

**UNIVERSIDADE DO PORTO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE EM  
CENTRAL**

**LUÍS FILIPE DE SOUSA GOMES**

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação apresentada na  
Faculdade de Engenharia da  
Universidade do Porto para a  
obtenção do grau de Mestre em  
Vias de Comunicação

**FEUP**

Fevereiro de 2005



## **Resumo**

Em Portugal a maior parte da rede rodoviária é constituída por pavimentos flexíveis, sendo que uma boa parte deles se encontra no fim da sua vida útil. A reabilitação desses pavimentos é por isso uma preocupação actual.

Por outro lado, a reabilitação de pavimentos produz uma grande quantidade de resíduos que importa, à luz das preocupações com o desenvolvimento sustentável, reutilizar. Do ponto de vista ambiental o processo de reciclagem é a forma mais desejável de reutilizar. Do ponto de vista das misturas betuminosas, a reciclagem a quente constitui o processo preferencial de reutilizar de modo a obter-se misturas betuminosas recicladas com qualidade idêntica à das misturas betuminosas fresadas quando novas.

Neste trabalho procura-se contribuir para um melhor conhecimento das misturas betuminosas recicladas a quente e em central identificando também outros processos de reutilização.

A qualidade exigível às misturas betuminosas recicladas a quente é a mesma que é exigida às misturas betuminosas tradicionais, pelo que, neste trabalho abordam-se as exigências que incidem sobre os materiais que constituem as misturas betuminosas e os seus processos de formulação.

Em Portugal ainda são poucas as experiências com a técnica da reciclagem de misturas betuminosas a quente. Neste trabalho estuda-se um caso prático de aplicação desta técnica numa obra.

## **Abstract**

In Portugal the flexible pavements are the main type of pavements used in the roadways and many of them are at the end of their design life's. The rehabilitation of these pavements is an actual concern.

On the other hand, the pavements rehabilitation produce considerable volumes of waste, that matters to reuse to meet the overall objective of sustainable development. From the environmental perspective recycling is the best way of reuse. The hot mix recycling is the desirable process of reuse bituminous mixtures as we can obtain recycled mixtures with the same quality as the reclaimed ones when they were new.

This work looks forward to increase the knowledge of the hot mix recycling in plant and also identify other types of techniques of reuse.

The required quality for hot recycled bituminous mixtures is the same that is required for hot bituminous mixtures in general. This work makes an approach to the requirements usually made to the material's characteristics and to the design methods of the bituminous mixtures.

In Portugal there are few experiences in hot mix recycling in plant. This work describes an application of this technique in a real case of study.

## **RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE EM CENTRAL**

Palavras chave:

Misturas betuminosas  
Ligante betuminoso  
Agregado  
Desenvolvimento sustentável  
Reciclagem  
Reciclagem a quente  
Formulação laboratorial  
Módulo de rigidez  
Fadiga  
Deformações permanentes

## **HOT MIX RECYCLING IN PLANT**

Key-words

Bituminous mixtures  
Bituminous binder  
Aggregate  
Sustainable development  
Recycling  
Hot recycling  
Mixture design  
Stiffness  
Fatigue  
Rutting

## Agradecimentos

A dissertação aqui apresentada foi elaborada no âmbito do curso de Mestrado em Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A orientação deste trabalho esteve sob a responsabilidade do Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro e da Doutora Engenheira Maria da Conceição Azevedo. Os estudos foram desenvolvidos com o apoio da empresa da Mota-Engil Engenharia e Construção.

Gostaria de dedicar este trabalho à Eng.<sup>a</sup> Isabel Paul, que apesar de infelizmente já não se encontrar entre nós, foi uma das responsáveis por ter surgido a oportunidade de realizar este trabalho.

A realização deste trabalho só foi possível pela colaboração de várias pessoas e entidades:

Ao Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, orientador desta dissertação, pela formação, acompanhamento e por toda a disponibilidade.

À Doutora Engenheira Maria da Conceição Azevedo, co-orientadora da dissertação, por ter proporcionado a oportunidade de realizar este trabalho, pelo acompanhamento ao longo de todo o trabalho, pelas críticas e sugestões, pelo apoio e pela disponibilidade sempre demonstrados.

À empresa Mota-Engil Engenharia e Construção que concedeu todos os meios necessários à execução dos trabalhos. Gostaria em especial de agradecer às seguintes pessoas:

- Ao Eng.º Mário Barros por ter permitido a execução deste trabalho.
- Ao Eng.º Ricardo Andrade por todo o empenho pessoal que teve para que fosse possível a concretização deste trabalho desde o primeiro momento criando as condições necessárias à sua execução.
- Ao Eng.º Jorge Santos por todo o apoio que deu à realização deste trabalho, assumindo-o como mais um objectivo do Laboratório Central da Mota-Engil que vemos neste momento concretizado. Trata-se de mais um objectivo que se concretiza e que vem em complemento de outros que vimos concretizados pela equipa do Laboratório Central nos tempos mais recentes.
- A todo o pessoal do Laboratório Central em especial ao Sr. Alfredo Cunha que acompanhou o trabalho desde o seu início, colaborando na execução dos ensaios e na resolução dos problemas que surgiram sempre com um empenho exemplar.
- À equipa da obra da SCUT da Costa da Prata nas pessoas do director da obra Eng.º Amadeu Moreira, do Sr. Abílio, do Sr. Coelho e de toda a equipa de pavimentação por terem permitido e colaborado na execução dos trabalhos na obra. Gostaria de agradecer de forma particular ao chefe de laboratório Sr. Carlos Fernandes e à restante equipa do Laboratório da obra por toda a colaboração que deram na preparação e execução dos trabalhos bem como no apoio laboratorial que deram.
- À Eng.<sup>a</sup> Susana Moreira e ao Eng.º Sebastião Cardoso que, durante a execução deste trabalho e enquanto foram colaboradores da Mota-Engil, se empenharam na execução deste trabalho.

À Consultrada, na pessoa do Sr. Miguel Barreira, pela disponibilidade demonstrada na execução dos ensaios de carga realizados na obra.

Ao Eng.º Adriano Teixeira, ao Eng.º Vítor Gomes e ao técnico João por todo o apoio prestado na execução dos ensaios e pela disponibilidade na resolução dos problemas que foram surgindo.

Aos meus colegas do Mestrado, em especial aos meus amigos André e Bernardo, companheiros desta jornada que assim se tornou um pouco mais fácil.

À Andreia que me apoiou na realização deste trabalho, desde o primeiro momento, ajudando-me a ultrapassar os tempos mais difíceis em tudo o que pode.

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos pelo apoio e encorajamento que tornou possível a realização deste trabalho. Um agradecimento especial ao meu pai a quem eu devo tudo.

# ÍNDICE

1. Introdução
  - 1.1. Enquadramento
  - 1.2. Objectivos do trabalho
  - 1.3. Estrutura do trabalho
2. Reciclagem de misturas betuminosas
  - 2.1. Introdução
  - 2.2. Reciclagem *in situ* a frio, e dentro desta a reciclagem mista a frio
  - 2.3. Reciclagem *in situ* com betume espuma
  - 2.4. Reciclagem *in situ* a quente, e dentro desta a reciclagem mista
  - 2.5. Reciclagem em central a quente ou a frio
    - 2.5.1. Introdução
    - 2.5.2. Armazenamento e tratamento das misturas betuminosas fresadas (MBF)
    - 2.5.3. Características da mistura betuminosa fresada (MBF)
    - 2.5.4. Ligante betuminoso da mistura betuminosa reciclada (MBR)
    - 2.5.5. Agregados da mistura betuminosa reciclada (MBR)
    - 2.5.6. Tipo e composição da mistura betuminosa reciclada (MBR)
    - 2.5.7. Centrais de produção de misturas betuminosas a quente
    - 2.5.8. Controlo da qualidade
    - 2.5.9. Custos
3. Misturas betuminosas a quente: materiais constituintes e formulação laboratorial
  - 3.1. Introdução
  - 3.2. Agregados
    - 3.2.1. Agregados grossos e finos
    - 3.2.2. Fíler
  - 3.3. Betume
    - 3.3.1. Introdução
    - 3.3.2. Metodologia tradicional
    - 3.3.3. Metodologia baseada no desempenho
      - 3.3.3.1. Metodologia SUPERPAVE
      - 3.3.3.2. Metodologia Europeia
  - 3.4. Formulação laboratorial
    - 3.4.1. Introdução
    - 3.4.2. Método de *Marshall*
    - 3.4.3. Método de *Hveem*
    - 3.4.4. Método de *Hubbard-Field*
    - 3.4.5. Método de *Smith* ou Triaxial do *Asphalt Institute*
    - 3.4.6. Método de *Duriez*
    - 3.4.7. Método utilizado no Reino Unido
    - 3.4.8. Método utilizado na Bélgica
    - 3.4.9. Método SUPERPAVE
    - 3.4.10. Formulação de misturas recicladas
      - 3.4.10.1. Método do *Asphalt Institute*
      - 3.4.10.2. Método SUPERPAVE
    - 3.4.11. Breves comentários. Método utilizado neste trabalho
4. Caso em estudo

- 4.1. Enquadramento
- 4.2. Formulação da mistura betuminosa
  - 4.2.1. Caracterização dos materiais a utilizar na mistura betuminosa
    - 4.2.1.1. Material fresado
    - 4.2.1.2. Betume novo
    - 4.2.1.3. Agregados novos
  - 4.2.2. Tratamento dos dados
  - 4.2.3. Estudo de *Marshall*
  - 4.2.4. Avaliação das propriedades fundamentais da mistura betuminosa
    - 4.2.4.1. Introdução
    - 4.2.4.2. Propriedades fundamentais de uma mistura betuminosa
      - 4.2.4.2.1. Módulo de rigidez e resistência à fadiga
      - 4.2.4.2.2. Resistência às deformações permanentes
      - 4.2.4.2.3. Metodologia utilizada neste trabalho
    - 4.2.4.3. Preparação dos provetes para ensaio
    - 4.2.4.4. Avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga
    - 4.2.4.5. Avaliação da resistência às deformações permanentes
    - 4.2.4.6. Discussão dos resultados
- 4.3. Obra
  - 4.3.1. Fabrico e aplicação da mistura betuminosa reciclada
  - 4.3.2. Avaliação das propriedades fundamentais da mistura betuminosa
    - 4.3.2.1. Corte das placas e preparação dos provetes
    - 4.3.2.2. Avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga
    - 4.3.2.3. Avaliação da resistência às deformações permanentes
    - 4.3.2.4. Discussão dos resultados. Comparação dos resultados obtidos com as misturas betuminosas fabricadas em laboratório.
  - 4.3.3. Avaliação do módulo de rigidez *in situ* através de ensaios de carga
- 4.4. Conclusão

## 5. Considerações finais

## Bibliografia

## ÍNDICE DE FIGURAS

|             |                                                                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 2.1  | - Funcionamento da reciclagem a frio <i>in situ</i>                                              |
| Figura 2.2  | - Variação da percentagem de água com a taxa de expansão e a meia-vida                           |
| Figura 2.3  | - Decréscimo da taxa de expansão                                                                 |
| Figura 2.4  | - Índice de espuma                                                                               |
| Figura 2.5  | - Variação do índice de espuma com a percentagem de água                                         |
| Figura 2.6  | - Agregados para misturas com espuma de betume                                                   |
| Figura 2.7  | - Central betuminosa a frio                                                                      |
| Figura 2.8  | - Conceito de escada                                                                             |
| Figura 2.9  | - Ciclo fechado de construção                                                                    |
| Figura 2.10 | - Organigrama para a formulação de misturas fabricadas a quente, incorporando materiais fresados |
| Figura 2.11 | - Vida à fadiga das misturas estudadas                                                           |
| Figura 2.12 | - Central betuminosa descontínua                                                                 |
| Figura 2.13 | - Fluxo dos agregados numa central descontínua                                                   |
| Figura 2.14 | - Central betuminosa descontínua – Método RAP a frio                                             |
| Figura 2.15 | - Central betuminosa descontínua – Método RAP a quente                                           |
| Figura 2.16 | - Central betuminosa descontínua – Método <i>Recyclelean</i>                                     |
| Figura 2.17 | - Central de torre                                                                               |
| Figura 2.18 | - Central betuminosa contínua                                                                    |
| Figura 2.19 | - Fluxo dos agregados numa central contínua                                                      |
| Figura 2.20 | - Central betuminosa contínua – RAP                                                              |
| Figura 2.21 | - Central betuminosa contínua de duplo tambor                                                    |
| Figura 2.22 | - Central betuminosa contínua de fluxo contracorrente                                            |
| Figura 2.23 | - Central móvel para reciclagem de misturas betuminosas                                          |
| Figura 2.24 | - Fluxo dos materiais e das operações da central móvel                                           |
| Figura 2.25 | - Central betuminosa mista ou conversível                                                        |
| Figura 2.26 | - Central betuminosa mista de duplo tambor                                                       |
| Figura 3.1  | - Pirâmide de exigências                                                                         |
| Figura 3.2  | - Representação da composição volumétrica de uma mistura betuminosa                              |
| Figura 3.3  | - Potencial das rochas ígneas na produção de agregados                                           |

|             |   |                                                                                                                                       |
|-------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 3.4  | - | Potencial das rochas metamórficas na produção de agregados                                                                            |
| Figura 3.5  | - | Potencial das rochas sedimentares na produção de agregados                                                                            |
| Figura 3.6  | - | Tipos de curvas granulométricas                                                                                                       |
| Figura 3.7  | - | Representação gráfica das massas volúmicas das partículas de agregados                                                                |
| Figura 3.8  | - | Variação da composição de um betume asfáltico durante as operações de mistura e compactação da mistura betuminosa e durante o serviço |
| Figura 3.9  | - | Envelhecimento do betume durante o fabrico, armazenamento, transporte, aplicação e serviço                                            |
| Figura 3.10 | - | Ensaio de penetração de betumes                                                                                                       |
| Figura 3.11 | - | Determinação da temperatura de amolecimento                                                                                           |
| Figura 3.12 | - | RTFOT                                                                                                                                 |
| Figura 3.13 | - | Câmara de envelhecimento pressurizada                                                                                                 |
| Figura 3.14 | - | Viscosímetro rotativo                                                                                                                 |
| Figura 3.15 | - | Reómetro de corte                                                                                                                     |
| Figura 3.16 | - | Comportamento visco-elástico do betume                                                                                                |
| Figura 3.17 | - | Ensaio DSR                                                                                                                            |
| Figura 3.18 | - | Ensaio de flexão em viga de um betume                                                                                                 |
| Figura 3.19 | - | Ensaio BBR                                                                                                                            |
| Figura 3.20 | - | Esquema do ensaio de tracção directa de um betume                                                                                     |
| Figura 3.21 | - | Relação entre a estabilidade e a durabilidade de uma mistura betuminosa com o teor em betume                                          |
| Figura 3.22 | - | Esquema do processo de formulação laboratorial de uma mistura betuminosa                                                              |
| Figura 3.23 | - | Compactador <i>Marshall</i>                                                                                                           |
| Figura 3.24 | - | Estabilómetro <i>Marshall</i>                                                                                                         |
| Figura 3.25 | - | Compactador <i>kneading</i>                                                                                                           |
| Figura 3.26 | - | Estabilómetro de <i>Hveem</i>                                                                                                         |
| Figura 3.27 | - | Esquema do ensaio do método de <i>Hubbard-Field</i>                                                                                   |
| Figura 3.28 | - | Comportamento ao corte dos agregados                                                                                                  |
| Figura 3.29 | - | Esqueleto pétreo dos agregados                                                                                                        |
| Figura 3.30 | - | Limites da granulometria SUPERPAVE                                                                                                    |
| Figura 3.31 | - | Compactador de corte giratório SUPERPAVE                                                                                              |

- Figura 3.32 - Configuração do molde do compactador de corte giratório SUPERPAVE
- Figura 3.33 - Características da mistura devido à compactação com o compactador de corte giratório SUPERPAVE
- Figura 3.34 - Equipamento SST (SUPERPAVE *Shear Tester*)
- Figura 3.35 - Equipamento ITT (*Indirect Tensile Tester*)
- Figura 3.36 - Organigrama para formulação de misturas betuminosas pelo método do AI
- Figura 3.37 - Determinação da viscosidade requerida para o betume novo ou agente rejuvenescedor a adicionar
- Figura 3.38 - Gráficos de temperatura (*Temperature blending charts*)
- Figura 3.39 - Gráfico da rigidez com a percentagem de betume novo
- Figura 4.1 - Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=0%)
- Figura 4.2 - Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=0%)
- Figura 4.3 - Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=0%)
- Figura 4.4 - Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=15%)
- Figura 4.5 - Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=15%)
- Figura 4.6 - Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=15%)
- Figura 4.7 - Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=20%)
- Figura 4.8 - Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=20%)
- Figura 4.9 - Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=20%)
- Figura 4.10 - Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=25%)
- Figura 4.11 - Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=25%)
- Figura 4.12 - Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=25%)
- Figura 4.13 - Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=30%)
- Figura 4.14 - Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=30%)
- Figura 4.15 - Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=30%)
- Figura 4.16 - Curva granulométrica dos agregados recuperados dos provetes moldados com percentagem de betume total de 4,5 % e fuso do Caderno de Encargos da Brisa
- Figura 4.17 - Tensões induzidas por uma carga em movimento

|             |                                                                                                                              |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 4.18 | - Equipamento utilizado para os ensaios de módulo de rigidez e de resistência à fadiga                                       |
| Figura 4.19 | - Equipamento <i>Wheel Tracking</i>                                                                                          |
| Figura 4.20 | - Processo de mistura                                                                                                        |
| Figura 4.21 | - Processo de mistura                                                                                                        |
| Figura 4.22 | - Processo de compactação                                                                                                    |
| Figura 4.23 | - Processo de compactação                                                                                                    |
| Figura 4.24 | - Corte de provetes para o ensaio de fadiga                                                                                  |
| Figura 4.25 | - Corte de provetes para o ensaio de deformações permanentes                                                                 |
| Figura 4.26 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.27 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.28 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 350 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.29 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 200 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.30 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 650 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.31 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.32 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 350 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.33 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 200 $\mu\epsilon$ (TR=0%; Pbtotal=5,1%)  |
| Figura 4.34 | - Lei de fadiga (TR=0%; Pbtotal=5,1%)                                                                                        |
| Figura 4.35 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.36 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.37 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.38 | - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 300 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.39 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 650 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.40 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.41 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.42 | - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 300 $\mu\epsilon$ (TR=15%; Pbtotal=4,3%) |
| Figura 4.43 | - Lei de fadiga (TR=15%; Pbtotal=4,3%)                                                                                       |

- Figura 4.44 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 800  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.45 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.46 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.47 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.48 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 800  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.49 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.50 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.51 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.52 - Lei de fadiga (TR=15%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.53 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.54 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.55 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 290  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.56 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 180  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.57 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.58 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.59 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 290  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.60 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 180  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.61 - Lei de fadiga (TR=30%; Pbtot=4,3%)
- Figura 4.62 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.63 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.64 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 280  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.65 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 210  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.66 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.67 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)
- Figura 4.68 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um

nível de extensão de 280  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbttotal=5,1%)

- Figura 4.69 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 210  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbttotal=5,1%)
- Figura 4.70 - Lei de fadiga (TR=30%; Pbttotal=5,1%)
- Figura 4.71 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2. (TR=0%; Pbttotal=5,1%)
- Figura 4.72 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1. (TR=0%; Pbttotal=5,1%)
- Figura 4.73 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2. (TR=0%; Pbttotal=5,1%)
- Figura 4.74 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1. (TR=0%; Pbttotal=5,1%)
- Figura 4.75 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2. (TR=0%; Pbttotal=5,1%)
- Figura 4.76 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1. (TR=15%; Pbttotal=4,3%)
- Figura 4.77 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2. (TR=15%; Pbttotal=4,3%)
- Figura 4.78 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1. (TR=15%; Pbttotal=4,3%)
- Figura 4.79 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2. (TR=15%; Pbttotal=4,3%)
- Figura 4.80 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1. (TR=15%; Pbttotal=4,3%).
- Figura 4.81 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2. (TR=15%; Pbttotal=4,3%).
- Figura 4.82 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1. (TR=15%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.83 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2. (TR=15%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.84 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1. (TR=15%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.85 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2. (TR=15%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.86 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1. (TR=15%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.87 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2. (TR=15%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.88 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1. (TR=30%; Pbttotal=4,3%).
- Figura 4.89 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2. (TR=30%; Pbttotal=4,3%).
- Figura 4.90 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1. (TR=30%; Pbttotal=4,3%).
- Figura 4.91 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2. (TR=30%; Pbttotal=4,3%).
- Figura 4.92 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1. (TR=30%; Pbttotal=4,3%).

- Figura 4.93 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2. (TR=30%; Pbttotal=4,3%).
- Figura 4.94 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1. (TR=30%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.95 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2. (TR=30%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.96 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1. (TR=30%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.97 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2. (TR=30%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.98 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1. (TR=30%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.99 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2. (TR=30%; Pbttotal=5,1%).
- Figura 4.100 - Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Figura 4.101 - Ângulo de fase. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Figura 4.102 - Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas
- Figura 4.103 - Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas através da energia da dissipada acumulada
- Figura 4.104 - Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*
- Figura 4.105 - Tambor secador misturador de fluxo paralelo
- Figura 4.106 - Introdução no anel central das misturas betuminosas fresadas
- Figura 4.107 - Rega de colagem
- Figura 4.108 - Aplicação do geotextil
- Figura 4.109 - Aplicação da mistura com reciclagem a quente
- Figura 4.110 - Corte das placas da camada executada com misturas com reciclagem
- Figura 4.111 - Provete para ensaio à fadiga
- Figura 4.112 - Provete para ensaio às deformações permanentes
- Figura 4.113 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.114 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.115 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.116 - Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 300  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.117 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.118 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

- Figura 4.119 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.120 - Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 300  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.121 - Lei de fadiga (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.122 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P1. (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.123 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P2. (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.124 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P3. (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.125 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P4. (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.126 - Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P5. (Mistura aplicada em obra)
- Figura 4.127 - Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Figura 4.128 - Ângulo de fase. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Figura 4.129 - Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas
- Figura 4.130 - Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas através da energia dissipada acumulada
- Figura 4.131 - Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*
- Figura 4.132 - Representação do deflectómetro de impacto
- Figura 4.133 - Princípio de funcionamento do deflectómetro de impacto
- Figura 4.134 - Ajuste dos deflectogramas calculado com o Bisar e “medido” com o deflectómetro de impacto
- Figura 4.135 - Relação entre módulo de rigidez e extensão no ensaio laboratorial de flexão em quatro pontos com extensão controlada

## ÍNDICE DE QUADROS

|             |                                                                                                                                 |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quadro 1.1  | - Principais manifestações de degradação de pavimentos                                                                          |
| Quadro 2.1  | - Percentagem de betume residual                                                                                                |
| Quadro 2.2  | - Resistência: ITS ( <i>Indirect Tensile Strenght</i> ) em provetes <i>Marshall</i> a 25°C                                      |
| Quadro 2.3  | - Rigidez: Ensaio de cargas repetidas                                                                                           |
| Quadro 2.4  | - Vantagens e desvantagens da técnica com emulsão betuminosa                                                                    |
| Quadro 2.5  | - Percentagem de cimento                                                                                                        |
| Quadro 2.6  | - Vantagens e desvantagens da técnica com cimento                                                                               |
| Quadro 2.7  | - Resumo da obra EN383                                                                                                          |
| Quadro 2.8  | - Resumo dos resultados do estudo de formulação                                                                                 |
| Quadro 2.9  | - Percentagem de betume residual                                                                                                |
| Quadro 2.10 | - Percentagem de betume residual                                                                                                |
| Quadro 2.11 | - Resistência: ITS ( <i>Indirect Tensile Strenght</i> ) em provetes <i>Marshall</i> a 25°C                                      |
| Quadro 2.12 | - Rigidez: Ensaio de cargas repetidas                                                                                           |
| Quadro 2.13 | - Vantagens e desvantagens da técnica com espuma de betume                                                                      |
| Quadro 2.14 | - Composição da mistura aplicada na camada de base                                                                              |
| Quadro 2.15 | - Quantidade em toneladas de misturas betuminosas recicladas a quente na Europa em 2002                                         |
| Quadro 2.16 | - Misturas estudadas                                                                                                            |
| Quadro 2.17 | - Tolerâncias nas características dos materiais fresados                                                                        |
| Quadro 2.18 | - Critérios a cumprir pelas misturas                                                                                            |
| Quadro 3.1  | - Grupos de normas Europeias de ensaio e respectivas propriedades                                                               |
| Quadro 3.2  | - Normas de ensaio para caracterização de agregados para misturas betuminosas de acordo com o Caderno de Encargos da JAE (1998) |
| Quadro 3.3  | - Ensaio sobre betumes preconizados na metodologia SUPERPAVE                                                                    |
| Quadro 3.4  | - Condição de envelhecimento do betume para o ensaio SUPERPAVE                                                                  |
| Quadro 3.5  | - Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas                                                                |
| Quadro 3.6  | - Norma EN 13108                                                                                                                |
| Quadro 3.7  | - Níveis do método de formulação SUPERPAVE                                                                                      |
| Quadro 3.8  | - Massas volúmicas da mistura de agregados e da mistura betuminosa                                                              |
| Quadro 3.9  | - Ensaio a realizar com o equipamento SST e ITT                                                                                 |

|             |                                                                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quadro 3.10 | - Modelos do método de formulação SUPERPAVE                                                                     |
| Quadro 3.11 | - Ensaaios para avaliação do desempenho                                                                         |
| Quadro 3.12 | - Temperaturas para selecção do ligante betuminoso                                                              |
| Quadro 4.1  | - Análise granulométrica da mistura betuminosa fresada                                                          |
| Quadro 4.2  | - Percentagem de betume e teor em água da mistura betuminosa fresada                                            |
| Quadro 4.3  | - Análise granulométrica dos agregados recuperados da mistura betuminosa fresada                                |
| Quadro 4.4  | - Características de limpeza dos agregados recuperados da mistura betuminosa fresada                            |
| Quadro 4.5  | - Massa volúmica e absorção de água dos agregados recuperados                                                   |
| Quadro 4.6  | - Forma e resistência ao desgaste dos agregados da mistura betuminosa fresada                                   |
| Quadro 4.7  | - Características do betume recuperado da mistura betuminosa fresada                                            |
| Quadro 4.8  | - Características do betume novo utilizado                                                                      |
| Quadro 4.9  | - Análise granulométrica dos agregados novos a utilizar na mistura betuminosa                                   |
| Quadro 4.10 | - Massa volúmica e absorção de água dos agregados novos a utilizar na mistura betuminosa                        |
| Quadro 4.11 | - Características de limpeza dos agregados novos a utilizar na mistura betuminosa                               |
| Quadro 4.12 | - Forma e resistência ao desgaste dos agregados novos a utilizar na mistura                                     |
| Quadro 4.13 | - Características do filer utilizado na mistura betuminosa                                                      |
| Quadro 4.14 | - Fusão do caderno de encargos da Brisa para a mistura betuminosa densa                                         |
| Quadro 4.15 | - Fusão granulométrica para os agregados novos que vão compor a mistura betuminosa para cada taxa de reciclagem |
| Quadro 4.16 | - Proporção de cada agregado novo a introduzir na mistura                                                       |
| Quadro 4.17 | - Valores de TR <sub>b</sub> para cada TR e para cada P <sub>btot</sub>                                         |
| Quadro 4.18 | - Estimativa dos valores de penetração e de temperatura de amolecimento da mistura reciclada final              |
| Quadro 4.19 | - Valores de TR <sub>b</sub> para cada TR e para cada P <sub>btot</sub>                                         |
| Quadro 4.20 | - Proporção de cada agregado na mistura de agregados                                                            |
| Quadro 4.21 | - Propriedades da mistura betuminosa densa a avaliar no estudo <i>Marshall</i> de acordo com Brisa (2003)       |
| Quadro 4.22 | - Estudo de <i>Marshall</i> (TR = 0%)                                                                           |
| Quadro 4.23 | - Estudo de <i>Marshall</i> (TR = 15%)                                                                          |
| Quadro 4.24 | - Estudo de <i>Marshall</i> (TR = 20%)                                                                          |
| Quadro 4.25 | - Estudo de <i>Marshall</i> (TR = 25%)                                                                          |

