensaios laboratoriais:

- Dispersão lateral do tráfego: 2,5;
- Recuperação das misturas e repouso entre cargas:
  - Misturas abertas e pobres em betume: 1,25
  - Misturas fechadas e ricas em betume: 10
- Gradiente térmico:
  - Camadas de espessura reduzida e/ou baixas temperaturas: 1
  - Camadas de espessura elevada e temperaturas elevadas: 0,5

Outros autores recomendam diferentes valores com base em ensaios efectuados, mas que, regra geral, se destinam a contabilizar os mesmos factores (Brown *et al.*, 1977; Brunton, 1990; Rao *et al.*, 1990).

Refere-se que em Portugal não é hábito considerar directamente o factor de distribuição lateral do tráfego no dimensionamento de pavimentos (Pinelo, 1991). Este procedimento está do lado da segurança, uma vez que o pavimento é dimensionado para um tráfego mais elevado.

O número de repetições de carga para efeitos de dimensionamento, quando deduzido de ensaios de fadiga é, então, obtido por:

$$N_{dimensionamento} = N_{ensaio} \times Factor\ de\ Escala \tag{6.15}$$

Na Universidade de Nottingham, Cooper & Pell (1974) desenvolveram uma lei de fadiga onde se consideram as características do betume da mistura betuminosa, como sejam, a percentagem volumétrica de betume e a temperatura de amolecimento de anel e bola. Esta lei foi estabelecida tendo em atenção os resultados de ensaios à flexão nos quais a variação cíclica das extensões de tracção era obtida através da rotação de um provete cilíndrico sobre o seu eixo *("rotating-bending tests")*, em extensão controlada (100 μm/m), e é dada pela seguinte expressão:

$$\log(N_f) = 4{,}13\log(V_b) + 6{,}95\log(T_{AB}) - 11{,}13\,, \quad \text{em que:} \tag{6.16}$$

N_f - *Número de repetições de carga*

V_b - *percentagem volumétrica de betume na mistura*

T_{AB} - *temperatura de amolecimento de anel e bola (BS 2000: Part 58)*

Nesta expressão, a temperatura de amolecimento de anel e bola (T_{AB}) deve ser determinada de acordo com a especificação inglesa BS 2000: Part 58. Se for utilizada a norma ASTM D 36 deve-se diminuir o seu valor em 1,5ºC (Pinelo, 1991).

No relatório final da Acção COST 333 (1999) indica-se que a expressão (6.16) deve ser corrigida para a adequar ao aparecimento dos primeiros sinais de fendilhamento nas condições de campo. O factor correctivo indicado é de 100 vezes.

A lei de fadiga proposta pela Shell (1978) com base em ensaios realizados sobre vários tipos de misturas betuminosas em extensão controlada, é a seguinte:

$$\varepsilon_t = (0{,}856V_b + 1{,}08)E^{-0{,}36}N_f^{-0{,}2}, \text{ em que:} \quad (6.17)$$

ε_t - *extensão de tracção*

V_b - *percentagem volumétrica de betume na mistura*

E - *módulo de deformabilidade da mistura, em Pa*

N_f - *Número de repetições de carga*

A lei de fadiga proposta no método do *Asphalt Institute*, foi desenvolvida com base em ensaios laboratoriais de fadiga (Finn *et al.*, 1977), sendo traduzida pela seguinte expressão (COST 333, 1999):

$$N_f = 1{,}14\times10^{-3}\times C\times\varepsilon_t^{-3{,}291}\times E^{-0{,}854}, \text{ com} \quad (6.18)$$

$$\log(C) = 4{,}84\times\left(\frac{V_b}{V_b+V_v} - 0{,}69\right), \text{ sendo}$$

N_f - *Número de repetições de carga*

ε_t - *extensão de tracção*

E - *módulo de deformabilidade da mistura, em MPa*

V_b - *percentagem volumétrica de betume na mistura*

V_v - *porosidade da mistura*

Determinou-se o número de repetições de carga para o caso concreto das misturas a frio em estudo, considerando cada uma das três expressões apresentadas: (6.16), (6.17) e (6.18). Para aplicação destas expressões optou-se por não se considerar qualquer factor de escala, o que permite a comparação mais fácil entre as diversas leis referidas.

Neste estudo comparativo consideraram-se três fases de endurecimento do betume residual (*vd* Quadro 6.14). Atendendo aos módulos de deformabilidade das misturas a frio ensaiadas, optou-se por admitir, para aplicação das expressões (6.17) e (6.18), três módulos de deformabilidade, de 1000, 2000 e 3000 MPa, correspondendo o primeiro ao valor de misturas relativamente jovens (cerca de 1 semana), o segundo, a uma cura intermédia (de cerca de 2 meses) e por último, a misturas já curadas (mais de 4 meses). Acrescenta-se que em relação à expressão (6.16) se consideraram igualmente três fases de endurecimento do betume, correspondentes a três valores de temperatura de amolecimento de anel e bola crescentes com a idade/processo de cura das misturas.

Os valores calculados para uma extensão de 100 μm/m segundo cada uma das leis referidas são os que se apresentam no Quadro 6.17.

Quadro 6.17 – Número de aplicações de carga admissíveis deduzidos a partir das leis de fadiga da Universidade de Nottingham (N_f^{UN}), da Shell (N_f^{Shell}) e do Asphalt Institute (N_f^{AI})

ε_t	V_b	V_V	T_{AB}	E	N_f^{UN}	N_f^{Shell}	N_f^{AI}
(μm/m)	(%)	(%)	(ºC)	(MPa)	Expressão (6.16) [2]	Expressão (6.17)	Expressão (6.18)
100	9	10	47 - 1,5 [1]	1 000	$2{,}2 \times 10^6$	$330{,}0 \times 10^6$	$4{,}1 \times 10^6$
100	9	10	50 - 1,5 [1]	2 000	$3{,}4 \times 10^6$	$94{,}8 \times 10^6$	$2{,}3 \times 10^6$
100	9	10	53 - 1,5 [1]	3 000	$5{,}1 \times 10^6$	$45{,}7 \times 10^6$	$1{,}6 \times 10^6$

LEGENDA:

V_b – percentagem volumétrica de betume; V_V – percentagem volumétrica de vazios (porosidade);

T_{AB} – temperatura de amolecimento de anel e bola do betume residual; E – módulo de deformabilidade da mistura

(2) Deduziu-se ao valor de T_{AB} determinado através da norma ASTM D 36, o valor de 1,5ºC por forma a fazer corresponder o valor ao da norma BS 2000: Part 58

(3) Na aplicação desta expressão adoptou-se o coeficiente correctivo (x100) indicado na Acção COST 333 (1999)

Da observação dos resultados obtidos conclui-se que se obtêm resultados para a resistência à fadiga de uma mesma mistura, determinada pelas diversas leis propostas por cada uma das instituições muito distintos entre si, o que se explica pela diversidade de variáveis em jogo, tais como, as condições de ensaio e a composição dos materiais estudados. Anota-se que pelo método de Nottingham, apenas é contabilizado directamente a influência do betume da mistura, enquanto nos restantes métodos, é também tido em linha de conta, o módulo de deformabilidade da mistura que contabiliza, naturalmente, o conjunto de betume mais agregados.

6.6.2 - Ensaios de compressão diametral com o *Nottingham Asphalt Tester*

6.6.2.1 - Descrição do método de ensaio

Como se referiu em 6.3.2, a caracterização das misturas betuminosas quanto à sua resistência à fadiga é geralmente efectuada com recurso ao mesmo tipo de ensaios laboratoriais dos utilizados para a determinação do módulo de deformabilidade.

Enquanto que os ensaios para determinação do módulo de deformabilidade foram realizados mantendo-se, para os diversos provetes ensaiados, as mesmas condições de carregamento (mesmo valor da tensão aplicada), já os ensaios para avaliação da resistência à fadiga foram realizados, para os diferentes provetes, para diferentes níveis de tensão aplicada, por forma a permitirem a obtenção de uma curva de fadiga.

Os ensaios no equipamento NAT foram realizados a uma temperatura de 20°C e a uma frequência de 10Hz, para valores de tensão máxima compreendidos entre 50 e 600 kPa.

Considerou-se que a ruína dos provetes ocorre para o número de ciclos correspondente a metade do módulo inicial.

6.6.2.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios

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. Para cada um do grupos de provetes ensaiados (provetes com a mesma idade e mesmo processo de cura), determinou-se a lei de fadiga a partir dos resultados dos ensaios em laboratório. No Anexo III apresenta-se a lei de fadiga obtida para cada um dos grupos de provetes ensaiados. Na Fig. 6.59 resumem-se os resultados obtidos.

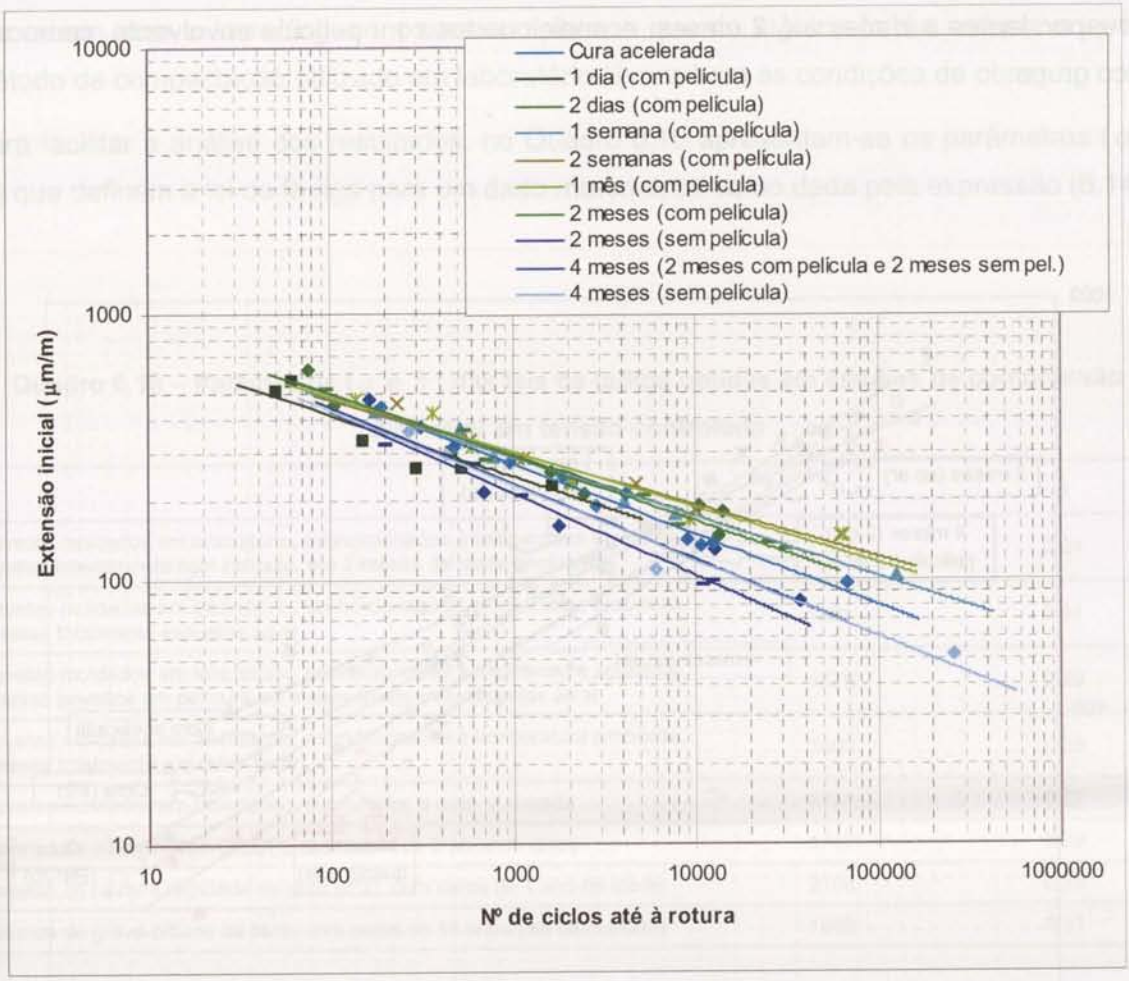


Fig. 6.59 – Comportamento à fadiga (NAT) de provetes moldados em laboratório

A observação da Fig. 6.59 permite 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 grupo. 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 verifica-se que a "inclinação" da curva à fadiga vai aumentando.

Na Fig. 6.60, em que se comparam 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, optou-se por considerar os resultados

correspondentes a idades até 2 meses, acondicionados com película envolvente, como um único grupo.

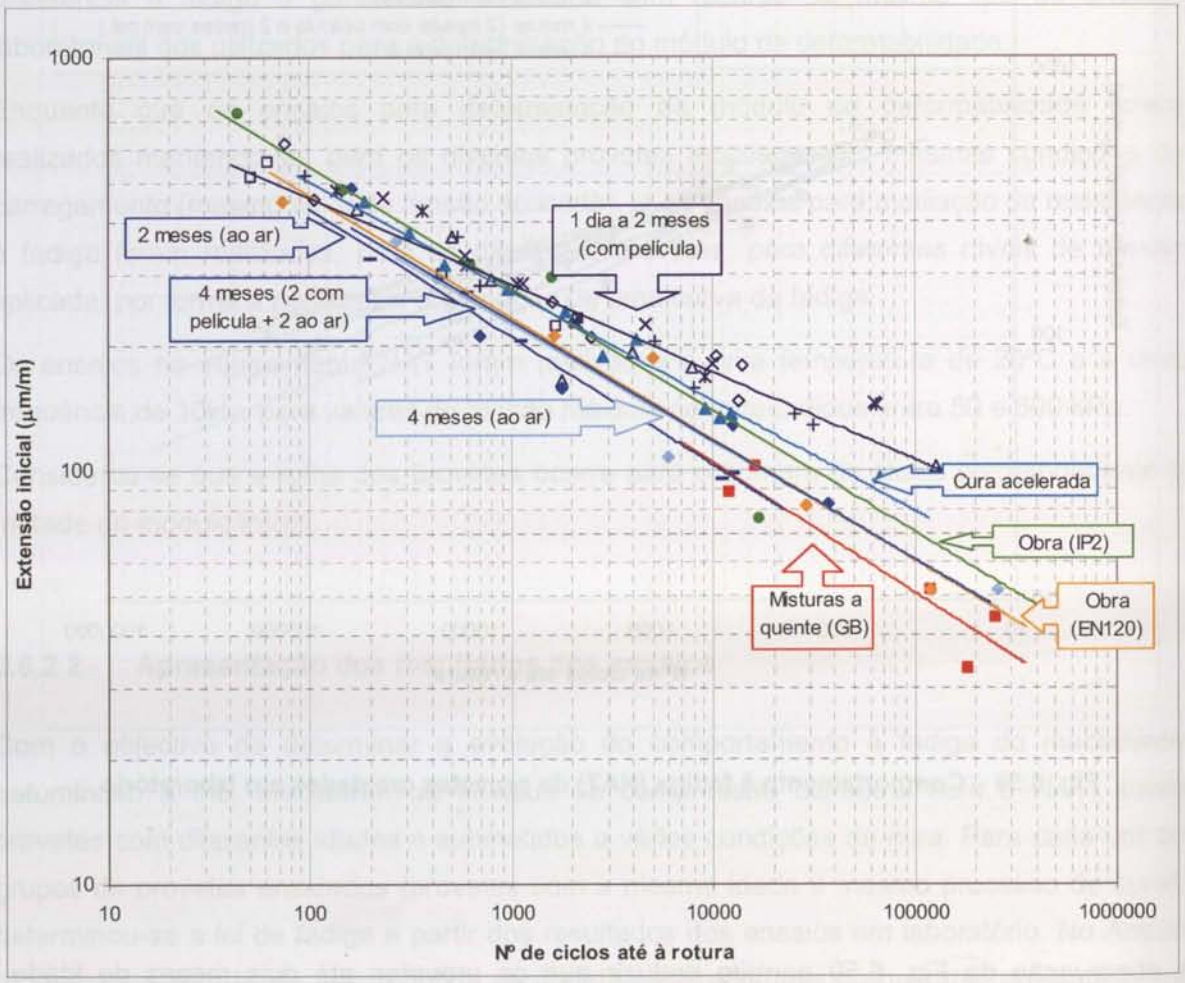


Fig. 6.60 – Comportamento à fadiga (NAT) de provetes de misturas betuminosas a frio e a quente

Uma primeira constatação que se pode fazer da observação da Fig. 6.60, 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 com o *kneading*, com cura completa, o que de alguma forma comprova que o método de compactação utilizado em laboratório simula bem as condições de obra.

Para facilitar a análise dos resultados, no Quadro 6.18 apresentam-se os parâmetros (a e b) que definem a lei de fadiga para um dado material, tal como dada pela expressão (6.14).

Quadro 6.18 – Parâmetros (a e b) das leis de fadiga obtidas em ensaios de compressão diametral em tensão controlada

	a	b
Provetes moldados em laboratório, acondicionados à temperatura ambiente, envoltos lateralmente com película, até 2 meses de idade (inclusivé)	1208	0,21
Provetes moldados em laboratório, acondicionados à temperatura ambiente, 2 meses totalmente expostos ao ar	1801	0,31
Provetes moldados em laboratório, acondicionados à temperatura ambiente, 2 meses envoltos em película e 2 meses totalmente expostos ao ar	1679	0,29
Provetes moldados em laboratório, acondicionados à temperatura ambiente, 4 meses totalmente expostos ao ar	1603	0,28
Provetes moldados em laboratório, submetidos a cura acelerada	1711	0,27
Provetes de obra (EN120-O/LDF), com cerca de 2 anos de idade	1787	0,29
Provetes de mistura reciclada da obra (IP2), com cerca de 1 ano de idade	2108	0,29
Provetes de *grave-bitume* da obra, com cerca de 14 anos (em laboratório)	1889	0,31

Na Fig. 6.61 compara-se graficamente o comportamento à fadiga obtido no NAT para os diversos tipos de misturas ensaiados (macadame a frio com idades jovens – 1 dia a 2 meses, macadame a frio com cura completa – mais de 4 meses, misturas a quente) com as leis da Shell e do Asphalt Institute para misturas com a mesma composição que as misturas a frio em estudo, com módulos correspondentes às três fases distintas do processo de cura (*vd* Quadro 6.17). Nesta figura representa-se ainda o comportamento à fadiga determinado em ensaios de flexão a extensão controlada com um tempo de carga de 0,1 s seguido de um tempo de repouso de 0,2 s, efectuados no equipamento servo-hidráulico do LNEC, de provetes de mistura a quente do tipo *grave-bitume* (GB) (Azevedo, 1993), com três diferentes porosidades (5,0%, 6,5% e 8,5%).

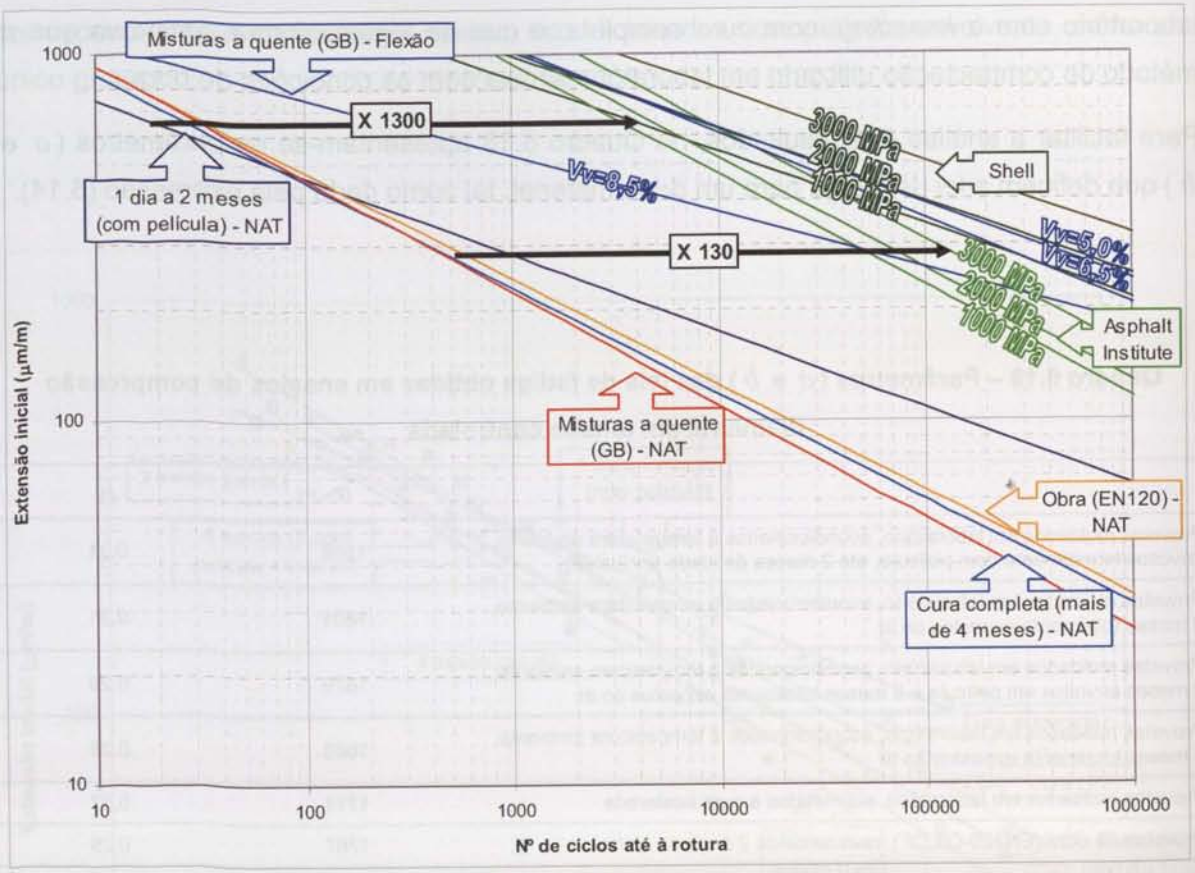


Fig. 6.61 – Comparação do comportamento à fadiga de provetes ensaiados no NAT com as leis de fadiga da Shell, do Asphalt Institute e com as obtidas para o GB em ensaios de flexão

A observação da Fig. 6.61 permite extrair as seguintes conclusões:

- Os ensaios de compressão diametral efectuados a tensão controlada, conduziram a resultados mais desfavoráveis do comportamento à fadiga dos materiais, que os ensaios de flexão a extensão imposta;
- As misturas de *grave-bitume* (GB) com menores porosidades apresentam maiores resistências à fadiga do que as que têm maiores porosidades (Azevedo, 1993);
- A lei de fadiga obtida para a mistura de macadame betuminoso a frio para idades jovens (1 dia a 2 meses) apresenta uma inclinação semelhante (parâmetro b) à obtida pela lei da Shell, sendo que o factor de escala a utilizar para misturas com módulo de deformabilidade de cerca de 1 000 MPa é de cerca de 1300;
- As leis de fadiga determinadas quer para as misturas de macadame betuminoso a frio com o processo de cura avançado, quer para a mistura de *grave-bitume*, apresentam

inclinações semelhantes à da lei do Asphalt Institute. Neste caso, o factor de escala a utilizar é de 130.