- Quadro 4.26 - Estudo de *Marshall* (TR = 30%)
- Quadro 4.27 - Determinação da percentagem óptima de betume total (Pbt<sub>total</sub>)
- Quadro 4.28 - Propriedades das misturas betuminosas para a percentagem óptima de betume total (Pbt<sub>total</sub>)
- Quadro 4.29 - Penetração e temperatura de amolecimento do betume das misturas betuminosas com 4,5% de betumes (provetes *Marshall*)
- Quadro 4.30 - Análise granulométrica (procedimento JAE S.8-53) dos agregados recuperados dos provetes moldados com percentagem de betume total de 4,5 %
- Quadro 4.31 - Propriedades das misturas betuminosas para o valor óptimo e para o valor mínimo (de acordo com o Caderno de Encargos) da percentagem em betume
- Quadro 4.32 - Fórmulas de trabalho das misturas a estudar
- Quadro 4.33 - Diferenças entre os dois modos de carregamento nos ensaios de resistência à fadiga
- Quadro 4.34 - Influência da composição das misturas betuminosas no comportamento à fadiga
- Quadro 4.35 - Efeito da variação de alguns factores no comportamento às deformações permanentes
- Quadro 4.36 - Condições de preparação das misturas betuminosas a estudar
- Quadro 4.37 - Condições do ensaio de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga
- Quadro 4.38 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa tradicional (com taxa de reciclagem de 0%) e com percentagem de betume total de 5,1%
- Quadro 4.39 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 4,3%
- Quadro 4.40 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 5,1%
- Quadro 4.41 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 4,3%
- Quadro 4.42 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 5,1%
- Quadro 4.43 - Condições de ensaio para avaliação da resistência às deformações permanentes
- Quadro 4.44 - Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa tradicional (com taxa de reciclagem de 0%) e com percentagem de betume total de 5,1%
- Quadro 4.45 - Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 4,3%
- Quadro 4.46 - Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 5,1%

- Quadro 4.47 - Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 4,3%
- Quadro 4.48 - Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 5,1%
- Quadro 4.49 - Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Quadro 4.50 - Ângulo de fase inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Quadro 4.51 - Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*
- Quadro 4.52 - Estrutura do pavimento no trecho experimental
- Quadro 4.53 - Análise granulométrica dos agregados da mistura betuminosa reciclada aplicada em obra com taxa de reciclagem de 15%
- Quadro 4.54 - Propriedades da mistura betuminosa reciclada aplicada em obra (provetes moldados com a mistura betuminosa aplicada na obra)
- Quadro 4.55 - Características do betume das placas do pavimento
- Quadro 4.56 - Condições do ensaio de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga
- Quadro 4.57 - Resultados dos ensaios de fadiga da mistura betuminosa aplicada em obra
- Quadro 4.58 - Condições de ensaio para avaliação da resistência às deformações permanentes
- Quadro 4.59 - Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa aplicada em obra
- Quadro 4.60 - Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Quadro 4.61 - Ângulo de fase inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.
- Quadro 4.62 - Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*
- Quadro 4.63 - Distâncias dos geofones ao centro da carga
- Quadro 4.64 - Deflexões medidas pelo deflectómetro de impacto
- Quadro 4.65 - Deflexões normalizadas para a força de 65 kN
- Quadro 4.66 - Iterações para ajuste dos deflectogramas calculado com o Bisar e “medido” com o deflectómetro de impacto
- Quadro 4.67 - Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa reciclada
- Quadro 4.68 - Extensões de tracção originadas no ensaio de carga com o deflectómetro de impacto
- Quadro 4.69 - Comparação entre os valores obtidos em ensaio laboratorial e a linha de tendência que relaciona o módulo de rigidez e a extensão de tracção

## Glossário de Símbolos

|                            |   |                                                                                                      |
|----------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a                          | - | Parâmetro                                                                                            |
| A                          | - | Parâmetro                                                                                            |
| b                          | - | Parâmetro                                                                                            |
| BBR                        | - | <i>Bending Beam Rheometer</i>                                                                        |
| BMT                        | - | Baridade máxima teórica                                                                              |
| BS                         | - | <i>British Standards</i>                                                                             |
| c                          | - | Parâmetro                                                                                            |
| CBR                        | - | <i>California Bearing Ratio</i>                                                                      |
| CKE                        | - | <i>Centrifuge Kerosene Equivalent</i>                                                                |
| C(N)                       | - | Percentagem da massa volúmica máxima teórica de uma mistura para um determinado valor de giros       |
| d                          | - | Dimensão mínima do agregado                                                                          |
| D                          | - | Dimensão máxima do agregado                                                                          |
| Densaio                    | - | Deflexão registada no ensaio                                                                         |
| DSR                        | - | <i>Dynamic Shear Rheometer</i>                                                                       |
| DTT                        | - | <i>Direct Tension Test</i>                                                                           |
| D <sub>65kN</sub>          | - | Deflexão normalizada para 65 kN                                                                      |
| D <sub>85</sub>            | - | Deflexão correspondente ao percentil 85% do conjunto de valores das deflexões                        |
| E                          | - | Módulo de deformabilidade                                                                            |
| EN                         | - | Norma Europeia; Estrada Nacional                                                                     |
| ER <sub>a</sub>            | - | Máxima taxa de expansão actual, calculada                                                            |
| ER <sub>m</sub>            | - | Máxima taxa de expansão medida imediatamente após a descarga da espuma                               |
| E <sub>retro-análise</sub> | - | Módulo de deformabilidade obtido na retro-análise, para a temperatura existente no pavimento         |
| ER(t)                      | - | Taxa de expansão, função do tempo após descarga da espuma;                                           |
| E <sub>T</sub>             | - | Módulo de deformabilidade corrigido para a temperatura T                                             |
| E*                         | - | Módulo complexo da mistura betuminosa                                                                |
| E <sub>1</sub>             | - | Componente real do módulo complexo                                                                   |
| E <sub>2</sub>             | - | Componente imaginária do módulo complexo                                                             |
| E <sub>15</sub>            | - | Módulo de deformabilidade à temperatura de 15 °C                                                     |
| f                          | - | Parâmetro                                                                                            |
| F                          | - | Parâmetro                                                                                            |
| Fensaio                    | - | Força de pico registada no ensaio                                                                    |
| FI                         | - | Índice de espuma                                                                                     |
| F <sub>max</sub> (i)       | - | Percentagem máxima de passados acumulados do fuso a respeitar pela mistura de agregados no peneiro i |
| F <sub>min</sub> (i)       | - | Percentagem mínima de passados acumulados do fuso a respeitar pela mistura de agregados no peneiro i |
| FWD                        | - | <i>Falling Weight Deflectometer</i>                                                                  |
| G                          | - | Parâmetro                                                                                            |
| G <sub>mm</sub>            | - | Massa volúmica máxima teórica da mistura betuminosa                                                  |
| G <sub>mb</sub>            | - | Massa volúmica da mistura betuminosa compactada                                                      |
| G <sub>sa</sub>            | - | Massa volúmica da mistura de agregados do material impermeável das partículas                        |
| G <sub>se</sub>            | - | Massa volúmica efectiva da mistura de agregados                                                      |
| G <sub>sb</sub>            | - | Massa volúmica da mistura de agregados das partículas secas                                          |
| GSB                        | - | Grau de saturação de betume                                                                          |

|                          |                                                                                                    |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G*                       | - Módulo complexo do betume                                                                        |
| K                        | - Parâmetro; Módulo de riqueza                                                                     |
| L                        | - Força no ensaio <i>Wheel Tracking</i>                                                            |
| IP                       | - Índice de Plasticidade                                                                           |
| ITS                      | - <i>Indirect Tensile Strenght</i>                                                                 |
| ITT                      | - <i>Indirect Tensile Tester</i>                                                                   |
| m                        | - Parâmetro                                                                                        |
| M                        | - Deflexão média do conjunto de valores das deflexões                                              |
| MBF                      | - Misturas Betuminosas Fresadas                                                                    |
| MBR                      | - Misturas Betuminosas Recicladas                                                                  |
| MMC                      | - Percentagem óptima de humidade de compactação da mistura;                                        |
| N                        | - Número de aplicações de carga; Resistência à fadiga; Número de<br>girações                       |
| NAEP                     | - Número acumulado de eixos padrão                                                                 |
| NAT                      | - <i>Nottingham Asphalt Tester</i>                                                                 |
| N <sub>formulação</sub>  | - Número de rotações de formulação                                                                 |
| N <sub>inicial</sub>     | - Número de rotações inicial                                                                       |
| N <sub>máximo</sub>      | - Número máximo de rotações                                                                        |
| NLT                      |                                                                                                    |
| NP                       | - Norma Portuguesa                                                                                 |
| OTFC                     | - <i>Optimun Total Fluid Content</i>                                                               |
| OMC                      | - Percentagem óptima de compactação dos agregados (AASHTO<br>modificado)                           |
| Pa                       | - Percentagem de agregados na mistura betuminosa                                                   |
| Pa <sub>MBF</sub>        | - Percentagem de agregados na mistura betuminosa fresada                                           |
| Pa <sub>N</sub>          | - Percentagem de agregados novos na mistura betuminosa reciclada<br>(MBR)                          |
| Patotal                  | - Percentagem de agregados na mistura betuminosa reciclada                                         |
| PAV                      | - <i>Pressure Aging Vessel</i>                                                                     |
| Pb                       | - Percentagem de betume                                                                            |
| Pb <sub>convertida</sub> | - Percentagem convertida de betume                                                                 |
| Pb <sub>ensaçada</sub>   | - Percentagem de betume ensaiada                                                                   |
| Pb <sub>MBFR</sub>       | - Percentagem de betume proveniente da mistura fresada na massa da<br>mistura betuminosa reciclada |
| Pb <sub>N</sub>          | - Percentagem de betume novo na mistura betuminosa reciclada                                       |
| Pb <sub>MBF</sub>        | - Percentagem de betume na mistura betuminosa fresada                                              |
| Pb <sub>residual</sub>   | - Percentagem de betume na emulsão betuminosa                                                      |
| Pbtotal                  | - Percentagem de betume na mistura betuminosa reciclada ou<br>percentagem de betume total          |
| Pe                       | - Percentagem de emulsão na massa da mistura betuminosa reciclada                                  |
| pen <sub>MBF</sub>       | - Penetração do betume da mistura betuminosa fresada                                               |
| pen <sub>MBR</sub>       | - Penetração do betume da mistura betuminosa reciclada                                             |
| pen <sub>N</sub>         | - Penetração do betume novo                                                                        |
| PG                       | - <i>Performance grades</i>                                                                        |
| P <sub>MBF(i)</sub>      | - Percentagem de passados acumulados dos agregados da mistura<br>betuminosa fresada no peneiro i   |
| P <sub>MBR(i)</sub>      | - Percentagem de passados acumulados dos agregados da mistura<br>betuminosa reciclada no peneiro i |
| P <sub>N(i)</sub>        | - Percentagem de passados acumulados dos agregados novos no<br>peneiro i                           |

|                      |   |                                                                                                    |
|----------------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PRD                  | - | <i>Percentage Refusal Density</i>                                                                  |
| R                    | - | Parâmetro                                                                                          |
| RAP                  | - | <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>                                                                  |
| RTFOT                | - | <i>Rolling thin film oven test</i>                                                                 |
| RV                   | - | <i>Rotational Viscometer</i>                                                                       |
| s                    | - | Parâmetro                                                                                          |
| S                    | - | Parâmetro; <i>Creep Stiffness</i>                                                                  |
| SST                  | - | <i>SUPERPAVE Shear Tester</i>                                                                      |
| t                    | - | Tempo                                                                                              |
| ts                   | - | Tempo de pulverização                                                                              |
| T                    | - | Temperatura à qual se pretende obter o módulo                                                      |
| Tb                   |   | Teor em betume                                                                                     |
| Tc                   | - | Temperatura crítica                                                                                |
| TAB <sub>MBF</sub>   | - | Temperatura anel e bola do betume da mistura betuminosa fresada                                    |
| TAB <sub>MBR</sub>   | - | Temperatura anel e bola do betume da mistura betuminosa reciclada                                  |
| TAB <sub>N</sub>     | - | Temperatura anel e bola do betume novo                                                             |
| T <sub>ef</sub>      | - | Temperatura efectiva                                                                               |
| T <sub>ef(DP)</sub>  | - | Temperatura efectiva para as deformações permanentes                                               |
| T <sub>ef(FF)</sub>  | - | Temperatura efectiva para a vida à fadiga                                                          |
| T <sub>ensaio</sub>  | - | Temperatura do pavimento na altura do ensaio                                                       |
| TFOT                 | - | <i>Thin Film Oven Test</i>                                                                         |
| TR                   | - | Taxa de reciclagem; Índice de aumento da profundidade da rodeira                                   |
| TRa                  | - | Taxa de reciclagem de agregado                                                                     |
| TRb                  | - | Percentagem de betume da MBR em 100% do betume da MBR, ou taxa de reciclagem de betume             |
| TRm                  | - | Índice médio de aumento da profundidade da rodeira                                                 |
| UCS                  | - | <i>Uniaxial Compressive Strength</i>                                                               |
| Va                   | - | Volume de vazios que se obteve para N <sub>formulação</sub> ; Percentagem volumétrica de agregados |
| Vba                  | - | Percentagem volumétrica de betume absorvido                                                        |
| VFA                  | - | Volume de vazios ocupados por betume                                                               |
| VMA                  | - | Volume de vazios do esqueleto mineral da mistura de agregados                                      |
| Vv                   | - | Volume de vazios ou porosidade                                                                     |
| VISC <sub>MBF</sub>  | - | Viscosidade do betume da mistura betuminosa fresada                                                |
| VISC <sub>MBR</sub>  | - | Viscosidade do betume da mistura betuminosa reciclada                                              |
| VISC <sub>N</sub>    | - | Viscosidade do betume novo                                                                         |
| Vv                   | - | Percentagem volumétrica de vazios ou porosidade                                                    |
| Vbef                 | - | Percentagem volumétrica de betume efectivo                                                         |
| w                    | - | Frequência; Largura do pneu no ensaio <i>Wheel Tracking</i>                                        |
| W <sub>N</sub>       | - | Energia dissipada acumulada                                                                        |
| WTR                  | - | Índice de deformação                                                                               |
| X                    | - | Parâmetro                                                                                          |
| z                    | - | Parâmetro                                                                                          |
| α                    |   | Parâmetro                                                                                          |
| δ                    | - | Ângulo de fase do betume                                                                           |
| εt                   | - | Extensão de tracção                                                                                |
| εt <sub>máxima</sub> | - | Máxima extensão horizontal de tracção na camada reciclada com espuma de betume                     |
| εt <sub>rotura</sub> | - | Extensão de rotura no ensaio de viga apoiada em três pontos.                                       |

|                  |                                                                                                              |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon(t)$ | - Extensão no instante t                                                                                     |
| $\varepsilon_0$  | - Extensão máxima                                                                                            |
| $\phi$           | - Ângulo de fase da mistura betuminosa                                                                       |
| $\gamma$         | - Baridade aparente da mistura compactada                                                                    |
| $\gamma_a$       | Massa volúmica das partículas secas da mistura das fracções do agregado; Massa volúmica do material agregado |
| $\sigma$         | - Tensão de tracção por flexão provocada por uma determinada carga; Desvio padrão                            |
| $\sigma_0$       | - Resistência à tracção por flexão do material; Tensão máxima                                                |
| $\sigma(t)$      | - Tensão no instante t                                                                                       |
| $\Sigma$         | - Superfície específica do agregado                                                                          |
| $\tau^{1/2}$     | - Meia-vida                                                                                                  |

## **Abreviaturas**

|           |                                                                                                     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AASTHO    | - <i>American Association of State Highway and Transport Official</i>                               |
| AI        | - <i>Asphalt Institute</i>                                                                          |
| APORBET   | - <i>Associação Portuguesa dos Industriais de Misturas Betuminosas</i>                              |
| ASTM      | - <i>American Society of Testing and Materials</i>                                                  |
| CEN       | - <i>Comité Européen de Normalisation</i>                                                           |
| CICCOPN   | - <i>Centro de formação profissional da Indústria da Construção Civil e Obras públicas do Norte</i> |
| EAPA      | - <i>European Asphalt Pavement Association</i>                                                      |
| FEUP      | - <i>Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto</i>                                           |
| GSM       | - <i>Groupe Spécial Mobile</i>                                                                      |
| IEP       | - <i>Instituto de Estradas de Portugal</i>                                                          |
| JAÉ       | - <i>Junta Autónoma de Estradas</i>                                                                 |
| LCPC      | - <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>                                                 |
| LNEC      | - <i>Laboratório Nacional de Engenharia Civil</i>                                                   |
| MARS      | - <i>Microwave Asphalt Recycling System</i>                                                         |
| NAPA      | - <i>National Asphalt Pavement Association</i>                                                      |
| NAT       | - <i>Nottingham Asphalt Tester</i>                                                                  |
| PIARC     | - <i>Permanent International Association of Road Congresses</i>                                     |
| SCUT      | - <i>Sem Custos para o Utente</i>                                                                   |
| SHRP      | - <i>Strategic Highway Research Program</i>                                                         |
| SUPERPAVE | - <i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>                                                      |
| TC        | - <i>Technical Committee</i>                                                                        |
| TG        | - <i>Task Group</i>                                                                                 |
| WG        | - <i>Working Group</i>                                                                              |

## 1. Introdução

### 1.1. Enquadramento

O desenvolvimento de um país depende de forma particularmente relevante das suas infra-estruturas de transportes. Em Portugal, os transportes rodoviários assumem particular importância dado que constituem o principal meio de transporte.

A partir de 1985 a rede rodoviária nacional sofreu uma grande transformação com o objectivo de promover a sua modernização. Esse esforço incidiu de forma particular na rede fundamental (Itinerários Principais e Complementares) ocorrendo a simultânea redução da rede considerada como nacional. Actualmente de acordo com o Plano Rodoviário 2000 (PRN 2000) a construção de novas estradas continua a efectuar-se para que a rede rodoviária Portuguesa venha a ter uma qualidade equivalente à dos países europeus mais desenvolvidos.

Os pavimentos rodoviários após a sua construção sofrem um processo de degradação sob a acção do tráfego e das condições atmosféricas. Esse processo que ocorre durante a vida útil do pavimento poderá no entanto ser mais lento se o pavimento for bem concebido, bem construído e bem conservado.

As solicitações a que são sujeitos os pavimentos rodoviários devidas ao tráfego têm aumentado quer em termos de volume quer em termos de agressividade. As exigências dos utentes têm também crescido com o tempo. Assim, paralelamente à construção de novas estradas, surge a necessidade de reabilitar uma parte importante da rede construída que se encontra em serviço há quase 20 anos. A reabilitação dos pavimentos rodoviários, cuja necessidade advém da inevitabilidade da ocorrência de degradações, pode incidir de formas distintas na qualidade de um pavimento em função do tipo de degradações que o mesmo apresenta.

Tendo em conta o desenvolvimento sócio-económico que acompanhou o ritmo muito intensivo de construção de anos recentes, grandes esforços foram feitos por parte dos diversos intervenientes no processo construtivo na procura de novos métodos de dimensionamento, novas técnicas construtivas, novos materiais e novas técnicas de reabilitação. Um exemplo a salientar foi o aparecimento nos anos 90 de misturas betuminosas delgadas com ligantes modificados utilizadas na rede rodoviária nacional com o objectivo de melhorar as características superficiais dos pavimentos. Outro exemplo, sobre o qual incide o presente trabalho, refere-se às técnicas de reciclagem de misturas betuminosas numa forma geral e na sua vertente a quente em central em particular, que começa actualmente a dar os primeiros passos no nosso país.

Os pavimentos rodoviários classificam-se de acordo com o seu funcionamento estrutural e materiais constituintes em pavimentos rígidos, semi-rígidos e flexíveis. A rede rodoviária Portuguesa é maioritariamente constituída por pavimentos flexíveis assumindo a reabilitação deste tipo de pavimentos uma importância acrescida.

A principal função de um pavimento rodoviário é oferecer uma superfície de rolamento livre e desempenada, destinada a permitir a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, conforto e economia (Azevedo, 2002). A segurança de um pavimento rodoviário depende não só das características do traçado da estrada como

também das suas características superficiais como a regularidade (transversal e longitudinal), textura e condições de drenagem das águas superficiais. O conforto (ou comodidade) dos utentes que compreende o conforto óptico e o conforto acústico está relacionado com a qualidade da superfície de rolamento e com o efeito acumulado das vibrações sentidas pelos utentes da estrada. A economia engloba a redução do desgaste dos veículos, de consumos de combustível e de pneus, do tempo de viagem e também a redução dos custos resultantes da taxa de acidentes.

A degradação das características dos pavimentos rodoviários impossibilita que os mesmos cumpram as funções para as quais foram construídos pelo menos de forma a satisfazer plenamente as exigências dos utentes que neles circulam.

As degradações podem ser divididas em duas famílias (Azevedo, 2002):

- Degradação das características estruturais;
- Degradação das características superficiais.

A degradação das características estruturais compreende a perda de capacidade de carga do pavimento traduzida pela ocorrência de deformações permanentes e também pelo aparecimento de fendilhamento à superfície. A degradação das características superficiais compreende a deficiente regularidade (transversal e longitudinal) e a deficiente textura (e consequente diminuição do atrito). As diversas degradações relacionam-se entre si, influenciando o modo e a velocidade da sua evolução. No quadro 1.1 constam as principais manifestações de degradação em pavimentos.

Quadro 1.1 – Principais manifestações de degradação em pavimentos (Azevedo, 2002)

| Manifestação  | Causas gerais                                                                                                              | Causas específicas                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fendas        | Associadas ao tráfego                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eixos sobrecarregados</li> <li>• Repetida aplicação de cargas (fadiga)</li> <li>• Deslizamento/escorregamento entre camadas (resultante de forças de travagem)</li> <li>• Propagação de fendas de camadas inferiores (podem ser aceleradas pelo tráfego)</li> </ul> |
|               | Não associadas ao tráfego                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variações térmicas</li> <li>• Variações do teor em água</li> <li>• Retracção dos materiais subjacentes</li> </ul>                                                                                                                                                   |
| Deformações   | Associadas ao tráfego                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rodeiras (resultante da repetida aplicação de cargas)</li> <li>• Deformações por fluência (resultante de um única ou de poucas aplicações de carga)</li> <li>• Erosão de camadas de suporte (escalonamento de lajes)</li> </ul>                                     |
|               | Não associadas ao tráfego                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Empolamento (resultante da expansão das argilas ou da acção gelo/degelo)</li> <li>• Assentamentos (resultantes de consolidação da fundação ou de drenagem insuficiente)</li> </ul>                                                                                  |
| Desagregações | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualidade e formulação dos materiais</li> <li>• Processos construtivos</li> </ul> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Os tipos de reabilitação dos pavimentos rodoviários diferenciam-se pelos objectivos que os precedem. Cabe distinguir a reabilitação das características superficiais, ou reabilitação funcional, da reabilitação estrutural, cujo objectivo desta última é repor a capacidade portante do pavimento (Azevedo, 2002).

A adopção da medida de reabilitação mais adequada a cada caso requer um diagnóstico das degradações existentes ou previsíveis, o conhecimento da estrutura do pavimento, das características dos materiais, das características do tráfego e do clima e dos restantes factores que possam influenciar a opção a efectuar.

A reabilitação das características superficiais (ou reabilitação funcional) tem o objectivo de conferir novamente ao pavimento as características superficiais adequadas tais como a textura (e consequentemente o atrito) e a regularidade (longitudinal e transversal). Pode ser concretizada através de várias técnicas que são seleccionadas de acordo os objectivos a atingir e as condições disponíveis para a intervenção a efectuar. De entre as diversas técnicas pode-se salientar a selagem de fendas para impermeabilização, a ranhuragem (*grooving*), os revestimentos superficiais, a incrustação de gravilhas pré-embebidas em betume (*chipping*) e a aplicação de camadas delgadas e ultra-delgadas em betão betuminoso drenante ou em betão betuminoso rugoso.

A reabilitação das características estruturais (ou reabilitação estrutural) tem o objectivo de conferir novamente ao pavimento as características estruturais adequadas tais como a capacidade de carga e a resistência ao fendilhamento. A técnica a seleccionar também deverá ser seleccionada de acordo os objectivos a atingir e as condições disponíveis para a intervenção a efectuar e pode consistir na execução de camadas de reforço, na fresagem de camadas degradadas e substituição por novas camadas sãs, com ou sem reciclagem dos materiais fresados, e na aplicação de geotêxteis impregnados com betume e misturas ou membranas anti-fissuras.

A reciclagem de misturas betuminosas aparece assim como uma técnica de reabilitação de pavimentos rodoviários. No entanto a sua importância vai para além de uma simples técnica de reabilitação uma vez que vai de encontro às preocupações actuais em relação às políticas de desenvolvimento sustentável. Define-se habitualmente desenvolvimento sustentável como o desenvolvimento que vai de encontro às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades. A preocupação internacional com o desenvolvimento sustentável tem vindo a crescer. Durante a conferência das Nações Unidas sobre ambiente e desenvolvimento em 1992, chegou-se a um acordo para a necessidade de um programa de acção completo para todo o mundo para atingir um padrão mais sustentável de desenvolvimento para o novo século (PIARC, 2001).

A construção e manutenção de estradas implicam a utilização de quantidades consideráveis de agregados e ligantes bem como a produção de materiais provenientes dos pavimentos degradados que após fresagem são tradicionalmente considerados como resíduos. A reciclagem aparece como resposta à preocupação em relação aos recursos não renováveis e em relação à deposição dos resíduos sendo considerada genericamente nas diversas vertentes desse conceito como um instrumento da política do desenvolvimento sustentável. Actualmente é necessário promover uma aproximação entre problemas ambientais e as soluções técnicas e económicas de forma a desenvolver a reciclagem. Este objectivo possibilita um clima político onde a intenção é obter um ciclo fechado através da reciclagem e reutilização de materiais, e onde, naturalmente, a situação óptima ocorre quando a reciclagem pode ser justificada economicamente. No entanto, enquanto tal não acontece, outros mecanismos tem de ser introduzidos para encorajar a reciclagem e reutilização das estruturas de pavimentos existentes. Essas medidas podem sumariamente ser as seguintes (PIARC, 2001):

- Promoção do espírito da reciclagem;
- Donos de obra devem partilhar o risco com os empreiteiros para estimular a reciclagem e reutilização;
- Autoridades rodoviárias devem enfatizar a reciclagem nas especificações e devem introduzir o controlo da qualidade para os materiais recicláveis;
- Introdução de bónus para a reutilização;
- Comparticipação no suporte de investimento de capital nas centrais de reciclagem para as tornar capazes de lidar com altas taxas de reciclagem.

A reciclagem tem vários benefícios podendo no entanto destacar-se dois, por serem mais importantes. O primeiro tem a ver com a atractividade da utilização de materiais disponíveis em termos económicos e o segundo tem a ver com o facto de a utilização mais extensiva dos materiais reciclados ser exigível em termos ambientais.

A reciclagem não só reduz os custos de transporte a vazadouro dos materiais betuminosos como reduz a procura por recursos naturais escassos, como é o caso dos afloramentos naturais. A reciclagem toma assim um importante papel nas políticas de planeamento dos agregados. O consumo de agregados em países industrializados é muito elevado, cerca de 6 a 8 toneladas por habitante, sendo apenas secundado pelo consumo de água e assumindo por isso um papel muito importante na economia dos países.

A Dinamarca e Holanda, foram pioneiros no desenvolvimento de estudos e legislação no sentido de promover a reciclagem dos resíduos da construção e demolição, de modo a obter agregados não naturais, normalmente resultantes da demolição de edifícios, estradas e aeroportos. De acordo com Gonçalves (2003) este desenvolvimento permitiu que em 1994, nestes países, se conseguisse reciclar cerca de 80% dos resíduos da construção e demolição. Outros países como a Alemanha, o Reino Unido, o Japão e os Estados Unidos vêm seguindo políticas semelhantes.

Em países que não possuem reservas de petróleo, a reciclagem de misturas betuminosas foi iniciada em 1973 como resultado de uma dramática subida dos preços do petróleo naquela altura.

Os regulamentos que dizem respeito à exploração de recursos minerais e à produção de ligantes tenderão a tornar-se mais restritivos devido aos efeitos adversos para o ambiente que acarretam. Estas restrições influenciam o preço deste tipo de produtos.

Na Europa, a produção anual de misturas betuminosas a quente excede as 270 milhões de toneladas (PIARC, 2001). As misturas betuminosas são tecnicamente inteiramente recicláveis. No entanto, apesar da maioria das misturas recuperadas durante os trabalhos de manutenção ser adequada para incorporação em novas camadas de misturas betuminosas através do processo a quente, apenas uma pequena parte delas é actualmente reciclada por este processo.

Tendo em conta as quantidades de materiais que são consumidos na construção de estradas e o facto de os recursos disponíveis adequados serem escassos, a reciclagem de misturas betuminosas assume um papel fundamental na construção de estradas numa perspectiva do desenvolvimento sustentável. Este aspecto é ainda mais relevante se tivermos em conta que os materiais utilizados nos pavimentos construídos eram

materiais que inicialmente reuniam as características adequadas para a construção. Assim, apesar de ocorrer um processo de degradação dessas características, é importante avaliar por um lado, se essas características ainda são adequadas para uma nova utilização nos pavimentos novos a construir e por outro lado, se não o forem, se existem processos de regeneração que ainda assim possibilitem a sua utilização com as vantagens económicas e ambientais que daí advêm.

Assim, tomando a reciclagem de materiais dos pavimentos como um importante instrumento na implementação da política de desenvolvimento sustentável esta necessita de ser activamente promovida por especificações, projectos experimentais e transferência de conhecimento. De forma resumida e de acordo com PIARC (2001) as medidas concretas que estimulam a reciclagem são:

- Mudança das especificações de forma a passarem a basear-se no desempenho dos materiais dos pavimentos;
- Promoção de projectos de estruturas de pavimentos para otimizar a reutilização de todos os materiais de pavimentos;
- Os problemas logísticos de implementar programas de reciclagem bem como qualquer benefício económico inerente têm de ser realçados;
- Realização de projectos de demonstração, onde o empreiteiro tem de aceitar o material escolhido para a reciclagem, mas em que o risco é partilhado com o cliente.

## **1.2. Objectivos do trabalho**

Actualmente, as misturas betuminosas fabricadas a quente com reutilização de misturas betuminosas envelhecidas provenientes da fresagem de pavimentos antigos (misturas betuminosas com reciclagem a quente), ainda são alvo de alguma desconfiança face à qualidade das misturas betuminosas tradicionais.

Este trabalho, para além de sugerir uma abordagem para caracterização das misturas betuminosas fresadas e para os estudos a efectuar para sua posterior incorporação nas misturas betuminosas com reciclagem, procura também comparar as propriedades das misturas fabricadas com e sem reciclagem através das propriedades racionais avaliadas nos estudos desenvolvidos.

Nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas diversas centrais que possibilitam a utilização das misturas betuminosas fresadas. No entanto, em Portugal, existem ainda poucas experiências em termos da sua utilização. Estas experiências são muito importantes não só para em produção se detectarem vantagens e desvantagens comparativas das diferentes centrais, mas também para afinar o processo de preparação dos materiais, fabrico da mistura e sua posterior aplicação.

## **1.3. Estrutura do trabalho**

No presente capítulo, capítulo 1, procura-se efectuar uma introdução à técnica de reciclagem de pavimentos rodoviários enquanto técnica de reabilitação de pavimentos degradados e enquanto técnica que se enquadra nas políticas de desenvolvimento sustentável.

No capítulo 2 abordam-se as técnicas de reciclagem de misturas betuminosas nas suas diversas vertentes e em especial na reciclagem de misturas betuminosas a quente em central. Neste capítulo abordam-se aspectos relacionados com a formulação, características e vantagens das misturas recicladas obtidas através de cada técnica procurando integrar experiências publicadas sobre a sua execução.

No capítulo 3 aborda-se a caracterização dos materiais constituintes das misturas betuminosas, quer através dos métodos tradicionais quer através dos métodos que têm vindo a ser desenvolvidos na normativa europeia e no programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) e os principais métodos de formulação de misturas betuminosas. São abordados os métodos de formulação relacionados com o desempenho das misturas betuminosas em serviço, que no caso de misturas inovadoras como as que são estudadas neste trabalho, são particularmente adequados.

No capítulo 4 é apresentado o caso prático deste trabalho sendo apresentada a caracterização dos materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas com reciclagem, os estudos de formulação desenvolvidos, a aplicação da mistura em obra e sua caracterização.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais do trabalho realizado, discutindo-se as principais conclusões face ao trabalho efectuado em relação à técnica da reciclagem a quente em central. São também apresentadas as questões mais significativas para investigações futuras.

## 2. Reciclagem de misturas betuminosas

### 2.1. Introdução

As principais razões para a utilização da técnica de reciclagem de pavimentos são as seguintes:

- Os recursos naturais são limitados;
- As limitações ambientais existentes em relação à abertura e funcionamento de novas pedreiras;
- Utilização de depósitos a vazadouro é cada vez mais regulamentada e onerosa;
- Utilização de materiais disponíveis e portanto mais económicos.

A maior parte dos materiais rodoviários é proveniente de pedreiras impondo-se a utilização dos agregados já utilizados nas estradas aquando da sua reabilitação.

Normalmente a reabilitação de pavimentos é frequentemente conseguida por reconstrução ou reforço tradicional. A reciclagem aparece como alternativa reaproveitando os materiais provenientes dos pavimentos degradados associando-se-lhe vantagens ambientais, técnicas e económicas.

O objectivo da política governamental de muitos países é minimizar a utilização de matérias-primas e reutilizar e reciclar materiais (resíduos) da indústria da construção (PIARC, 2002).

A técnica de reciclagem de pavimentos surge na década de 70, principalmente nos EUA, durante a crise petrolífera então vivida e consequente aumento do preço do crude de petróleo, e pelo interesse na conservação de energia. As considerações ecológicas surgiram, um pouco mais tarde, na década de 80.

Nos últimos anos tem-se assistido a um progressivo desenvolvimento tecnológico, no campo dos equipamentos utilizados na reciclagem de pavimentos, existindo hoje em dia equipamentos capazes de reciclar materiais em central, ou *in situ* a uma profundidade já considerada importante e numa única passagem (Azevedo *et al.*, 2003).

Não existe uma técnica única de reciclagem mas sim várias sendo que se distinguem essencialmente devido ao tipo de ligante utilizado (betume, emulsão betuminosa, espuma de betume, cimento ou cal), temperatura do processo de fabrico da mistura reciclada (a frio ou a quente) e local de fabrico da mistura (*in situ* ou em central).

Conhecem-se os seguintes tipos de reciclagem (Azevedo *et al.*, 2003):

- Reciclagem *in situ* a frio, e dentro desta a reciclagem mista a frio;
- Reciclagem *in situ* com betume espuma;
- Reciclagem *in situ* a quente, e dentro desta a reciclagem mista;
- Reciclagem em central a quente ou a frio.

### 2.2. Reciclagem *in situ* a frio, e dentro desta a reciclagem mista a frio

A reciclagem *in situ* a frio é a mais conhecida e desenvolvida no nosso País pelo facto de utilizar equipamentos simples e que podem ser utilizados noutros processos construtivos tais como as estabilizações dos solos da fundação dos pavimentos

utilizando cimento e/ou cal. Esta técnica executa-se fresando o pavimento existente numa espessura pré-determinada e misturando o material resultante, no mesmo sítio, com um ou vários ligantes e sem aquecimento. O material é colocado e compactado de forma a obter-se uma camada com a espessura desejada. Este processo permite a obtenção de uma nova camada, de resistência mecânica melhorada em relação à inicial que se encontrava degradada, reutilizando o material que já lá existia. Nesta técnica os ligantes utilizados são a emulsão betuminosa e o cimento.

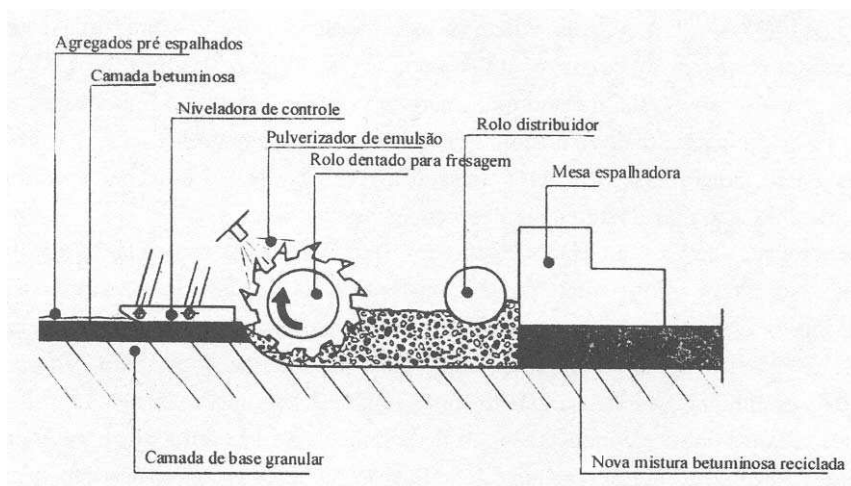


Figura 2.1 – Funcionamento da reciclagem a frio *in situ* (Pereira *et al.*, 2002)

As emulsões betuminosas foram desenvolvidas para permitir a aplicação de betumes à temperatura ambiente. As emulsões são constituídas por uma fase contínua e uma fase dispersa podendo ser classificadas de directas, inversas ou múltiplas consoante a fase dispersa é o betume ou a água. Nas emulsões directas que são as que habitualmente são utilizadas a fase contínua é a água e a fase dispersa é o betume. Neste tipo de emulsões é necessário aplicar um emulsionante para provocar a dispersão das partículas criando em cada uma delas uma película protectora constituída por um ião emulsionante (agentes de superfície). As emulsões dizem-se aniónicas se este ião for de carga negativa (anião) e catiónicas se este ião for de carga positiva (catião). No caso de serem adicionados iões não carregados positiva ou negativamente as emulsões dizem-se neutras.

O emulsionante utilizado nas emulsões catiónicas é o sal amina (conferindo-lhes uma reacção ácida) e nas aniónicas é o sabão alcalino (conferindo-lhes uma reacção alcalina). A forma de fabrico das emulsões consiste na preparação da fase contínua e no posterior envio para um misturador que compreende um desintegrador coloidal e um aquecedor. Neste sistema coloidal é feita a mistura da fase contínua com a fase dispersa. Geralmente são compostas por 60 % de betume e 40 % de água.

A reciclagem com emulsão betuminosa é por vezes realizada conjuntamente com o cimento. A adição de pequenas quantidades (< 2 % em massa) de cimento (e/ou cal) à mistura a reciclar com emulsão tem os seguintes objectivos:

- Facilitar ou acelerar a rotura da emulsão;
- Redução da sensibilidade à água (em particular em materiais argilosos ou contaminados);

- Correção granulométrica;
- Aumento de coesão do material resultante.

Este tipo de reciclagem em que são utilizados ligantes betuminosos e hidráulicos é designado por reciclagem mista a frio.

A utilização de emulsões com materiais granulares ou betuminosos é uma técnica relativamente antiga e comprovada na prática. Independentemente das exigências que se estabelecem sobre os materiais e misturas, há dois aspectos básicos nos quais muitas vezes não se insiste o suficiente (*Fernandez del Campo*, 1998):

- A boa afinidade da emulsão com o material a tratar, que deve ser evidenciada pela sua estabilidade e adesividade, tanto activa como passiva, com os agregados, comprova-se bastante bem com os ensaios imersão-compressão;
- A densidade obtida em obra deve ser alta, para que não se obtenha um produto final com pouca semelhança com o que se definiu em laboratório. Este aspecto, que é fundamental, deve ser acautelado nos trechos experimentais e na selecção do equipamento de compactação. Acontece com frequência que se presta uma grande atenção às máquinas de reciclagem que chegam a ser potentes e eficazes, ao mesmo tempo que se descuidam os equipamentos de compactação assim como o controlo do teor em água.

A dosificação dos componentes é orientada no sentido do cumprimento do fuso granulométrico de forma a obter uma mistura betuminosa cremosa, homogénea, com boa trabalhabilidade e coesão.

De acordo com *Merighi* (2003) um procedimento empírico para estudo da mistura a aplicar poderá ser o seguinte:

- Determinação da granulometria e da percentagem em betume do material fresado;
- Verificar se a granulometria obtida se enquadra no fuso granulométrico previsto ou se deve ser adicionado agregado;
- Determinar a percentagem de emulsão betuminosa necessária, estimada através das seguintes fórmulas empíricas:

$$P_{\text{total}} = \frac{(0,035 \times a + 0,045 \times b + K \times c + F)}{R} \quad (2.1) \quad P_e = \frac{P_{\text{total}} - P_{\text{MBFR}}}{P_{\text{residual}}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Onde:

|                    |   |                                                                                                                                                                                            |
|--------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_{\text{total}}$ | – | percentagem de betume total na massa da mistura betuminosa reciclada;                                                                                                                      |
| $K$                | – | 0,15 para 11 a 15 % de passados no peneiro nº 200 da ASTM (abertura de 0,074 mm); 0,18 para 6 a 10 % de passados no peneiro nº 200 e 0,20 para menos de 5 % de passados no peneiro nº 200; |
| $a$                | – | percentagem retida no peneiro nº 8 da ASTM (abertura de 2,36 mm);                                                                                                                          |
| $b$                | – | percentagem de passados no peneiro nº 8 e retida no peneiro nº 200;                                                                                                                        |
| $c$                | – | percentagem de passados no peneiro nº 200;                                                                                                                                                 |
| $F$                | – | 0 a 2,0% da absorção dos agregados (na ausência de valores adoptar 0,7 a 1);                                                                                                               |
| $R$                | – | 0,6 a 0,65 para emulsões (1,0 para betume);                                                                                                                                                |

- $Pb_{MBFR}$  – percentagem de betume proveniente da mistura fresada na massa da mistura betuminosa reciclada;
- $Pb_{residual}$  – percentagem de betume na emulsão betuminosa;
- $Pe$  – percentagem de emulsão na massa da mistura betuminosa reciclada.

No manual de reciclagem a frio da *Wirtgen* (1998) também se estabelecem critérios de formulação para este tipo de misturas. Em primeiro lugar define-se um conceito que é o teor óptimo de fluído total (*Optimum Total Fluid Content* - OTFC). Nas emulsões betuminosas considera-se o teor em fluído total em vez do teor em humidade, sendo que o seu valor considera a massa da humidade e da emulsão antes de ocorrer a rotura. O teor de fluído total óptimo determina-se no ensaio *Proctor* modificado (AASHTO T180) sendo este valor definido como aquele que permite alcançar a baridade máxima. Outra característica que interessa conhecer com vista à formulação das misturas betuminosas com emulsões é o valor óptimo de betume residual para o teor de fluído óptimo. Para tal pode recorrer-se a ensaios imersão-compressão (ASTM D 1075) em que se faz variar o teor em emulsão em percentagens crescentes mantendo o valor do teor de fluído óptimo. De acordo com *Wirtgen* (1998) as taxas usuais de betume residual variam segundo o material a tratar de acordo com o quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Percentagem de betume residual (*Wirtgen*, 1998)

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| RAP/Agregado britado (50/50)     | 1,5 a 3,0 % |
| Agregado britado                 | 2,5 a 4,0 % |
| Agregado natural (IP<10; CBR>30) | 3,0 a 4,5 % |

Assim para RAP (“*Reclaimed Asphalt Pavement*”) considerando 50 % de RAP e 50 % de agregado britado a percentagem de betume residual varia entre 1,5% e 3,0%. Quando é utilizado cimento as percentagens em que este intervém são de 1 a 2 %.

No manual da *Wirtgen* (1998) são também propostos critérios com base em ensaios de tracção indirecta (compressão diametral) e em ensaios de carga repetida. Os ensaios de tracção indirecta são conduzidos sobre provetes de *Marshall* à temperatura de 25 °C. Os valores típicos obtidos nesses ensaios para a resistência à tracção e para a rigidez são apresentados nos quadros 2.2 e 2.3.

Quadro 2.2 - Resistência: ITS (*Indirect Tensile Strenght*) em provetes *Marshall* a 25°C (*Wirtgen*, 1998)

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| RAP/Agregado britado (50/50)     | 350 a 750 kPa |
| Agregado britado                 | 400 a 800 kPa |
| Agregado natural (IP<10; CBR>30) | 250 a 500 kPa |

Quadro 2.3 - Rigidez: Ensaio de cargas repetidas (*Wirtgen*, 1998)

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| RAP/Agregado britado (50/50)     | 2500 a 5000 MPa |
| Agregado britado                 | 3000 a 6000 MPa |
| Agregado natural (IP<10; CBR>30) | 2000 a 4000 MPa |

Para o material RAP considerando 50% de adição de RAP e 50% de adição de agregado britado devem obter-se valores para a resistência à tracção em ensaios de tracção

indirecta entre 350 a 750 kPa e de rigidez em ensaios de cargas repetidas entre 2500 a 5000 MPa.

Após conhecimento da granulometria do material fresado deverá ser ajustada a granulometria da mistura adicionando novos agregados. Deverá também ser determinado o índice de plasticidade (IP). Conforme o valor de IP adiciona-se entre 1 a 2 % de cimento ou cal à amostra. Para valores de IP maiores que 10 deverão ser adicionadas maiores percentagens de cal.

Em relação à aplicação da mistura betuminosa não existe tempo limite, apenas a condição de se concluir a compactação antes da rotura da emulsão. Na aplicação as exigências em termos de densidade são colocadas relativamente ao valor da baridade máxima obtida no ensaio *Proctor* modificado. As exigências de acordo com Ribeiro (2002) são:

- > 98 % AASHTO modificado (média);
- > 96 % na base da camada (1/3 da espessura).

Em síntese as vantagens e desvantagens desta técnica são apresentadas no quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Vantagens e desvantagens da técnica com emulsão betuminosa (Ribeiro, 2002)

| Vantagens                                            | Desvantagens                                                                            |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Boa resistência à fadiga.                            | Preço, transporta-se também água.                                                       |
| Facilidade de aplicação.                             | O teor de humidade do material é por vezes tão elevado que fica saturado com a emulsão. |
| Bom conhecimento da indústria rodoviária da emulsão. | A resistência obtém-se com a perda de humidade.                                         |

O cimento é o ligante mais utilizado. Quando é adicionado exclusivamente cimento como ligante, no processo de fabrico adiciona-se cimento, água e nalguns casos agregados novos se a composição granulométrica tiver de ser corrigida.

Desde meados dos anos 80 a reciclagem *in situ* com adição de cimento desenvolveu-se com um êxito notável devido principalmente a três factores (Jofré, 2003):

- Melhor conhecimento das características mecânicas dos materiais tratados com cimento e do comportamento dos pavimentos semi-rígidos;
- Utilização de novos equipamentos de maior potência, rendimento e profundidade de trabalho que proporcionam uma melhor qualidade do produto final e uma redução dos custos;
- Crescente preocupação ecológica, que impulsionou esta técnica devido aos benefícios para o meio ambiente no que respeita ao esgotamento das fontes existentes de agregados e à dificuldade em abrir novas explorações.

Na actualidade o reciclado *in situ* com cimento é uma técnica largamente utilizada em países como África do Sul, Estados Unidos, Austrália, Alemanha, Espanha e França (Simões *et al.*, 2003). Inicialmente esta técnica era apenas utilizada em vias com baixa intensidade de tráfego. No entanto, como resultado da ampla experiência entretanto adquirida, actualmente já é aplicada em estradas com um importante volume de veículos pesados.

De acordo com *Jofré* (2003) Espanha tem cerca de 7000000 m<sup>2</sup> de pavimentos onde tenha sido aplicada a técnica da reciclagem com cimento. Em Portugal já foram realizadas algumas obras de reabilitação utilizando esta técnica (*Simões et al.*, 2003; *Miranda et al.*, 2003; *Oliveira*, 2003).

Especificamente podem enumerar-se os seguintes objectivos do emprego desta técnica (*Simões et al.*, 2003):

- Transformação de um pavimento degradado e heterogéneo numa estrutura mais resistente e homogénea;
- Incremento da capacidade de carga, adaptando-a às solicitações do tráfego;
- Incremento da durabilidade; menor susceptibilidade à água e maior resistência à erosão;
- Protecção do leito de pavimento e das camadas inferiores do pavimento, por vezes com características deficientes.

As características das camadas recicladas com cimento variam muito devido à heterogeneidade das características dos materiais dos pavimentos a reabilitar, à sua própria desagregação no processo de fresagem e a eventuais contaminantes que possua. De qualquer forma, de acordo com *Jofré* (2003), uma proporção de misturas betuminosas fresadas de cerca de 30% nas misturas recicladas pode dar origem a valores de resistência e de módulo de elasticidade de metade dos valores obtidos no caso de se misturar os mesmos materiais granulares apenas com cimento. Do ponto de vista do processo construtivo certos factores podem também afectar o desvio do comportamento esperado dos materiais provenientes da reciclagem tais como o conteúdo em cimento, a eficácia do processo de desagregação do pavimento e do processo de mistura com o cimento, a densidade alcançada na compactação, a humidade da mistura e a idade do material fresado. Note-se que em qualquer caso as resistências mecânicas são incrementadas notavelmente com o conteúdo em cimento, se os outros factores permanecerem constantes.

Tendo em conta todas estas variáveis pode dizer-se que as misturas recicladas com cimento são caracterizadas por uma elevada rigidez, sendo muito superior à dos materiais de partida. Este aspecto é responsável por um significativo aumento da capacidade de suporte em comparação com a do pavimento degradado inicial reduzindo tanto as deflexões como as tensões transmitidas à fundação. De acordo com *Jofré* (2003) em França propôs-se para os pavimentos reciclados com cimento valores do módulo de elasticidade ao fim de um ano compreendidos entre 11000 e 20000 MPa dependendo do equipamento utilizado e dos materiais existentes.

Em relação ao comportamento à fadiga dos materiais estabilizados com cimento este é similar ao dos betões vibrados ou às misturas “grave-ciment” possuindo uma curva de fadiga com uma pendente muito reduzida. Para que o pavimento não tenha um comportamento demasiado frágil, na passagem de um número relativamente reduzido de veículos pesados, é conveniente que a camada reciclada tenha uma espessura mínima. *Jofré* (2003) sugere, como exemplo, cerca de 20 cm. De uma maneira geral, poder-se-á adoptar como lei de fadiga dos materiais reciclados com cimento a seguinte:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - \left( \frac{1}{12} \right) \times \log N \quad (2.3)$$

Onde:

- $\sigma$  - tensão de tracção por flexão provocada por uma determinada carga;
- $\sigma_0$  - resistência à tracção por flexão do material;
- N - número de aplicações da carga.