Por último cabe referir que o facto de as leis propostas por cada instituição conduzirem a diferentes resistências à fadiga para cada mistura, reforça a necessidade de se efectuarem ensaios por forma a determinar o comportamento à fadiga da mistura betuminosa específica de cada obra.

6.7 - Aspectos relativos ao dimensionamento de pavimentos por via analítica

6.7.1 - Generalidades

Embora se verifique, desde há largos anos, uma tendência para a utilização crescente de métodos de dimensionamento por via analítica, em substituição dos métodos empíricos, existem ainda poucas instituições que utilizem métodos analíticos quando se trata de pavimentos que incorporem misturas a frio. Na análise estrutural destes pavimentos deve-se ter em conta parâmetros próprios das misturas a frio, bem como modelos de evolução do estado do pavimento adequados a estes pavimentos.

Um dos objectivos principais do presente estudo foi a obtenção de dados para o dimensionamento analítico das estruturas do pavimento que compreendem este tipo de materiais.

Seguidamente analisam-se as conclusões alcançadas tendo em vista contribuir para o estabelecimento de métodos de dimensionamento analíticos para pavimentos flexíveis que incluam camadas a frio.

6.7.2 - Dimensionamento de estruturas de pavimentos incorporando misturas a frio

Os critérios de dimensionamento têm por objectivo evitar que o pavimento atinja determinado estado de ruína antes do final da sua vida de projecto. Os estados de ruína geralmente considerados no dimensionamento de pavimentos são o fendilhamento por fadiga nas camadas betuminosas e a formação de deformações permanentes à superfície do pavimento (cavados de rodeira), na zona de passagem dos rodados (rodeiras).

A metodologia adoptada para a definição da estrutura do pavimento baseia-se na análise estrutural do pavimento, cujas camadas são assumidas como elásticas lineares,

homogéneas e semi-infinitas. Cada camada é caracterizada por um módulo de deformabilidade (E) e um coeficiente de Poisson (ν).

Esta análise consiste no cálculo dos estados de tensão e extensão induzidos na estrutura constituída pelas camadas do pavimento e pelo solo de fundação, quando solicitada pelo tráfego, que é caracterizado pelo número acumulado de passagens do eixo padrão (NAEP).

Para o estabelecimento de modelos estruturais de pavimentos incorporando misturas a frio, considera-se que se devem distinguir duas fases, correspondentes a módulos de deformabilidade e critérios de dimensionamento diferentes.

No que concerne ao desenvolvimento de deformações permanentes, verificou-se que, após a primeira fase, correspondente ao adensamento das misturas por acção da acção do tráfego rodoviário, não há problemas com as deformações permanentes das camadas em misturas a frio. Assim, recomenda-se que a camada de desgaste não seja efectuada antes de terem decorrido cerca de três semanas da conclusão da camada em mistura a frio. Tomando estas medidas construtivas, admite-se que a consideração das deformações permanentes, no dimensionamento de pavimentos incorporando misturas a frio pode ser feita adoptando os critérios habituais para pavimentos flexíveis tradicionais.

Assim, para o caso particular do dimensionamento de pavimentos com camadas em misturas a frio, há que considerar duas fases, uma primeira, até cerca de 2 meses de idade, correspondendo à fase em que o processo de cura não se encontra concluído, e em que a mistura apresenta um módulo de deformabilidade mais baixo e uma lei de fadiga representada por uma curva menos inclinada. A segunda fase corresponderá àquela em que o processo de cura se encontra praticamente concluído, apresentando a mistura betuminosa a frio, um módulo de deformabilidade mais elevado que na primeira fase e um comportamento à fadiga semelhante ao das misturas a quente tradicionais.

6.8 - Síntese das principais conclusões alcançadas

Em relação às deformações permanentes observou-se que as misturas do tipo macadame betuminoso a frio apenas apresentam deformações iniciais importantes quando o processo de cura não está completo. Este facto realça a vantagem que existe em executar sobre este tipo de camadas, após estarem um determinado tempo em serviço no início da sua vida útil, camada(s) sobrejacente(s).

No que concerne ao módulo de deformabilidade das misturas, bem como ao seu comportamento á fadiga, deve-se atender ao facto de as misturas fabricadas a frio terem um

comportamento que evolui significativamente após a sua aplicação em obra, até se atingir a cura completa. Este é um processo que, em condições favoráveis, tem uma duração de cerca de 4 meses. No "manual de dimensionamento de estruturas de pavimento francês" (LCPC & SETRA, 1997) refere-se que o processo de cura das misturas tipo *grave-émulsion* pode prolongar-se por dois a quatro anos, ocorrendo principalmente nos primeiros seis meses. Neste manual, recomenda-se que as camadas deste tipo de misturas tenham uma espessura inferior a 15 cm, por forma a não comprometer quer a compacidade da camada em toda a sua profundidade, quer a evaporação da água, e consequentemente, a cura da mistura.

Durante o período em que ocorre a maior parcela da cura das misturas, deve-se atender ao facto de que as características de comportamento ainda não atingiram os valores que são geralmente usados no dimensionamento do pavimento.

Esta é uma das principais diferenças que as misturas a frio registam relativamente às misturas a quente. De facto, para estas últimas, após a sua aplicação em obra, a mistura apresenta quase de imediato (à medida que o betume arrefece até à temperatura ambiente) as características finais para que foi dimensionada.

Em relação às misturas a frio fabricadas com emulsão betuminosa recomenda-se que sejam considerados estágios intermédios enquanto a cura não se pode considerar como completa, tendo em vista o dimensionamento dos pavimentos por via analítica.

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 – Considerações sobre as técnicas de reabilitação de pavimentos

Às acções de conservação de uma rede rodoviária estão associados diversos custos directos e indirectos, identificando-se os seguintes:

- Custos da administração rodoviária
  - Custos relativos às obras de conservação e reabilitação;
- Custos dos utentes
  - Custos de operação dos veículos;
  - Segurança, congestionamentos;
- Externalidades
  - Ambiente, segurança.

A protecção do ambiente tem-se afirmado como um domínio chave no desenvolvimento dos Países da Comunidade Europeia.

No campo da engenharia rodoviária, assim como em todas as áreas de engenharia, é já hoje em dia imperativo que se considerem os factores ambientais, para além dos aspectos técnicos e económicos. Assim, quando do projecto de reabilitação de um pavimento rodoviário, devem ser estudadas todas as alternativas possíveis, equacionando a utilização de todas as técnicas conhecidas, devendo ser seleccionada aquela que à partida combinará, da forma mais equilibrada, a resolução do problema técnico com a protecção e, às vezes, até a valorização do ambiente.

As análises custo/benefício resumem-se em muitos casos apenas à contabilização dos custos directos de construção e, por vezes também dos custos de conservação, mas raramente se atribui valor aos benefícios.

Nos últimos anos têm surgido no mercado Nacional diversas técnicas vocacionadas para o desenvolvimento sustentável no sector da pavimentação de estradas e que, ao mesmo tempo, constituem técnica e economicamente, soluções muito interessantes.

Com o desenvolvimento deste trabalho, pensa-se ter contribuído para que se identificassem mais facilmente, para cada tipo de acção de reabilitação disponível actualmente no nosso País, os benefícios decorrentes da aplicação de cada uma das técnicas de reabilitação de pavimentos abordadas.

O presente trabalho foi especialmente orientado para o estudo de um tipo de materiais não tradicionais no âmbito de obras de reabilitação rodoviária. Esses materiais – misturas betuminosas fabricadas a frio com emulsões betuminosas – apresentam-se hoje como uma alternativa a ter em consideração na construção e, em particular, na reabilitação de pavimentos rodoviários.

Na escolha do tema da tese pesou a oportunidade, a actualidade e a importância do assunto que resulta, entre outros factores, da necessidade de modernizar a rede rodoviária nacional tendo em atenção também as preocupações ambientais.

Apesar de as emulsões betuminosas se aplicarem na pavimentação há cerca de cem anos, são materiais que têm conhecido desenvolvimentos muito significativos nos últimos anos. A par desses desenvolvimentos, essencialmente na matéria-prima, a emulsão betuminosa, assiste-se também ao desenvolvimento de novos equipamentos que potenciam ainda mais o campo de aplicação destes materiais.

A investigação focalizada nestes materiais levada a cabo em diversos países, com redes rodoviárias muito mais extensas que as do nosso país, é outro indício significativo da sua importância.

Para além de poderem ser aplicadas na construção de pavimentos novos, isto é, recorrendo a agregados novos, as emulsões podem ser aplicadas com igual sucesso na reciclagem de pavimentos antigos e degradados. Neste ponto de vista constituem uma alternativa viável, uma vez que, a reciclagem usando emulsões apresenta vantagens do ponto de vista económico e ambiental dado não ser necessário despender energia no aquecimento dos agregados e do betume.

Para a adopção deste tipo de solução devem ser ponderados todos os factores, técnicos, económicos e ambientais por forma a permitir uma escolha adequada. Outros aspectos que podem influenciar na decisão passam, por exemplo, por questões relacionadas com a disponibilidade de matérias primas e equipamentos adequados para cada tipo de solução.

A revisão dos documentos normativos, especificações e outros documentos de referência de diversos países permitiu verificar que não existe uma uniformidade quer nas designações, quer nas características dos materiais fabricados com emulsões betuminosas, muito embora

existam diversos pontos comuns. Ao nível Europeu, encontra-se em elaboração normas que deverão, pelo menos na esfera de influência da Comunidade, uniformizar as designações.

7.2 – Síntese das principais conclusões alcançadas

Os materiais que constituem a mistura betuminosa densa a frio – a emulsão, a água e os agregados – têm todos grande importância no seu comportamento. A água enquanto material temporário tem grande importância no processo de fabrico da emulsão, na preparação da mistura e na sua aplicação. A utilização de forma inadequada da água pode comprometer estas fases. Os agregados constituem em peso e em volume a maior parcela da mistura. Sendo normalmente usados os materiais disponíveis no local (ou pelo menos sendo aconselhável fazê-lo) é necessário caracterizar bem o seu comportamento em conjunto com a emulsão betuminosa, tendo em atenção a aplicação pretendida.

São diversos os factores que condicionam a cura das misturas betuminosas. Assim, é necessário ter em consideração as características dos agregados, tanto geométricas, como químicas, entre outras, em conjunto com o tipo de emulsão. Por outro lado, e no que respeita à aplicação, é necessário considerar as condições atmosféricas, os equipamentos de compactação e tempo disponível antes de abrir a via ao tráfego.

A aplicação das misturas betuminosas densas a frio em casos de obra foi acompanhada no âmbito deste trabalho tendo-se aproveitado esse facto para implementar recomendações construtivas que contribuíram para o bom funcionamento destas soluções.

Um dos aspectos que derivou dos acompanhamentos referidos foi o da necessidade de estudos que permitissem um melhor conhecimento do comportamento mecânico das misturas a frio, nomeadamente no que respeita à evolução das suas características mecânicas e aos factores que afectam essas características.

A selecção de processos de preparação de provetes de misturas betuminosas com emulsão, que reproduzam adequadamente as condições de compactação e cura em obra, é fundamental para o sucesso da caracterização mecânica dessas misturas em laboratório. De entre os vários processos disponíveis para este fim, concluiu-se que a compactação com recurso ao equipamento *kneading* seria aquele que melhor se ajustava às condições de obra, produzindo materiais com características semelhantes. No entanto, tratando-se de um equipamento não corrente nos laboratórios de ensaios de pavimentos em Portugal, não pode ser considerado como norma para a preparação de provetes para estudos de formulação das misturas. Em contrapartida concluiu-se que a compactação estática de

duplo efeito a 8 MPa também produz provetes com características semelhantes às da obra, podendo então ser este o processo de eleição a considerar na preparação de provetes para a realização de ensaios de laboratório.

As misturas betuminosas a frio são materiais evolutivos no sentido em que as suas características variam muito nas fases subsequentes ao fabrico e aplicação. No seu estudo em laboratório é pois de grande importância a consideração desse processo. A avaliação da evolução do processo de cura pode ser feita pelo acompanhamento do teor em água dos provetes. Foram feitos estudos considerando diferentes condições de cura, por exemplo, ao ar sem qualquer confinamento e ao ar envolvidos em película de polietileno, em paralelo com a monitorização da cura das misturas aplicadas em obra.

Concluiu-se que os provetes de laboratório totalmente expostos ao ar apresentam um processo de cura mais rápido que o processo em obra, isto é, na camada de pavimento. Em contrapartida os provetes envolvidos em película apresentam um processo mais lento.

O comportamento mecânico das misturas betuminosas pode ser focalizado no estudo do módulo de deformabilidade, da sua variação com a temperatura, no estudo do comportamento à fadiga e às deformações permanentes.

Sendo as misturas betuminosas com emulsão materiais em que as características mecânicas variam no tempo, e considerando a importância do processo de cura, procurou-se avaliar a variação dos parâmetros que caracterizam o seu comportamento ao longo deste processo.

No que respeita ao módulo de deformabilidade medido em ensaios de compressão diametral, os valores obtidos no período subsequente (24 h) à compactação foram tipicamente inferiores a 1 000 MPa ocorrendo, frequentemente, valores inferiores a 500 MPa. Verificou-se o crescimento progressivo dos valores desta grandeza até cerca de 4 meses, altura em que os módulos estabilizam em valores superiores, entre os 2000 e os 3000 MPa, para uma temperatura de referência de 20°C. Este comportamento foi verificado quer nos provetes de laboratório quer naqueles extraídos da obra. O processo de cura acelerada (1 dia à temperatura ambiente e 3 dias em estufa a 60°) parece conduzir a um processo de cura intermédio, com os valores do módulo de deformabilidade a oscilar entre 1 500 e 2 000 MPa. Em qualquer dos casos, quer de provetes recolhidos em obra quer de provetes curados em laboratório, a dispersão obtida foi elevada o que condiciona o número mínimo de ensaios necessários para definir o valor da deformabilidade.

A determinação do módulo de deformabilidade por retro-análise com base em resultados de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto, conduz a valores superiores, tipicamente

maiores que 3 000 MPa para a situação de cura completa. Esta diferença é inerente aos métodos de ensaio em apreço.

Os valores obtidos nos ensaios realizados, nomeadamente aqueles que acima se indicam, enquadram-se dentro das especificações e recomendações usadas em diversos países.

No que respeita à influência da temperatura no módulo de deformabilidade, dos ensaios efectuados, concluiu-se que a lei que se ajusta melhor aos valores obtidos é do tipo exponencial e que, independentemente das condições de cura, o declive da curva (em escala semi-logarítmica) é o mesmo. Aliás comparando com outro tipo de misturas, por exemplo misturas a quente, obtém-se o mesmo andamento, apenas diferindo no valor do módulo de referência (por exemplo, para uma temperatura de 20°C) que é necessariamente mais elevado nestas últimas, intermédio no caso nas misturas curadas e mais reduzido no caso das misturas ensaiadas com idades jovens. Tendo em consideração que a variação do módulo de deformabilidade da mistura com a temperatura é função essencialmente da variação da viscosidade do material betuminoso com essa grandeza, é natural que o tipo de andamento obtido seja, pelo menos semelhante, nos diversos tipos de misturas dado que todas possuem um componente comum.

O comportamento à fadiga é estudado em termos do número de ciclos que é necessário para levar o material à rotura. No pavimento real, os ciclos correspondem à passagem dos rodados dos veículos, enquanto que, nos ensaios de laboratório, os ciclos correspondem à aplicação de impulsos de carga do equipamento de ensaio. Existem diversas leis empíricas que permitem, em teoria, fazer a previsão do número de ciclos que cada mistura suporta.

Através de ensaios de compressão diametral foi avaliada a resistência à fadiga de misturas betuminosas a frio, em diversas fases de cura, tendo-se também, verificado o comportamento de uma mistura a quente de referência, usando o mesmo método de ensaio.

Os ensaios realizados com as misturas a frio com cura avançada, aproximaram-se bastante dos ensaios realizados em provetes de misturas a quente. Embora estes últimos tenham sido em número relativamente reduzido, a tendência verificada é a de que o comportamento dos materiais à fadiga será tendencialmente semelhante.

A caracterização do comportamento das misturas betuminosas às deformações permanentes pode ser feita recorrendo a diversos métodos de ensaio, tendo-se optado no presente estudo por ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas e ensaios de simulação em pista de laboratório. De acordo com os resultados obtidos, o comportamento às deformações permanentes segue o comportamento habitual dos mais diversos materiais, onde se podem distinguir três fases distintas no processo de desenvolvimento de deformações permanentes. Do ponto de vista das misturas betuminosas, a fase mais

relevante para o estudo é a fase secundária em que a deformação se processa a uma velocidade constante. As principais particularidades do comportamento das misturas a frio é a de apresentarem uma fase primária com uma deformação muito elevada que corresponde ao adensamento do material da mistura e re-arranjo das partículas de agregado, seguido da fase secundária com uma velocidade de deformação muito reduzida, inclusivamente mais baixa do que a verificada, em regra, nas misturas a quente tradicionais. O desempenho destas misturas na fase secundária vai melhorando com a idade, uma vez que para idades jovens das misturas a cura ainda não está concluída. De qualquer forma, a caracterização do comportamento às deformações permanentes é mais importante para as idades mais avançadas, atendendo a que estas misturas serão sempre aplicadas em camadas de base, e consequentemente, sobre elas será executada uma camada.

Finalmente, na sequência dos resultados obtidos no presente estudo, considera-se oportuna a revisão das especificações actualmente incluídas no Caderno de Encargos tipo da JAE, actual IEP, no que concerne às camadas em misturas betuminosas a frio, fabricadas com emulsão, por forma a ajustar alguns aspectos tendo em atenção os resultados dos presentes estudos e a experiência adquirida no decurso das obras recentemente realizadas.

Por outro lado, torna-se imprescindível que o Caderno de Encargos venha a incluir também especificações relativas a misturas recicladas, em particular, às realizadas *in situ* com emulsão betuminosa.

7.3 – Desenvolvimentos futuros

No presente trabalho procurou-se contribuir para o melhor conhecimento das misturas betuminosas densas a frio com especial incidência na sua aplicação à reabilitação de pavimentos. Apesar de se ter incidido em três vertentes importantes: pesquisa bibliográfica, acompanhamento de casos de obra e caracterização laboratorial, há diversos aspectos que interessa aprofundar.

Uma das principais dificuldades da caracterização do comportamento de pavimentos, em geral, e no caso particular das misturas betuminosas a frio, tem a ver com a transposição dos resultados dos ensaios de laboratório para a obra. Por exemplo, na caracterização do comportamento à fadiga, verificam-se importantes discrepâncias entre os resultados do número de ciclos até a rotura que se obtêm nos ensaios de laboratório e o que se passa na realidade. O uso de factores de escala para ultrapassar essas diferenças é algo arbitrário e deverá ser melhor estudado, em particular para as misturas betuminosas a frio, nomeadamente através da observação do comportamento de pavimentos em serviço.

A fim de atingir estes objectivos afigura-se indispensável o prosseguimento do acompanhamento do comportamento de obras, ao longo das diversas fases porque estas passam. Com efeito, embora a observação de obras tenha algumas limitações, nomeadamente pela dificuldade em caracterizar correctamente o carregamento a que os pavimentos estão sujeitos, as condições climatéricas, entre outros, as obras são, em última análise, a aplicação dos materiais e tecnologias nas condições reais.

Com base na avaliação do desempenho a longo prazo dos pavimentos reabilitados, e da sua comparação com o comportamento das misturas em laboratório, devem-se estabelecer correlações entre ambos por forma a obterem-se parâmetros para o correcto dimensionamento analítico dos pavimentos.

Paralelamente, torna-se igualmente indispensável estudar de forma sistemática, outras composições das misturas betuminosas a frio, por forma a avaliar a influência de cada componente no comportamento das misturas. Uma das tendências actuais é para a adição de pequenas quantidades de cimento, por forma a conseguirem-se melhores resistências iniciais, não alterando, no entanto, significativamente o comportamento "flexível" da mistura.

A metodologia proposta neste trabalho para o estudo de misturas betuminosas a frio, bem como a experiência adquirida no acompanhamento de obras onde estas foram aplicadas, constitui um ponto de partida para o desenvolvimento de estudos relativos a outras técnicas, nomeadamente a reciclagem *in situ* com cimento.

As especificações actualmente utilizadas em obras de pavimentação, embora englobem já o uso de emulsões, devem ser adequadas aos novos tipos de emulsões e às novas técnicas construtivas, como por exemplo, à reciclagem de pavimentos. Por outro lado, o controlo da qualidade deve ser tendencialmente direccionado para avaliar características directamente relacionadas com o desempenho do produto, nomeadamente, características de deformabilidade e de resistência, em complemento ao controlo indirecto habitualmente realizado através do controlo da composição das misturas e da baridade das camadas de pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agenda 21 (1992) - "Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano". Portal na internet http://www.pr.gov.br/sema/agenda21.shtml e http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/index.htm

AIPCR (1990) - "Dictionnaire Technique Routier (6e édition, 1990) Français - Anglais". Association Internationale Permanente des Congres de la Route/ Permanent International Association of Road Congresses, Paris, França

AMADEUS Report (1999) - "Guidelines on the use of models for pavement design and assessment". Project AMADEUS - Advance Models for Analytical Design of European Pavement Systems, Report, 30th June 1999

Ángel del Val, M.; Rocci, S. (1998) - "Guia para el dimensionamento de firmes reciclados in situ en frio". PROBISA, Espanha

Antunes, M.L. (1993) - "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

Antunes, M.L.; Batista, F.A. (1999) - "Estudo de formulação para uma mistura de agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa". LNEC, Nota Técnica Proc.º 92/73/8297, Portugal, Dezembro de 1999

Antunes, M.L.; Batista, F.A. (2002) - "Reabilitação de pavimentos utilizando misturas betuminosas a frio. Acompanhamento da obra de reabilitação do pavimento da EN120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro (proximidades de Baiona)". LNEC, Rel.º Proc.º 92/16/13636, Portugal, Janeiro de 2002

Antunes, M.L.; Batista, F.A. (2004) - "Reabilitação do pavimento do IP2, entre a barragem do Fratel e a EN 118, utilizando reciclagem "in situ" a frio com emulsão betuminosa". LNEC, Rel.º Proc.º 702/16/13636, Janeiro de 2004

Antunes, M.L.; Domingos, P.M. (2003) - "Caracterização final dos pavimentos do IC1 - Nó de Viana/Nó da Meadela (1ª fase) e do IP9". LNEC, Rel.º Proc.º0702/1/14578, Portugal, Março de 2003

Antunes, M.L.; Freire, A.C. (2003) - "Agregados para misturas betuminosas". Seminário sobre agregados, LNEC, Lisboa, Portugal, 31 de Março de 2003, 18p.