Os materiais reciclados com cimento, para além das características mecânicas mencionadas anteriormente, possuem um certo tipo de propriedades características dos materiais ligados com cimento, tais como:

- Prazo de trabalhabilidade;
- Estabilidade imediata;
- Dependência das características mecânicas da densidade;
- Fissuração por retracção térmica.

A existência de um prazo de trabalhabilidade deve-se ao facto de se utilizar cimento e consequentemente a compactação dos materiais reciclados ter de finalizar-se dentro do chamado tempo de presa. O prazo de trabalhabilidade define-se como sendo o intervalo máximo dentro do qual devem efectuar-se as operações de compactação. Para além do tempo de presa estar intimamente ligado à presença do ligante cimento, este parâmetro depende ainda da natureza dos agregados, do conteúdo de água e das condições da obra.

De acordo com *Jofré* (2003) existem diversos métodos para determinar o prazo de trabalhabilidade consistindo o mais sensível na realização de ensaios de compactação diferida determinando a descida de densidade que se produz nos provetes à medida que se deixa decorrer tempo entre a mistura do material e a sua compactação. Considera-se que se alcançou o prazo de trabalhabilidade quando essa diminuição é igual a 2 % da densidade inicial. Estes ensaios, para que sejam verdadeiramente representativos, devem realizar-se à temperatura prevista em obra nas horas mais quentes. No processo de reciclagem de pavimentos *in situ* com cimento a compactação inicia-se praticamente sem desfasamento temporal em relação ao fabrico da mistura. No entanto o problema pode ocorrer no caso de os trabalhos de compactação estarem a ser realizados em duas faixas adjacentes.

De acordo com *Simões et al.* (2003), o intervalo máximo no qual devem decorrer as operações de compactação deverá ser inferior ao prazo de trabalhabilidade e nunca deverá ser superior a 2-3 horas. Em *Jofré* (2003) referem-se valores dessa ordem de grandeza.

Outra das propriedades destes materiais reciclados com cimento tem a ver com a estabilidade imediata. Esta propriedade permite que em obras de reabilitação com pouco tráfego seja possível a abertura imediata à circulação. Para assegurar uma estabilidade imediata adequada é suficiente que o material contenha uma determinada proporção de materiais britados. No caso de pavimentos reciclados com cimento este aspecto é assegurado no processo de execução. A estabilidade imediata adequada deve-se à estruturação do esqueleto mineral após compactação e assegura que as deformações originadas pelos veículos não sejam suficientes para ocasionar a rotura das ligações cristalinas entre os agregados. De acordo com *Jofré* (2003) é frequente que após ter-se efectuado a fresagem do pavimento existente, efectuado a reciclagem e uma vez completada a protecção através da rega de cura que a camada reciclada com cimento seja aberta ao tráfego após 3 a 4 horas. O tráfego inicial não provoca problemas relevantes se forem tomadas as devidas precauções com a cura. A superfície não deve

ser exposta à acção do tráfego pesado sem ter sido aplicada a indispensável rega de protecção.

Nas misturas recicladas com cimento existe uma grande dependência da resistência mecânica em relação ao grau de compactação alcançado. De acordo com *Jofré* (2003) e *Simões et al.* (2003) uma pequena descida na densidade de por exemplo 5 % traduz-se numa grande diminuição das resistências mecânicas que pode atingir 25 %. Deste modo é fundamental que a compactação se efectue de forma cuidadosa devendo alcançar-se em qualquer ponto a densidade mínima exigida nas especificações.

Os materiais reciclados com cimento devido às suas características intrínsecas em particular em termos de rigidez e de comportamento higro-térmico, podem atingir a rotura em consequência do efeito combinado das variações de temperatura diárias e de estações do ano e do nível do tráfego. Este comportamento, que aliás é típico dos pavimentos semi-rígidos convencionais, não deve ser atribuído, em geral, a falhas de execução mas antes a características dos materiais utilizados, em particular ao cimento, e à sua formulação laboratorial.

De acordo com *Jofré* (2003) as características das fissuras resultantes (distância entre as mesmas, abertura, momento de aparecimento) dependem de um grande número de factores (tipo de cimento, dosificação, natureza e granulometria dos materiais fresados, etc). As condições climáticas durante a execução e a cura influem também consideravelmente no processo. A ocorrência de fissuração é um dado adquirido podendo propagar-se para a camada de desgaste contribuindo para a degradação do pavimento. Este problema, de acordo com *Simões et al.* (2003), soluciona-se executando uma pré-fissuração transversal ordenada, ainda em fresco e antes da compactação inicial, com uma localização precisa normalmente com um espaçamento de 2,5 m a 3,5 m. O risco de fissuração deve-se a duas causas que são a reacção de hidratação do cimento e o tráfego. A fissuração que ocorre devido ao tráfego localiza-se na base das camadas.

Deste modo quando se trabalha com cimento deverão ter-se algumas precauções adicionais para ter em conta a fissuração e a qualidade pretendida. Assim a fissuração e a qualidade da camada são influenciadas por (*Ribeiro, 2002*):

- Estudo de composição;
- Qualidade de cimento (não utilizar cimento com mais de três meses de armazenamento);
- Uniformidade de aplicação (existem três métodos de aplicação sendo dois a seco e um como *slurry*);
- Uniformidade da mistura;
- Adição de água (< 75% do teor de água de saturação);
- Cura (manter a superfície húmida).

A introdução de materiais novos pode limitar-se ao cimento e à água da mistura. Em alguns casos é preciso incorporar também agregados, ou como corrector granulométrico ou com outros objectivos, assim como retardadores de presa se for exigido um prazo de trabalhabilidade mais alargado.

No que se refere aos cimentos, os mais adequados são os que possuem as seguintes características (*Jofré, 2003*):

- Conteúdo elevado de adições activas;
- Resistência média baixa;
- Desenvolvimento lento das resistências nas idades jovens.

A primeira característica permite obter um prazo de trabalhabilidade mais alargado enquanto que a segunda e terceira característica dão origem a um esquema de fissuração mais favorável.

Em relação aos tipos de cimentos que estão incluídos na NP EN 197-1:2001, em princípio, podem utilizar-se todos os cimentos incluídos na norma. No entanto os mais aconselháveis, de acordo com *Jofré* (2003), são os cimentos de alto forno tipo CEM III/A, os cimentos pozolânicos CEM IV/B e os cimentos compostos CEM V/A, contendo todos eles adições activas não inferiores a 35% do total dos componentes (excluindo o sulfato de cálcio para a regulação da presa). Além das suas características de retardar o início da presa que dão maior margem para as operações de colocação em obra, a presença de cinzas, escórias ou pozolanas melhora o comportamento dos materiais reciclados ou estabilizados antes de eventuais ataques de agentes externos de agressividade fraca ou média (no caso de cimentos de alto forno esta resistência estende-se também à presença de sulfatos). No extremo oposto encontram-se os cimentos *Portland* CEM I, com 95 a 100% de clínquer que apesar de poderem ser utilizados em reciclados exigiriam em muitos casos a utilização de retardadores de presa para alcançar um prazo de trabalhabilidade adequado. Os cimentos *Portland* compostos CEM II ocupam um espaço intermédio podendo empregar-se sem nenhum problema em estabilização e reciclagem. Em algumas ocasiões podem inclusivamente ser mais adequados que os cimentos mencionados anteriormente como no caso da existência de matéria orgânica ou de materiais argilosos que tenham contaminado as camadas de pavimentos a reciclar. Nestas situações é recomendável aumentar a quantidade de clínquer e baixar a de adições. As diferenças nos resultados que se obtêm com os cimentos II, III, IV ou V não são muito importantes, pelo que em geral podem considerar-se na sua selecção factores como o custo ou a disponibilidade.

Quanto à resistência dos distintos cimentos, os mais recomendáveis para reciclagem, são os da classe resistente mais baixa (32,5). Note-se que quanto mais elevada a resistência do cimento, maior o perigo de que se produzam fissurações por retracção, pelo que, o emprego de cimentos de classes mais resistentes só se justifica em obras executadas em tempo frio.

As percentagens de cimento usuais são apresentadas no quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Percentagem de cimento (*Wirtgen*, 1998)

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| RAP/Agregado britado (50/50)     | 2,0 a 2,5 % |
| Agregado britado                 | 2,0 a 3,0 % |
| Agregado natural (IP<10; CBR>30) | 3,0 a 4,0 % |

Assim para RAP considerando 50% de RAP e 50% de agregado britado a percentagem de cimento varia entre 2,0% e 2,5%.

Após uma primeira fase de reconhecimento do pavimento a reciclar e de todos os dados que possam interessar ao processo de reciclagem devem ser recolhidas amostras dos

materiais constituintes para sua caracterização laboratorial, que terá como objectivo final o estudo da fórmula de trabalho e detectar condicionantes de realização em obra.

Os ensaios a efectuar devem avaliar as seguintes características:

- Granulometria: a curva granulométrica permite averiguar a necessidade ou não de um corrector granulométrico;
- Presença de finos: para caracterizar a quantidade e a actividade das partículas argilosas do material determina-se o índice de plasticidade ou o valor do azul-de-metileno. Se forem obtidos valores superiores a 15 ou 2,5 respectivamente em cada um dos ensaios anteriores, pode ser necessário efectuar a reciclagem mista com cal e cimento, assim como averiguar em cada caso a dose de cal necessária para anular o efeito das argilas contidas no material;
- Humidade natural do material a reciclar;
- A humidade óptima de compactação uma vez incorporado o cimento, mediante o *Proctor* modificado. O ensaio deve realizar-se sobre um material que reproduza de forma o mais aproximada possível a granulometria obtida depois da passagem da equipa de reciclagem.

O estudo de formulação tem como objectivo determinar o conteúdo em cimento a adicionar ao material existente *in situ*, e em caso disso, o corrector granulométrico, de maneira a atingir as características mecânicas do material previstas no dimensionamento. As características a ter em conta a nível de resistência são a resistência à compressão uniaxial (UCS – *Uniaxial Compressive Strength*) sobre provetes com 7 dias à temperatura de 22 °C e com humidade superior a 95 %.

A metodologia do estudo consiste em estabelecer a variação dos parâmetros a determinar em função da dosagem em cimento, da variação do conteúdo em água e da densidade dos provetes. Para além das resistências já se mencionou o interesse especial em determinar o prazo de trabalhabilidade do material reciclado em função das condições climáticas para ajustar não apenas o tempo de compactação da mistura mas também o desfaseamento máximo entre a execução das bandas adjacentes de reciclado, com o objectivo de evitar a formação de juntas frias na zona de contacto.

De acordo com *Jofré* (2003) é frequente especificar-se uma resistência à compressão da mesma ordem de grandeza da que se pode exigir a sub-bases em solo-cimento (por exemplo 2,5 MPa aos 7 dias).

A determinação da fórmula de trabalho tem de ter em conta que não é possível ir modificando continuamente em obra as fórmulas de trabalho para acomodar as variações da granulometria e outras características dos materiais *in situ*. É preciso eleger portanto uma composição média da mistura e determinar no estudo as variações das características mecânicas resultantes das flutuações das características mecânicas resultantes dos desvios dos materiais *in situ* com respeito à dita composição média.

A execução de uma obra de reciclagem *in situ* com cimento desenvolve-se em geral de acordo com o seguinte processo (*Jofré*, 2003):

- Preparação da superfície existente (limpeza da superfície para eliminar os materiais prejudiciais como partículas de argila ou matéria orgânica);
- Correção granulométrica mediante introdução de novos materiais britados e crivados, caso seja necessária;

- Aplicação do cimento;
- Escarificação do pavimento à profundidade requerida;
- Humidificação;
- Mistura;
- Execução das juntas (pré-fissuração);
- Compactação inicial;
- Eventual nivelamento;
- Compactação final;
- Aplicação da rega de cura ou de protecção e das camadas superiores da mistura betuminosa.

Normalmente o espalhamento é efectuado com equipamentos. O espalhamento manual, distribuindo sacos em quadriculas de dimensão definida, é apenas admissível em obras muito pequenas e de tráfego reduzido. Se for efectuada a dosificação em pó é preferível utilizar equipamentos em que a dosificação é efectuada de forma regulada pela velocidade de avanço. A dosificação prevista de cimento deve espalhar-se o mais uniformemente possível sobre a superfície a reciclar. Para tal um equipamento interessante é o que possui um depósito de cimento, outro de água e um misturador de suspensão água-cimento, para incorporar a calda resultante directamente na recicladora. No entanto, tem como limitação a situação em que o material a reciclar tem já uma humidade muito próxima da obtida no ensaio *Proctor* modificado para a mistura. A injeção em pó tem vindo a ser desenvolvida em alguns países. O cimento é espalhado antes ou depois de fresar o pavimento. Na situação mais comum a recicladora realiza conjuntamente as operações de fresagem e mistura, sendo que nesse caso o cimento é espalhado previamente ou é incorporado em calda no processo e na proporção adequada. O ritmo de avanço da recicladora está muito condicionado pelas características dos materiais existentes e pela profundidade em causa no processo de reciclagem. Outros factores que têm influência estão relacionados com as paragens para abastecimento de cimento ou para a substituição dos pinos da fresadora. São habituais valores de 4000 e 8000 m<sup>2</sup>/dia (Jofré, 2003).

O equipamento de compactação deve ser composto, no mínimo, por um cilindro de rolo vibratório e um compactador de pneumáticos, ou por um cilindro de rolo misto. No início, na saída da recicladora o volume dos materiais tratados é superior ao inicial (devido ao empolamento dos materiais que ocorre ao desagregar camadas normalmente muito densificadas pela passagem do tráfego) tornando-se necessário proceder ao nivelamento do material. Este nivelamento ajuda a melhorar a regularidade superficial e pode ser realizado recorrendo por exemplo a uma motoniveladora.

Uma vez terminada a compactação e com o menor desfasamento possível deve-se proceder à rega de protecção da camada reciclada. De acordo com Jofré (2003) a rega é normalmente constituída por uma emulsão catiónica com dosagem mínima de betume residual de 600 g/m<sup>2</sup> que se protege espalhando gravilha limpa e seca 3/6 (com uma dosagem compreendida entre 4 e 6 l/m<sup>2</sup>) no caso do tráfego ir circular sobre a mesma. Para um tráfego importante pode ser aconselhável a aplicação de um revestimento superficial simples ou duplo.

A abertura ao tráfego da superfície reciclada deve atrasar-se até que se produza a rotura da emulsão devendo ser tomadas as devidas precauções para que a velocidade seja

moderada evitando assim deslizamentos e desprendimentos superficiais ou deteriorações de outro tipo.

A execução da camada em termos das operações de mistura, colocação, espalhamento, nivelamento e compactação deve ser realizada o mais rapidamente possível. No limite, desde que o cimento entra em contacto com o material até à conclusão da compactação não devem passar mais de quatro horas. Em termos de compactação as exigências reportam-se ao ensaio *Proctor* modificado e são de acordo com Ribeiro (2002) as seguintes:

- > 97 % AASHTO modificado (média);
- > 95 % na base da camada (1/3 da espessura).

Em síntese as vantagens e desvantagens desta técnica são apresentadas no quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Vantagens e desvantagens da técnica com cimento (Ribeiro, 2002)

| Vantagens                           | Desvantagens                                                      |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Disponibilidade em saco ou a granel | Fissuração por retracção é inevitável mas pode ser minimizada     |
| Geralmente mais barato que o betume | Aumenta a rigidez logo diminui a resistência à fadiga             |
| Facilidade de aplicação             | Obriga a uma cura. O tráfego inicial pode danificar a superfície. |
| Aceitabilidade – bem conhecido      |                                                                   |
| Aumento da resistência              |                                                                   |
| Torna o material resistente à água  |                                                                   |

Um exemplo da aplicação desta técnica em Portugal vem descrito em Simões *et al.* (2003). O quadro 2.7 resume as características da obra.

Quadro 2.7 - Resumo da obra EN383 (Simões *et al.*, 2003)

|                                    |                                                                                  |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Dono de obra                       | ICERR – Beja                                                                     |
| Adjudicatário                      | MOTA E COMPANHIA, SA                                                             |
| Data de realização                 | Novembro e Dezembro de 2001                                                      |
| Longitude                          | 21200 m                                                                          |
| Secção existente                   | 5,5 m                                                                            |
| Área total                         | 116600 m                                                                         |
| Pavimento existente                | 0,15 m de macadame hidráulico + 0,10 m de revestimento superficial duplo         |
| Problemas observados               | Pavimento muito degradado com pele de crocodilo e rodeiras                       |
| Novo pavimento                     | 0,20 m de reciclado sob 0,03 m de misturas betuminosas modificadas com polímeros |
| Corrector granulométrico           | Não utilizado                                                                    |
| Espessura a reciclar               | 0,20 m                                                                           |
| Resistências exigidas (compressão) | 2,5 MPa aos 7 dias e 4 MPa aos 28 dias                                           |

O pavimento envelhecido a reabilitar era constituído por um macadame hidráulico e um revestimento superficial betuminoso duplo. Para reabilitar estruturalmente o pavimento foi construída uma camada reciclada numa espessura de 0,20 m. As características funcionais foram asseguradas por uma camada de desgaste em mistura betuminosa com betume modificado com polímeros, com espessura média de 0,03 m.

Os valores de dimensionamento para a base reciclada com cimento apontaram para resistências à compressão simples aos 7 e aos 28 dias superiores respectivamente a 2,5 MPa e a 4 MPa, tendo sido efectuado o estudo de formulação do material resultante da reciclagem *in situ* com cimento com o objectivo de determinar a percentagem óptima de ligante hidráulico a utilizar. O procedimento passou pelo fabrico de misturas hidráulicas com diferentes dosagens de ligante e pela identificação das características físicas e mecânicas do material reciclado. O ligante utilizado foi o cimento *Portland*, tipo II – 32,5 com o qual foram fabricadas misturas com 3,0; 3,5 e 4,0 % de cimento. Foram moldados provetes com 0,178 m de altura e 0,152 m de diâmetro, com martelo vibrador *kango* (de 810 W), de acordo com o especificado na norma NLT 310. Determinaram-se os valores da compacidade e da resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias. Imediatamente após ensaiar cada provete, determinou-se o teor em água respectivo, para cálculo da baridade seca após cura. O quadro 2.8 resume os resultados obtidos aos 7 e 28 dias.

Quadro 2.8 - Resumo dos resultados do estudo de formulação  
(Simões *et al.*, 2003)

| Dosagem de cimento  | Teor em água        |                               | Baridade (g/cm <sup>3</sup> ) | Resistência à compressão simples (MPa) |         |
|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|---------|
|                     | Na mistura com água | Na mistura com água e cimento |                               | 7 dias                                 | 28 dias |
| 3,0 %               | 4,2                 | 3,7                           | 2,24                          | 1,63                                   | 2,90    |
| 3,5 %               | 4,5                 | 3,8                           | 2,23                          | 1,88                                   | 3,21    |
| 4,0 %               | 4,3                 | 3,7                           | 2,24                          | 2,52                                   | 4,10    |
| CADERNO DE ENCARGOS |                     |                               |                               | > 2,50                                 | > 4,00  |

Para obter as resistências mecânicas pretendidas a composição média utilizada foi com um teor ótimo em água próximo dos 4,0 % e com 4,0 % de cimento tipo II – 32,5. Dado que os valores de índice de plasticidade não eram superiores a 12 %, não houve necessidade de recorrer ao emprego de cal apagada e/ou mais cimento.

De acordo com Simões *et al.* (2003) os meios necessários para se obter a produção desejada para 0,20 m de espessura de reciclado com incorporação de 4 % de cimento e 4 % de água, foram os seguintes (Simões *et al.*, 2003):

- 1 escarificadora *Wirtgen* 2500;
- 1 misturadora *Wirtgen* WM 400;
- 2 camiões-tanque de abastecimento de água (10 m<sup>3</sup>);
- 3 silos para armazenamento de cimento com a capacidade total de 200 toneladas;
- 1 camião cisterna para transporte de cimento;
- 2 cilindros vibradores compactadores de solos;
- 1 motoniveladora;
- 1 camião de 26 toneladas;
- 1 gravilhador;
- 1 camião para rega com emulsão.

O controlo da qualidade feito sobre a superfície terminada supôs a extracção de 1 carote por dia em que se estudou: a espessura do material reciclado, a densidade alcançada, as resistências mecânicas (moldaram-se provetes durante a fase de execução com o martelo vibrador *kango*), o nivelamento, a regularidade superficial, as deflexões e o controlo de fissuras. Relativamente à resistência à compressão simples obteve-se uma

média de 2,8 MPa aos 7 dias e 5,1 MPa aos 28 dias. Uma vez que os resultados obtidos foram sempre satisfatórios não houve necessidade de se alterar a fórmula de trabalho. As espessuras das camadas envolvidas no processo de reciclagem *in situ* a frio oscilaram entre 12 a 15 cm atingindo o valor máximo de 20 cm. O tratamento de espessuras menores também é possível mas com objectivos diferentes da melhoria da capacidade de suporte tais como a impermeabilização do pavimento.

Como limitação desta técnica é de referir a sensibilidade deste processo a factores como o teor em humidade e granulometria dos agregados, e os agentes climáticos. Por outro lado, pretende-se que o material reciclado tenha características de camada de base, pelo que não podem ser utilizados como camada de desgaste (Azevedo *et al.*, 2003).

### 2.3. Reciclagem *in situ* com betume espuma

As primeiras referências a espuma de betume surgem em 1889 no *Nebraska* (Estados Unidos da América) em reparações de pavimentos. Só mais tarde em 1928 *August Jacobi de Darmstadt* (Alemanha) patenteou o primeiro sistema de produção de espuma a partir de betume quente (Ribeiro, 2003). No entanto só mais tarde, em 1956, foi demonstrado o potencial da sua utilização. Na última década vários países têm utilizado largamente esta técnica, designadamente África do Sul, Alemanha, Austrália, Brasil, Canadá, Estados Unidos, Holanda, Inglaterra, Irão, Japão, Líbia, Nigéria, Noruega, México e Rússia (Ribeiro, 2003).

O fabrico da espuma de betume visa diminuir a viscosidade do betume de forma a ocorrer o envolvimento dos agregados, sendo que, após o seu fabrico, pode considerar-se que o processo de reciclagem se desenvolve a frio. A espuma de betume é produzida através da adição de pequenas quantidades de água (aproximadamente 2-3% por massa de betume) a betume quente (Wirtgen, 2001). A água fria provoca uma reacção no betume quente alterando as suas propriedades físicas e originando uma expansão no volume de betume em relação ao volume inicial. Esta reacção é controlada por factores como a pressão e a temperatura na câmara de expansão. O betume quente está a uma temperatura acima dos 170 °C e a água é injectada uma pressão de aproximadamente 5 bar. A espuma de betume, assim produzida *in situ*, sai da câmara de expansão através de um bico injector e pode ser imediatamente misturada com os materiais a reciclar e/ou agregados na câmara de mistura da recicladora. A espuma de betume à semelhança das emulsões betuminosas podem ser consideradas sistemas coloidais mas neste caso a fase dispersa é o vapor de água (que ocorre por contacto da água com betume quente) e a fase contínua é o betume.

Os parâmetros principais para determinar a qualidade final da espuma de betume são a taxa de expansão e a meia-vida. A expansão é definida como sendo a proporção entre o máximo volume atingido pela espuma de betume e o volume original do betume não espumado. Como regra, a expansão da espuma de betume é aproximadamente 15 a 20 vezes o volume original de betume (Wirtgen, 2001). A meia-vida é definida como sendo o tempo que a espuma de betume demora a reduzir o volume máximo atingido para 50 %, isto é metade da expansão. Após um certo tempo, a espuma de betume rompe. A meia-vida é medida em segundos e usualmente situa-se entre 10 e 15 segundos (Wirtgen, 2001). Em regra a qualidade da espuma de betume melhora com uma maior expansão e uma maior meia vida. Do ponto de vista das condições de fabrico da espuma verifica-se que as características da espuma melhoram com o aumento da temperatura

do betume enquanto que a pressão de injeção do betume na câmara de expansão quando demasiado baixa (menos de 3 bares) afecta negativamente as propriedades da espuma de betume. Os betumes de penetração menor que 100 são geralmente utilizados em climas quentes e geralmente uma grande percentagem de asfaltos pioram a qualidade da espuma.

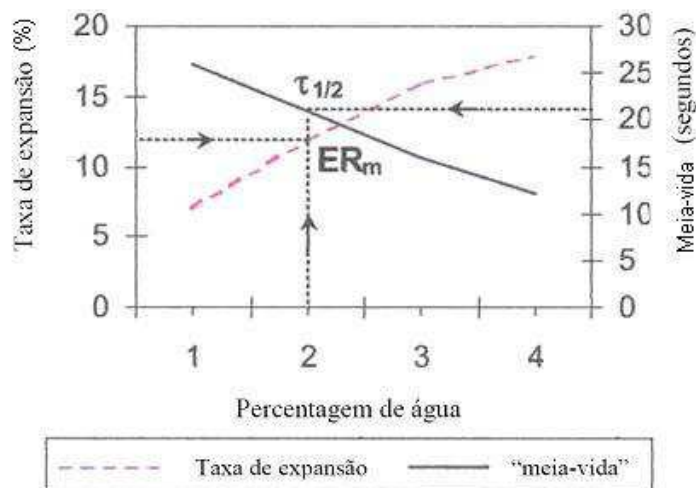


Figura 2.2 -Variação da percentagem de água com a taxa de expansão e a meia-vida (Ribeiro, 2003)

Da figura 2.2 pode verificar-se que a taxa de expansão aumenta com a percentagem de água e a meia-vida diminui. Como a qualidade da espuma melhora com o aumento dessas duas características a solução será de compromisso entre as duas propriedades. Valores de taxa de expansão inferior a 4 e da meia-vida inferior a 5 segundos tornam impraticável a execução da reciclagem (Ribeiro, 2003).

O decréscimo da taxa de expansão com o tempo depende de (Ribeiro, 2003):

- Redução da temperatura do vapor devido ao contacto do filme de betume com temperaturas mais baixas;
- Elongação da película de betume que encerra a bolha de vapor para além do seu limite de ductilidade rompendo;
- Homogeneização das dimensões das bolhas. Num sistema em equilíbrio as bolhas terão dimensões homogéneas.