Antunes, M.L.; Fontul, S.; Campos, A.; Barros, R. (1998) - "Estudo de técnicas a aplicar no reforço de pavimentos flexíveis fendilhados. Execução de trechos experimentais na EN118 (km28+100 a km43+100)". JAE/LNEC, Rel.º Proc.º 92/1/10726, Portugal, Outubro de 1998

Antunes, M.L.; Azevedo, J.; Batista, F.A. (1999a) - "Experimental programme on traffic induced vibrations". SIAIS, Porto, Portugal, Março de 1999

Antunes, M.L.; Barros, R.; Batista, F.A. (1999b) - "Implementation of longitudinal evenness specifications for new constructions in Portugal". SIAIS, Porto, Portugal, Março de 1999

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Barros, R. (1999c) - "Especificações relativas à regularidade longitudinal em construções novas, 2º Relatório". JAE/LNEC, Rel.º Proc.º 92/1/12990, Portugal, Março de 1999

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Barros, R., Fonseca, M.E. (1999d) - "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, Portugal, Março de 1999

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Fonseca, M.E.; Barros, R. (1999e) - "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

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Eusébio, M.I.; Sá da Costa, M.; Miranda, C.V. (2000a) - "Characterisation of asphalt rubber mixtures for pavement rehabilitation projects in Portugal". Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal, 14th to 17th November 2000, Jorge B. Sousa (eds), pp. 285-307

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Eusébio, M.I.; Sá da Costa, M. (2000b) - "Caracterização de misturas betuminosas utilizando betume modificado com borracha". 1º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2000", LNEC, Lisboa, Portugal, 28 a 30 de Novembro de 2000, Volume III, pp. 395 a 409

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Gonçalves, J.-P. (2000c) - "Estudos relativos a misturas betuminosas densas a frio". 1º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2000", LNEC, Lisboa, Portugal, 28 a 30 de Novembro de 2000, Volume III, pp. 471 a 485

Antunes, M.L.; Fontul, S.; Pinelo, A. (2000d) - "Estudios relativos a técnicas de refuerzo de firmes flexibles agrietados". Carreteras - Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera, 4ª época, Núm. 110, Espanha, Setembro - Outubro de 2000, pp.53-68

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Eusébio, M.I.; Sá da Costa, M. (2001a) - "Reciclagem de pneus. Acompanhamento de obras de reabilitação de pavimentos rodoviários utilizando betão betuminoso com borracha". Revista bimestral "Tecnologias do Ambiente", Janeiro/Fevereiro 2001 – Ano 8 – Nº39, páginas 16 e 18, Lisboa, Portugal

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Eusébio, M.I.; Sá da Costa, M. (2001b) - "Estudos relativos à utilização de misturas betuminosas descontínuas com betume modificado com borracha na reabilitação de pavimentos das EENN 104 e 105". LNEC, Rel.º Proc.º 92/16/14174 - Proc.º Int. 24/533/692, Portugal, Setembro de 2001

Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Domingos, P.M. (2001c) - "Acompanhamento da obra de pavimentação do IC1 – Nó de Viana / Nó da Meadela (1ªfase) e Variante à EN202 entre o Nó da Meadela e o Nó com a EM526. 1º Relatório". LNEC, Rel.º Proc.º92/1/14578, Lisboa, Novembro de 2001

Antunes, M.L.; Eusébio, M.I.; Sá da Costa, M.; Domingos, P.M.; Lima, H. (2002) - "Caracterização da mistura betuminosa com betume modificado com borracha aplicada no IC1". 2º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2002", LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de Novembro de 2002, vol. II, pp. 363-378

Antunes, M.L.; Domingos, P.M.; Eusébio, M.I.; Sá da Costa, M. (2003) - "Studies concerning the use of asphalt rubber in Portugal". Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasília, Brasil, 1st to 4th, December, 2003, pp.195-210

APORBET (1998) - "Misturas Betuminosas - Contribuição para a normalização do fabrico e aplicação. Materiais e tipos de misturas, processos construtivos". Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Agosto de 1998, Portugal

Arce Jiménez, M. (2001) - "Agregados volcánicos para la producción de mezcla asfáltica". "Infraestructura Vial" Boletín Técnico del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Volumen 3, Nº1, Abril 2001, ISSN: 1409-4045, Costa Rica: pp. 16-25

Arizona DOT (1996) - "Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Section 413 - Asphaltic Concret (Ásphalt-Rubber), Section 414 - Asphaltic Concrete Friction Course (Asphalt-Rubber) & Section 1009 - Asphalt-Rubber Material". Arizona Department of Transportation, EUA

ARRA (2001) - "Basic Asphalt Recycling". Asphalt Recycling and Reclaiming Association, EUA

Asphalt Institute IS-178 (1987) - "Alternatives in pavement maintenance, rehabilitation, and reconstruction". Information Series No. 178, Second Edition, Asphalt Institute, Asphalt Institute Building College Park, Maryland 20740-1802, EUA

Asphalt Institute MS-2 (1993) - "Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types". Manual Series No.2, Sixth Edition, Asphalt Institute, EUA

Asphalt Institute MS-14 (1997) - "Asphalt cold mix manual". Manual Series No.14, Third Edition, Asphalt Institute, EUA, Janeiro de 1997

Asphalt Institute MS-19 - "A basic asphalt emulsion manual". Manual Series No.19, Third Edition, Asphalt Institute & Asphalt Emulsion Manufactures Association, EUA

Asphalt Institute MS-21 (1983) - "Asphalt cold mix recycling". Manual Series No.21, Asphalt Institute, EUA, Março de 1983

Austroads (2002) - "Guide to the Selection and Use of Bitumen Emulsions". Austroads, Sydney, Australia, 2002

Azevedo, M.C. (1987) - "Metodologia para formulação de misturas betuminosas fechadas fabricadas a frio". LNEC, Rel.os Proc.os 92/15/8750, 92/13/7476, Portugal, Dezembro de 1987

Azevedo, M.C. (1993) - "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, Portugal, Maio de 1993

Baptista, A.M. (1999) - "Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis. Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes". Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, Fevereiro de 1999

Barnes, H.; Huntton, J.; Walters, K. (1998) - "An Introduction to Rheology". Rheology Series 3, University of Wales, Abersystwyth, Elsevier, R.U.

Batista, F.A.; Antunes, M.L. (2001) - "Estratégias de reabilitação de pavimentos. Reciclagem". Simpósio Ibérico GALP ENERGIA "Ambiente, Qualidade e Segurança nos Ligantes Betuminosos", Lisboa, Portugal, 25 de Outubro de 2001

Batista, F.A.; Antunes, M.L. (2002) - "Characterisation of dense-graded asphalt cold mixtures for pavement rehabilitation". Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields", Bearing Capacity of Roads,

Railways and Airfields, LNEC, Lisboa, Portugal, Correia & Branco (eds), Portugal, 2002, Volume 1 – pág. 391-400.

Batista, F.A.; Antunes, M.L. (2003) - "Pavement rehabilitation using asphalt cold mixtures". Proceedings of the 3rd International Symposium on the Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control "Mairepav03", Guimarães, Portugal, 7 a 10 de Junho de 2003, pp. 653-662

Batista, F.A.; Antunes, M.L.; Marques, J.A. (2000) - "Reutilização de materiais betuminosos fresados na reabilitação de pavimentos". 1º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2000", LNEC, Lisboa, Portugal, 28 a 30 de Novembro de 2000, vol. II, pp. 689-702

Batista, F.A.; Antunes, M.L.; Pathé, P.; Botelho, T. (2002) - "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", LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de Novembro de 2002

Bondt, A.H. (1999) - "Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays". Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Holanda

Bonnot, J. (1986) - "Asphalt aggregate mixtures". Transportation Research Record, 1096, TRB, Washington D. C., pp. 42-51

Bonvallet, J. (2003) - "Bituminous products recycling in hot mix plants: some remarks on the possible choices for the contractor". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 8.1 - 8.12

Brown, S F. (1990) - "Bituminous materials. Elastic stiffeness and permanent deformation". Residential course on bituminous pavements: materials, design and evaluation, Lecture I, University of Nottingham, Inglaterra

Brown, S.F.; Pell, P.S.; Stock, A.F. (1977) - "The application of simplifiesd, fundamental design procedure for flexible paviments". Proceedings of the IVth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, EUA, pp. 107-120

Brunton, J. M. (1990) - "Structural design of pavements". Residential course on bituminous pavements: materials, design and evaluation, Lecture N, University of Nottingham, Inglaterra

Capitão, S.D. (2003) - "Caracterização mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade". Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, Julho de 2003

Capitão, S.D.; Picado Santos, L. (2002) - "Comparação de características mecânicas de misturas betuminosas de alto módulo obtidas sobre provetes extraídos do pavimento e produzidos em laboratório". 2º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2002", LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de Novembro de 2002, vol. II, pp. 205-216

Capitão, S.D.; Picado Santos, L.; Quaresma, L. (2000) - "Formulação de mistura betuminosa de alto módulo para um pavimento fortemente solicitado". 1º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2000", LNEC, Lisboa, Portugal, 28 a 30 de Novembro de 2000, vol. II, pp. 593-604

CE (2000) - "La politique Européene des transports à l'horizon 2010: l'heure du choix". Livro branco da Comissão Europeia

CFTR (2002) - "Anti-rutting solutions". Comité français pour les techniques routières. Europeanroads review, Special Issue, RGRA 2, 2002

Claessen, A.; Edwards, J.; Sommer, P.; Ugé, P. (1977) - "Asphalt Pavement Design - The Shell Method". Proceedings of the IVth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, EUA, pp. 39-74

Collings, D. C. (2001) - "Experiences gained from ten years of pavement rehabilitation by in situ recycling with cement and combinations of cement/bituminous stabilising". 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, Salamanca, España, 1 al 4 de Octubre, Vol. I, pp. 89-103

Colombier, G. (1989) - "Fissuration des chaussées - Nature et origine des fissures - Moyens pour maitriser leur remontée". RILEM Conference on Reflective cracking in pavements – Assessement and control, Liege, Belgium, March 8, 9 and 10, 1989, CEP-LMC University of Liege Ed., pp.3-22

Cooper, K.E.; Pell, P.S. (1974) - "The effect of mix variables on the fatigue strength of bituminous materials". TRRL Laboratory Report LR 633, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, R.U.

COST 333 (1999) - "COST 333 – Development of New Bituminous Pavement Design Method - Final Report of the Action". Transport Research, European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, European Commission, Directorate General Transport, 1999

COST 343 (2001) - "Final Report – COST Action 343 – Reduction on Road Closures by Improved Maintenance Procedures, Work Package 1 – Maintenance Options". European Commission, Research DG, European Research Area: Structural Aspects & FEHRL - Forum of European National Highway Research Laboratories

COST 343 (2003a) - "Final Report – COST Action 343 – Reduction on Road Closures by Improved Maintenance Procedures, Work Package 3 – Procedure for Selection of Maintenance Treatment Options at Project Level". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, European Commission, Research DG, European Research Area: Structural Aspects & FEHRL - Forum of European National Highway Research Laboratories

COST 343 (2003b) - "COST Action 343 – Reduction of Road Closures by Improved Pavement Maintenance Procedures, Work Package 3 – Practical Guide for Selection of Maintenance Treatments at Project Level". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, European Commission, Research DG, European Research Area: Structural Aspects & FEHRL - Forum of European National Highway Research Laboratories

de Hilster, E.; Van de Loo, P. (1977) - "The creep test: Influence of test parameters". Koninklijke/Shell Laboratorium, Amsterdam, Holanda

Drescher, A.; Kim, J.; Newcomb, D. (1993) - "Permanent Deformation in Asphalt Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 5, Number 1, February 1993

Dudgeon, R.P.; Ellis, S.J.; Carswell, I. (2001) - "Mantenimiento estructural de firmes mediante la tècnica de reciclado in situ". 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, Salamanca, España, 1 al 4 de Octubre, Vol. I, pp. 625-637

EAPA (1995) - "Recycling technologies in Europe". European Asphalt Pavement Association, Breukelen, Holanda

EAPA (1998) - "Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas". European Asphalt Pavement Association, Holanda (APORBET, Portugal)

Eckmann, B. (1999) - "Especificaciones basadas en el comportamiento (performance based specifications) para el betún. Parte I: El papel del betún en una mezcla bituminosa". PERFORMANCE, El boletín de información de Nynas sobre el betún asfaltico y sus aplicaciones, NYNAS, 1999/Edición

Epps, J. & Quintus, H. V. (1990) - "Asphalt materials and paving mixtures". NHI Course nº 13123, Federal Highway Administration

ETNRecy (2000) - "Use of recycled materials as aggregates in the construction industry. Lahti Motorway load bearing structures. Finland". European Thematic Network on Recycling in Construction, Combined Volume 2, Issue 3 & 4, March/September 2000

Fernández del Campo, J. A. (1983) - "Pavimentos bituminosos en frío". Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, Espanha

Fernández del Campo, J. A. (1998) - "Tratado de estabilización y reciclado de capas de firmes con emulsión asfáltica". Asociación Española de la Carretera, Espanha

Ferreira, A; Picado Santos, L.; Antunes, A. (1999) - "Modelação do comportamento dos pavimentos rodoviários". 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Volume II, Asociación Española de la Carretera, Sevilha, Espanha, 1 a 6 de Novembro de 1999, pp.1481-1495

FHWA (1999) - "Pavement Preservation: A Road Map for the Future. Ideas, strategies, and techniques for Pavement Preservation". Federal Highway Administration, U.S. Departement of Transportation, Publication No. FHWA-SA-99-015, Forum held, October 26-28, 1998, Kansas City, Missouri

Finn, F.; Saraf, C.; Kulkarni, R.; Nair, K.; Smith, W.; Abdullah, A. (1977) - "The use of distress prediction subsystems for the design of pavement structures". Proceedings of the VIth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, EUA, pp. 3-38

FORMAT (2003) - "Selection of Maintenance Techniques and Procedures for Implementation". FORMAT - Fully Optimised Road Maintenance, Deliverable Report D2, January 2004

FORMAT (2004) - "Performance of Innovative Maintenance Techniques and Strategies". FORMAT - Fully Optimised Road Maintenance, Deliverable Report D9, January 2004

Francken, L.; Clauwaert, C. (1987) - "Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures". Proceedings of the VIth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, EUA, 1987

Freire, A.C. (2002) - "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, Portugal, Janeiro de 2002

Freire, A.C.; Antunes, M.L. (2004) - "Acompanhamento da execução da obra do IP4. Beneficiação entre Santa Comba de Rossas (km 193+500) e Bragança (km 213+100)". LNEC, Rel.º Proc.º0702/01/14937, Lisboa, Portugal

Fröbel, T. (2002) - "Reabilitação de pavimentos usando a reciclagem a frio - Porquê, Quando, Como?". Colóquio Técnico "Foamed Bitumen: Reciclagem a frio para o Séc. XXI", FEUP, Porto, Portugal, 15 de Março de 2002

Fröbel, T.; Veith, G. (2002) - "Cold recycling with foamed bitumen: An innovative technology for structural road rehabilitation". Europeanroads review, Special Issue, RGRA 2, 2002

Gallego Medina, J. (1999) - "Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos. Estudio de la influencia de las características del caucho e del proceso de fabricación y puesta en obra de la mezcla". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha

Gallego Medina, J. (2001) - "Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos". Ministerio de Fomento & CEDEX - Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, Espanha, 2001, 175p.

Glet, W. (2000) - "Five stages model for the bitumen emulsion setting and its importance of such emulsions in road construction". Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V, Hamburg, January 2000

Gonçalves, J.-P. (2000) - "Formulação de misturas betuminosas densas a frio para camadas de base em pavimentos rodoviários". Tese de Mestrado, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2000

Haas & Joseph (1989) - "Desin oriented evaluation of alternatives for reflection cracking through pavement overlays". RILEM Conference on Reflective cracking in pavements – Assessement and control, Liege, Belgium, March 8, 9 and 10, 1989, CEP-LMC University of Liege Ed., pp.23-46

HRB/AASHO Test (1962) - "The AASHO road test". Highway Research Board, Report 5, Pavement Research, Special Report 61E, National Academy of Sciencies

Huang, Y.H. (1993) - "Pavement analysis and design". Edited by Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, EUA

Huet, C. (1967) - "Représentation des modules et complaisances complexes dans les plans complexes arithmétique et logarithmique". Cahiers du Groupe Français de Rhéologie, Tome I, Nº5, França, pp.237-258

Itasca (1997) - "FLAC3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 2.0". Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, EUA

Jenkins, K. J. (2000) - "Mix design considerations for cold and alf-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen". PhD Thesis, University of Stellenbosch, África do Sul

Jofré, C. (2001) - "La técnica del reciclado de firmes con cemento". 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, Salamanca, Espana, 1 al 4 de Octubre de 2001, Vol. I, pp. 61-88

Jofré, C. (2003) - "Reciclados de firmes con cemento". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 4.1 - 4.36

Jofré, C.; Kraemer, C.; Díaz Minguela, J. (1999) - "Manual de firmes reciclados in situ con cemento". IECA - Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Espanha, 1999, 161p.

Jongepier, R.; Kuilman, B. (1969) - "Characteristics of the rheology of bitumens". Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.38, pp98-122

Kuhn, M.R.; Mitchell, J.K. (1993) - "New perpectives on soil creep". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, Nº 3, pp. 507-524

Lakes, R. (1998) - "Viscoelastic solids". CRC Mechanical Engineering Series, Edited by Franck A. Kulacki, University of Minnesota

Lara, A.L. (1998) - "Reciclado en frío in situ con emulsión en itinerario Serpa-Vila Verde de Ficalho". IV Congreso Nacional de Firmes, Reciclado de Firmes, Segovia, Espanha, 3 a 5 de Junho de 1998, pp.213-219

LCPC & SETRA (1997) - "French design manual for pavement structures. Guide technique". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées & Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, Ministère de L'Équipement, des Transports et du Logement, França

Le Coroller, A. (1999) - "L'émulsion de bitume au service de la route dans le monde". Routes/Roads, AIPCR, N°304, IV

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

Martinho, F.; Clérigo, V. (1999) - "Reciclagem in situ 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.1109-1119

Miranda, C.V. (1979) - "Emulsões de betume/Misturas betuminosas a frio". 1º Volume - Emulsões de betume, Junta Autónoma de Estradas, Sector de Geotecnia da D.S.R.E. Sul

Miranda, C.V. (1996) - "Projecto de Beneficiação da EN 14 entre o Nó de Chantre (km 4,585) e o Limite do Distrito de Braga (km 20,028), da EN 104 entre Azurara (km 0,000) e Trofa (km 16,334) e da EN 105 entre Travagem (km 5,718) e Santo Tirso (km 22,500)". JAE – DSREN, Porto, Portugal

Miranda, C.V.; Fernandes, C.; Fonseca; P. (2003) - "A utilização de reciclagem "in situ" com cimento na obra de beneficiação do IP4 entre Rossas e Bragança". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 13.1 - 13.10

NCAT (1999) - "Hot mix asphalt for undergraduate, including the Superpave mix design system". National Center for Asphalt Tecnology (USA), CD-Rom, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, EUA

Neussner, E. (2001) - "The importance of stabilisation procedures. History and current practise in Germany". 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, Salamanca, España, 1 al 4 de Octubre, Vol. I, pp. 41-59

Novais Ferreira (1997) - "Aspectos da compactação em estradas". LNEC, Especialização e Aperfeiçoamento, Vias de Comunicação, S329, Lisboa, Portugal

Nunes, A. & Santos, J. (2003) - "Cimentos para a reciclagem de pavimentos rodoviários". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 3.1 - 3.11

Nunn, M. E. (1989) - "An investigatin of reflection cracking in composite pavements in the United Kingdom". RILEM Conference on Reflective cracking in pavements –

Assessement and control, Liege, Belgium, March 8, 9 and 10, 1989, CEP-LMC University of Liege Ed., pp.146-153

Nunn, M. E.; Lawrence, D.; Brown, A. (2000) - "Development of a practical test to assess the deformation resistance of asphalt". Proceedings of the 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress 2000, Barcelona, Spain, pp. 587-596

OCDE (1987) - "Systèmes de gestion des chaussées". Organisation de Coopération et de Développement Économiques, Paris, France

OCDE (1997) - "Stratégies de recyclage dans les travaux routiers". Organisation de Coopération et de Développement Économiques, Paris, France, 145p.

Oliveira, J.R. (2000) - "Reciclagem de pavimentos. Uma técnica alternativa de reabilitação.". Relatório de Projecto Individual da Licenciatura em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Páez, A.; Sánchez, J.; Bardesi, A.; Albuquerque, A. (2000) - "Experiência no fabrico e na utilização de betumes modificados com polímeros". 1º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2000", LNEC, Lisboa, Portugal, 28 a 30 de Novembro de 2000, vol. III, pp. 439-449

Pais, J.; Pereira, P.; Azevedo, M. C. (2000) - "Ensaios mecânicos para caracterização de misturas betuminosas". 2º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2002", LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de Novembro de 2002, vol. II, pp. 639-649

Paranhos, C.A. (1990) - "Compatibilidade das emulsões asfálticas com a natureza mineralógica dos agregados". 10º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil, 1990

PARIS (1998) - "Performance Analysis of Road Infrastructure". Final Report, European Comission, Brussels 1999

Pavia (2002) - "Estudo para reciclagem "in situ" com emulsão betuminosa ". Pavia - Pavimentos e Vias S.A., Relº nº R020056, Alverca, Portugal, 26 de Março de 2002

Pereira, P. A.; Pais, J.; Azevedo, M. C. (1997) - "Shear tests for characterization of bituminous mixtures stifness". 2nd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials, Leeds, April

Pérez Jiménez, F.E. (2003) - "Reciclado in situ com emulsión. Análisis de su comportamiento. Comparación resultados de laboratório y obra". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 6.1 - 6.17

Picado Santos, L. (1994) - "Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis". Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, Novembro de 1994

Pinelo, A.M. (1991) - "Projecto e observação de pavimentos rodoviários". Programa de Investigação Apresentado a Concurso para Acesso à Categoria de Investigador-Coordenador, LNEC, 1991

Potti, J.J. (1999) - "Propiedades y clasificación de las emulsiones bituminosas". As emulsões betuminosas e suas aplicações, 24 a 26 Novembro, 1999, Centro Rodoviário Português, Lisboa, 17 pág.

Potti, J.J. (2002) - "Experiencia del empleo de las bases de alto módulo en la M-501 (Madrid)". 2º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2002", LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de Novembro de 2002, vol. II, pp. 109-121

Potti, J.J. & Leal, F. (2000) - "Estudo da rotura e coesão inicial das emulsões betuminosas". 1º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2000", LNEC, Lisboa, Portugal, 28 a 30 de Novembro de 2000, vol. II, pp. 661-670

Powell, W.D.; Potter, J.F.; Mayhew, H.C.; Nunn, M.E. (1984) - "The structural design of bituminous roads". TRRL Laboratory Report LR 1132, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, R.U.