A curva de decréscimo da taxa de expansão pode ser definida através da figura 2.3.

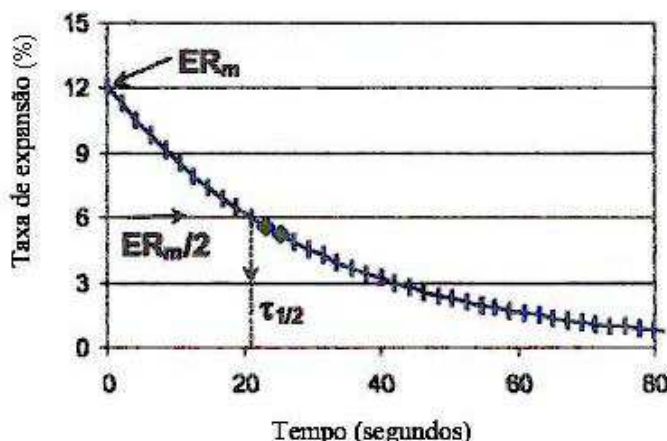


Figura 2.3 - Decréscimo da taxa de expansão (Ribeiro, 2003)

A equação seguinte define a curva da figura 2.3:

$$ER(t) = ER_m \times e^{\frac{-\ln 2}{\tau^{1/2}} \times t} \quad (2.4)$$

Onde:

- ER(t) - taxa de expansão, função do tempo após descarga da espuma;
- ER<sub>m</sub> - máxima taxa de expansão medida imediatamente após a descarga da espuma;
- $\tau^{1/2}$  - meia-vida (segundos);
- t - tempo decorrido após a descarga da espuma.

A taxa de expansão e a meia-vida são quantificadas após a medição do volume da espuma, mas há um período de tempo (tempo de pulverização) anterior que pode chegar a 5 segundos que é ignorado. Este período tem um efeito significativo quando a meia-vida é baixa. A equação que descreve o decréscimo da taxa de expansão (ER(t)) permite analisar esse período.

Para a obtenção dos valores das propriedades da espuma desejados podem ser utilizados agentes espumantes. A determinação da percentagem óptima de água para o fabrico da espuma e a determinação da influência de um agente espumante podem ser efectuadas pela utilização do conceito de índice de espuma. Este índice representa a área sob a curva de decréscimo da taxa de expansão com o tempo.

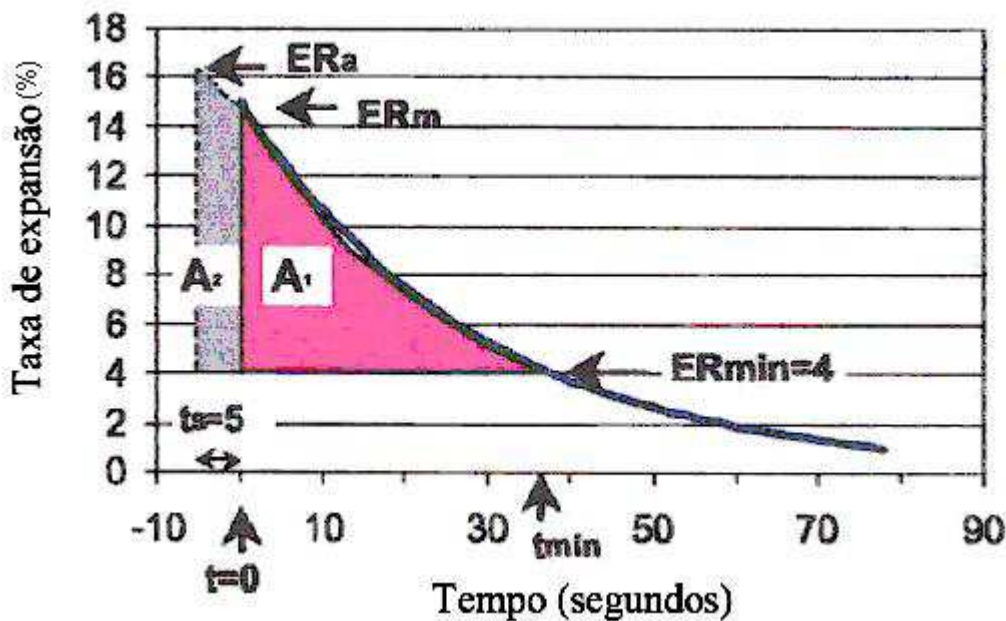


Figura 2.4 - Índice de espuma (Ribeiro, 2003)

O índice de espuma pode ser dado pela equação seguinte (Ribeiro, 2003):

$$FI = \frac{-\tau^{1/2}}{\ln 2} \times \left[ 4 - ER_m - 4 \times \ln \left( \frac{4}{ER_m} \right) \right] + \left( \frac{1+c}{2 \times c} \right) \times ER_m \times ts \quad (2.5)$$

Onde:

- ER<sub>m</sub> - máxima taxa de expansão medida imediatamente após a descarga da

- espuma;  
 $ER_a$  - máxima taxa de expansão actual, calculada;  
 $c$  -  $ER_m / ER_a$ ;  
 $\tau^{1/2}$  - meia-vida (segundos);  
 $ts$  - tempo de pulverização.

A figura 2.5 mostra a variação do índice de espuma com a percentagem de água.

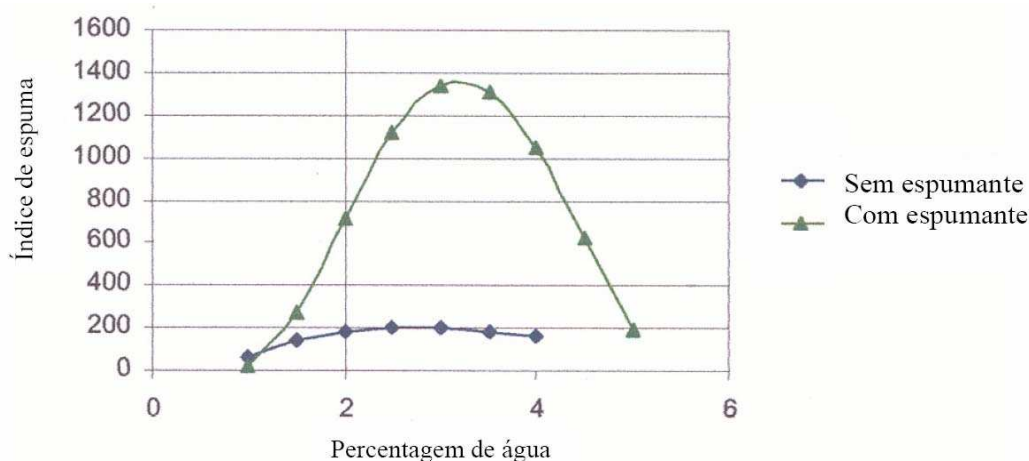


Figura 2.5 - Variação do índice de espuma com a percentagem de água (Ribeiro, 2003)

A utilização da espuma de betume confere à mistura betuminosa final características particulares. Assim a mistura final não é preta, o agregado grosso não fica impregnado com betume e a espuma envolve os finos formando uma argamassa.

O objectivo do fabrico da espuma de betume é a redução da viscosidade do betume possibilitando o envolvimento de agregados frios e até húmidos, agregados ou areias naturais e mesmo argilas de baixa plasticidade. Pode também ser utilizada como ligante na reutilização de materiais fresados de pavimentos degradados numa técnica que se designa de reciclagem *in situ* com betume espuma.

De acordo com Ribeiro (2002) a utilização de betume espuma acarreta desde logo algumas vantagens e algumas precauções adicionais, tais como:

- Redução dos custos de transporte (a água utilizada é geralmente 2 % da massa de betume);
- Não há custo de fabrico;
- O tráfego pode circular imediatamente;
- É trabalhável durante longos períodos;
- Pode ser aplicável em condições adversas;
- Segurança – temperaturas elevadas, maior cuidado;
- Material – se a qualidade de finos é deficiente a espuma não dispersa correctamente;
- Fornecimento de betume – verificação sempre que há mudança de cisterna (temperatura e qualidade da espuma);
- Fluxo de betume – se a cisterna tiver aquecimento directo há o perigo da formação de bocados de carbono que podem ir para o processo de reciclagem, principalmente quando se esvazia a cisterna pelo que é aconselhável a utilização de filtros e cuidar a sua manutenção.

Tal como quando se utilizam emulsões betuminosas também quando se utiliza espuma de betume é frequente a adição de cimento em percentagens de 1 a 2 %. Neste caso deve ter-se cuidado para o cimento não entrar em contacto com a água cedo de mais, diminuindo os finos. De acordo com Ribeiro (2003) a reduzida percentagem quer de cimento, quer de betume conferem a estas misturas um bom comportamento à fadiga e às deformações permanentes. No entanto, como apresentam pouca resistência à abrasão e à desagregação superficial, não podem ser utilizadas como camadas de desgaste.

Em relação à formulação da mistura betuminosa esta compreende três aspectos: a espuma de betume, os agregados e a água. A espuma de betume é formulada de forma a obter determinados valores para a taxa de expansão (superior a 10) e para a meia vida (superior a 12) ou optimizando o índice de espuma. Os ensaios a efectuar são realizados variando a percentagem de água entre 1 a 3 % e a temperatura de betume entre 180 °C e 200 °C. Após selecção da percentagem de água e da temperatura de fabrico é determinada a percentagem óptima de betume na mistura. O processo mais generalizado para a definição da percentagem de betume, consiste em optimizar a estabilidade *Marshall* (limite superior) e minimizar a perda da resistência em provetes sujeitos a imersão (limite inferior) (Ribeiro, 2003). As misturas com espuma de betume funcionam essencialmente por atrito e não são tão sensíveis à temperatura porque os agregados grossos não estão revestidos com betume e consequentemente o atrito é mantido mesmo às temperaturas elevadas. Um aspecto importante para a estabilidade da mistura é a relação entre a percentagem de betume e a percentagem de filler. As percentagens usuais de betume residual variam com a granulometria e tipo de material a tratar de acordo com os quadros 2.9 e 2.10.

Quadro 2.9 – Percentagem de betume residual (Ribeiro, 2003)

| % passados peneiro 4,75 mm | % passados no peneiro 0,075 mm | % betume residual |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------|
| <50                        | 3,0 - 5,0                      | 3,0               |
|                            | 5,0 - 7,5                      | 3,5               |
|                            | 7,5 - 10,0                     | 4,0               |
|                            | > 10,0                         | 4,5               |
| >50                        | 3,0 - 5,0                      | 3,5               |
|                            | 5,0 - 7,5                      | 4,0               |
|                            | 7,5 - 10,0                     | 4,5               |
|                            | > 10,0                         | 5,0               |

Quadro 2.10 - Percentagem de betume residual (Wirtgen 1998)

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| RAP/Agregado britado (50/50)     | 1,5 a 3,0% |
| Agregado britado                 | 2,5 a 4,0% |
| Agregado natural (IP<10; CBR>30) | 3,0 a 4,5% |

Assim para o material RAP considerando 50 % de RAP e 50 % de agregado britado a percentagem de betume residual varia entre 1,5 % e 3,0 %. Quando é utilizado cimento as percentagens em que este intervém são de 1 a 2 %.

Em relação aos agregados ou aos materiais a tratar existem dois aspectos a analisar que são a granulometria (que aliás condiciona a percentagem de betume como se viu atrás) e o índice de plasticidade. Em relação à granulometria o fuso a respeitar é apresentado em

Ribeiro (2003). Se o material a tratar não respeitar o fuso deverá ser adicionado um corrector granulométrico.

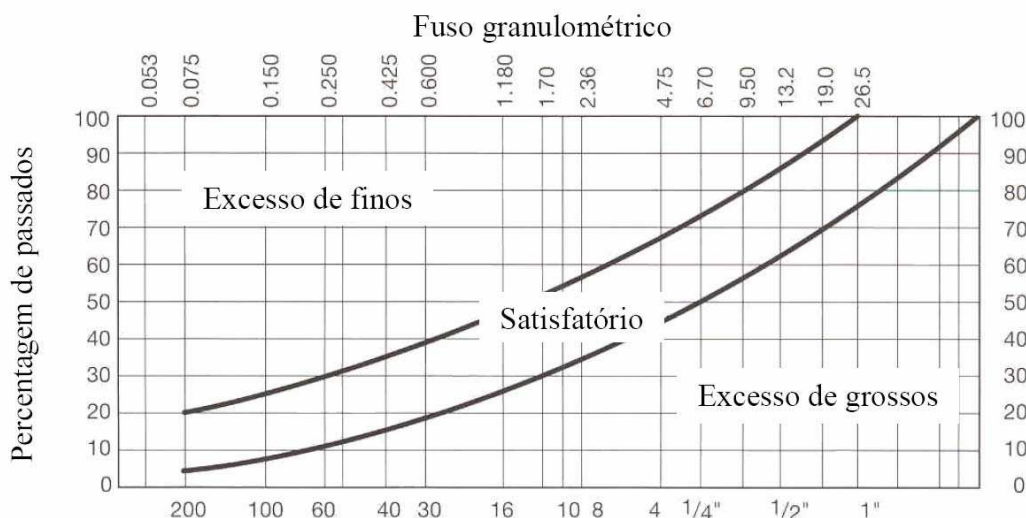


Figura 2.6 - Agregados para misturas com espuma de betume (Ribeiro, 2003)

A percentagem de passados no peneiro ASTM de 0,075 mm deve ser superior a 5 %, pois para valores inferiores a espuma de betume não dispersa de forma homogênea. Assim ocorrem na mistura zonas ricas em betume e finos que acabam por funcionar como lubrificante diminuindo a estabilidade e a resistência. Para valores de índice de plasticidade superiores a 12 é necessário efectuar um tratamento com cal. A utilização de ligantes hidráulicos deve atender ao facto de que dá lugar a uma reacção com a água aglomerando-se os finos e alterando a granulometria reduzindo a fracção fina.

A percentagem de água nos agregados é muito importante, pois é responsável por quebrar as ligações nos agregados, ajudar a dispersão da espuma de betume durante a mistura e permitir uma boa compactação (Ribeiro, 2003). A água em excesso provoca o aumento do tempo de cura e a diminuição da densidade e da resistência final. Se a água adicionada for insuficiente impede uma distribuição homogênea do betume e reduz a trabalhabilidade da mistura. A percentagem de água deve ser a que optimize as operações de mistura e de compactação. O conceito da percentagem óptima de fluidos é aplicável às misturas com espuma de betume (tal como as fabricadas com emulsão betuminosa).

Ribeiro (2003) sugere uma equação proposta por outro autor que é a seguinte:

$$MMC = 8,92 + 1,48 \times OMC + 0,40 \times c - 0,39 \times Pb \quad (2.6)$$

Onde:

- MMC - percentagem óptima de humidade de compactação da mistura;
- OMC - percentagem óptima de compactação dos agregados (AASHTO modificado);
- c - percentagem do material passado no peneiro ASTM nº 200;
- Pb - percentagem de betume.

No manual da *Wirtgen* (1998) são também propostos critérios com base em ensaios de tracção indirecta e ensaios de cargas repetidas. Os valores constam dos quadros 2.11 e 2.12.

Quadro 2.11 – Resistência: ITS (*Indirect Tensile Strength*) em provetes *Marshall* a 25°C (*Wirtgen*, 1998)

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| RAP/Agregado britado (50/50)     | 350 a 800 kPa |
| Agregado britado                 | 400 a 900 kPa |
| Agregado natural (IP<10; CBR>30) | 250 a 500 kPa |

Quadro 2.12 - Rigidez: Ensaios de cargas repetidas (*Wirtgen*, 1998)

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| RAP/Agregado britado (50/50)     | 2500 a 5000 MPa |
| Agregado britado                 | 3000 a 6000 MPa |
| Agregado natural (IP<10; CBR>30) | 2000 a 4000 MPa |

Para o material RAP considerando 50 % de adição de RAP e 50 % de adição de agregado britado devem obter-se valores para a resistência à tracção em ensaios de tracção indirecta entre 350 a 800 kPa e de rigidez entre 2500 a 5000 MPa em ensaios de cargas repetidas.

A lei de fadiga destes materiais é de acordo com Ribeiro (2003):

$$N = 10^{6,499 - 0,708 \times \frac{\epsilon_{t\text{máxima}}}{\epsilon_{t\text{rotura}}}} \quad (2.7)$$

Onde:

- N - número de aplicações de carga;
- $\epsilon_{t\text{máxima}}$  - máxima extensão horizontal de tracção na camada reciclada com espuma de betume;
- $\epsilon_{t\text{rotura}}$  - extensão de rotura no ensaio de viga apoiada em três pontos. Valores típicos são: 220 (2% percentagem de betume), 400 (3% percentagem de betume) e 600 (4% percentagem de betume).

De acordo com *Wirtgen* (1998) as exigências em termos de densidade são as seguintes:

- >98% AASHTO modificado (média);
- >96% na base da camada (1/3 da espessura).

A temperatura ideal do agregado durante a mistura varia entre 13 e 23 °C dependendo do agregado a ser utilizado sendo que o aquecimento dos agregados melhora a dispersão da espuma e facilita o revestimento das partículas de maiores dimensões.

O controlo da qualidade na reciclagem pode ser efectuado recolhendo material atrás da recicladora e compactando-o mais tarde.

De acordo com Ribeiro (2002) pode trabalhar-se mais tarde a espuma de betume, sem afectar a sua resistência desde que se mantenha a humidade próxima da compactação. Este aspecto permite abrir a via ao tráfego imediatamente e só mais tarde concluir correctamente a superfície o que geralmente obriga a uma fresagem. Deste modo, em

relação à aplicação, não há tempo limite desde que o teor de humidade seja mantido perto do óptimo.

Existem actualmente para além de recicladoras capazes de introduzir a espuma de betume, centrais de produção de espuma de betume e equipamentos de laboratório para fabrico da espuma. O equipamento a utilizar deverá ser composto no mínimo por (Ribeiro, 2003):

- Uma recicladora com barra para aplicação de espuma de betume;
- Cisternas de betume com aquecimento em número suficiente para não haver interrupções do trabalho;
- Cisternas de água para humidificar o material existente (capacidade superior a 7000 litros) em número suficiente para não haver interrupções do trabalho;
- Uma cisterna de água com capacidade superior a 2000 litros para abastecer a recicladora;
- Cilindro vibrador com peso mínimo de 18 toneladas;
- Cilindro de pneus com peso mínimo de 18 toneladas;
- Motoniveladora com potência superior a 120 HP.

O rendimento que se pode alcançar varia conforme as condições locais e trânsito podendo atingir valores entre 3000 a 5000 m<sup>2</sup> diários (Ribeiro, 2003).

Em síntese as vantagens e desvantagens desta técnica são apresentadas no quadro 2.13.

Quadro 2.13 - Vantagens e desvantagens da técnica com espuma de betume  
(Ribeiro, 2002)

| Vantagens                                      | Desvantagens                                                       |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Facilidade de aplicação                        | O betume deve estar quente (>170 °C) o que envolve maiores riscos  |
| Boa resistência à deformação e à fadiga        | A qualidade final depende da qualidade da espuma e esta do betume. |
| Não há custos de fabrico                       | Material saturado e com poucos finos não pode ser utilizado        |
| Abertura ao tráfego logo após a sua aplicação. |                                                                    |

Um exemplo de um trabalho efectuado utilizando esta técnica em Portugal é apresentado por Teixeira *et al.* (2003). Este trabalho reflecte um caso prático utilizando esta técnica e que foi realizado no Porto em Junho de 2002. O pavimento em causa tinha 0,20 m de base granular e um revestimento superficial betuminoso de 0,10 m e encontrava-se muito degradado. A intervenção passou por saneamento do pavimento degradado numa espessura de 0,20 m e construção de uma camada de base com betume espuma e posteriormente uma camada de desgaste com betão betuminoso. A fresagem e construção da camada de base com betume espuma ocorreram simultaneamente. Em fase de projecto considerou-se um módulo de deformabilidade de 2000 MPa para esta camada.

Para a formulação da mistura foram realizados ensaios *Proctor* e sobre a mistura assim definida foram efectuados ensaios de tracção por compressão diametral fazendo variar a percentagem de betume espuma. A composição da mistura aplicada é apresentada no quadro 2.14.

Quadro 2.14 - Composição da mistura aplicada na camada de base  
(Teixeira *et al.*, 2003)

| Componentes         | Percentagem em massa (%) |
|---------------------|--------------------------|
| Betume espuma       | 3,0                      |
| Cimento CEM II 32,5 | 2,0                      |
| Água                | 2,0 – 3,0                |
| Material fresado    | 84                       |
| Pó de pedra         | 9                        |
| Total               | 100                      |

Os ensaios realizados após a execução do pavimento com o deflectómetro de impacto demonstram que a rigidez da camada de base realizada com betume espuma evolui no tempo sendo que, após a sua execução obtiveram-se valores de 900 MPa e dez meses depois 1900 MPa. Este valor é muito próximo do assumido em projecto (2000 MPa) considerando que o material fresado continha cerca de 50 % de material granular (0,10 m) e 50 % de semi-penetração betuminosa (0,10 m).

#### 2.4. Reciclagem *in situ* a quente, e dentro desta a reciclagem mista

A reciclagem *in situ* a quente, muitas vezes designada termoregeneração, termoreperfilagem ou termoreciclagem, envolve um trem de equipamentos, em que um deles está munido de painéis radiantes, que no local elevam a temperatura da superfície do pavimento, facilitando, assim, a desagregação do material superficial, por uma fresadora (Azevedo *et al.*, 2003). O material depois de solto é misturado com um betume mole ou com um agente rejuvenescedor podendo também ser incorporados novos agregados sendo que a operação de mistura é realizada com o mesmo trem de equipamento. Trata-se de uma boa técnica para correcção, por exemplo de anomalias superficiais. No entanto devido à passagem dos painéis radiantes, a regeneração do ligante betuminoso fica bastante limitada devido à oxidação a que o betume envelhecido fica sujeito. Por esta razão também a espessura a regenerar fica condicionada, dado que, para se conseguirem temperaturas suficientes em espessuras mais elevadas, a superfície fica excessivamente quente. Assim as espessuras máximas recomendadas são geralmente da ordem de 6 ou 7 cm. Como a termoregeneração e a adição de agentes rejuvenescedores altamente contaminantes, poderá ter efeitos negativos em termos ambientais e de segurança, actualmente as experiências vão no sentido da regeneração em central ou *in situ*, mas utilizando centrais móveis.

No caso da reciclagem *in situ* a quente utilizando centrais móveis o ligante é um betume modificado com polímeros de alta concentração capaz de regenerar o betume envelhecido oxidado contido no pavimento a reciclar, conferindo à mistura betuminosa elevadas propriedades mecânicas e excelente comportamento ao longo do tempo. Este tipo de reciclagem, denominada mista, consiste na fresagem a frio do material do pavimento, e posterior mistura, de 100% do material a reciclar, numa central móvel que segue junto ao equipamento de fresagem (Azevedo *et al.*, 2003). A espessura da camada a reciclar não deverá exceder os 12 cm (15 cm como valor máximo absoluto). Em Portugal, devido aos custos destes equipamentos, a reciclagem a quente *in situ* não tem tido grande implementação.

## 2.5. Reciclagem em central a quente ou a frio

### 2.5.1. Introdução

A reciclagem a frio em central não é muito comum. Geralmente as técnicas a frio aplicam-se *in situ*.

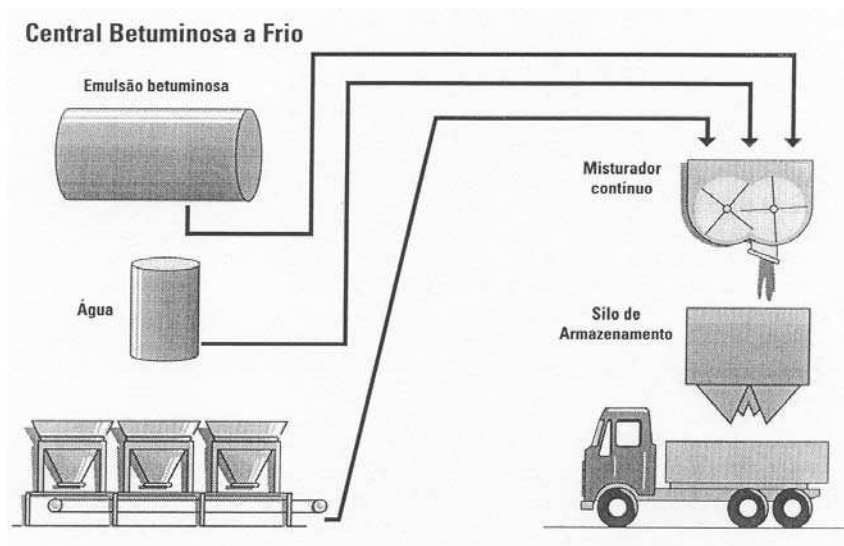


Figura 2.7 - Central betuminosa a frio (EAPA,1998)

Pelo contrário as técnicas a quente desenvolvem-se preferencialmente em central. Esta técnica é o tema da presente dissertação pelo que lhe será dado um desenvolvimento maior.

A reciclagem a quente tem um grau de complexidade idêntico ao da produção de misturas betuminosas tradicionais a quente. Tal como nas misturas betuminosas tradicionais, também existem diversas formas de produzir as misturas com materiais reciclados. A melhor forma de fazer a reciclagem a quente em central é realizá-la como uma extensão da forma como são produzidas as misturas betuminosas tradicionais.

A conservação das estradas implica uma estratégia que muitas vezes é orientada, de acordo com PIARC (2001), pelo chamado “conceito escada”. Este conceito constitui uma ferramenta para a tomada de decisões na Engenharia Rodoviária. Analisando a figura 2.8 verifica-se que os esforços devem estar concentrados na utilização dos materiais mais duráveis nos pavimentos procurando construir estradas com longas vidas de projecto. Quando a reconstrução se tornar necessária, os materiais recuperados devem ser reutilizados nas mesmas camadas e com propriedades idênticas àquelas da estrutura do pavimento original. Caso não seja possível os materiais devem ser reutilizados em camadas de menor qualidade. Apenas em condições excepcionais, onde todas as possíveis aplicações tenham sido exploradas, uma quantidade limitada de materiais recuperados dos pavimentos poderá ser transportada para depósitos a vazadouro. A opção de depósito a vazadouro é a opção menos aceitável do ponto de vista ambiental e deve ser evitada sempre que possível.