Prates, M. & Barros, R. (1998) - "As novas técnicas de pavimentação em Portugal". Forum Internacional sobre Novas Técnicas de Pavimentação, Barcelona, Espanha, 26 e 27 de Novembro de 1998

PROBISA (2000) - "Estudo de base tratada com emulsão - EN120 - Beneficiação entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro". PROBISA Portuguesa - Produtos Betuminosos, S.A., Portugal

PROBISA (1998a) - "Mezclas en frío y grava-emulsión". Documento interno, PROBISA, Madrid, Espanha

PROBISA (1998b) - "Estudo Reciclado a Frio - EN260 (IP8) - Beneficiação entre Serpa e V. V. Ficalho". PROBISA Portuguesa - Produtos Betuminosos, S.A., Portugal

PROBISA (1998c) - "Estudo de base tratada com emulsão (km31+000 a 40+200) - EN260 (IP8) - Beneficiação entre Serpa e V. V. Ficalho". PROBISA Portuguesa - Produtos Betuminosos, S.A., Portugal

PROBISA (1998d) - "Estudo de base tratada com emulsão (km40+200 a 58+000) - EN260 (IP8) - Beneficiação entre Serpa e V. V. Ficalho". PROBISA Portuguesa - Produtos Betuminosos, S.A., Portugal

Profabril (1988) - "IP8 - EN260 – Reforço do pavimento e protecção marginal entre Serpa e Vila Verde de Ficalho. Caracterização do estado actual". Profabril Centro de projectos, S.A., Estudo nº9458, Volume 1/2, Lisboa, Portugal

Quaresma, L.M. (1992) - "Estudos relativos a pavimentos semi-rígidos. Dimensionamento e Observação". Tese para acesso à categoria de Investigador-Auxiliar e para a obtenção do grau de Especialista, LNEC, Portugal

Quaresma, L.; Freire, A.C.; Ferreira, P.S.; Batista, A.L.; Almeida, J.R. (2000) - "Consideração do comportamento viscoelástico das misturas betuminosas na previsão de deformações permanentes de pavimentos rodoviários". 1º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2000", LNEC, Lisboa, Portugal, 28 a 30 de Novembro de 2000, vol. II, pp. 717-730

Rao, T.S.; Craus, J.; Deacon, J.A.; Monismith, C.L. (1990) - "Summary Report on Fatigue Reponse of Asphalt Mixtures". TM-UCB-A-003A-89-3, Strategic Highway Research Program, Project A-003A, National Research Program

Ribeiro, J.Q. (2003) - "Reciclagem a frio com espuma betume". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 5.1 - 5.15

Ruopp, F. (1997) - "Cold asphalt recycling. An economical and environmental method for the construction of low volume roads.". VTI notat 71-1997, Swedish National Road and Transport Research Institute, Suécia

Sá da Costa, M.; Eusébio; M.I. (2002) - "Emulsões betuminosas catiónicas para pavimentação - Análise comparativa das especificações LNEC E 354 e prEN 13808". LNEC, Rel.º Proc.º024/541/673, Lisboa, Fevereiro de 2002

Sabita Manual 19 (1997) - "Technical Guidelines for the Specification and Design of Bitumen-Rubber Asphalt Wearing Courses, Manual 19". Southern African Bitumen and Tar Association, Roggebaai, África do Sul, Março de 1997

Sabita Manual 3 (1988) - "Test methods for bitumen-rubber". Southern African Bitumen and Tar Association, Roggebaai, África do Sul

Santana, H. (1992) - "Manual de pré-misturados a frio, 1ª Edição". Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro

Santos, B.; Picado Santos, L.; Antunes, A.; Ferreira, A.; Carvalheira, C.; Bicho, M.H.; Quadrado, I.; Silvestre, S. (2002) - "Desenvolvimento duma base de dados como instrumento dum sistema de gestão duma rede rodoviária urbana". 2º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2002", LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de Novembro de 2002, vol. I, pp. 431-442

Sayegh (1967) - "Viscoelastic properties of bituminous mixtures". Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, EUA, 1967

Serfass, J.-P. (2002) - "Advantages, peculiarities and mysteries of emulsion cold mixes. ". Colas (Ed.) – Emulsion cold mixes. Specific features and new design method, COLAS S.A., Magny-les-Hameaux, France, pp. 3-11.

Shell (1990) - "The Shell bitumen handbook". Shell Bitumen U.K.

Shell (1998) - "Shell Global Solutions. BANDS 2.0 BISAR 3.0 SPDM 3.0 - Software and Usar Manuals". CD-Rom, Shell Research and Technology Centre, Amsterdam, May 1998

Shell International Petroleum Company, Lda. (1978) - "Shell pavement design manual – Asphalt pavements and overlays for road traffic". London

Simões, R.; Paul, I. (2002) - "Aplicação da técnica de reciclagem de pavimentos in situ na beneficiação da EN383 - Canhestros/Aljustrel". 2º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2002", LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de Novembro de 2002, vol. II, pp. 305-318

Sousa, J. B. (1986) - "Dynamic properties of pavement materials". PhD Thesis, University of California, Berkeley, EUA

Sousa, J. B.; Weissman, S. (1994) - "Modelling permanent deformation of asphalt-aggregate mixes". Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologies, St. Louis; Missouri, March 21-23, Volume 63, pp. 224-257

Tanner, R.; Walkers, K. (1998) - "Rheology: an historical perpesctive". Rheology Series 7, University of Wales, Abersystwyth, Elsevier, R.U.

Task Force 38 Report (1998) - "Report on Cold Recycling of Asphalt Pavements". AASHTO-AGC-ARTBA Joint Committee, March 1998

Teixeira, A.; Rodrigues, R.; Azevedo, M.C. (2003) - "Betume espuma - 1ª Experiência em Portugal". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 12.1 - 12.14

Tejeda, E. (1999) - "Investigación sobre el comportamiento en laboratorio de las mezclas bituminosas recicladas con emulsión. Bases para un nuevo método de formulación". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos, Madrid, Espanha, Junio de 1999

Tomás, R. (1999) - "Las emulsiones en el mundo. Ultimos avances". Acção de formação "As emulsões betuminosas e suas aplicações", Centro Rodoviário Português, Lisboa, 24 a 26 de Novembro de 1999

Tovar de Lemos, A.F. (1990) - "Mecânica dos meios contínuos". Lisboa, 1990

TRL Report 386 (1999) - "Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling by Milton, L. J. & Earland, M. G.". TRL Report 386, Inglaterra

Ullidtz, P. (1998) - "Modelling Flexible Pavement Response and Performance". Technical University of Denmark, Polytenisk edition, Lyngby, Dinamarca

Vale, C.; Sousa Melo, A. (2004) - "Comparison of materials' behaviour models in the performance of flexible pavements". Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004, pp 1777-1787

Van der Zwan (2003) - "Recycling in road construction more than technology". Roads, Nº319, III

Vieira, L. (2003) - "Reciclagem semiquente em central". II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp. 10.1 - 10.11

Visser, A.T.; Verhaeghe, B. (2000) - "Bitumen-rubber: Lessons learned in South Africa". Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal, 14th to 17th November 2000, Jorge B. Sousa (eds), pp. 33-51

Way, G. B. (1999) - "Flagstaff I-40 asphalt rubber overlay project – Nine years of success". Transportation Research Board, 78th Annual Meeting, Agosto de 1999

Way, G. B. (2000) - "OGFC Meets CRM: Where de Rubber meets the Rubber. 12 Years of Durable Success". Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal, 14th to 17th November 2000, Jorge B. Sousa (eds), pp. 15-31

Wirtgen GmbH (1997) - "Máquina recicladora WR 2500. Prestaciones convincentes para múltiples aplicaciones". Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany, 1997, 51p.

Wirtgen GmbH (1998) - "Dust-free addition of cement with the slurry mixer WM 1000". Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany

Wirtgen GmbH (2001a) - "Rehabilitation of a heavily trafficked road. Pavement investigation and construcyion report". Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany, 45p.

Wirtgen GmbH (2001b) - "Foamed Bitumen - The innovative technology for road construction". Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany, 29p.

Wirtgen GmbH & A. A. Loudon & Partners (2001c) - "Wirtgen cold recycling manual". Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany, 2nd revised issue September 2001, 165p.

ACERVO NORMATIVO

Normas Portuguesas (Portugal)

NP 82:1964	Materiais betuminosos. Ensaio de penetração
NP 581:1969	Inertes para argamassas e betões. Determinação das massas volúmicas e da absorção de água das britas e godos
NP 954:1973	Inertes para argamassas e betões. Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias
NP EN 197-1:2001	Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes

Especificações LNEC (Portugal)

LNEC E 80 – 1997	Betumes e ligantes betuminosos. Betumes de Pavimentação. Classificação, propriedades e exigências de conformidade
LNEC E 128 – 1984	Emulsões betuminosas alcalinas para pavimentação. Características e recepção
LNEC E 197 – 1967	Solos. Ensaios de compactação
LNEC E 199 – 1967	Solos. Ensaios de equivalente de areia
LNEC E 204 – 1967	Solos. Determinação da baridade seca "in situ" pelo método de garrafa de areia
LNEC E 233 – 1970	Agregados. Análise granulométrica
LNEC E 235 – 1970	Agregados. Determinaçãop da quantidade de material que passa no peneiro 0,074 mm (nº 200 ASTM)
LNEC E 237 – 1971	Agregados. Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles
LNEC E 354 – 1984	Emulsões betuminosas catiónicas para pavimentação. Características e recepção

Caderno de Encargos tipo da JAE (Portugal)

Caderno de Encargos Tipo para a Execução de Empreitadas de Construção, Março de 1998

Capítulo 03 Pavimentação

Normas NLT (Espanha)

NLT-161/84	Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas
NLT-162/84	Efecto del agua sobre las mezclas bituminosas compactadas (Ensayo de Inmersión – Compresión)
NLT-173/84	Resistencia a la deformaciín plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio
NLT-310/90	Compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados
NLT-349/90	Medida de módulos dinámicos de materiales para carreteras

Caderno de Encargos tipo da DGC (Espanha)

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3

Artículo 213/1999	Emulsiones bituminosas
Artículo 216/1999	Emulsiones bituminosas modificadas con polímeros
Artículo 514/1976	Grava-emulsión
Artículo 541/1976	Mezclas bituminosas en frío
Artículo 542/2001	Mezclas bituminosas en caliente

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras PG-4

Artículo 20/2001	Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas
Artículo 21/2001	Reciclado in situ con cimento de capas bituminosas

Outros documentos normativos (Espanha)

Instrucción de Carreteras

Instrucción 6.1-IC (2003)	Secciones de firmes
Instrucción 6.3-IC (2003)	Rehabilitación de firmes

Normas AFNOR (França)

XP P 18-540: Octobre 1997	Granulats : Définitions, conformité, spécifications
NF T 65-011: Octobre 1984	Liants hydrocarbonés - Émulsions de bitume - Spécifications
NF P 98-121: Novembre 1993	Assises de chaussés. Grave-émulsion. Définition – Classification – Caractéristiques – Fabrication – Mise en oeuvre
NF P 98-139: Janvier 1994	Enrobés hydrocarbonés. Couches de roulement : bétons bitumineux à froid. Définition – Classification – Caractéristiques – Fabrication – Mise en œuvre
NF P 98-141 : Novembre 1999	Enrobés hydrocarbonés. Couches de roulement et couches de liaison : bétons bitumineux à module élevé (BBME). Définition – Classification – Caractéristiques – Fabrication – Mise en oeuvre
NF P 98-149 : Juin 2000	Enrobés hydrocarbonés. Terminologie. Composants et composition des mélanges – Mise en oeuvre – Produits – Techniques et procédés
NF P 98-251-4 : Octobre 1992	Essais relatifs aux chaussées. Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés. Partie 4 : Essais DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à froid à l'émulsion de bitume

Normas BSI (Reino Unido)

BS DD 226: 1996	Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subjected to unconfined dynamic loading
BS DD 213:1993	Method for determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures
BS 2000-58:1993	Methods of test for petroleum and its products. Determination of softening point of bitumen. Ring and ball method

Normas ASTM (Estados Unidos da América)

ASTM D 977 – 03	Standard Specification for Emulsified Asphalt
ASTM D 1074 – 96	Standard Test Method for Compressive Strength of Bituminous Mixtures
ASTM D 1075 – 94	Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures
ASTM D 1561 – 92 (Reapproved 2000)	Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Test Specimens by Means of California kneading Compactor
ASTM D 2397 – 02	Standard Specification for Cationic Emulsified Asphalt
ASTM D 3202 – 94 (Reapproved 2000)	Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Beam Specimens by Means of the California kneading Compactor

Normas AASHTO (Estados Unidos da América)

TP8-94	Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt subjected to repeated flexural bending

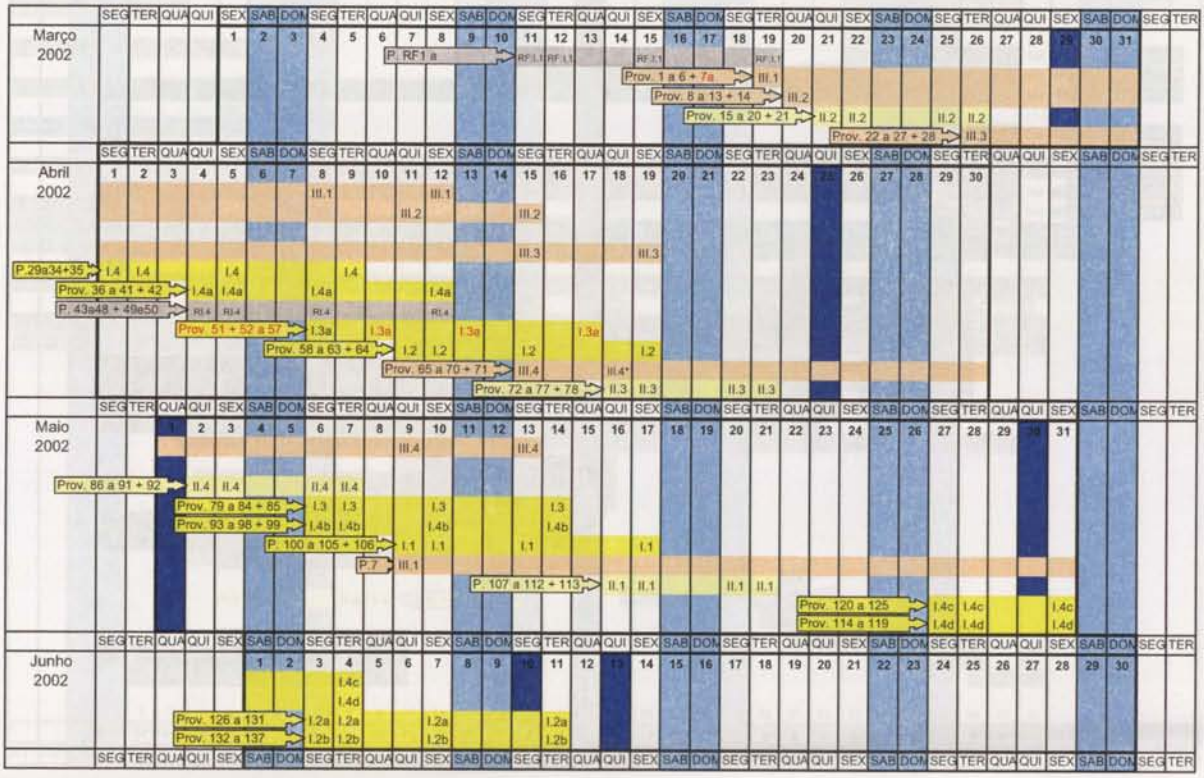
Normas ou pré-normas Europeias

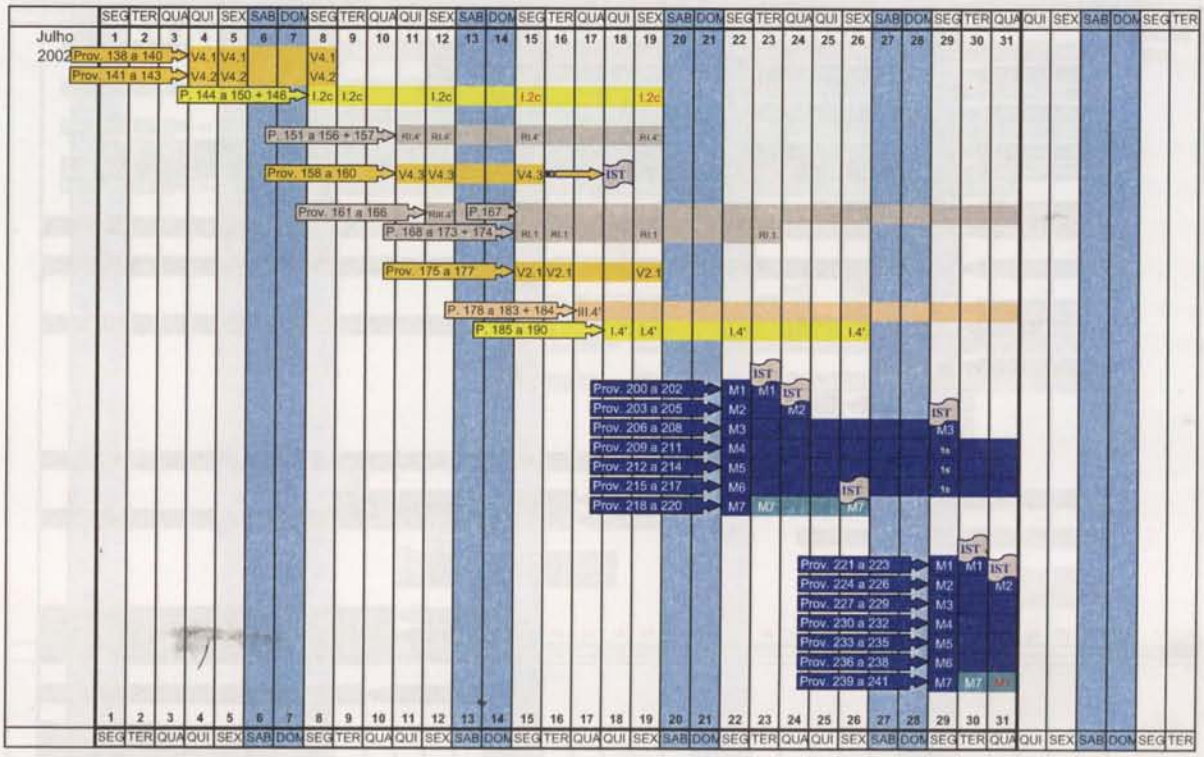
EN 933-1: 2000	Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method
prEN 12697-22: 2003	Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking
prEN 12697-23: 2003	Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens
prEN 12697-24: 2003	Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue
prEN 12697-25: 2003	Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test
prEN 13808: 2001	Bitumen and bituminous binders – Framework for specifying cationic bituminous emulsions
EN 13043: 2002	Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas

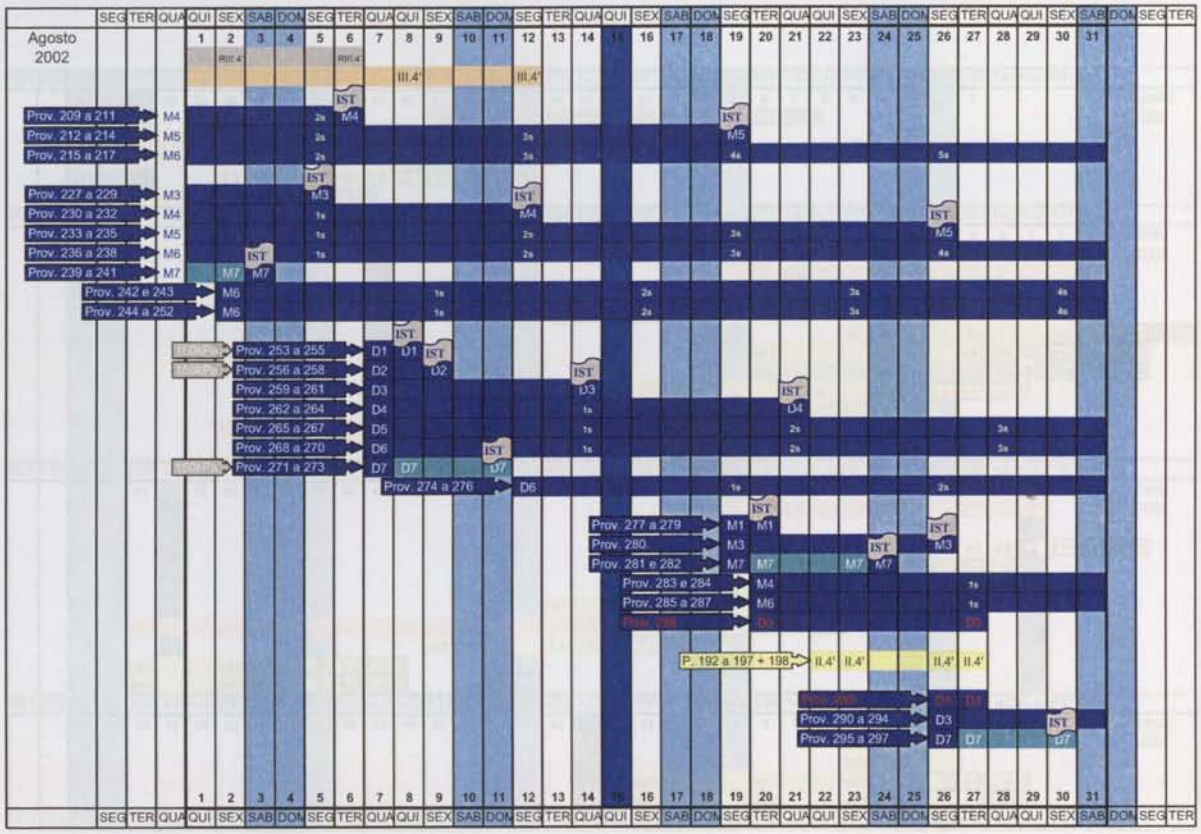
ANEXOS

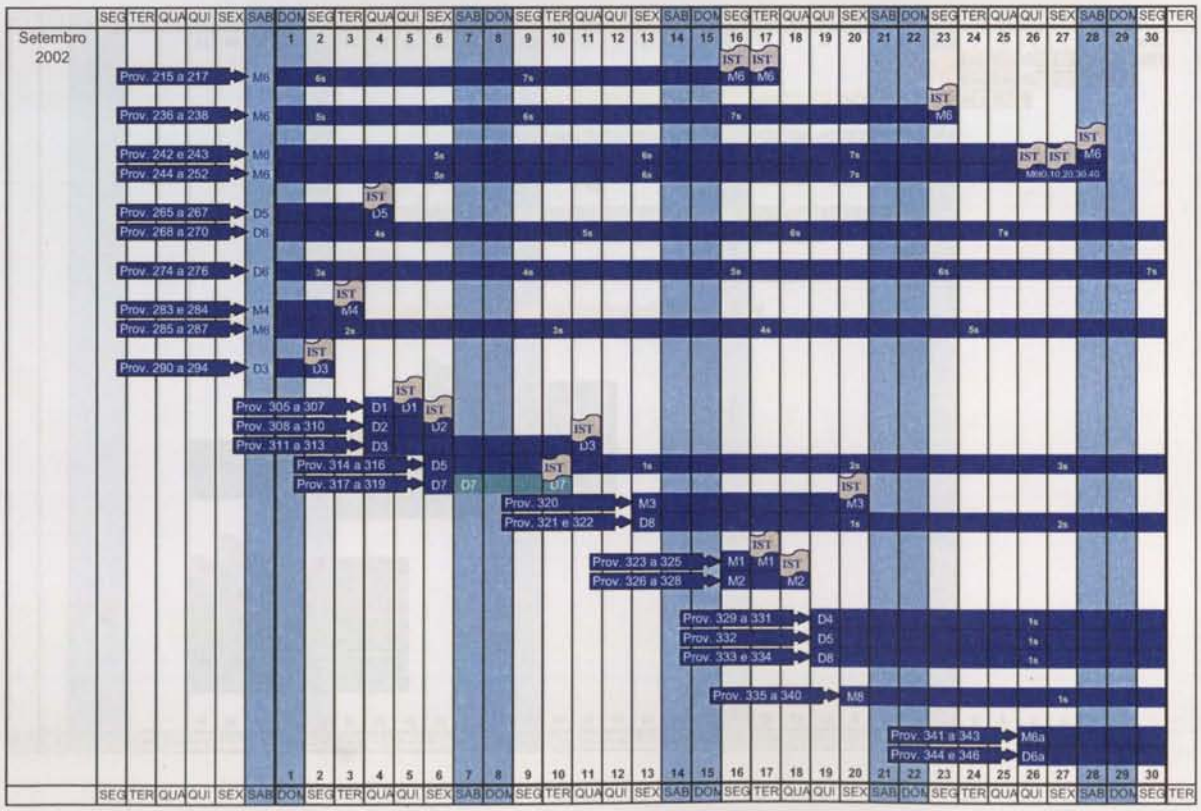
ANEXO I

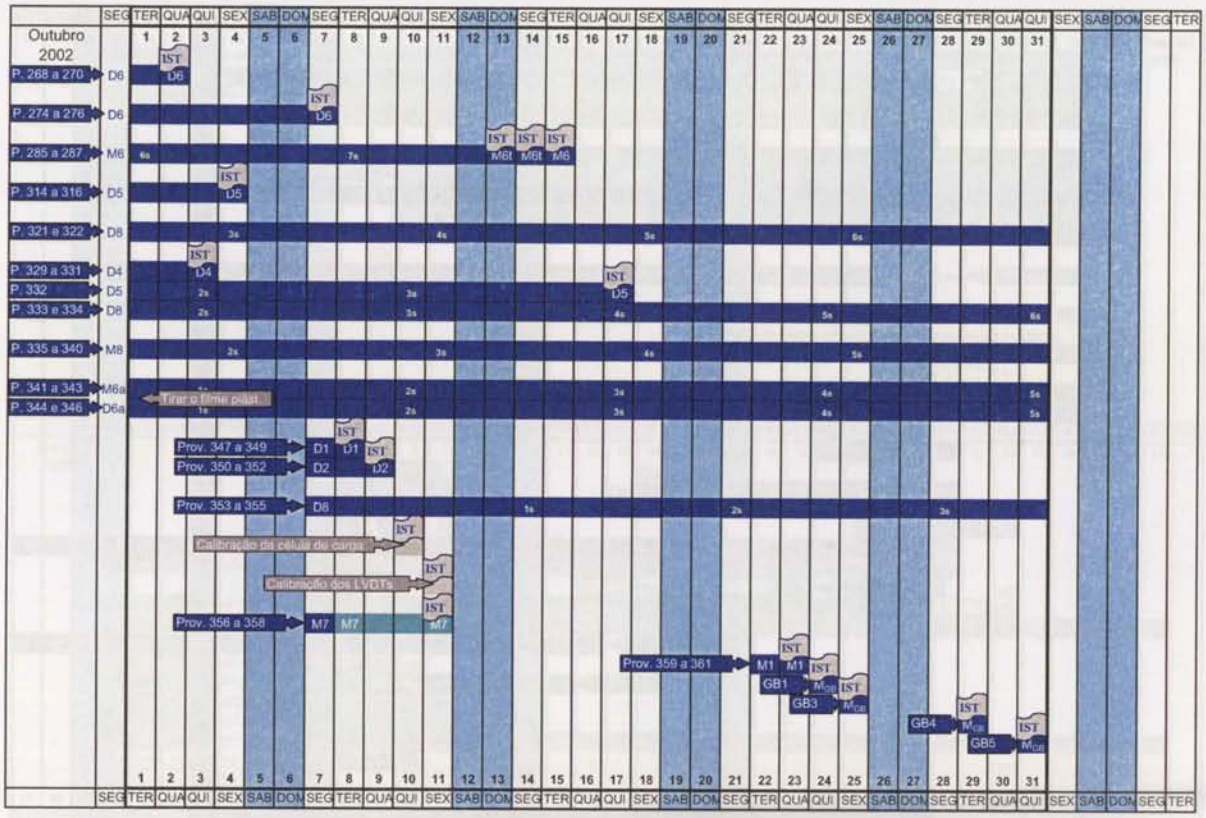
- Plano de Ensaios -

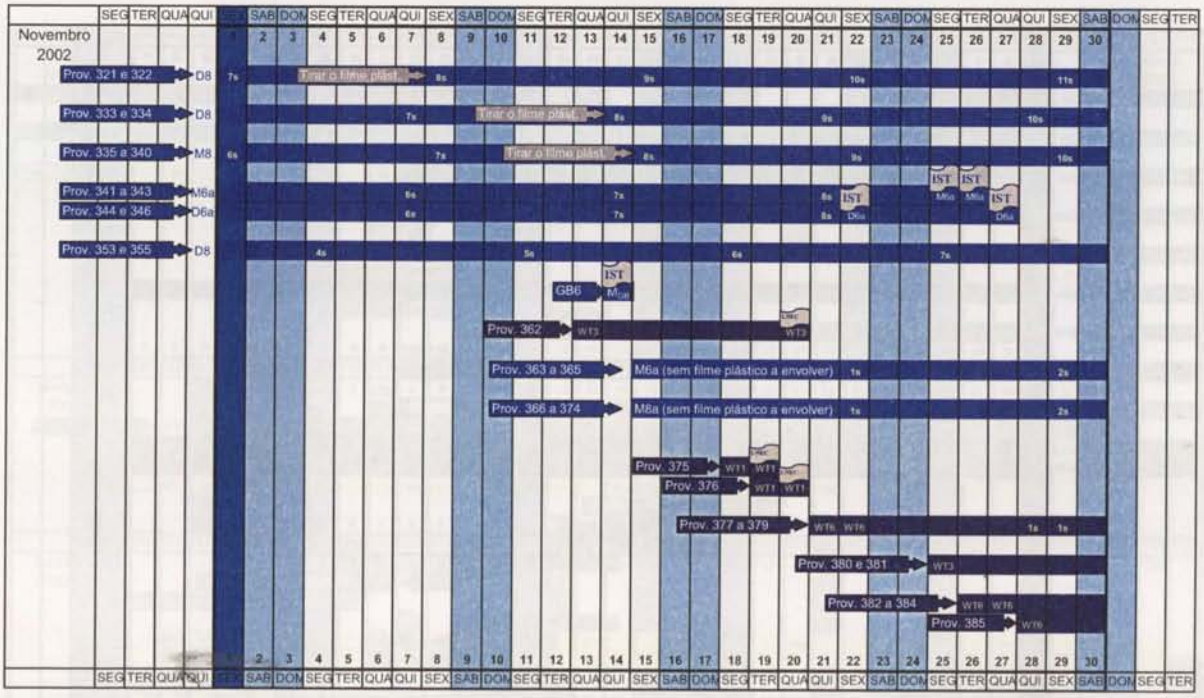

Março 2002
Abril 2002
Maio 2002
Junho 2002
P. RF1 a
Prov. 1 a 6 + 7a
Prov. 8 a 13 + 14
Prov. 15 a 20 + 21
Prov. 22 a 27 + 28
P. 29a34+35
Prov. 36 a 41 + 42
P. 43a48 + 49e50
Prov. 51 + 52 a 57
Prov. 58 a 63 + 64
Prov. 65 a 70 + 71
Prov. 72 a 77 + 78
Prov. 86 a 91 + 92
Prov. 79 a 84 + 85
Prov. 93 a 98 + 99
P. 100 a 105 + 106
P. 7
P. 107 a 112 + 113
Prov. 120 a 125
Prov. 114 a 119
Prov. 126 a 131
Prov. 132 a 137

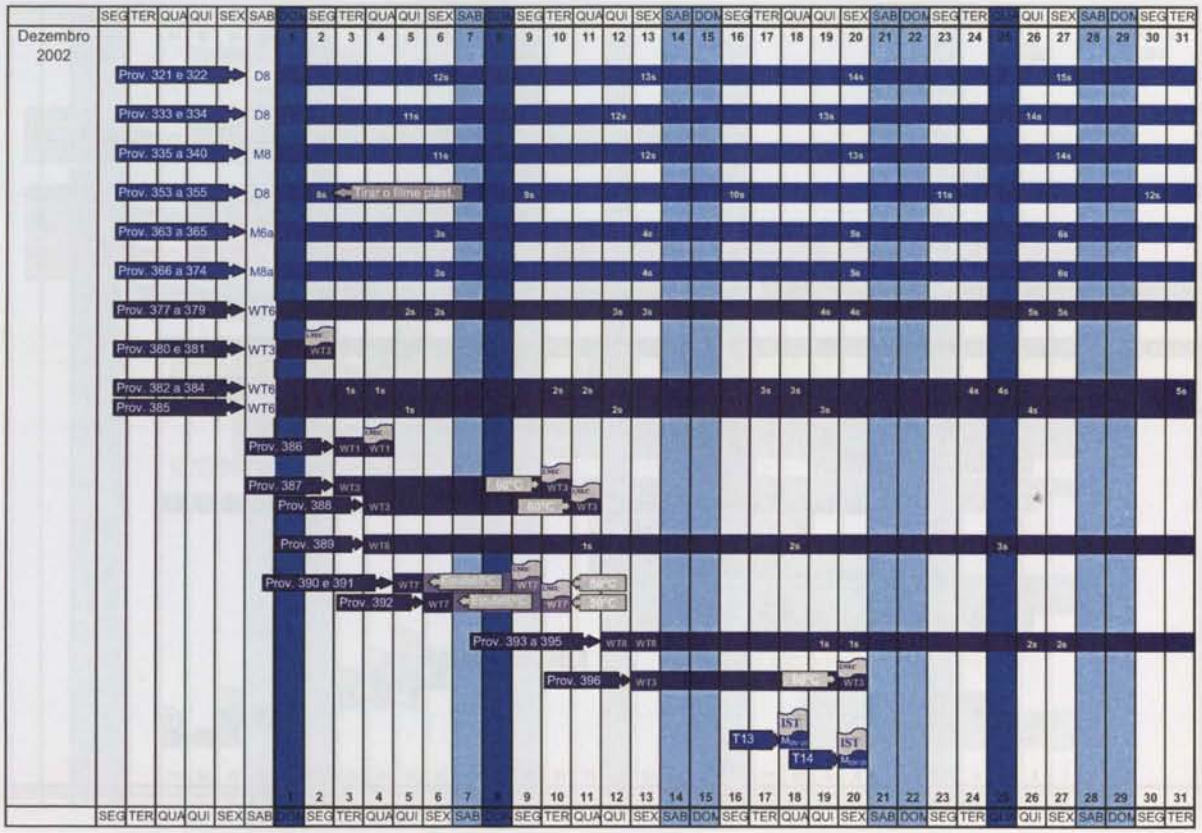

Julho 2002
Prov. 138 a 140
Prov. 141 a 143
P. 144 a 150 + 148
P. 151 a 156 + 157
Prov. 158 a 160
Prov. 161 a 166
P. 167
P. 168 a 173 + 174
Prov. 175 a 177
P. 178 a 183 + 184
P. 185 a 190
Prov. 200 a 202
Prov. 203 a 205
Prov. 206 a 208
Prov. 209 a 211
Prov. 212 a 214
Prov. 215 a 217
Prov. 218 a 220
Prov. 221 a 223
Prov. 224 a 226
Prov. 227 a 229
Prov. 230 a 232
Prov. 233 a 235
Prov. 236 a 238
Prov. 239 a 241
IST

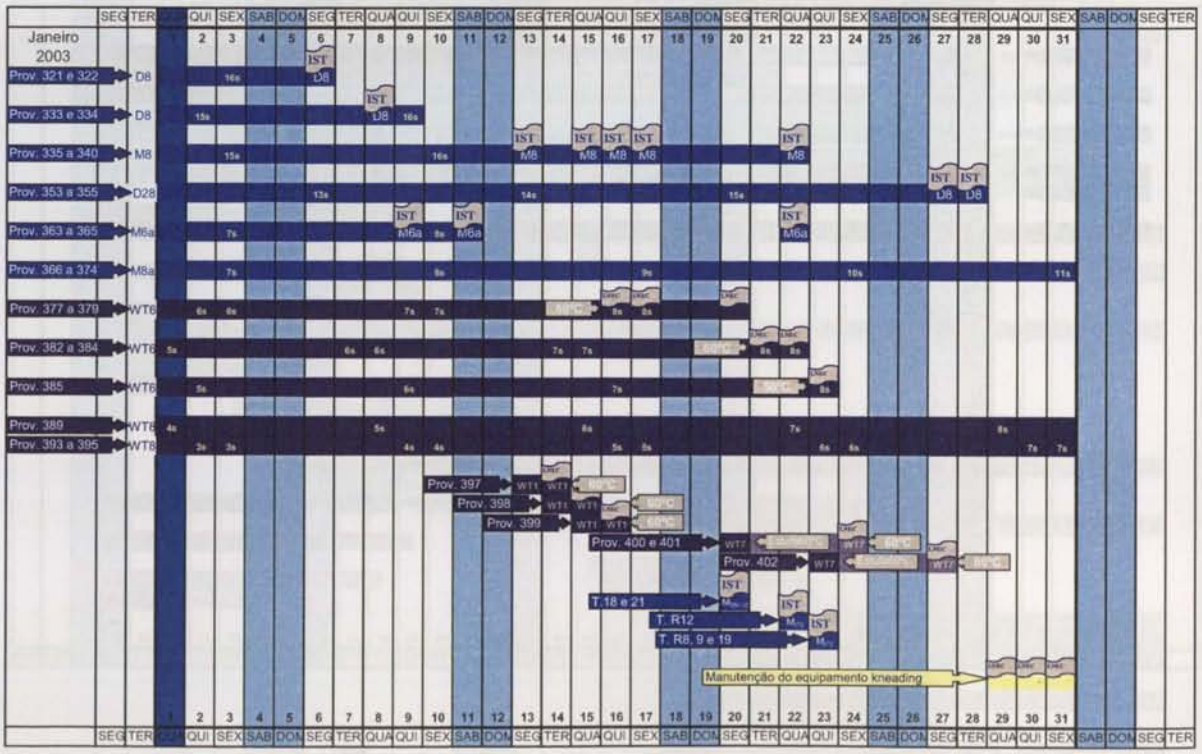

Agosto 2002
SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
III.4'
IST
Prov. 209 a 211 M4
Prov. 212 a 214 M5
Prov. 215 a 217 M6
Prov. 227 a 229 M3
Prov. 230 a 232 M4
Prov. 233 a 235 M5
Prov. 236 a 238 M6
Prov. 239 a 241 M7
Prov. 242 e 243 M6
Prov. 244 a 252 M6
Prov. 253 a 255 D1
Prov. 256 a 258 D2
Prov. 259 a 261 D3
Prov. 262 a 264 D4
Prov. 265 a 267 D5
Prov. 268 a 270 D6
Prov. 271 a 273 D7
Prov. 274 a 276 D6
Prov. 277 a 279 M1
Prov. 280 M3
Prov. 281 e 282 M7
Prov. 283 e 284 M4
Prov. 285 a 287 M6
Prov. 288 D3
P. 192 a 197 + 198
Prov. 290 a 294 D3
Prov. 295 a 297 D7
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER

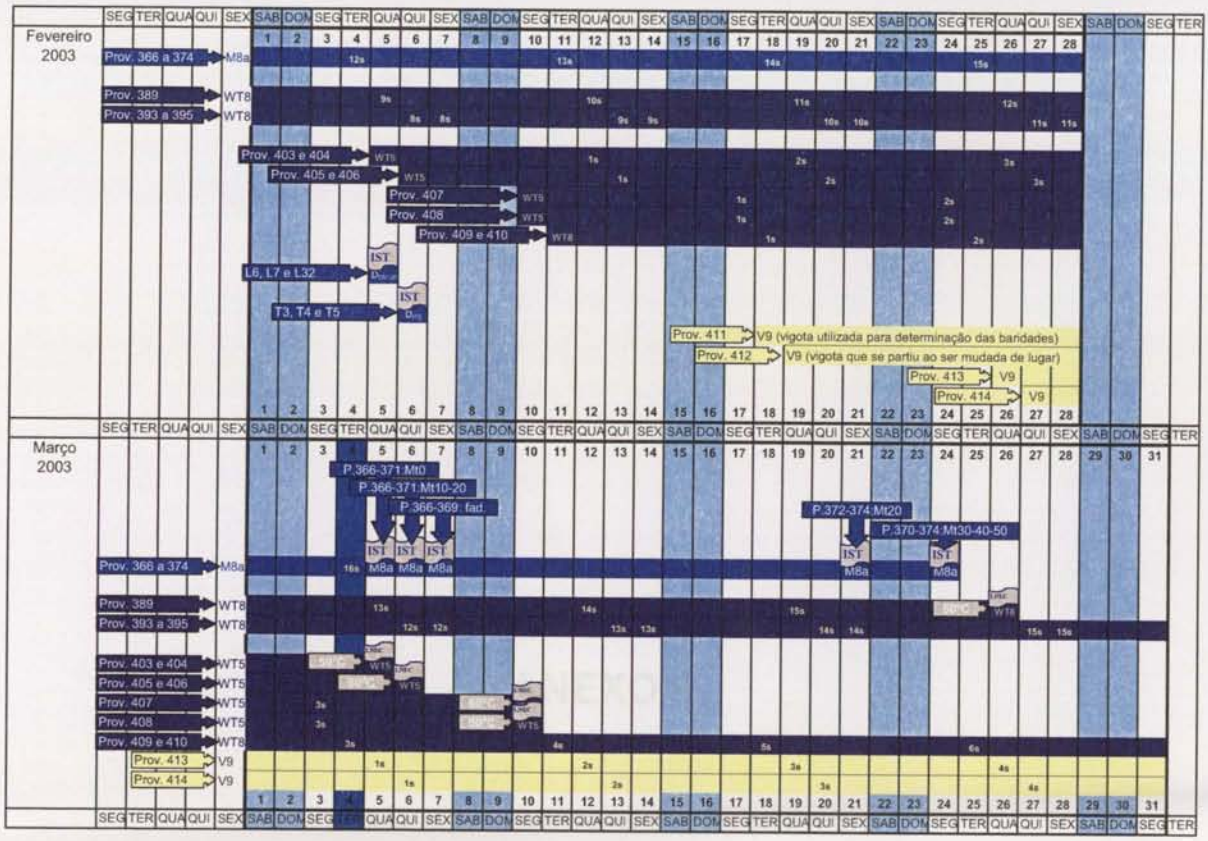

Setembro 2002
SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
IST
Prov. 215 a 217 M6
Prov. 236 a 238 M6
Prov. 242 e 243 M6
Prov. 244 a 252 M6
Prov. 265 a 267 D5
Prov. 268 a 270 D6
Prov. 274 a 276 D6
Prov. 283 e 284 M4
Prov. 285 a 287 M6
Prov. 290 a 294 D3
Prov. 305 a 307 D1
Prov. 308 a 310 D2
Prov. 311 a 313 D3
Prov. 314 a 316 D5
Prov. 317 a 319 D7
Prov. 320 M3
Prov. 321 e 322 D8
Prov. 323 a 325 M1
Prov. 326 a 328 M2
Prov. 329 a 331 D4
Prov. 332 D5
Prov. 333 e 334 D8
Prov. 335 a 340 M8
Prov. 341 a 343 M6a
Prov. 344 e 346 D6a
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER QUA QUI SEX SAB DOM SEG TER

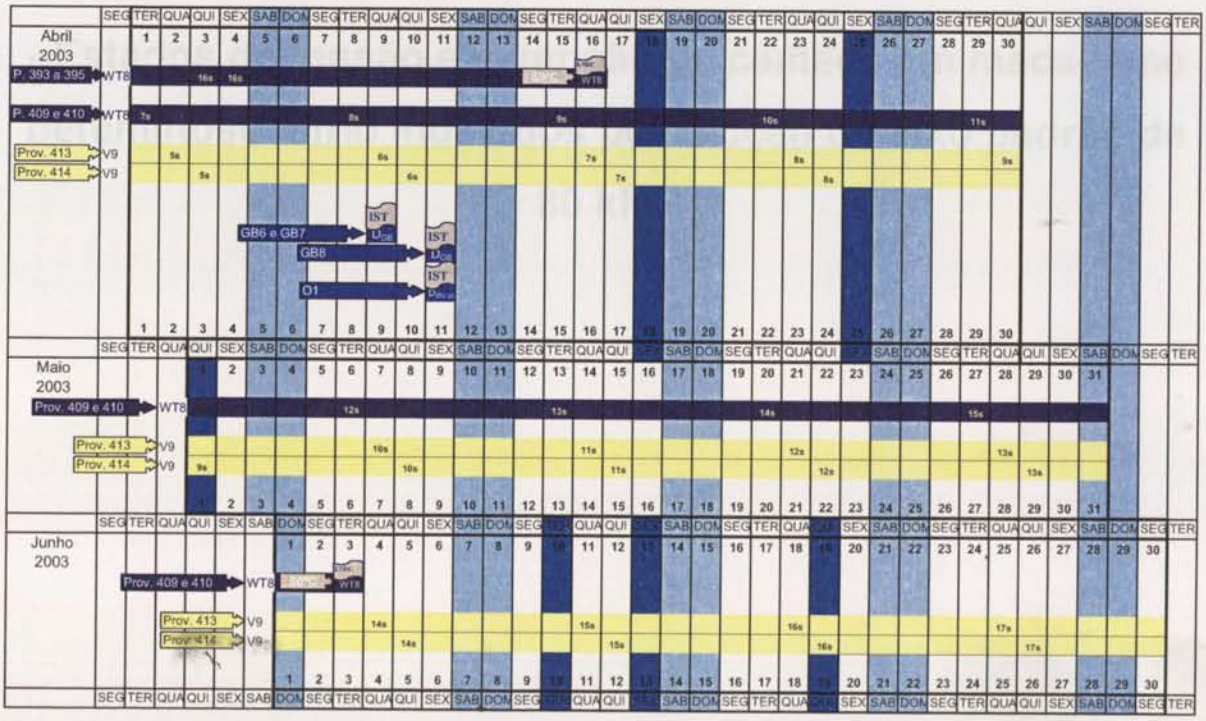

Outubro 2002
P. 268 a 270
P. 274 a 276
P. 285 a 287
P. 314 a 316
P. 321 e 322
P. 329 a 331
P. 332
P. 333 e 334
P. 335 a 340
P. 341 a 343
P. 344 e 346
Tirar o filme plást.
Prov. 347 a 349
Prov. 350 a 352
Prov. 353 a 355
Calibração da célula de carga
Calibração dos LVDTs
Prov. 356 a 358
Prov. 359 a 361
GB1
GB3
GB4
GB5
IST


Novembro 2002
Prov. 321 e 322
Prov. 333 e 334
Prov. 335 a 340
Prov. 341 a 343
Prov. 344 e 346
Prov. 353 a 355
Tirar o filme plást.
GB6
Prov. 362
Prov. 363 a 365
Prov. 366 a 374
M8a (sem filme plástico a envolver)
Prov. 375
Prov. 376
Prov. 377 a 379
Prov. 380 e 381
Prov. 382 a 384
Prov. 385
IST


Dezembro 2002
Prov. 321 e 322
Prov. 333 e 334
Prov. 335 a 340
Prov. 353 a 355
Prov. 363 a 365
Prov. 366 a 374
Prov. 377 a 379
Prov. 380 e 381
Prov. 382 a 384
Prov. 385
Prov. 386
Prov. 387
Prov. 388
Prov. 389
Prov. 390 e 391
Prov. 392
Prov. 393 a 395
Prov. 396
T13
T14
Tirar o filme plást.