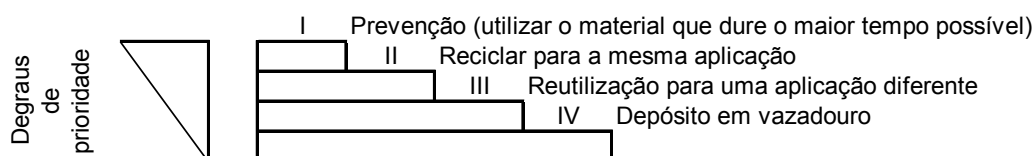


Figura 2.8 – Conceito de escada PIARC (2001)

A palavra “reciclagem” é geralmente usada para quase todos os processos nos quais um resíduo é utilizado numa outra forma que não seja a sua destruição ou depósito a vazadouro. Frequentemente o material resultante do processo de reciclagem tem propriedades que lhe conferem um valor técnico e económico inferior ao material reutilizado quando este era novo. A expressão reciclagem deve apenas ser aplicada para processos nos quais os materiais readquiram as mesmas propriedades que têm os materiais dos quais partem (PIARC, 2002).

A reciclagem de misturas betuminosas a quente tem como objectivo a obtenção de misturas betuminosas idênticas às fabricadas de forma tradicional pelo que merece plenamente a expressão “reciclagem”. Neste trabalho, ainda que de forma grosseira (de acordo com o exposto) optou-se por designar os processos de reutilização (nomeadamente os processos *in situ*) por reciclagem, dado que são assim designados na bibliografia.

A reciclagem de misturas betuminosas a quente em central consiste numa técnica para produção de misturas betuminosas com uma certa percentagem de misturas betuminosas fresadas, eventualmente tratadas. A percentagem de misturas betuminosas fresadas incorporadas na mistura a produzir (designada por taxa de reciclagem, TR) varia entre 0 e quase 100 % dependendo do tipo de central e do tipo de mistura a ser produzida.

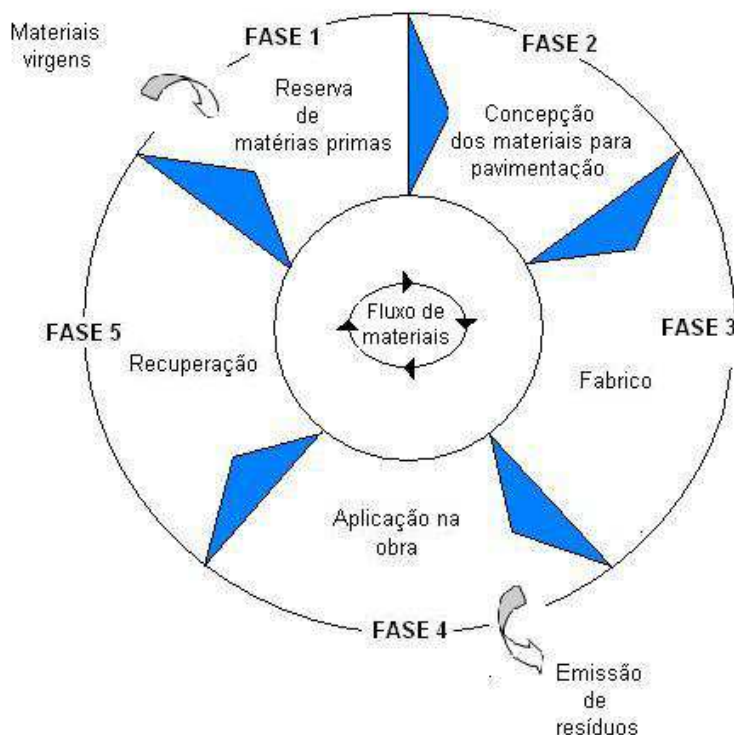


Figura 2.9 - Ciclo fechado de construção (PIARC, 2001)

As misturas betuminosas fresadas devem ser recicladas numa nova mistura com a mesma qualidade das misturas originais, o que do ponto de vista ambiental, constitui o ciclo de construção óptimo.

A primeira técnica que foi desenvolvida em muitos países foi a utilização de uma central descontínua na qual não existia um tambor secador individual para aquecer o material fresado. Assim o material fresado não era previamente aquecido e por isso se chama adição a frio. Esta técnica é proveniente dos Estados Unidos da América no fim dos anos 70 (o chamado *Minnesota-process*) (PIARC, 2002). Pelo facto de o aquecimento e secagem do material fresado ser realizado apenas por condução por contacto com os agregados virgens quentes, a máxima percentagem de reciclagem era de apenas 20%.

De acordo com PIARC (2002), na Alemanha em 1978 foi aplicada a técnica de reciclagem com tambor misturador. Na Bélgica também se iniciou a reciclagem com este processo.

Na Holanda a central *Renofalt* foi construída em 1976. Nesta central os materiais fresados eram aquecidos com vapor em compartimentos resultando em agregados molhados que impediam que os materiais fresados ficassem colados e que impediam o betume de endurecer por oxidação. No início dos anos 90 o mesmo grupo de empreiteiros introduziu o MARS (*Microwave Asphalt Recycling System*) (PIARC, 2002). Este sistema consiste nas seguintes etapas:

- O material fresado é aquecido num tambor normal até cerca de 130°C;
- De seguida é guiado por um túnel de microondas por onde continua a aquecer até aos 155 °C;
- Cerca de 10% de areia e/ou pedra são adicionados para se obter uma composição dentro dos limites. É também adicionada uma pequena porção de óleo rejuvenescedor.

Através desta técnica com o sistema MARS é possível obter uma taxa de reciclagem de mais de 90%. Neste sistema as emissões poluentes são reduzidas pelo facto de a temperatura no tambor poder ser mais baixa, tendo em conta o aquecimento posterior adicional conseguido pelo sistema de microondas. Apesar disso, de acordo com PIARC (2002), esta central foi retirada da produção em 1998 devido à competição dos sistemas com centrais descontínuas com tambor secador. Para o governo holandês a questão das emissões mais reduzidas não constituía uma vantagem determinante porque todas as outras centrais de produção cumpriam os regulamentos holandeses. Uma desvantagem deste sistema consistia também em problemas com as ondas de radiação da central que interferiam com as redes locais GSM (*Groupe Spécial Mobile*).

No Japão foi realizada reciclagem a 100% com centrais descontínuas com tambor paralelo e com tambores misturadores, mas apenas em acessos privados.

De acordo com PIARC (2002), na maioria dos países a tonelagem total de misturas betuminosas fresadas e de misturas betuminosas recicladas quando comparada com a tonelagem total produzida de misturas betuminosas por país e ainda a percentagem de misturas fresadas nas misturas recicladas por país (média de todos os tipos de centrais) continua a crescer regularmente. Em alguns países a percentagem total de misturas

recicladadas comparada com a tonelagem total de misturas betuminosas produzidas estabilizou. Esta percentagem varia geralmente entre 15% e 50% (PIARC, 2002).

É desejável que estas percentagens se tornem maiores por várias razões tais como:

- Maiores restrições na deposição de resíduos ou sua proibição (na Holanda, por exemplo) tornam as misturas com incorporação de materiais fresados mais económicas que as misturas tradicionais;
- Benefícios económicos para o dono de obra e para o produtor de misturas betuminosas que advêm da utilização de um material que já se encontra no local;
- Satisfação dos requisitos nos concursos das obras que deverão ter cláusulas impondo a reutilização das misturas fresadas;
- Existência de centrais mais modernas de reciclagem de misturas betuminosas a quente que possibilitam a reciclagem de maiores percentagens de misturas fresadas.

Os países Europeus com maior utilização de materiais reciclados por processo a quente em central betuminosa são a Alemanha, Bélgica, Dinamarca e Holanda. O quadro 2.15 mostra a proporção de misturas fresadas utilizadas na produção de misturas betuminosas recicladas.

Quadro 2.15 – Quantidade em toneladas de misturas betuminosas recicladas a quente na Europa em 2002 (EAPA, 2003)

| <b>País</b>            | <b>Materiais disponíveis<br/>(x 1000 ton)</b> | <b>Percentagem utilizada<br/>em reciclagem a<br/>quente</b> | <b>Percentagem da<br/>produção de novas<br/>misturas que contêm<br/>material reciclado</b> |
|------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Áustria                | 500                                           | ---                                                         | 5                                                                                          |
| Bélgica                | 1500                                          | 29                                                          | 31                                                                                         |
| Croácia                | 50                                            | 5                                                           | 10-15                                                                                      |
| República Checa        | 354                                           | 10-40                                                       | 18                                                                                         |
| Dinamarca              | 237                                           | 54                                                          | 36                                                                                         |
| Finlândia              | 370                                           | 20                                                          | <10                                                                                        |
| França                 | 5000                                          | 10-45                                                       | >15                                                                                        |
| Alemanha               | 15000                                         | 80                                                          | 20                                                                                         |
| Hungria                | ---                                           | 15                                                          | 0,43                                                                                       |
| Irlanda                | 10                                            | 0                                                           | 0                                                                                          |
| Itália                 | 13000                                         | 15                                                          | 5                                                                                          |
| Holanda                | 3500                                          | 60-70                                                       | 60-65                                                                                      |
| Noruega                | 471                                           | 19                                                          | 7                                                                                          |
| Polónia                | 750                                           | 15-30                                                       | 0,5                                                                                        |
| Roménia                | 383                                           | ---                                                         | ---                                                                                        |
| Eslovénia              | 10                                            | 0                                                           | 3                                                                                          |
| Suécia                 | 900                                           | 15                                                          | 20                                                                                         |
| Suíça                  | 1900                                          | 17                                                          | ---                                                                                        |
| Fora da Europa-Japão   | 30000                                         | 49                                                          | 64                                                                                         |
| Fora da Europa-Ontário | 2,5                                           | ---                                                         | 20                                                                                         |

Conforme se pode constatar a percentagem de misturas fresadas utilizadas é já bastante elevada num número considerável de países Europeus. Na Alemanha a incorporação de misturas fresadas na produção de misturas betuminosas com reciclagem a quente é já de 80% enquanto que na Holanda atinge cerca de 60 a 70 %. Nesta técnica as percentagens de materiais a reciclar presentes nas misturas betuminosas produzidas (taxa de reciclagem) não ultrapassam os 40% a 50% e os betumes utilizados são geralmente betumes menos duros. Actualmente, o grande desenvolvimento no campo da tecnologia

de centrais betuminosas e no aparecimento de novos tambores misturadores impulsionaram bastante esta técnica e permitem a utilização de maiores percentagens de material a reciclar (Azevedo *et al.*, 2003). Para alguns países como a Holanda (60 a 65 %) e o Japão (64 %) a produção de misturas betuminosas que contêm material a reciclar representam já a maior parte da produção de misturas betuminosas.

Em Portugal a técnica de reciclagem a quente de misturas betuminosas ainda é pouco utilizada fundamentalmente pelo desconhecimento e insegurança técnica que lhe estão associadas. No entanto existem já algumas experiências realizadas.

Em Batista *et al.* (2000) são apresentados os estudos de uma mistura com reciclagem a quente a aplicar em camada de regularização no âmbito da reabilitação do pavimento da EN 105 bem como alguns resultados da sua aplicação. Nesta experiência foram estudadas três percentagens de reciclagem (20 %, 30 % e 40 %) e são apresentados neste trabalho os resultados para uma taxa de reciclagem de 40 %. O estudo laboratorial foi realizado segundo o método de *Marshall*.

Posteriormente realizou-se uma inspecção visual e ensaios de carga com o deflectómetro de impacto para caracterização estrutural do pavimento. Foram também efectuados ensaios para determinação do módulo de deformabilidade e da vida à fadiga em provetes serrados de lajetas da obra. A vida à fadiga foi avaliada por comparação directa com a lei de fadiga típica de uma mistura tradicional. De acordo com Batista *et al.* (2000) a comparação directa dos gráficos das leis de fadiga parece indicar que a resistência à fadiga da mistura reciclada não é inferior à das misturas tradicionais.

Efectuaram-se ensaios para avaliação da resistência às deformações permanentes e concluiu-se que as misturas ensaiadas, em termos de comportamento às deformações permanentes, apresentam um comportamento ligeiramente pior do que seria exigido para camadas de desgaste. No entanto ressalva-se o facto de como se tratam de misturas em camadas de regularização tal facto pode considerar-se aceitável. Neste trabalho os autores concluem que em termos de módulos de deformabilidade, a mistura apresenta um comportamento satisfatório, uma vez que os valores obtidos, tanto nos ensaios de campo, como nos ensaios laboratoriais são da ordem de grandeza dos valores obtidos para misturas betuminosas tradicionais ressaltando no entanto a necessidade de mais experiências para tirar mais conclusões.

Em obra a central utilizada foi uma central contínua equipada com anel central para introdução do material fresado. O *stock* de fresado foi caracterizado em termos de percentagem de betume e de granulometria dos agregados recuperados após extracção do betume.

Em Batista *et al.* (2000) é proposto um organigrama para a formulação de misturas betuminosas fabricadas a quente, incorporando materiais fresados, que se apresenta na figura 2.10. Conclui-se também da necessidade de caracterizar convenientemente os lotes de materiais fresados eliminando os não recicláveis salientando-se a necessidade de garantir a homogeneidade dos *stocks*. Neste trabalho os autores concluem ainda que devem ser avaliadas diferentes taxas de reciclagem para se avaliar as que são satisfatórias e assim se poder optar. A caracterização mecânica efectuada sobre as misturas com reciclagem foi considerada satisfatória.

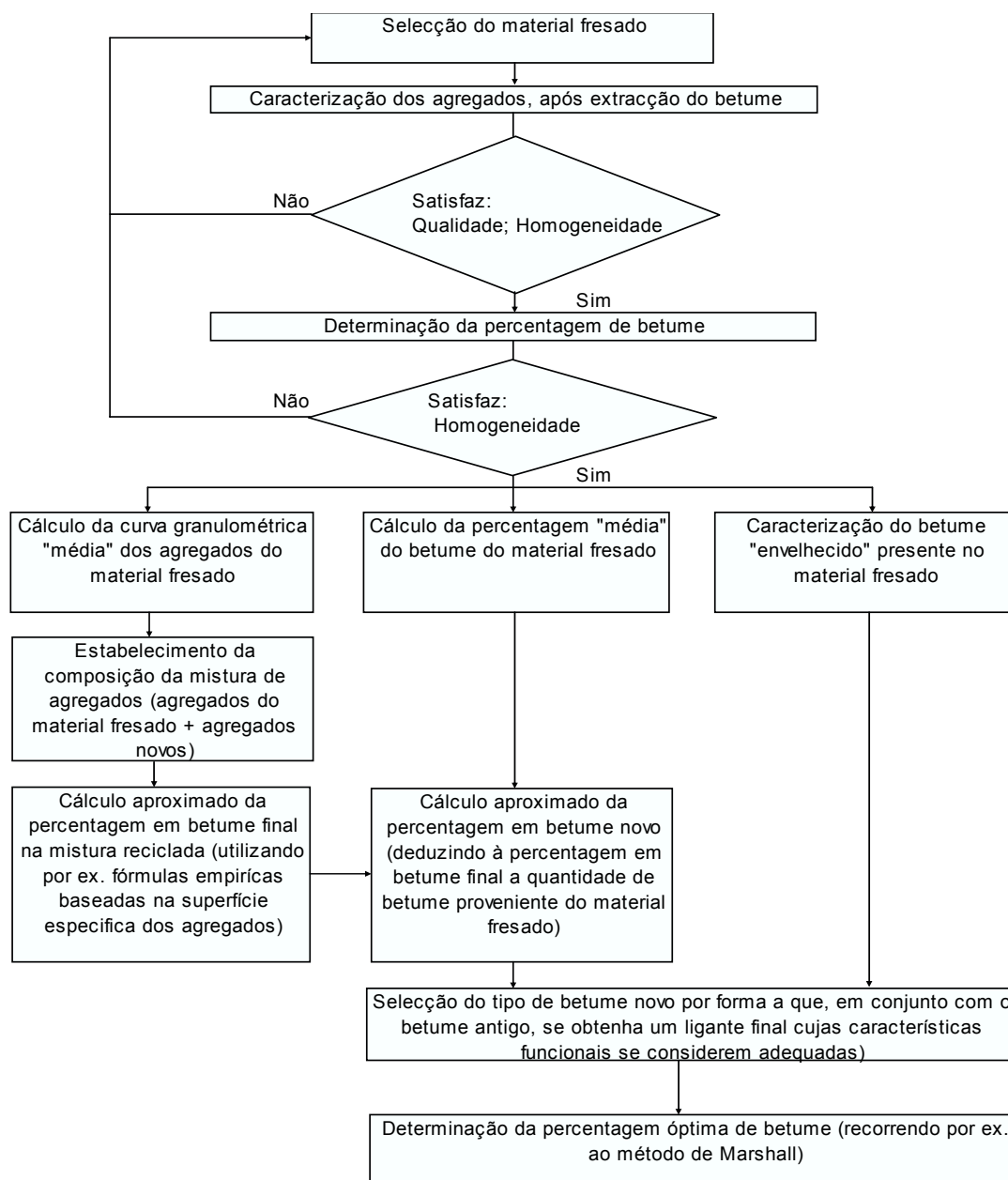


Figura 2.10 - Organograma para a formulação de misturas fabricadas a quente, incorporando materiais fresados (Batista *et al.*, 2000)

Em Picado-Santos (2003) descreve-se a metodologia de tratamento dos dados provenientes da caracterização dos materiais fresados bem como estudos de *Marshall* para a formulação de uma mistura betuminosa com reciclagem, no caso em concreto, um macadame betuminoso em camada de regularização. Estudaram-se três taxas de reciclagem: 30, 40 e 50 % sendo que para cada uma delas foram comparados os valores obtidos com os valores exigidos a uma mistura convencional idêntica. Os resultados foram considerados encorajadores sendo apontada a intenção de prosseguir esse trabalho através da realização de trechos experimentais e ensaios de desempenho.

A nível internacional já existem algumas experiências na técnica da reciclagem a quente.

*Antoine et al.* (2004) apresenta um estudo de aplicação da solução construtiva de reciclagem de misturas betuminosas com uma taxa de reciclagem elevada na reabilitação de um pavimento de uma estrada francesa com tráfego elevado. A solução de reciclagem foi executada paralelamente a uma solução tradicional de forma a serem comparados os resultados obtidos. Foram executadas as seguintes etapas:

- Fresagem da camada superficial de betão betuminoso drenante;
- Fresagem das restantes camadas betuminosas;
- Aplicação de uma mistura betuminosa 0/14 em camada de base com taxa de reciclagem de 50%;
- Aplicação de betão betuminoso 0/10 resistente às deformações com taxa de reciclagem de 50%;
- Aplicação de betão betuminoso drenante 0/10 em camada de desgaste com taxa de reciclagem de 40%.

Os materiais provenientes da fresagem da camada de betão betuminoso drenante foram utilizados no fabrico da mistura reciclada do mesmo tipo. Para as outras duas camadas recicladas utilizaram-se os materiais betuminosos provenientes da fresagem das restantes camadas betuminosas existentes no pavimento constituídas por betumes não modificados. *Antoine* (2004) conclui que face a resultados obtidos em laboratório e *in situ* o desempenho das misturas recicladas é do mesmo nível das misturas tradicionais.

Em Lima (2003) é apresentado um trabalho relativo ao estudo de formulação de misturas betuminosas recicladas fabricadas a quente. Foram colhidas amostras de misturas fresadas, efectuadas análises granulométricas ao material fresado e aos agregados recuperados e foi determinada a percentagem de betume das misturas fresadas. O betume foi caracterizado através da metodologia habitual tendo por base as propriedades relacionadas com a viscosidade e através da metodologia SUPERPAVE. Foi utilizado um aditivo rejuvenescedor nas misturas betuminosas recicladas. O aditivo e o betume novo foram seleccionados através de gráficos (*blending chart*) de acordo com metodologia do *Asphalt Institute* (ver ponto 3.4.10 do presente trabalho). Foram estudadas misturas com taxas de reciclagem de 0 (Mistura I), 10 (Mistura II), 30 (Mistura III) e 50% (Mistura IV). As misturas betuminosas foram formuladas pelo método de *Marshall*. Posteriormente foram caracterizadas em termos de resistência à tracção, módulo de resiliência e vida à fadiga. Os ensaios foram realizados por compressão diametral. Os ensaios para determinação do módulo de resiliência e da vida à fadiga foram efectuados em tensão controlada. Os resultados são resumidos no quadro 2.16 e na figura 2.11.

Quadro 2.16 – Misturas estudadas (Lima, 2003)

| Propriedade                         |                                   | Misturas |     |      |     |      |     |      |     |
|-------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
|                                     |                                   | I        |     | II   |     | III  |     | IV   |     |
| Taxa de reciclagem (%)              |                                   | 0        |     | 10   |     | 30   |     | 50   |     |
| Teor de betume total (%)            |                                   | 6,0      |     | 5,8  |     | 5,1  |     | 5,2  |     |
| Teor de ligante novo (%)            | Teor de betume novo (%)           | 6,0      | 6,0 | 5,2  | 4,7 | 3,4  | 2,6 | 2,2  | 1,0 |
|                                     | Teor de agente rejuvenescedor (%) |          | 0,0 |      | 0,5 |      | 0,8 |      | 1,2 |
| Teor de betume envelhecido (%)      |                                   | 0,0      |     | 0,6  |     | 1,7  |     | 3,0  |     |
| Resistência à tracção (25° C) (MPa) |                                   | 1,2      |     | 1,3  |     | 1,3  |     | 1,6  |     |
| Módulo de resiliência (25° C) (MPa) |                                   | 3200     |     | 4776 |     | 7524 |     | 8901 |     |

Nota: teor em betume (T) representa a percentagem da massa de betume relativamente à massa de agregados, enquanto que, percentagem de betume (P) representa a massa de betume relativamente à massa da mistura betuminosa. Para converter teores em percentagens tem de se utilizar a seguinte expressão:  $P = T \times 100 / (100 + T)$ .

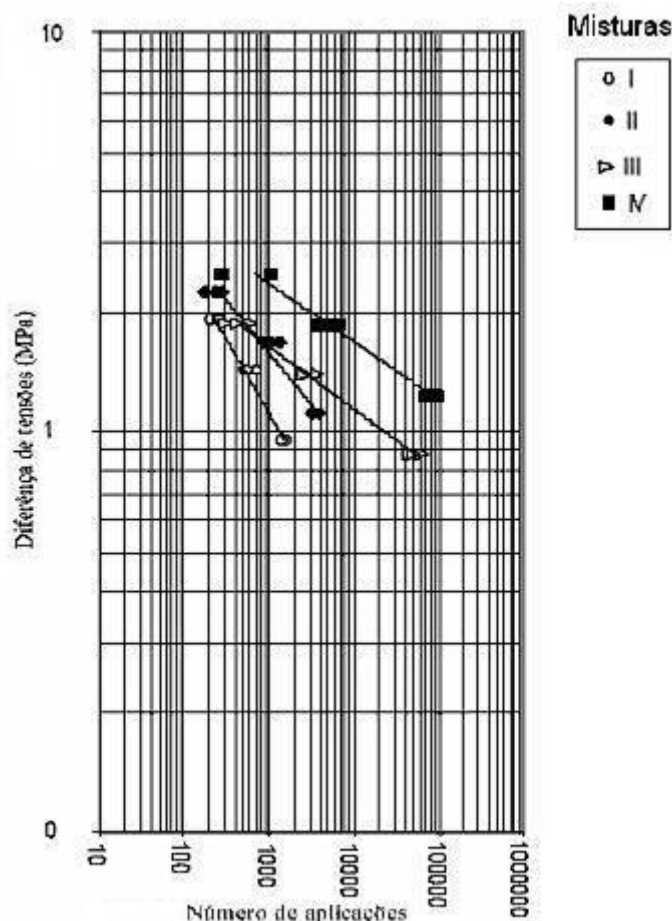


Figura 2.11 – Vida à fadiga das misturas estudadas (Lima, 2003)

O módulo de resiliência cresce à medida que a taxa de reciclagem aumenta, atingindo o seu valor máximo para uma taxa de reciclagem de 50 %. A resistência à tracção também atinge o seu valor máximo para a mesma mistura. Em termos de vida à fadiga a mistura com melhor comportamento para as tensões ensaiadas foi a mistura IV. Para diferenças de tensões mais elevadas o comportamento das misturas aproxima-se. Pode concluir-se que, de acordo com os resultados apresentados, as misturas betuminosas com reciclagem apresentaram um melhor comportamento mecânico do que a mistura betuminosa tradicional

Nas Cláusulas Técnicas Especiais do Caderno de Encargos da Brisa (Brisa, 2003) e num trabalho apresentado por M.C. Azevedo e Mário Cardoso em 2003 (Azevedo *et al.*, 2003) nas II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários dedicadas ao tema “Reciclagem de Pavimentos”, constam as especificações técnicas a observar na técnica de reciclagem de misturas betuminosas a quente em central.

A execução de uma mistura betuminosa reciclada a quente em central inclui as seguintes operações (Brisa, 2003):

- Armazenamento do material procedente de pavimentos betuminosos envelhecidos;
- Tratamento do material betuminoso a reciclar em bruto;
- Caracterização e armazenamento do material betuminoso a reciclar tratado;
- Estudo da mistura e obtenção da fórmula de trabalho;
- Fabrico da mistura de acordo com a fórmula de trabalho;

- Transporte da mistura ao local de utilização;
- Preparação da superfície sobre a qual se vai espalhar a mistura;
- Espalhamento e compactação da mistura.

O transporte, a preparação da superfície e o espalhamento constituem operações perfeitamente idênticas às que ocorrem nas misturas tradicionais. As restantes operações envolvem aspectos particulares ligados à técnica da reciclagem a quente.

Em Brisa (2003) denominam-se as misturas betuminosas envolvidas no processo de reciclagem a quente por:

- MBF – Misturas Betuminosas Fresadas;
- MBR – Misturas Betuminosas Recicladas.

As Misturas Betuminosas Fresadas (MBF) são as misturas betuminosas provenientes da fresagem de um pavimento enquanto que as Misturas Betuminosas Recicladas (MBR) são as misturas betuminosas novas que são constituídas total ou parcialmente por MBF fabricadas através do processo de reciclagem. Os materiais fresados a incorporar nas misturas betuminosas a produzir podem ter origem noutros trechos de estrada diferentes do local onde estas vão ser aplicadas.