Janeiro 2003
Prov. 321 e 322
Prov. 333 e 334
Prov. 335 a 340
Prov. 353 a 355
Prov. 363 a 365
Prov. 366 a 374
Prov. 377 a 379
Prov. 382 a 384
Prov. 385
Prov. 389
Prov. 393 a 395
Prov. 397
Prov. 398
Prov. 399
Prov. 400 e 401
Prov. 402
T.18 e 21
T. R12
T. R8, 9 e 19
Manutenção do equipamento kneading


Fevereiro 2003
Prov. 366 a 374
Prov. 389
Prov. 393 a 395
Prov. 403 e 404
Prov. 405 e 406
Prov. 407
Prov. 408
Prov. 409 e 410
L6, L7 e L32
T3, T4 e T5
Prov. 411
V9 (vigota utilizada para determinação das banidades)
Prov. 412
V9 (vigota que se partiu ao ser mudada de lugar)
Prov. 413
Prov. 414
Março 2003
P.366-371:Mt0
P.366-371:Mt10-20
P.366-369: fad.
P.372-374:Mt20
P.370-374:Mt30-40-50


Abril 2003
P. 393 a 395
P. 409 e 410
Prov. 413
Prov. 414
GB6 e GB7
GB8
O1
Maio 2003
Prov. 409 e 410
Prov. 413
Prov. 414
Junho 2003
Prov. 409 e 410
Prov. 413
Prov. 414

ANEXO II

- Estados de tensão e extensão da camada em macadame betuminoso a frio induzidos pela acção do eixo padrão de 80 kN -

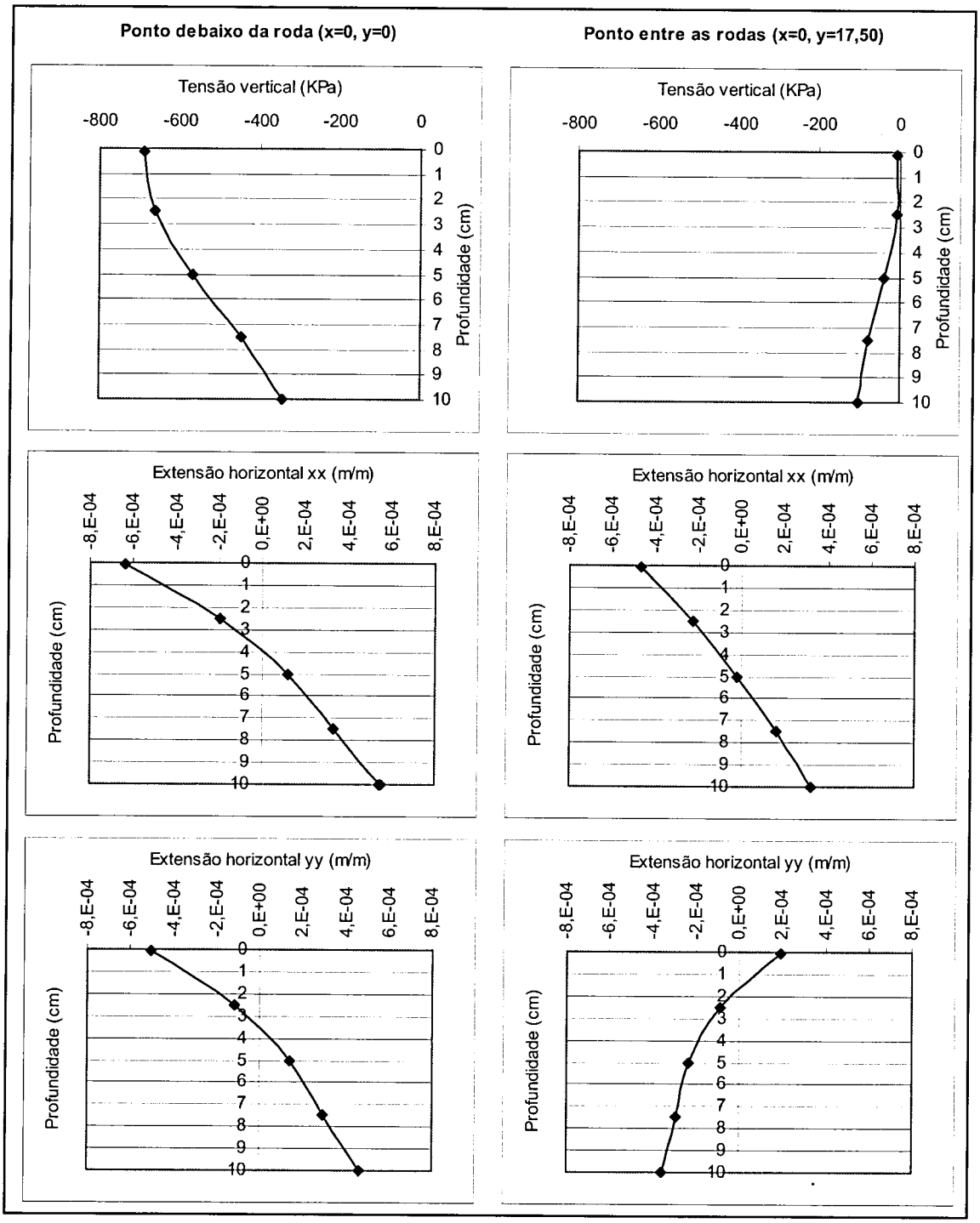


Fig. AIII.1 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 500 MPa

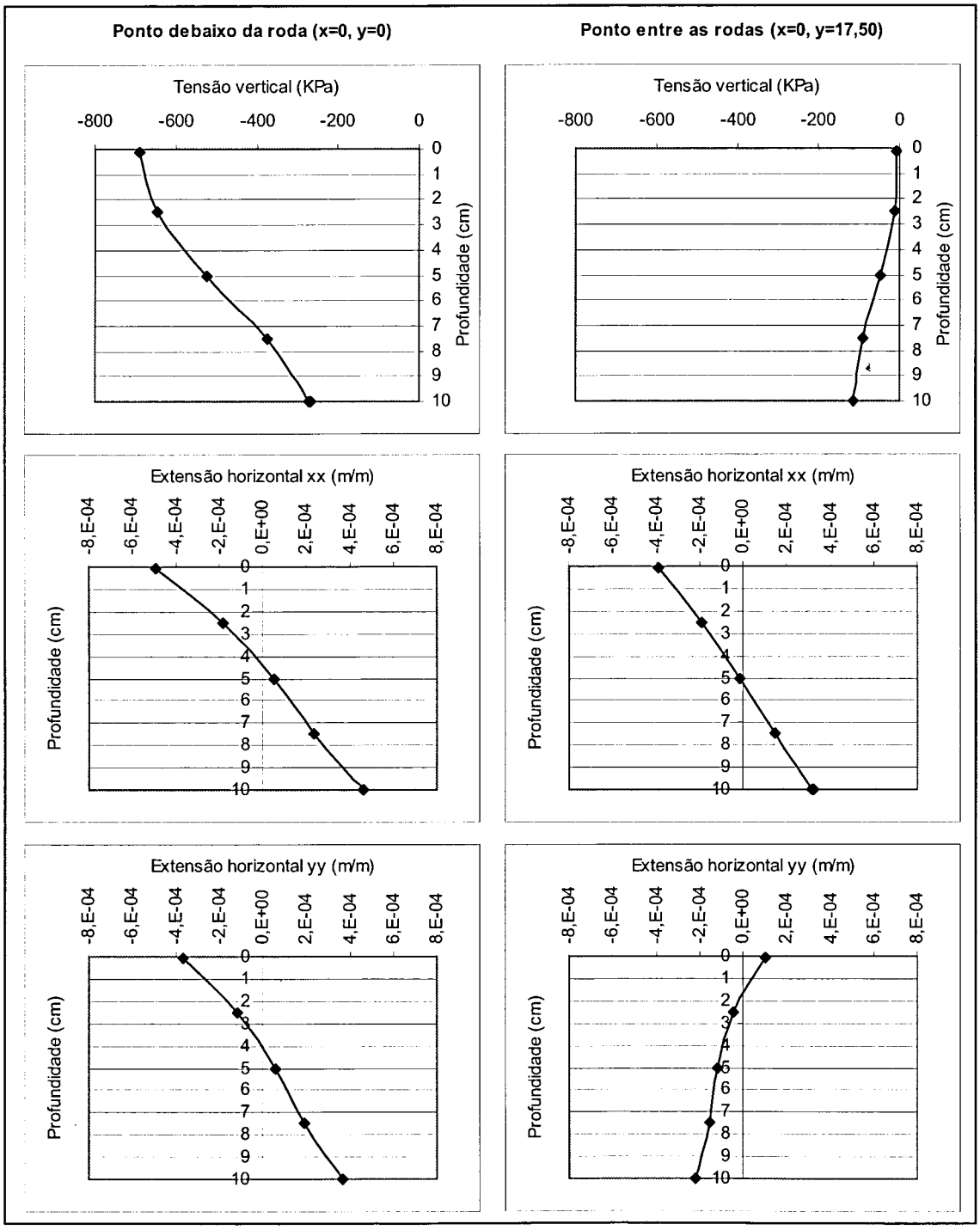


Fig. AIII.2 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 1 000 MPa

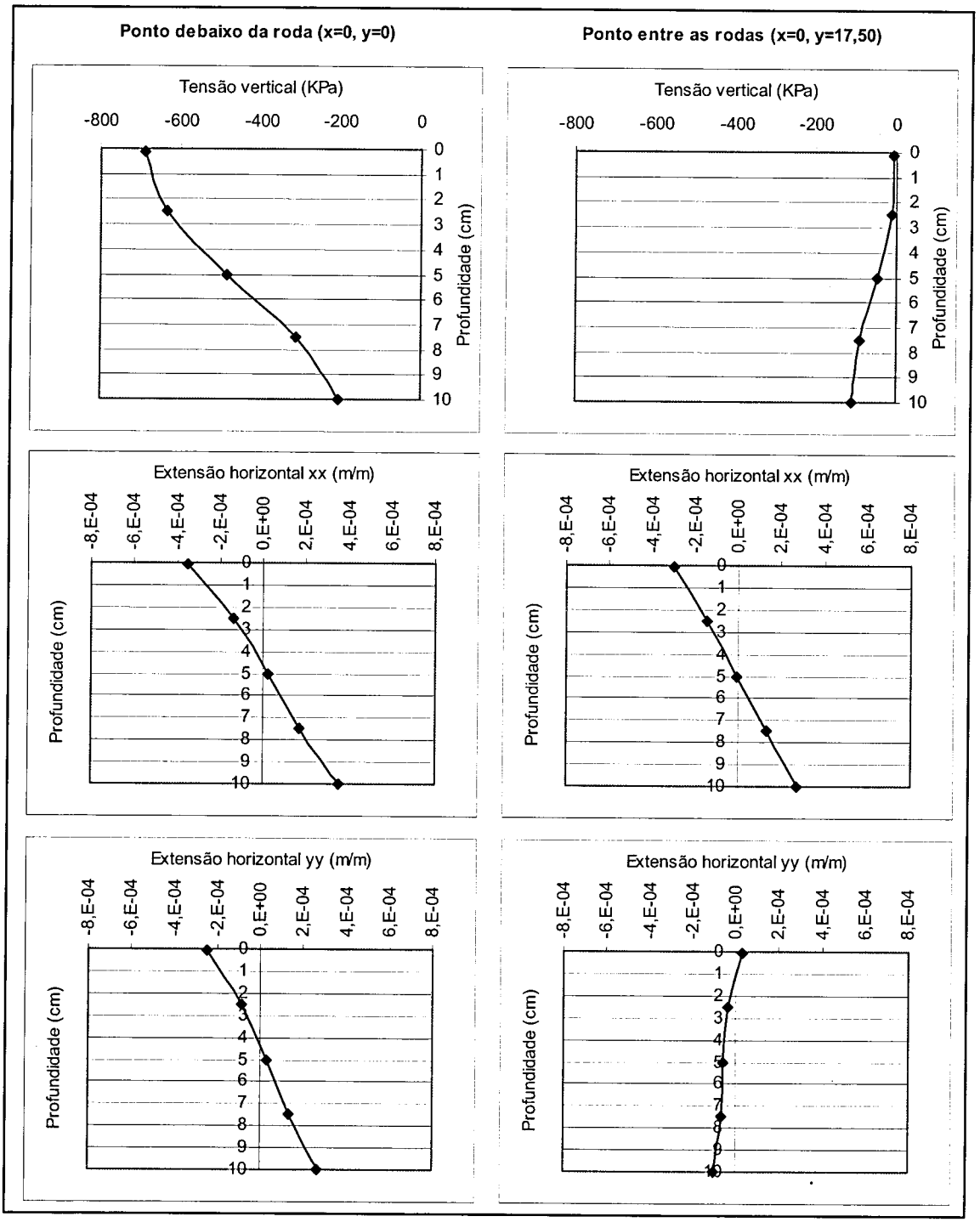


Fig. AIII.3 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 2 000 MPa

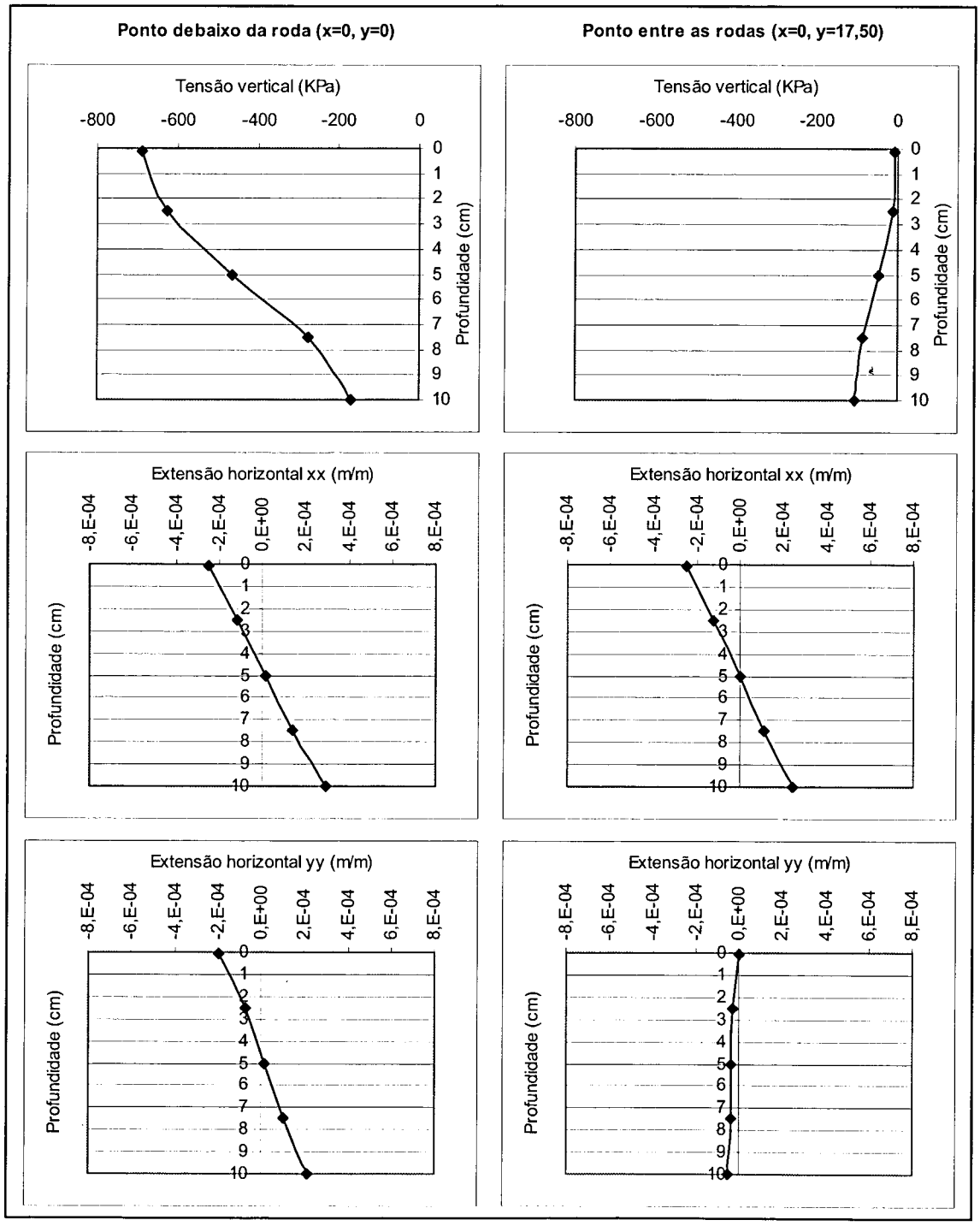


Fig. AIII.4 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 3 000 MPa

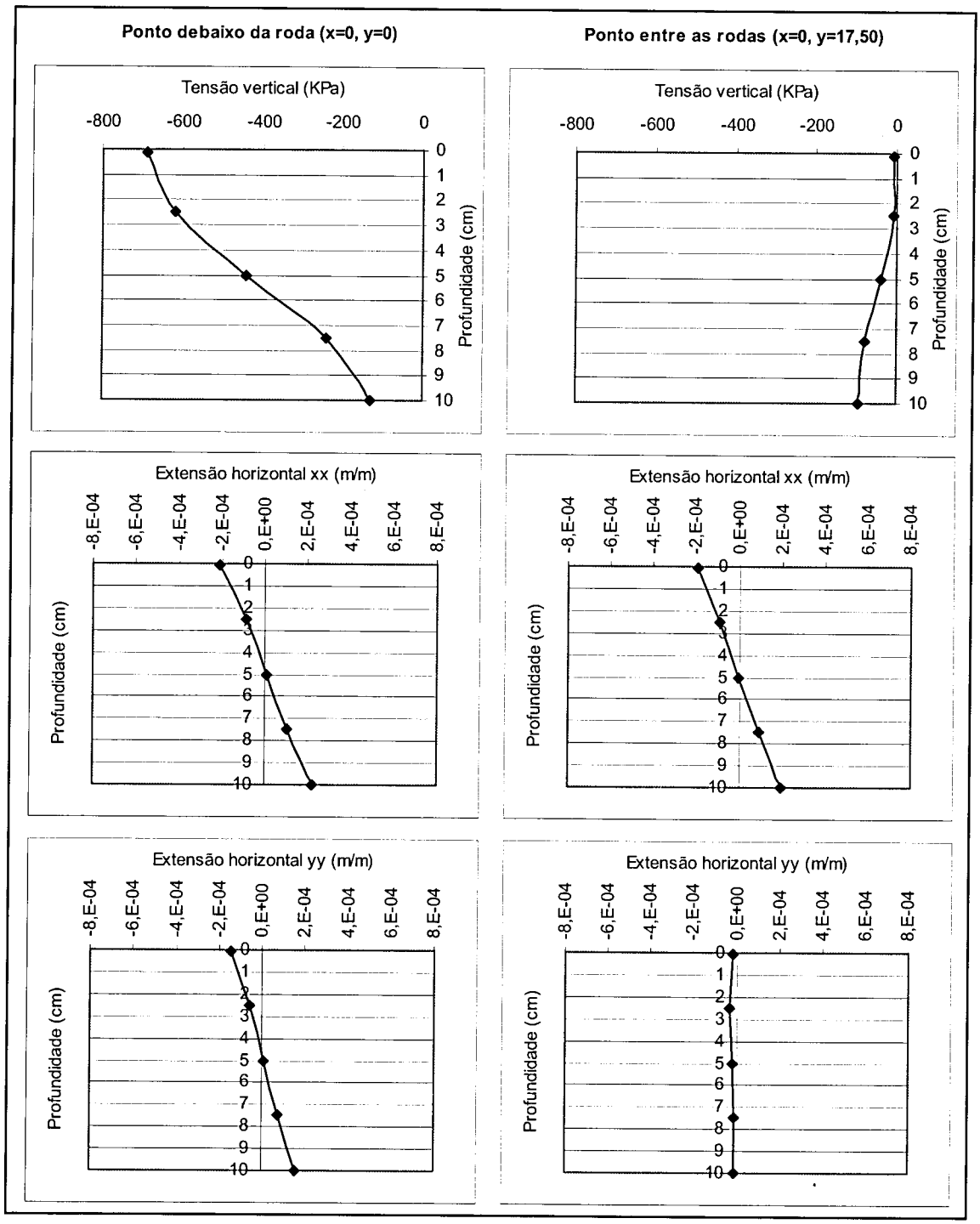


Fig. AIII.5 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 5 000 MPa

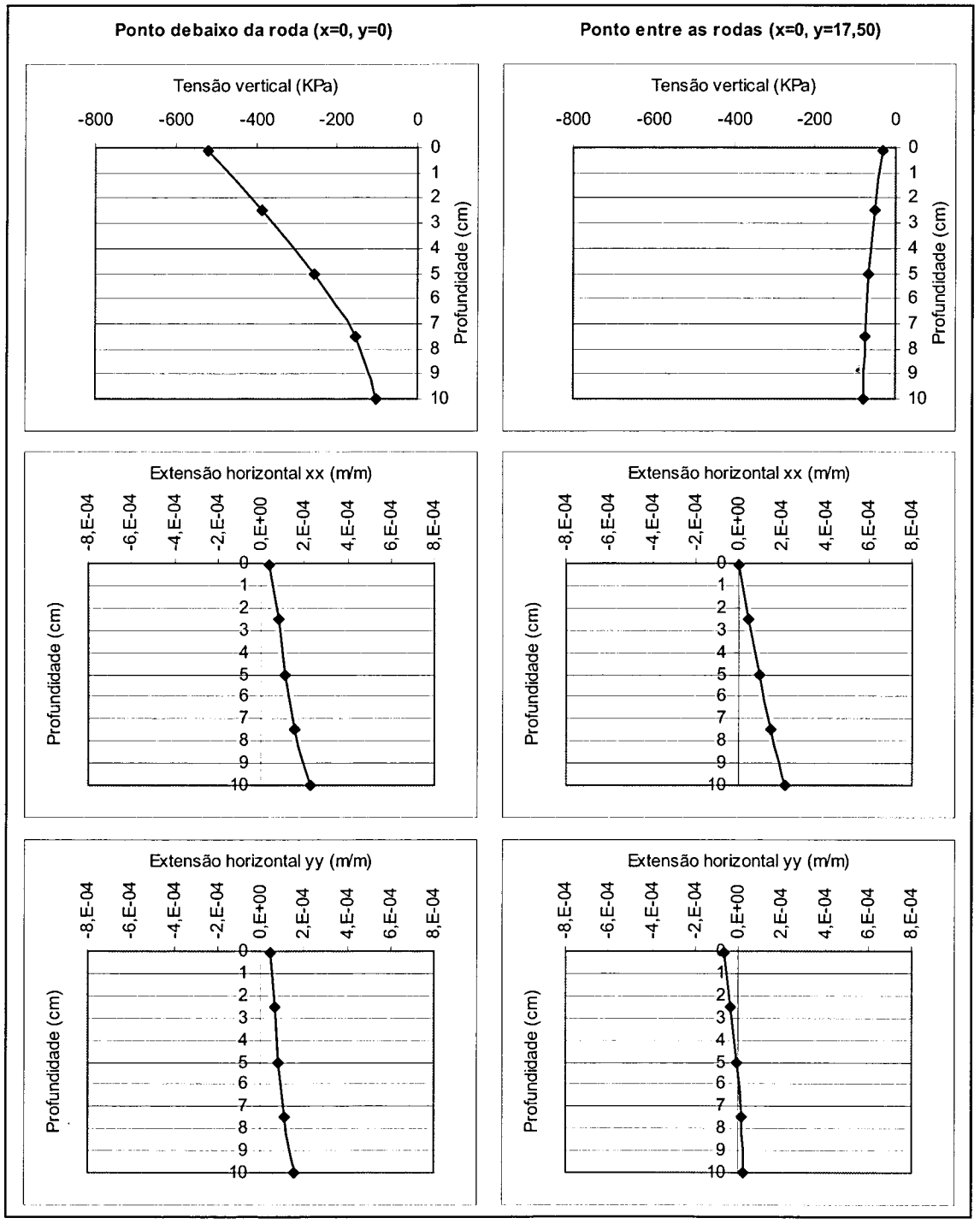


Fig. AIII.6 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 1 000 MPa, com uma camada sobrejacente em betão betuminoso (E=4 000 MPa)

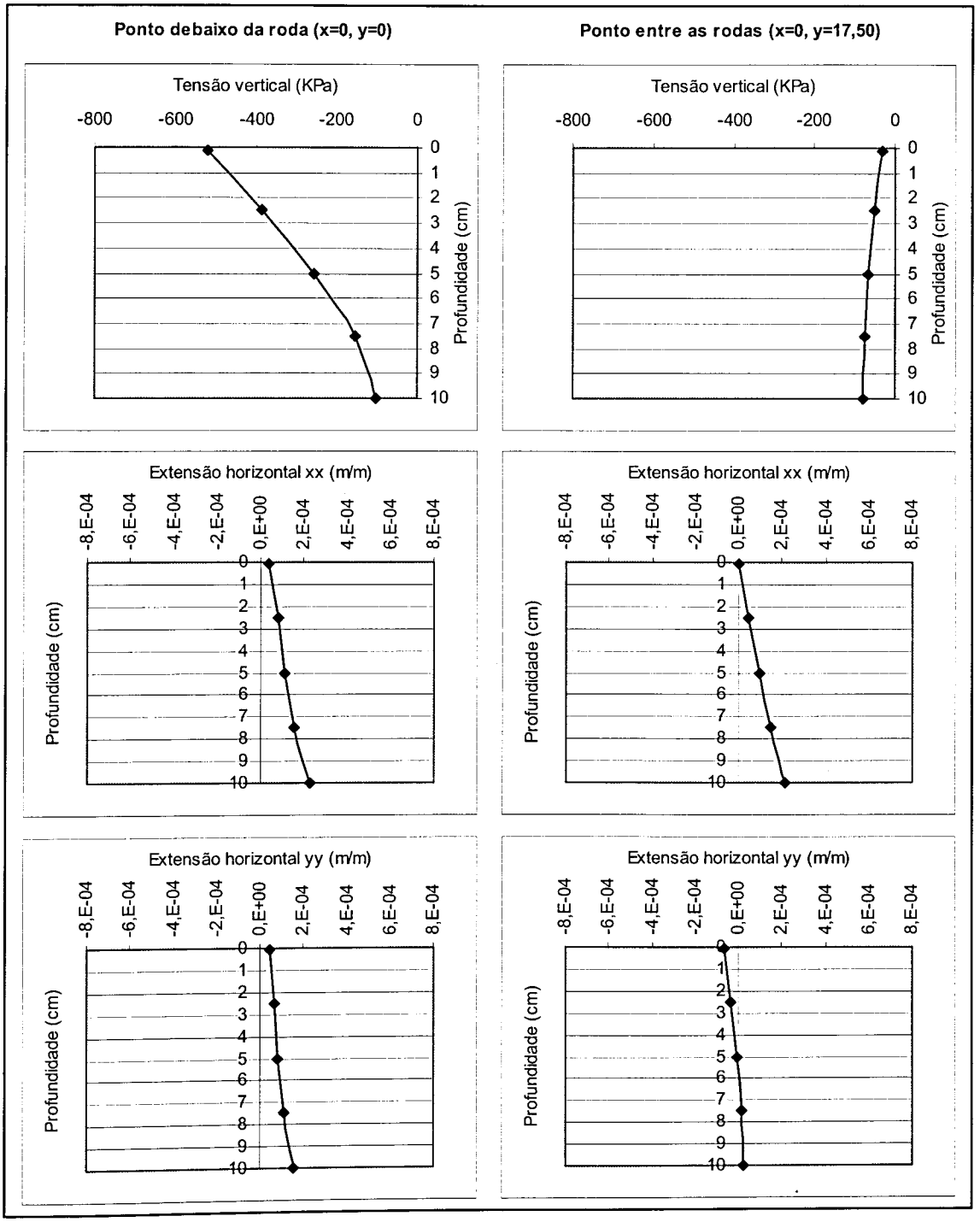


Fig. AIII.7 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 2 000 MPa, com uma camada sobrejacente em betão betuminoso (E=4 000 MPa)

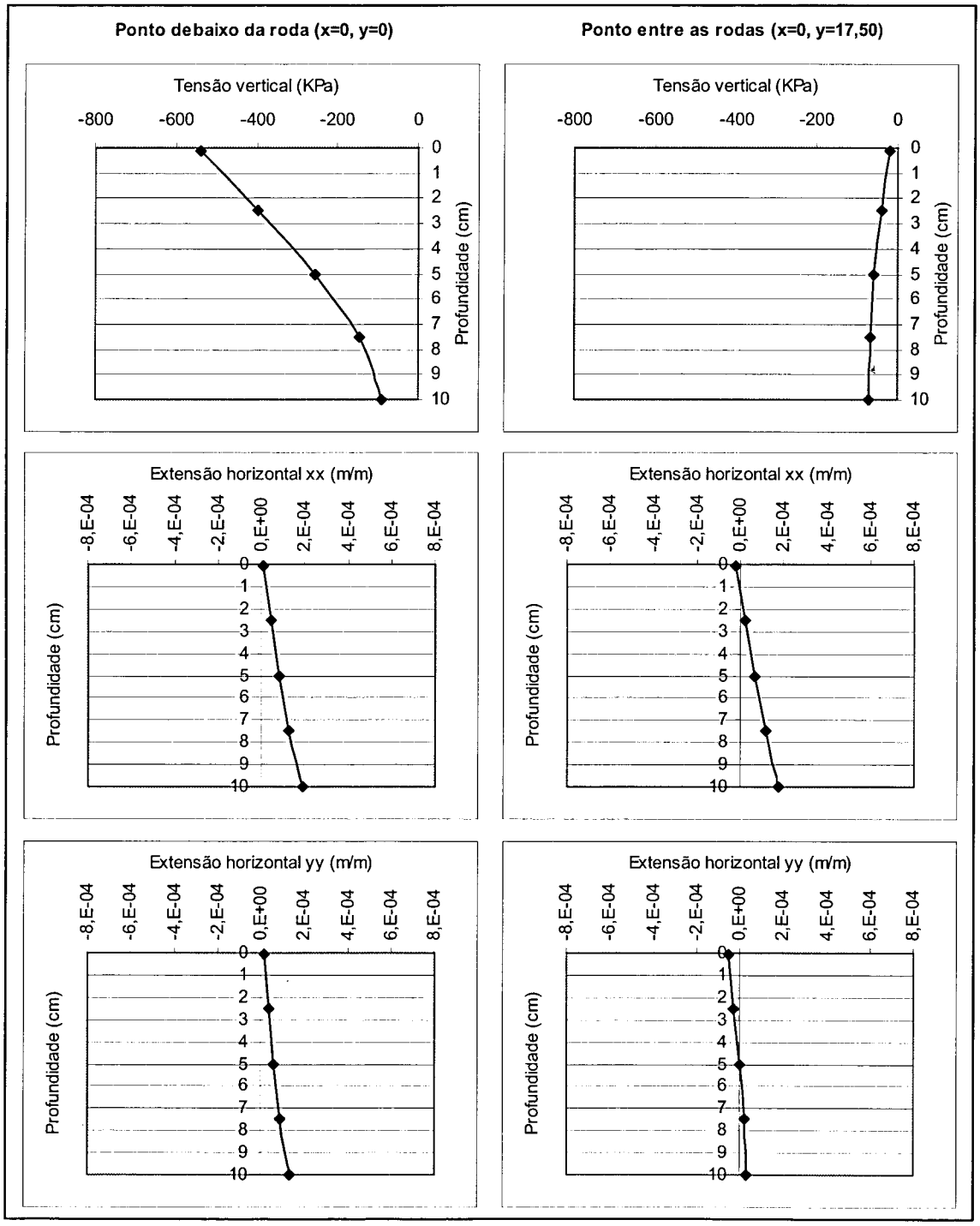


Fig. AIII.8 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 3 000 MPa, com uma camada sobrejacente em betão betuminoso (E=4 000 MPa)

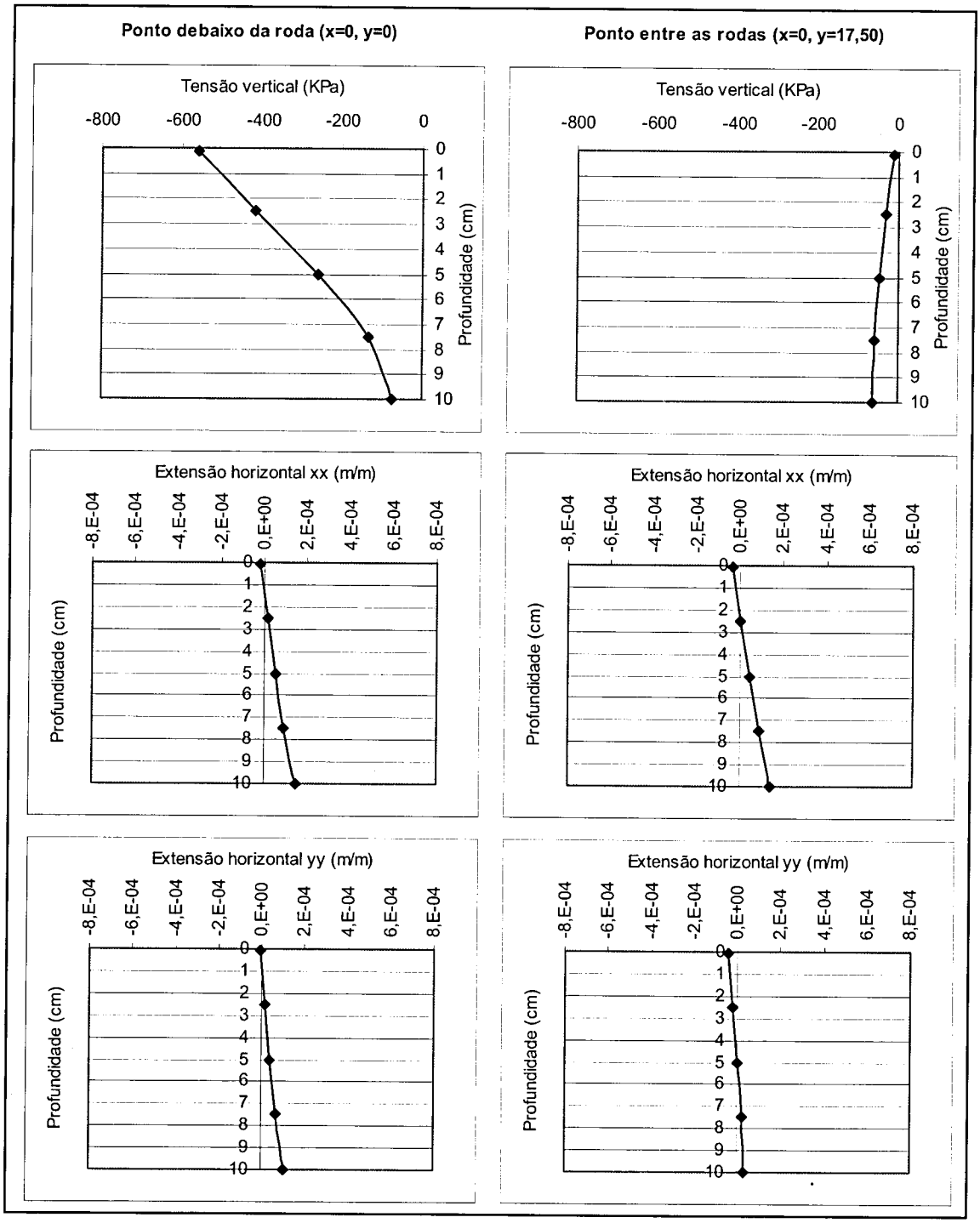


Fig. AIII.9 – Tensões e extensões ao longo da camada de macadame betuminoso a frio para um módulo de deformabilidade de 5 000 MPa, com uma camada sobrejacente em betão betuminoso (E=4 000 MPa)

ANEXO III

- Resultados dos ensaios à compressão diametral realizados no *Nottingham Asphalt Tester* para estudo do comportamento à fadiga -

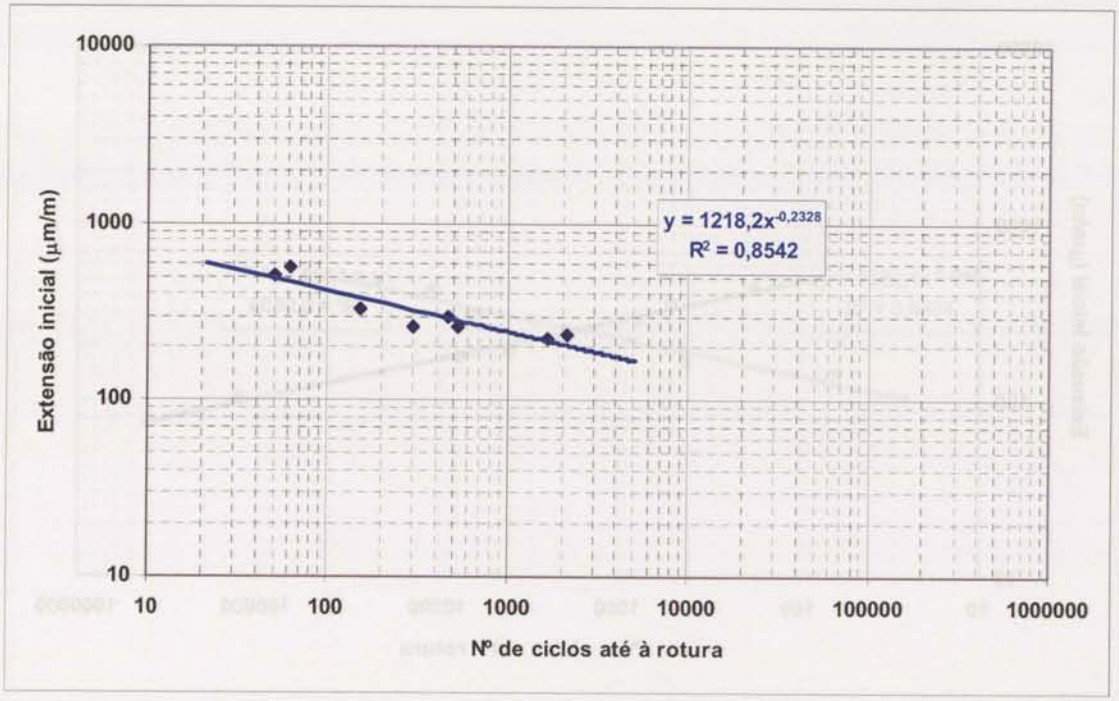


Fig. AIV.1 – Comportamento à fadiga de provetes com 1 dia de idade, envolvidos lateralmente com película

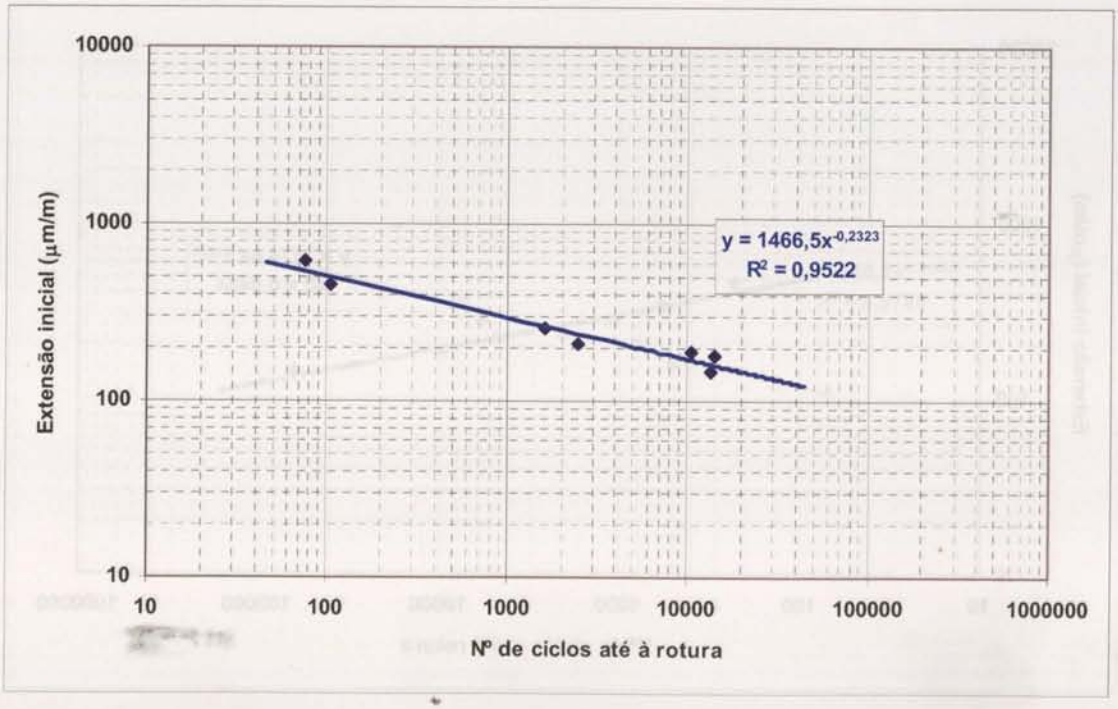


Fig. AIV.2 – Comportamento à fadiga de provetes com 2 dias de idade, envolvidos lateralmente com película

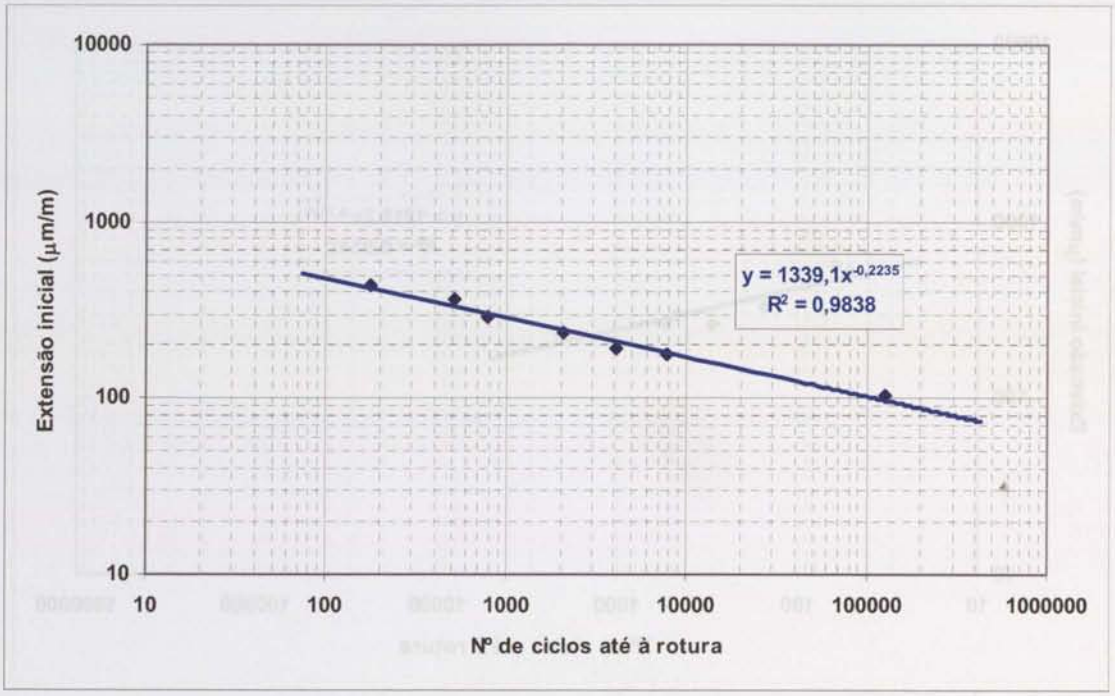


Fig. AIV.3 – Comportamento à fadiga de provetes com 1 semana de idade, envolvidos lateralmente com película

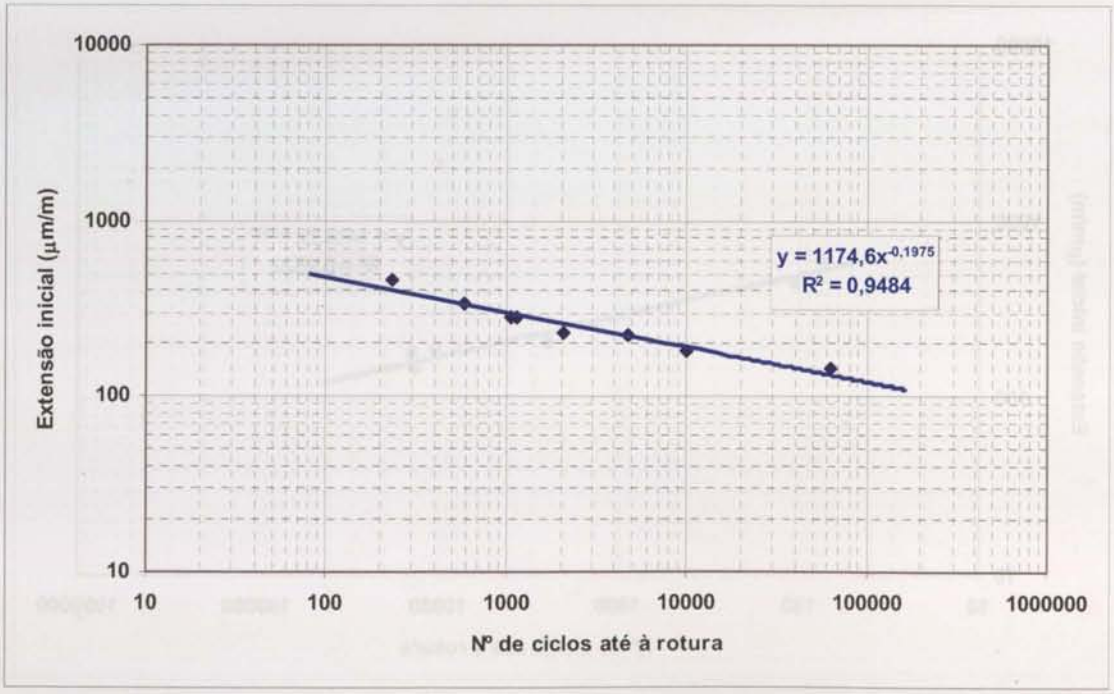


Fig. AIV.4 – Comportamento à fadiga de provetes com 1 mês de idade, envolvidos lateralmente com película