### **2.5.2. Armazenamento e tratamento das misturas betuminosas fresadas (MBF)**

Os *stocks* das misturas fresadas são de vital importância para o processo construtivo uma vez que se tratam de materiais de produção menos controlada do que por exemplo os materiais granulares provenientes das pedreiras. Este aspecto assume uma importância acrescida no caso em que os materiais a reciclar são provenientes de outras obras que não a obra onde vão ser utilizados. Os materiais provenientes da fresagem têm de ser tratados e misturados com vista à sua homogeneização e descontaminação. O tratamento envolve operações:

- Trituração de todos os blocos e bolas com o objectivo de que todo o material fique com um tamanho abaixo do pretendido;
- Descontaminação detectando e eliminando por exemplo eventuais elementos metálicos;
- Mistura até se obter um produto homogéneo sem segregações.

De acordo com PIARC (2002), em termos de armazenamento dos diferentes materiais a reciclar, existem dois procedimentos principais para obter uma boa homogeneidade dos materiais a reciclar e consequentemente uma boa homogeneidade e qualidade da mistura reciclada, que são:

- Manter os materiais estritamente separados;
- Fazer uma mistura homogénea de todos os materiais que vão ser reciclados.

A escolha de um ou outro procedimento depende de várias variáveis nomeadamente das possibilidades de armazenagem da central de produção de misturas betuminosas. Numa obra em concreto outros aspectos interferem na decisão do número de *stocks* a escolher nomeadamente aspectos relacionados com o espaço físico da central e razões económicas. A armazenagem de misturas fresadas de forma separada é particularmente importante se as misturas a produzir são mais nobres. Se as misturas betuminosas recuperadas forem provenientes de diferentes locais com diferentes composições tem de

ser efectuada uma mistura adequada para se obterem propriedades homogéneas. As misturas betuminosas fresadas a depositar no local de *stock* devem ser armazenadas em camadas horizontais, para que, se a colheita for efectuada na vertical em vários locais do *stock* (pelo menos três locais), se possa garantir desde logo uma certa mistura entre camadas.

O tratamento do material betuminoso a reciclar envolvendo problemas de homogeneidade ou de uma dimensão excessiva realiza-se numa central de trituração onde se procede à sua trituração e homogeneização com o objectivo de obter um produto granular uniforme. Esta central, no caso de existirem contaminantes (por exemplo metálicos), deve estar dotada de um dispositivo para a sua detecção e eliminação.

Os materiais fresados após tratamento devem ser armazenados em *stock*, em camadas horizontais, perto da central de fabrico, até serem reutilizados sendo fundamental que sob boas condições de preservação. Deve ser garantida a protecção das pilhas em relação à chuva e em relação às temperaturas elevadas. A protecção da chuva deve ser feita para evitar a retenção de humidade. De acordo com Brisa (2003) a humidade nas misturas betuminosas fresadas não deve exceder 5 % para que o consumo de energia para a secagem e aquecimento destes materiais não seja excessivo. A protecção em relação às temperaturas elevadas procura evitar a colagem, compactação, e o envelhecimento e/ou oxidação provocado pela radiação solar pelo que, quando se prevejam temperaturas superiores a 30 °C, os *stocks* não deverão superar 3 m de altura. Os materiais deverão estar cobertos e o tempo de armazenamento deverá ser o mínimo possível.

Os *stocks* de misturas fresadas devem estar devidamente identificados em relação à sua procedência para que posteriormente sejam preparados novos *stocks* que se venham a considerar homogéneos. A identificação dos *stocks* homogéneos é realizada através da proveniência dos materiais que o constituem e através dos ensaios sobre eles realizados.

Os *stocks* devem situar-se numa zona bem drenada e sobre uma superfície revestida. De acordo com Brisa (2003), no caso de serem colocados sobre o terreno natural, não deverão ser utilizados os 15 cm inferiores dos *stocks*.

### 2.5.3. Características da mistura betuminosa fresada (MBF)

Sendo as misturas betuminosas fresadas (MBF) um dos componentes das misturas betuminosas recicladas (MBR) devem ser determinadas algumas das suas características. As características a determinar são as seguintes (Brisa, 2003):

- Percentagem de materiais estranhos;
- Percentagem de contaminantes;
- Percentagem de betume;
- Granulometria da mistura de agregados;
- Penetração, temperatura de amolecimento e/ou viscosidade do betume recuperado;
- Quantidade de betume modificado e tipo de modificador (por exemplo polímeros).

Em relação à constituição dos materiais fresados um dos aspectos mais importantes é a presença de betume modificado envelhecido nas misturas betuminosas fresadas. Esta situação poderá ocorrer nas estradas mais importantes construídas nos últimos anos dada a crescente utilização desse tipo de misturas em camadas de desgaste. No caso de um betume modificado com polímeros é recomendável uma percentagem máxima de 20% e 10% de misturas fresadas respectivamente para camadas de base e para camadas de desgaste. De acordo com PIARC (2002), nas normas Europeias para misturas betuminosas com reciclagem estes serão os limites para métodos de concepção empírica. De acordo com Brisa (2003), em relação à mistura fresada, no caso de a mesma conter betumes modificados, a percentagem de reutilização deve ser limitada a 15% e apenas incorporada em macadame betuminoso e em mistura betuminosa densa, qualquer que seja o tipo de central utilizada para o fabrico de misturas betuminosas.

Em Brisa (2003) estão também definidos limites para os materiais estranhos e para os materiais contaminantes. A percentagem de materiais estranhos tais como betão de cimento, mástique betuminoso, materiais granulares de base ou de sub-base ou ainda materiais de demolição deve ser inferior a 1%. A percentagem de contaminantes tais como materiais não pétreos como são os metais, os materiais sintéticos e a madeira deve ser inferior a 0,1%. Depois de tratadas, as misturas fresadas deverão sempre passar totalmente no crivo que define a dimensão máxima da mistura a fabricar.

Em Brisa (2003) define-se, para utilização em qualquer fracção de material betuminoso a reciclar, que a granulometria dos agregados após a extracção do ligante, bem como a sua percentagem deverão cumprir as tolerâncias indicadas no quadro 2.17, em relação aos valores especificados na fórmula de trabalho.

Quadro 2.17 – Tolerâncias nas características dos materiais fresados

| Características                  |                   | Unidade                                | Tolerância |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------------------|------------|
| Passado nos peneiros ASTM        | > 2 mm            | % em massa do material a reciclar seco | 5          |
|                                  | > 0,074 mm e 2 mm |                                        | 3          |
|                                  | 0,063 mm          |                                        | 1,5        |
| Percentagem de ligante           |                   |                                        | 0,4        |
| Penetração de ligante recuperado |                   | 0,1 mm                                 | 4          |

Para que um *stock* se considere homogéneo, deverão ser cumpridas as tolerâncias estabelecidas no quadro 2.17.

#### 2.5.4. Ligante betuminoso da mistura betuminosa reciclada (MBR)

O betume da mistura betuminosa reciclada (MBR) é composto pelo betume envelhecido contido na mistura betuminosa fresada (MBF) e pelo betume novo a adicionar.

Para além da percentagem de betume total da MBR a definir nos estudos de formulação têm ainda de ser avaliadas as características desse betume. A filosofia é a de que a mistura do betume envelhecido e do betume novo devem ir de encontro às exigências que normalmente são especificadas para o betume de uma certa mistura (PIARC, 2002). Assim para serem consideradas as propriedades do betume da MBR tais como a penetração e a temperatura de amolecimento tem de se supor que durante o fabrico irá ocorrer uma intensa mistura entre o betume novo e o betume envelhecido. Esta suposição, de acordo com PIARC (2002) é questionável, tendo vindo a ser realizadas

investigações por muitos países para conhecer o mecanismo real. No entanto, na prática parece ser suficiente o uso de medidas e modelos simples para assegurar o comportamento do ligante, desde que não seja usado betume muito endurecido (PIARC, 2002).

De acordo com Brisa (2003) a penetração do betume recuperado das MBF não pode apresentar um valor médio, em cinco determinações, inferior a  $15 \times 10^{-1}$  mm, e nenhum valor individual menor do que  $10 \times 10^{-1}$  mm.

Uma forma de calcular a quantidade e as propriedades (classe) do betume novo é utilizando a penetração, a temperatura de amolecimento ou a viscosidade, como indicadores para irem de encontro às especificações do ligante da mistura a ser produzida. De acordo com PIARC (2002), esta forma de proceder é utilizada por vários países.

As expressões que relacionam a penetração, a temperatura de amolecimento e a viscosidade do betume da MBF, do betume novo e do betume da MBR são apresentadas em PIARC (2002). Em Brisa (2003), para a penetração, é apresentada a mesma expressão. Essas expressões com algumas diferenças na nomenclatura são as seguintes:

- Penetração

$$\log pen_{MBR} = TRb \times \log pen_{MBF} + (1 - TRb) \times \log pen_N \quad (2.8)$$

- Temperatura de amolecimento

$$TAB_{MBR} = TRb \times TAB_{MBF} + (1 - TRb) \times TAB_N \quad (2.9)$$

- Viscosidade

$$\log \log Visc_{MBR} = TRb \times \log \log Visc_{MBF} + (1 - TRb) \times \log \log Visc_N \quad (2.10)$$

Onde:

|              |   |                                                                                         |
|--------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $pen_{MBR}$  | - | Penetração do betume da MBR;                                                            |
| $pen_{MBF}$  | - | Penetração do betume da MBF;                                                            |
| $pen_N$      | - | Penetração do betume novo;                                                              |
| $TAB_{MBR}$  | - | Temperatura de amolecimento do betume da MBR;                                           |
| $TAB_{MBF}$  | - | Temperatura de amolecimento do betume da MBF;                                           |
| $TAB_N$      | - | Temperatura de amolecimento do betume novo;                                             |
| $Visc_{MBR}$ | - | Viscosidade do betume da MBR;                                                           |
| $Visc_{MBF}$ | - | Viscosidade do betume da MBF;                                                           |
| $Visc_N$     | - | Viscosidade do betume novo;                                                             |
| $TRb$        | - | Porcentagem de betume da MBR em 100% do betume da MBF, ou taxa de reciclagem de betume. |

Para um *stock* de misturas betuminosas fresadas devidamente caracterizado em que é conhecida a percentagem de betume e o valor da sua penetração para uma determinada taxa de reciclagem é possível determinar se a adição de um determinado betume novo com uma determinada penetração permite obter o ligante desejado. No âmbito dos

processos de formulação de misturas betuminosas recicladas a selecção do betume pode ser também efectuada pelos processos descritos no ponto 3.4.10 deste trabalho.

### 2.5.5. Agregados da mistura betuminosa reciclada (MBR)

De acordo com Brisa (2003) os agregados procedentes do material betuminoso a reciclar não deverão apresentar sinais de meteorização e deverão possuir propriedades de dureza e qualidade similares às exigidas aos agregados novos a adicionar. Essas propriedades deverão ser avaliadas directamente com os mesmos ensaios previstos para os agregados novos ou eventualmente indirectamente através de ensaios mecânicos a realizar sobre a MBR. Um desses ensaios é o ensaio de imersão-compressão para avaliação da resistência conservada.

### 2.5.6. Tipo e composição da mistura betuminosa reciclada (MBR)

As misturas betuminosas recicladas (MBR) devem satisfazer as especificações aplicáveis à mistura betuminosa a fabricar tal como se tratassem de misturas tradicionais. Adicionalmente devem ainda satisfazer certos requisitos que são referidos em Brisa (2003).

Assim para o teor total de ligante betuminoso (betume novo mais o procedente da MBF), expresso em proporção em massa sobre o total dos agregados a seco da mistura (incluindo o filler e os agregados procedentes do material betuminoso reciclar), o valor mínimo é de 5 % em camadas intermédias e de 4,5 % em camadas de base (incluídas as tolerâncias). A percentagem de ligante novo deverá ser no mínimo 60 % da percentagem total de ligante da MBR.

Relativamente à MBR a razão entre a estabilidade *Marshall* e a deformação de *Marshall* deverá ser inferior a 8 kN/mm.

Um aspecto particular nas misturas fresadas é o endurecimento do betume envelhecido durante o estudo laboratorial. Este betume por se encontrar envelhecido é normalmente um betume duro. Assim as operações de aquecimento das misturas fresadas devem ser realizadas num tempo mínimo de aquecimento em estufa e com exclusão de oxigénio. Deve também ser utilizado um tempo mínimo de mistura com os agregados novos. A minimização destes dois tempos visa minimizar o efeito de envelhecimento do betume nas diferentes etapas do estudo laboratorial.

De acordo com PIARC (2002), a taxa de reciclagem final a adoptar tem em consideração os seguintes factores:

- Propriedades dos agregados e do ligante (valores médios) da mistura fresada;
- Homogeneidade das propriedades da mistura fresada;
- Equipamento disponível na central betuminosa.

Para considerar as propriedades da mistura fresada pode recorrer-se a intervalos de valores ou ao desvio padrão dos valores dessas propriedades tendo sempre em perspectiva as tolerâncias da mistura final. Também a homogeneidade tem influência nas propriedades da mistura final. Assim de acordo com as tolerâncias definidas para a MBR e de acordo com a homogeneidade da MBF define-se um limite para a taxa de reciclagem. Outro aspecto a considerar relaciona-se com o equipamento disponível na

central de fabrico. Nos chamados métodos a frio podem ser adicionadas percentagens de apenas 10 % a 20 %. No caso de a central possuir um tambor paralelo, a adição pode ser de mais de 80 %. Cada um destes factores (características dos materiais, homogeneidade e equipamento de fabrico) define uma restrição sendo que a percentagem a considerar será o mínimo dos valores.

Alguns países têm restrições técnicas na percentagem de misturas fresadas a ser usada, tendo em conta qualidade da mistura fresada e o tipo de mistura betuminosa a ser produzida (PIARC, 2002).

Em Portugal, em Brisa (2003), são apontados factores como o tipo de mistura betuminosa fresada, o tipo de mistura betuminosa reciclada a produzir e o tipo de central de fabrico.

### **2.5.7. Centrais de produção de misturas betuminosas a quente**

O conceito de centrais de fabrico de misturas betuminosas tem-se mantido nos últimos 25 anos. Actualmente encontram-se divididos em dois tipos principais: as centrais contínuas ou de tambor secador misturador e as centrais descontínuas (por amassadura) (actualmente predominantes). Nas centrais contínuas o processo de mistura desenvolve-se no tambor enquanto nas centrais descontínuas ocorre no misturador.

De uma forma geral, uma central de produção de misturas betuminosas é constituída pelas seguintes partes principais (EAPA, 1998):

- Tremonhas pré-doseadoras de agregados (unidade de alimentação de agregados frios);
- Unidade de secagem de agregados;
- Tanques de armazenamento de betume e silos de filer;
- Unidade misturadora;
- Silos de armazenamento das misturas betuminosas quentes.

O fabrico de misturas betuminosas em central pode ser dividido em várias etapas principais que são a secagem e o aquecimento dos agregados, a mistura dos agregados com o filer e com o betume e o transporte para o local da obra ou para armazenamento em silos.

As diferentes operações que ocorrem na central são controladas a partir da cabine de controlo. O grau de automatismo e de controlo electrónico difere de central para central de acordo com a sua idade e mobilidade. De acordo com EAPA (1998), um controlo de processos completamente informatizado consegue controlar:

- As taxas de combustão do queimador;
- As taxas de combustível, de ar primário, e de ar secundário e de ar em excesso;
- As pressões no tambor;
- O volume e velocidade dos gases de exaustão;
- A inclinação do tambor;
- As massas volúmicas dos agregados, taxas de alimentação e os tempos de estadia dos agregados;
- A taxa de queda de pressão do sistema de despoeiramento (filtros de mangas), a taxa de impulso, a modulação dos ventiladores;

- Taxa de alimentação dos agregados novos, das misturas a reciclar, do betume e dos aditivos para a mistura;
- A transferência, descarga e armazenamento das misturas prontas.

Podem distinguir-se as centrais fixas, as centrais móveis e as centrais auto-dirigíveis. As centrais fixas encontram-se sempre no mesmo local constituindo a maioria das centrais de misturas betuminosas. As centrais móveis são as que permitem a sua deslocação de local para local. Essa possibilidade torna-as vantajosas para a realização de certas obras. As centrais auto-dirigíveis são centrais que permitem a realização das operações de mistura e de espalhamento num único processo sendo executadas de forma contínua na própria obra.

A implementação do processo de reciclagem em central origina uma série de adaptações tendo em vista a utilização de materiais fresados. Deste modo surgem nas centrais tradicionais, contínuas ou descontínuas, novos componentes que permitem a produção de misturas betuminosas com reciclagem. As centrais de fabrico têm de cumprir o disposto na legislação vigente em matéria ambiental.

Em relação às centrais e de acordo com Brisa (2003) as limitações à taxa de reciclagem são:

- No caso de centrais betuminosas com tambor secador paralelo para secagem e aquecimento das MBF, operação esta em separado e em simultâneo com a secagem e aquecimento dos novos agregados no tambor secador tradicional, poderão ser utilizadas as seguintes percentagens máximas:

|    |                                           |       |
|----|-------------------------------------------|-------|
| a) | Macadames betuminosos                     | - 60% |
| b) | Misturas betuminosas densas               | - 50% |
| c) | Betões betuminosos subjacentes a drenante | - 50% |

Neste caso a temperatura de secagem e pré-aquecimento das MBF pode atingir 130°C.

- No caso de centrais betuminosas sem tambor secador paralelo, mas que possibilitam a introdução das MBF no meio do tambor secador tradicional, ou na extremidade oposta à chama, onde as MBF irão ser aquecidas em conjunto com os agregados novos quentes, poderão ser utilizadas as seguintes percentagens máximas:

|    |                                           |       |
|----|-------------------------------------------|-------|
| a) | Macadames betuminosos                     | - 30% |
| b) | Misturas betuminosas densas               | - 25% |
| c) | Betões betuminosos subjacentes a drenante | - 20% |

- No caso de centrais betuminosas descontínuas sem as facilidades indicadas anteriormente, e onde as MBF não são pré-aquecidas, mas aquecidas em contacto directo com os agregados novos quentes na amassadura, poderão ser utilizadas as seguintes percentagens máximas:

|    |                                           |       |
|----|-------------------------------------------|-------|
| a) | Macadames betuminosos                     | - 20% |
| b) | Misturas betuminosas densas               | - 15% |
| c) | Betões betuminosos subjacentes a drenante | - 10% |

Neste último caso as percentagens a adicionar dependerão de forma particular do teor em humidade da MBF. O aquecimento dos agregados novos deve ser aumentado mas a uma temperatura que não exceda 275°C. As MBF devem ser adicionadas aos agregados

novos após passagem numa unidade de pesagem separada, o que permite a crivagem dos materiais novos sem a influência das MBF e, por outro lado, a mistura dos agregados novos com as MBF deve ser efectuada antes da adição do betume novo, de modo a evitar o endurecimento deste.

De acordo com Brisa (2003), Azevedo *et al.* (2003) e PIARC (2002), se a formulação das misturas for realizada através de metodologias fundamentais de formulação de misturas betuminosas, ou seja com execução de ensaios de determinação de módulos de rigidez, resistência à fadiga e resistência às deformações permanentes, todos os valores indicados anteriormente podem ser superiores. Para tal terá de ser provado que as propriedades mecânicas das misturas betuminosas consideradas no projecto de execução são atingidas.

### Centrais betuminosas descontinuas

Actualmente, a maior parte das centrais são do tipo descontínuo (EAPA, 1998).

#### Centrais Betuminosas Descontínuas

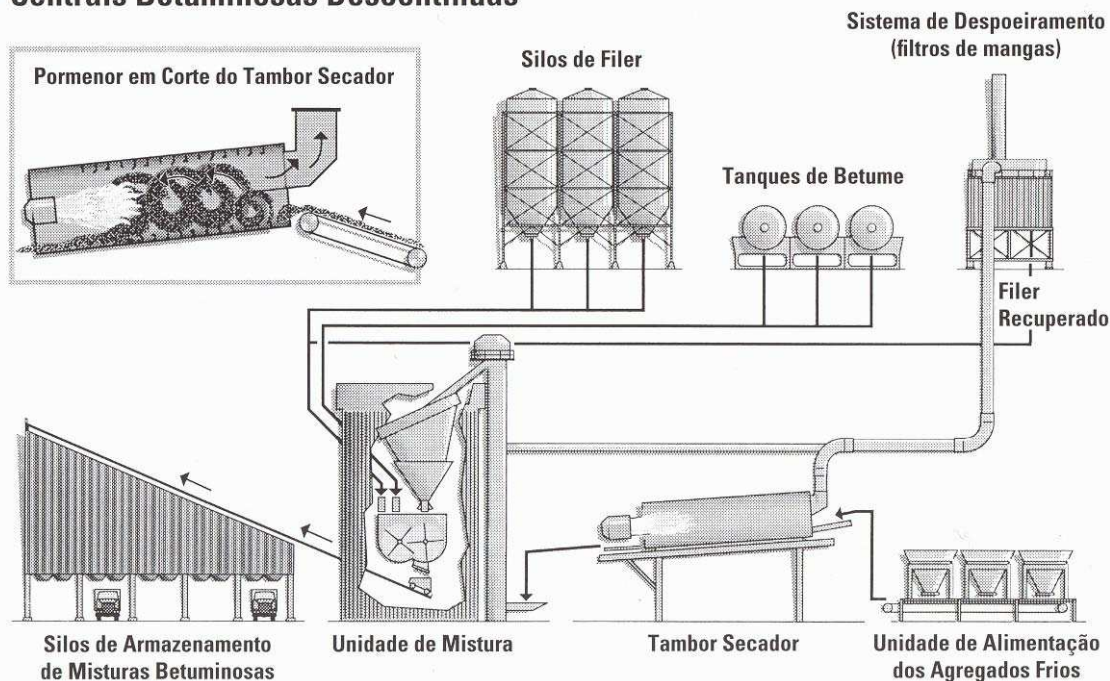


Figura 2.12 – Central betuminosa descontínua (EAPA, 1998)

Os agregados necessários à produção de misturas betuminosas são normalmente armazenados em pilha junto à central. Do ponto de vista da poupança de energia e de um maior aproveitamento da capacidade de produção da central, a humidade das pilhas deve ser mantida num valor mínimo. O esquema da figura 2.13 ilustra as etapas que os agregados percorrem no processo de produção das misturas.

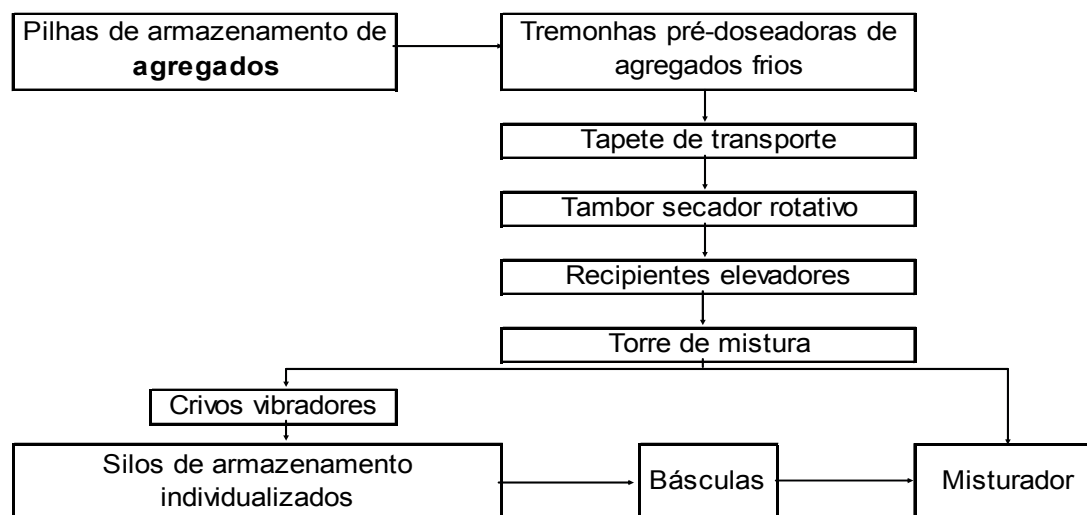


Figura 2.13 – Fluxo dos agregados numa central descontínua

O tambor secador rotativo é um cilindro de aço que contém umas placas no seu interior e que exibe uma certa inclinação. Quando o cilindro roda as placas contidas no seu interior elevam os agregados e deixa-os cair através da corrente de ar quente que percorre o tambor. Da inclinação do tambor resulta que os agregados vão deslizando para a frente. Normalmente o sentido em que sopra o aquecimento é oposto ao do fluxo do material no que habitualmente se designa por processo de fluxos contracorrente. Os parâmetros importantes de controlo para o tambor são o ângulo de inclinação, a velocidade de rotação e o posicionamento das placas. Para o aquecimento e secagem dos agregados, é colocado, num dos extremos do tambor, um queimador funcionando a gás, a carvão ou a outro combustível proveniente da destilação do petróleo bruto, sendo o calor transmitido principalmente por radiação.

Durante o processo de secagem e aquecimento o ar e o vapor de água são aspirados na extremidade fria do tambor para um sistema de despoeiramento. O sistema de despoeiramento é constituído por filtros de mangas, ciclones simples ou sistemas por via húmida. O ar é libertado para a atmosfera enquanto que o pó recolhido volta a entrar no processo de mistura. Os agregados quando saem do tambor estão a uma temperatura entre 135 °C e 180 °C.

Quando os agregados estão no misturador é-lhes adicionado o filer e o betume que os vai revestir. O tempo de mistura pode variar entre 25 a 90 segundos de acordo com a central e com o tipo de mistura a produzir.

### Centrais betuminosas descontínuas – reciclagem

Nas centrais descontínuas são introduzidas algumas alterações para as capacitar de produzir misturas betuminosas com a introdução de material a reciclar. As técnicas de reciclagem incluem os métodos RAP a frio, RAP a quente, *Recyclean* (reciclagem limpa) e a central de torre. Nos métodos RAP a frio, RAP a quente e no método *Recyclean* o material fresado a reciclar deverá ser crivado e eventualmente britado previamente para que se obtenha as dimensões adequadas.