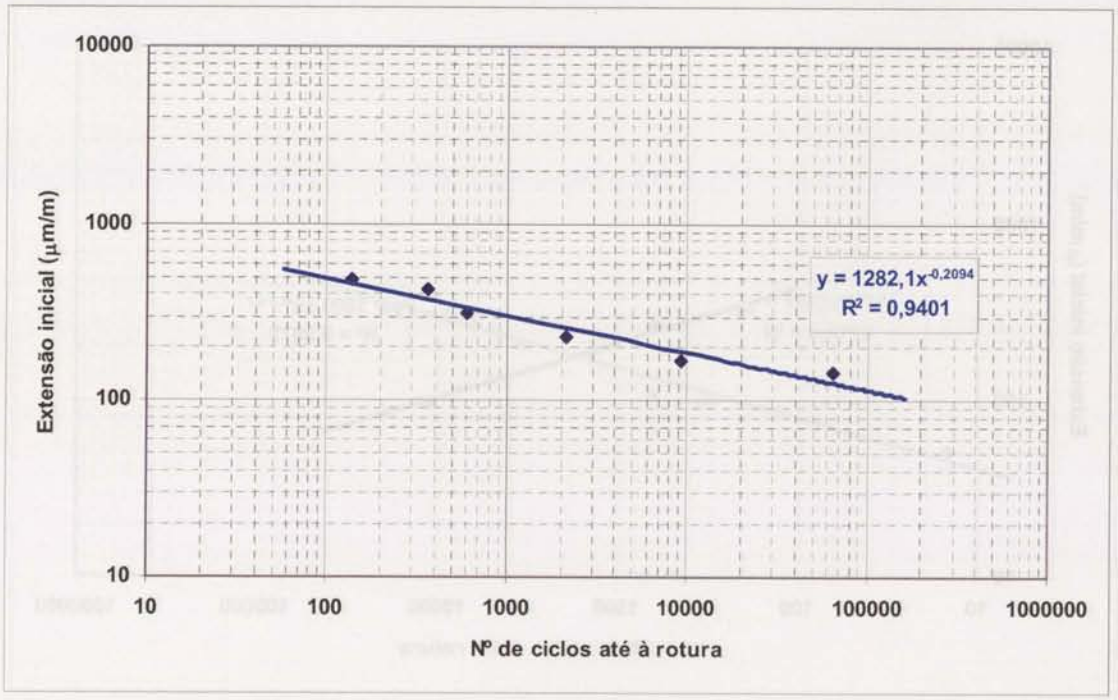


Fig. AIV.5 – Comportamento à fadiga de provetes com 1 mês de idade, envolvidos lateralmente com película

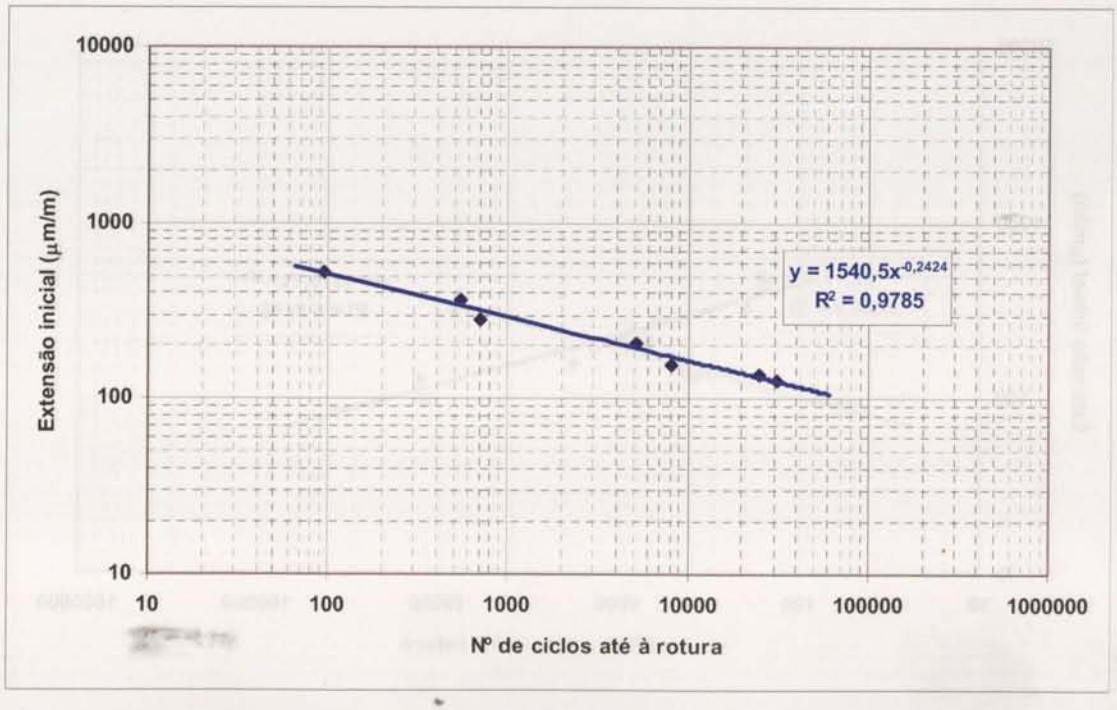


Fig. AIV.6 – Comportamento à fadiga de provetes com 2 meses de idade, envolvidos lateralmente com película

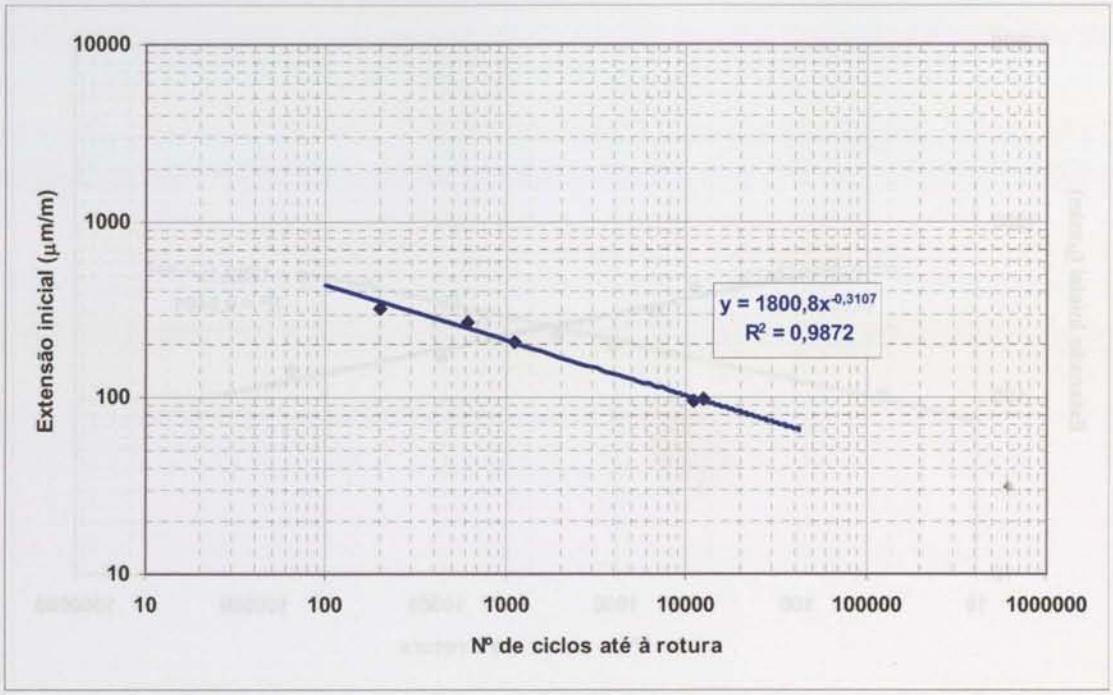


Fig. AIV.7 – Comportamento à fadiga de provetes com 2 meses de idade, totalmente expostos ao ar

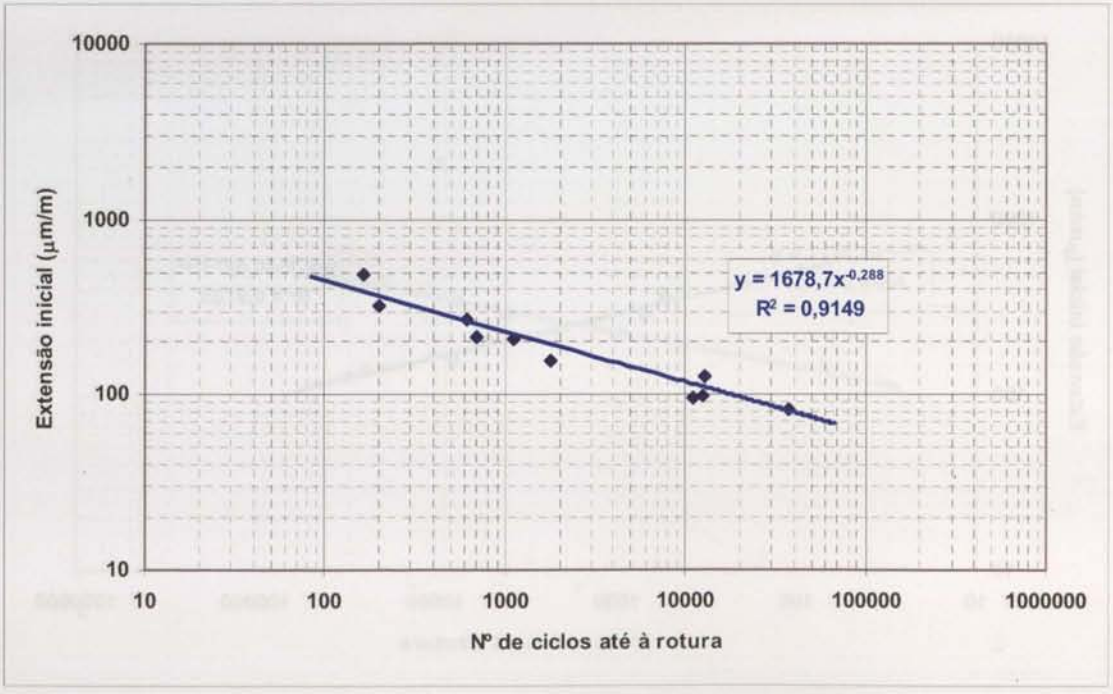


Fig. AIV.8 – Comportamento à fadiga de provetes com 4 meses de idade, 2 com película envolvente e 2 totalmente expostos ao ar

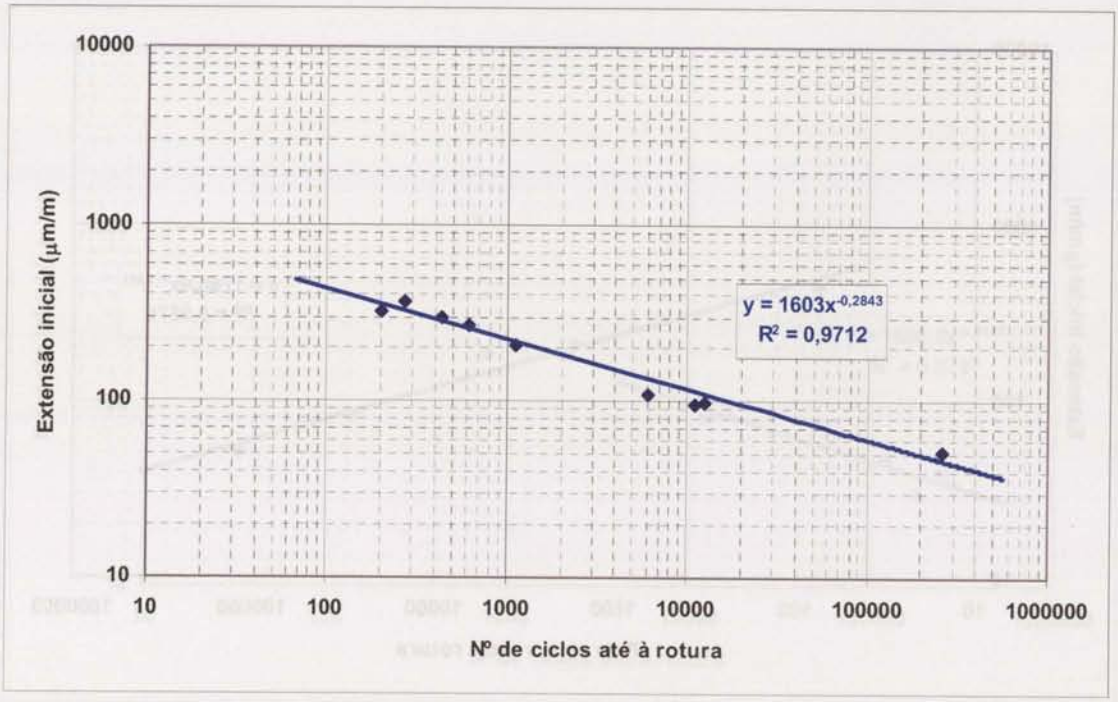


Fig. AIV.9 – Comportamento à fadiga de provetes com 4 meses de idade, totalmente expostos ao ar

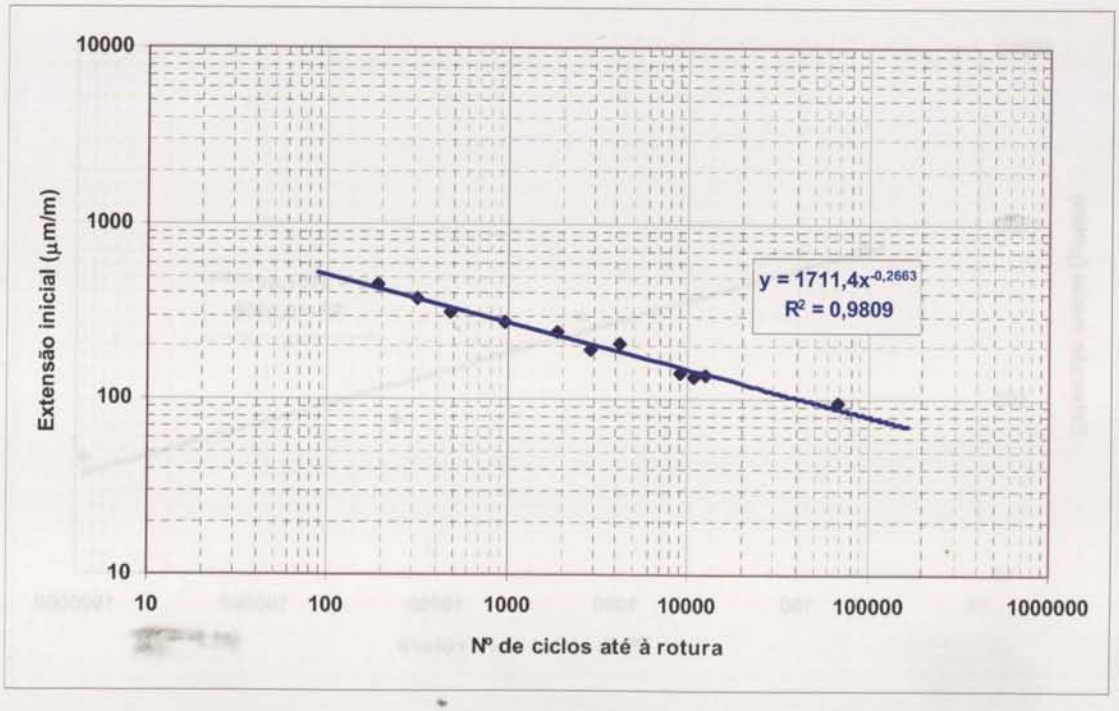


Fig. AIV.10 – Comportamento à fadiga de provetes com 4 dias, submetidos a cura acelerada

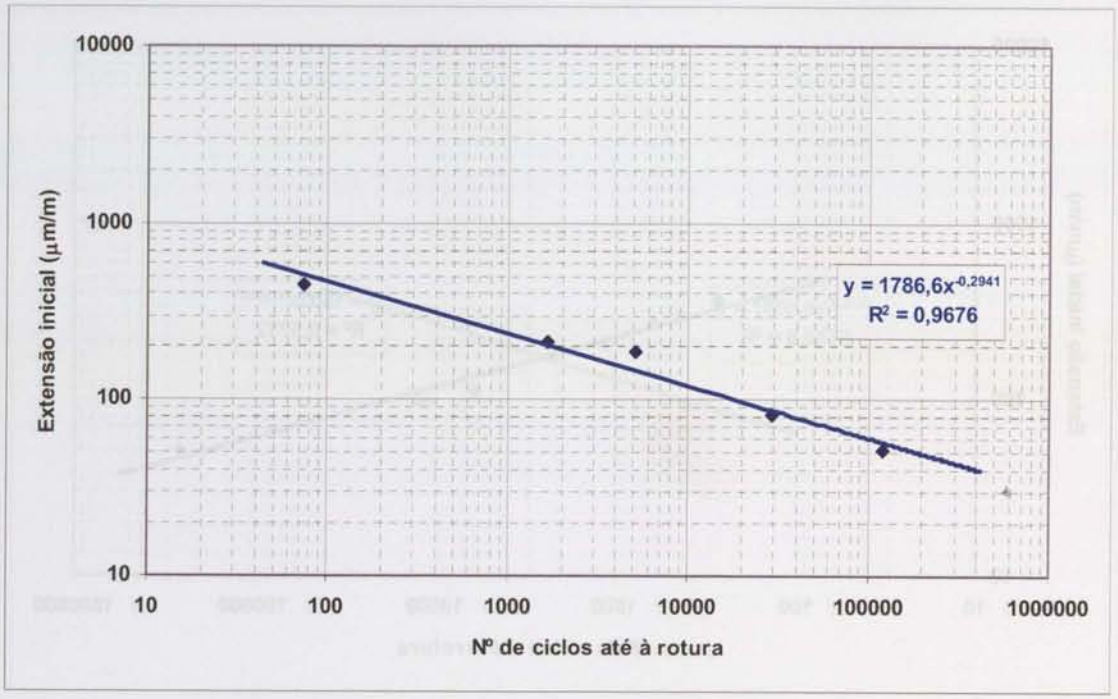


Fig. AIV.11 – Comportamento à fadiga de provetes em macadame betuminoso a frio recolhidos em obra (EN120-O/LDF)

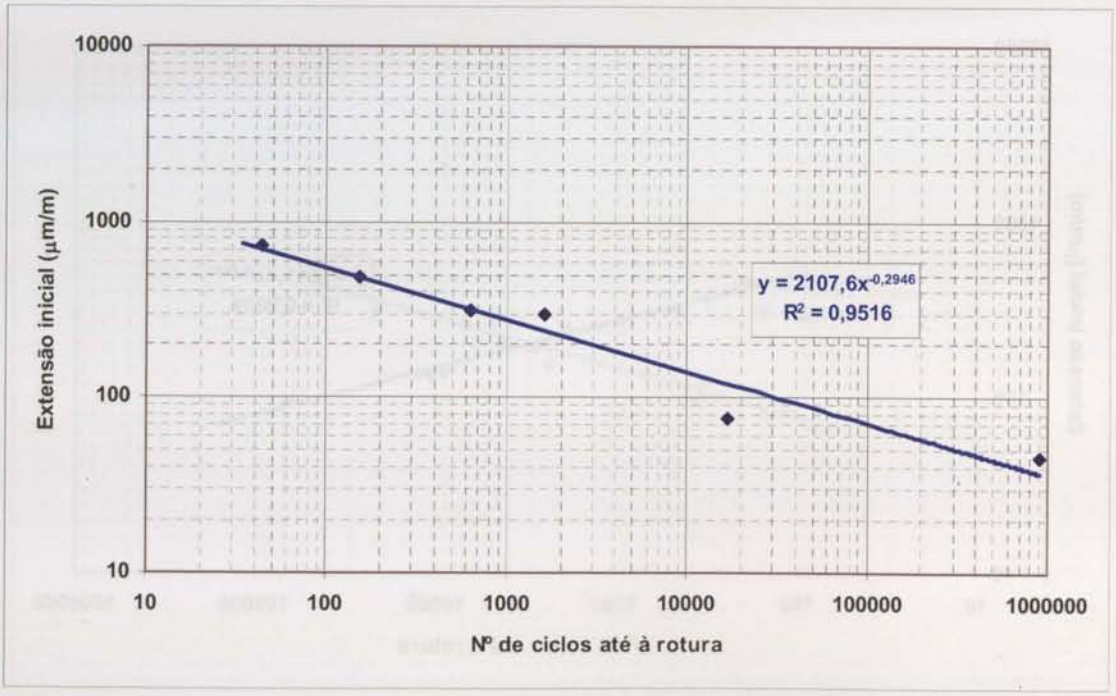


Fig. AIV.12 – Comportamento à fadiga de provetes em mistura reciclada a frio recolhidos no IP2

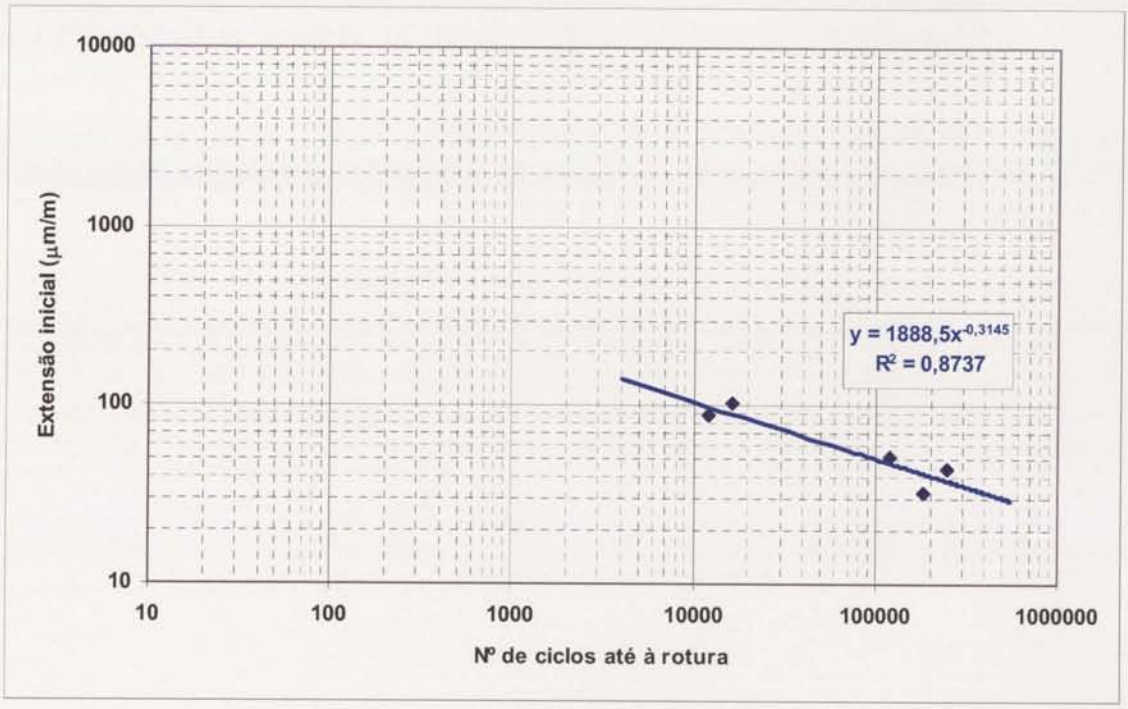


Fig. AIV.12 – Comportamento à fadiga de provetes em macadame betuminoso a quente tipo "grave-bitume"

BIBLIOTECA F.E. PORTO



BIBLIOTECA F.E. PORTO







FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000076310