RAP a frio

A figura 2.14 representa esquematicamente a técnica de reciclagem através do processo RAP a frio. Nesta técnica a introdução dos materiais a reciclar é realizada na base do elevador de agregados quentes ou no próprio misturador. O aquecimento desse material é conseguido por contacto com os agregados novos sobreaquecidos.

Neste processo conseguem-se taxas de reciclagem que oscilam entre os 10 e os 30%. Esta taxa depende da percentagem de água do material fresado a reciclar, da relação entre a qualidade da mistura que se pretende produzir em relação à da mistura fresada e das limitações devido às temperaturas máximas admissíveis. Apesar do aquecimento do material a reciclar ser feito por condução é conveniente não exagerar no sobreaquecimento a que se submete os materiais novos.

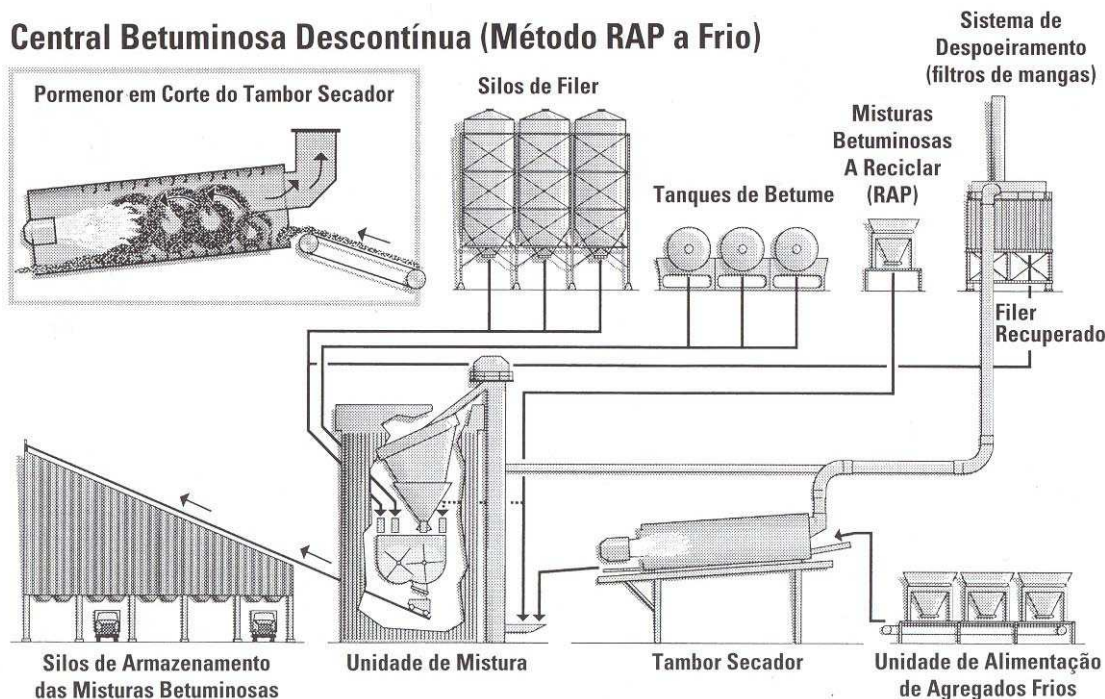


Figura 2.14 – Central betuminosa descontínua – Método RAP a frio (EAPA, 1998)

RAP a quente

Nesta técnica o material fresado a reciclar é pré-aquecido, normalmente, num tambor secador paralelo (tambor tandem). Assim, paralelamente ao processo de secagem e aquecimento que decorre para os materiais novos, o material a reciclar é pesado sendo depois seco e aquecido no segundo tambor. Após aquecimento o material é conduzido a um silo pré-doseador e transferido para o misturador.

Os gases da combustão do tambor com o material reciclado são conduzidos ou para o tambor secador de agregados novos como ar secundário ou para o sistema de despoeiramento.

Neste processo conseguem-se taxas de reciclagem que oscilam entre os 30 e os 70%. Esta taxa varia com a relação entre a qualidade da mistura a produzir e a qualidade da mistura fresada.

A figura 2.15 representa esquematicamente a técnica de reciclagem através do processo RAP a quente.

### Central Betuminosa Descontínua (Método RAP a Quente)

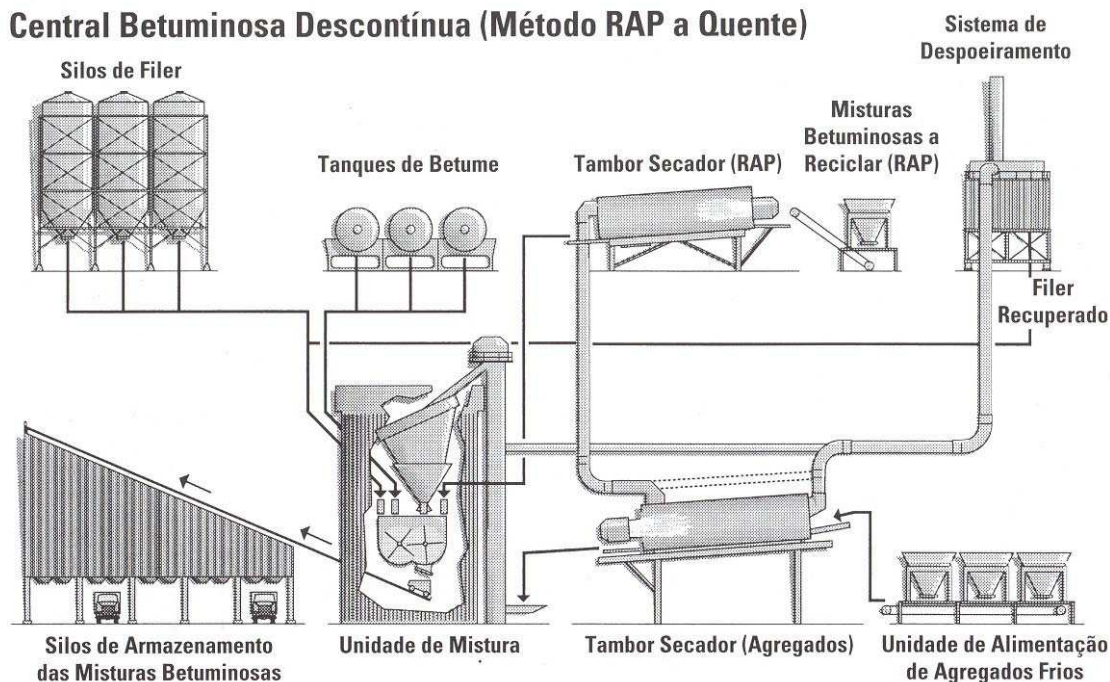


Figura 2.15 – Central betuminosa descontínua – Método RAP a quente (EAPA, 1998)

### Recycleclean

A figura 2.16 representa esquematicamente a técnica de reciclagem através do processo *Recycleclean*.

### Central Betuminosa Descontínua (Método de Reciclagem *Recycleclean*)

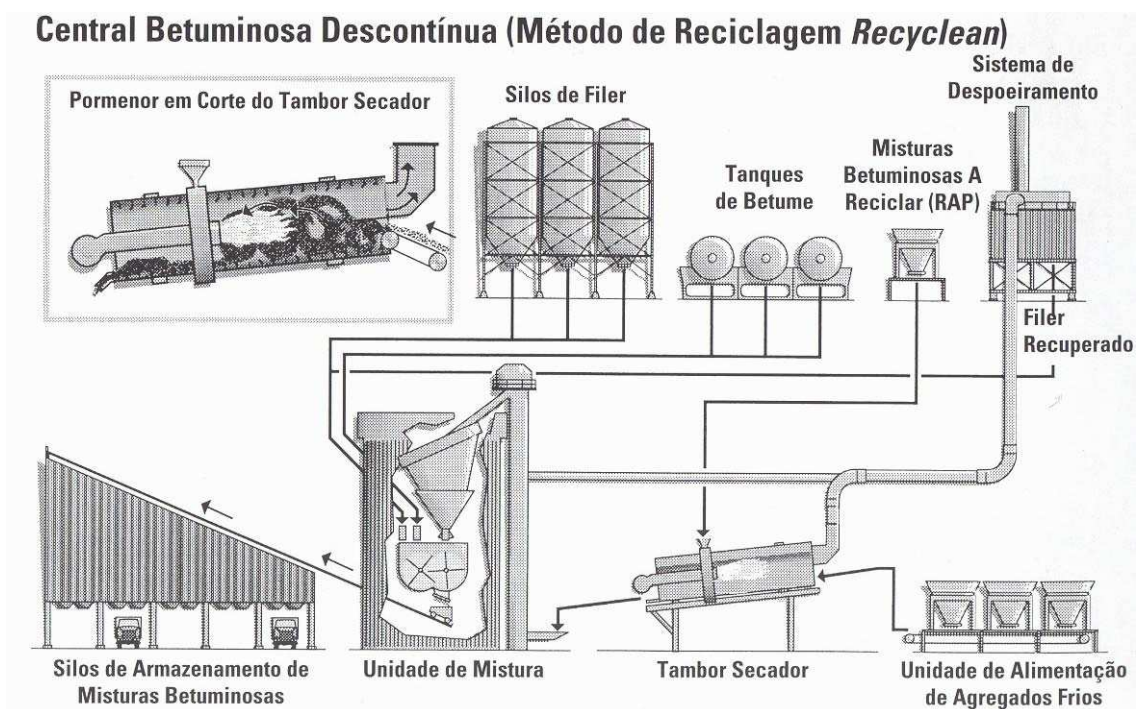


Figura 2.16 – Central betuminosa descontínua – Método *Recycleclean* (EAPA, 1998)

Os agregados entram no tambor secador na extremidade enquanto que o material fresado é introduzido no meio do tambor secador num anel central. De forma a minimizar o sobreaquecimento dos materiais fresados a reciclar o seu aquecimento é realizado atrás da chama e é conseguido por contacto com os agregados novos aquecidos e pelos gases de combustão que circulam no interior do tambor secador. Este sistema permite taxas de reciclagem até 35 %.

#### Central de torre

A figura 2.17 representa esquematicamente a técnica de reciclagem através do processo da central de torre.

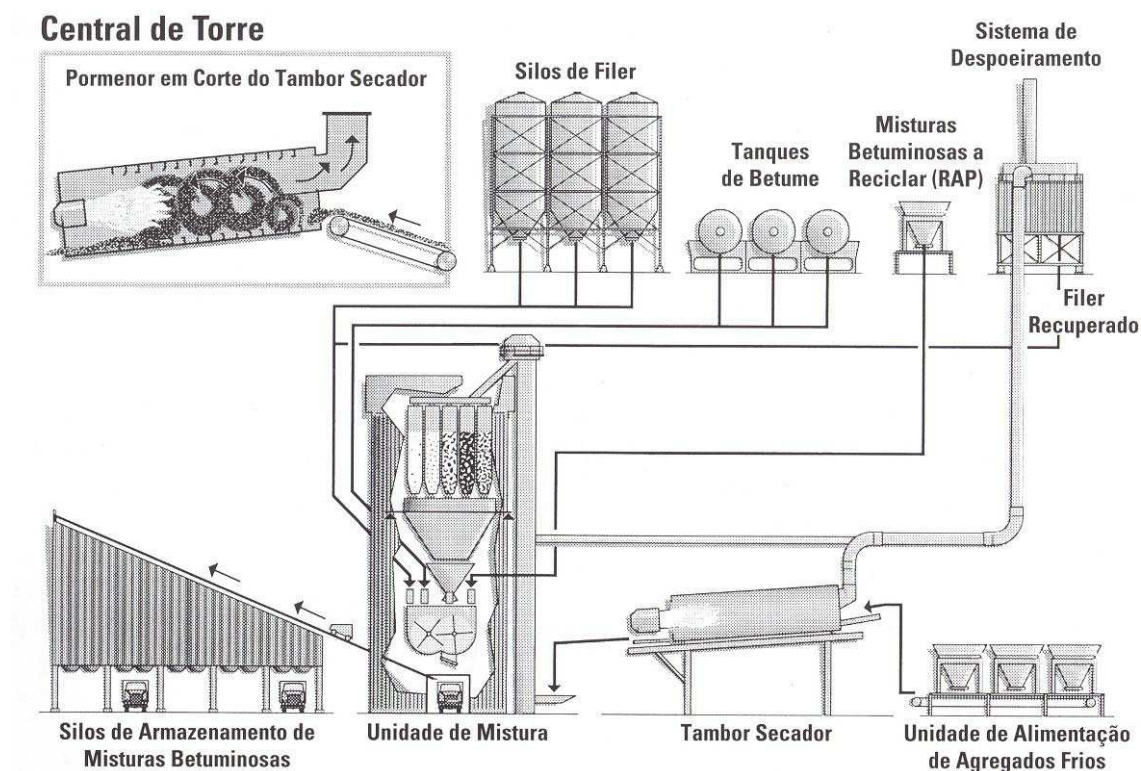


Figura 2.17 – Central de torre (EAPA, 1998)

Esta central permite o armazenamento intermédio dos agregados aquecidos. Esta característica da central permite uma mudança rápida de fórmula de trabalho conferindo à central a possibilidade de fornecimento de misturas diferentes num curto espaço de tempo.

Os agregados são secos e aquecidos, são separados de acordo com a sua fracção granulométrica e são conduzidos a silos aquecidos para armazenamento intermédio. Estes silos estão localizados em cima do misturador para que, quando é definida uma fórmula de trabalho para mistura, os agregados serem deixados cair sobre as básculas e encaminhados para o misturador. Assim, nesta central, o processo de secagem pode ser considerado de certa forma independente do processo de mistura.

### Centrais betuminosas contínuas

Neste tipo de centrais as operações de secagem, aquecimento e mistura concentram-se no mesmo local que é o tambor secador misturador. Na figura 2.18 esquematiza-se o funcionamento de uma central deste tipo.

#### Centrais Betuminosas Contínuas

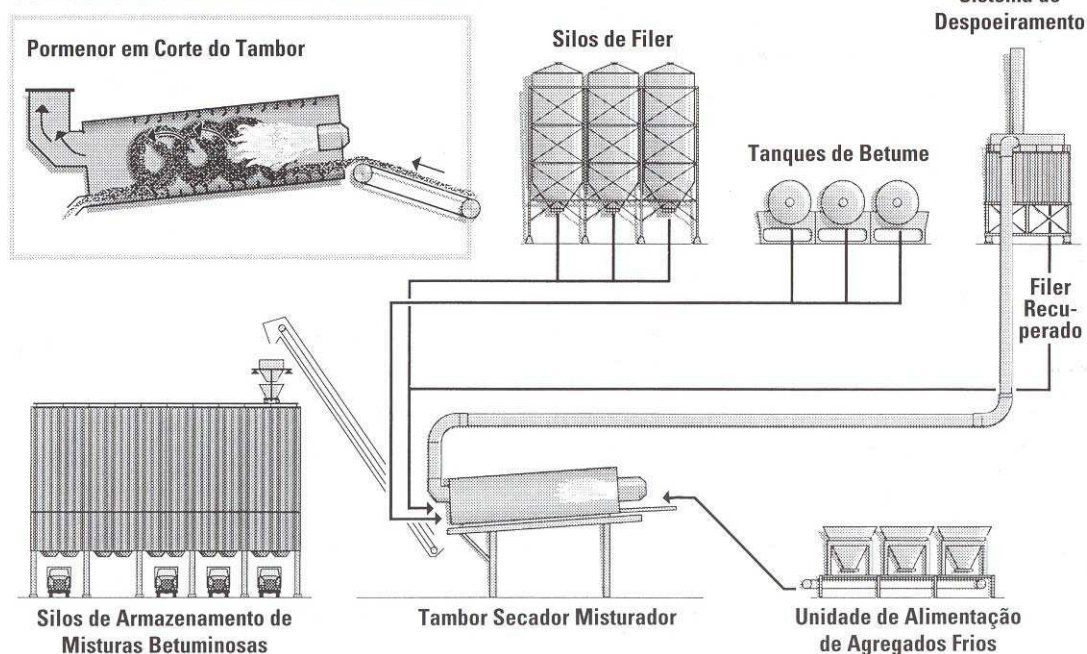


Figura 2.18 – Central betuminosa contínua (EAPA, 1998)

Em substituição de tremonhas pré-doseadoras dos agregados aquecidos, da reclassificação dos agregados nas células de crivagem e do misturador, encontram-se localizados no interior do tambor comandos de alimentação proporcionais ponderais das matérias-primas.

As centrais contínuas são de alguma forma, menos flexíveis no que se refere à alteração para misturas de fórmulas diferentes, sendo esta uma das razões apontadas em EAPA (1998) para a predominância das centrais descontínuas na Europa. A figura 2.19 ilustra as etapas que os agregados percorrem no processo de produção das misturas betuminosas.

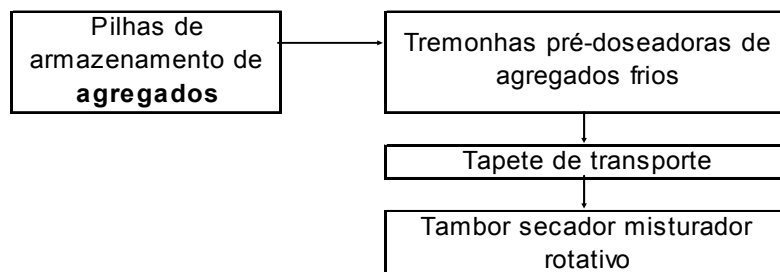


Figura 2.19 – Fluxo dos agregados numa central contínua

Os agregados frios armazenados nas pilhas são pré-doseados e transportados para o tambor secador misturador rotativo. Numa primeira fase os agregados são secos e aquecidos na zona de aquecimento. O filer e o betume são introduzidos no tambor numa

segunda fase, na zona de mistura, para se dar a mistura e revestimento dos agregados aquecidos. As pás do forno que estão no interior do tambor e a sua inclinação asseguram que a secagem, aquecimento e a mistura sejam realizadas de forma adequada. As misturas são encaminhadas para um tapete transportador que as conduz a silos de armazenamento aquecidos ou aos camiões de transporte.

No processo de secagem e aquecimento o ar e o vapor de água são aspirados na extremidade fria do tambor através de uma ventoinha de exaustão para um sistema de despoeiramento. O sistema de despoeiramento é constituído por filtros de mangas, ciclones simples ou sistemas por via húmida. O ar é libertado para a atmosfera enquanto que grande parte do pó recolhido volta a entrar no processo de mistura.

Ao contrário das centrais descontínuas, neste tipo de centrais os agregados deslocam-se no mesmo sentido em que sopra o aquecimento no que habitualmente se designa por processo de fluxos paralelos. No entanto algumas centrais contínuas com a possibilidade de produzir misturas com reciclagem também funcionam com fluxos contracorrente. De facto, de acordo com EAPA (1998), o princípio de fluxos opostos permite reduzir a temperatura dos gases quentes e melhora o desempenho do ponto de vista ambiental, através de um aquecimento menos intenso das misturas betuminosas recicladas.

### **Centrais betuminosas contínuas – reciclagem**

Nos últimos anos vários tipos de centrais têm sido concebidos para incorporarem a técnica de reciclagem de misturas betuminosas em central. As diferenças entre as centrais contínuas quanto ao processo de reciclagem situam-se principalmente no que diz respeito ao momento em que são introduzidos os materiais a reciclar no processo produtivo e consequentemente em relação ao processo de aquecimento desses materiais. Basicamente é possível identificar três métodos diferentes de aquecimento do material antes de se adicionar o betume: aquecimento por chama directa, aquecimento por chama indirecta e por contacto com os agregados sobreaquecidos (EAPA, 1998). Numa central podemos encontrar mais do um método de aquecimento.

Podemos encontrar várias tipologias de centrais contínuas concebidas para a incorporação de materiais fresados a reciclar. De seguida serão descritas essas tipologias.

#### **RAP**

De acordo com EAPA (1998), a concepção mais usada actualmente de centrais contínuas utiliza ambos os princípios de aquecimento por chama directa e por contacto com os agregados sobreaquecidos. Esta central, designada por central contínua RAP, encontra-se esquematizada na figura 2.20.

Nesta central, o material a reciclar após ser processado, é introduzido na zona central do tambor onde é aquecido por contacto com os agregados sobreaquecidos e por acção dos gases quentes da combustão.

### Centrais Betuminosas Contínuas (RAP)

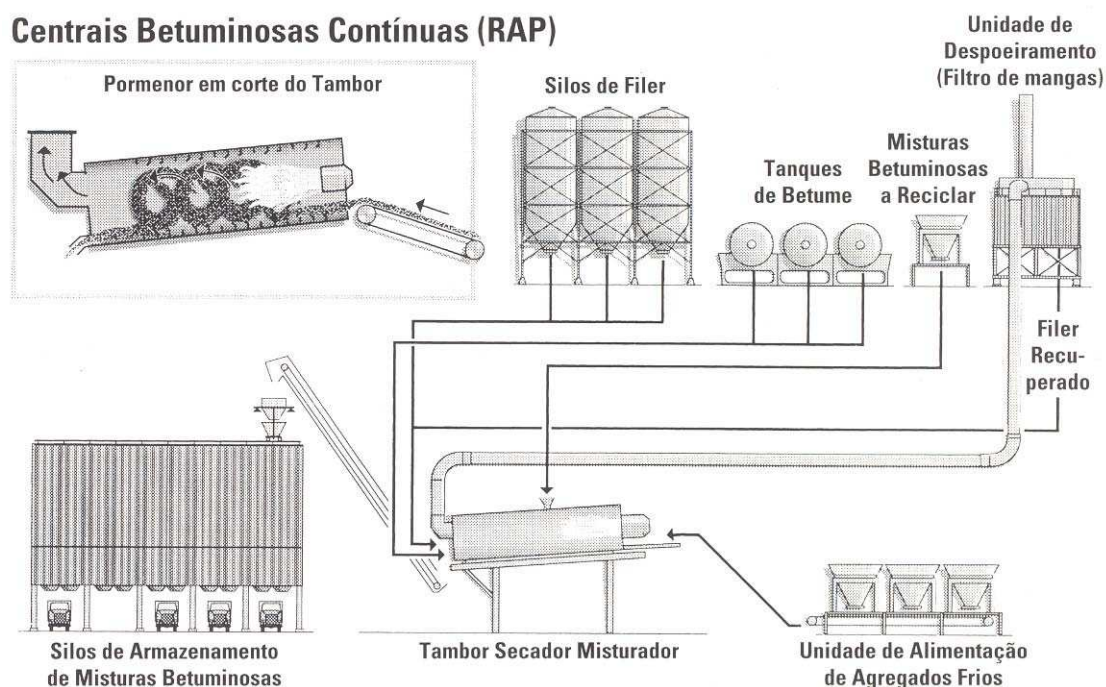


Figura 2.20 – Central betuminosa contínua – RAP (EAPA, 1998)

### Central contínua de duplo tambor

A figura 2.21 ilustra uma central deste tipo.

### Centrais Betuminosas Contínuas de Duplo Tambor

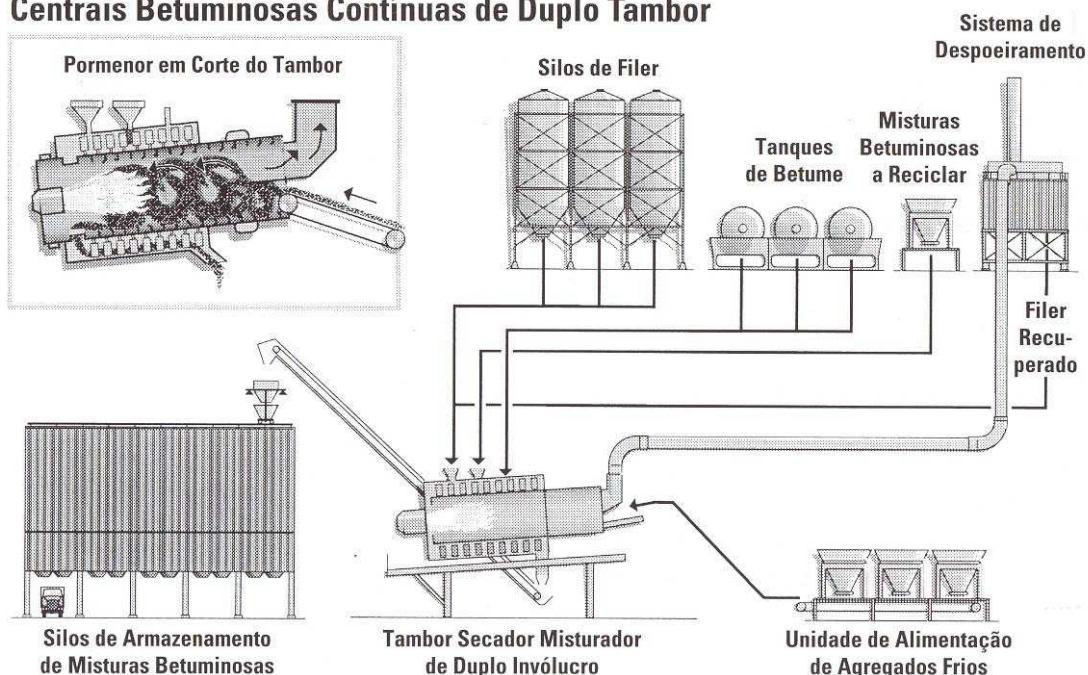


Figura 2.21 – Central betuminosa contínua de duplo tambor (EAPA, 1998)

Esta central possui um tambor secador misturador de duplo invólucro. No tambor interior circulam os agregados, que como já foi descrito para outro tipo de centrais, são secos, aquecidos e movimentados de acordo com a inclinação do tambor. O fluxo é do tipo contracorrente (típico de centrais descontínuas).

O material a reciclar é introduzido na zona superior do tambor exterior e percorre o espaço entre tambores mas sem contacto com o fluxo dos gases de combustão. A operação de mistura ocorre (como demonstra o pormenor da figura 2.21) através de pás montadas na face exterior do tambor interior.

O aquecimento do material a reciclar é realizado por acção da chama indirecta e por contacto com os agregados sobreaquecidos. Outras medidas de aquecimento indirecto por chama, são constituídas principalmente por dispositivos ou por tubos de transmissão de calor, para evitar que a mistura do material betuminoso a reciclar e do agregado a incorporar entre em contacto directo com a chama (EAPA, 1998).

#### Central contínua de fluxos contracorrente

A figura 2.22 ilustra uma central deste tipo.

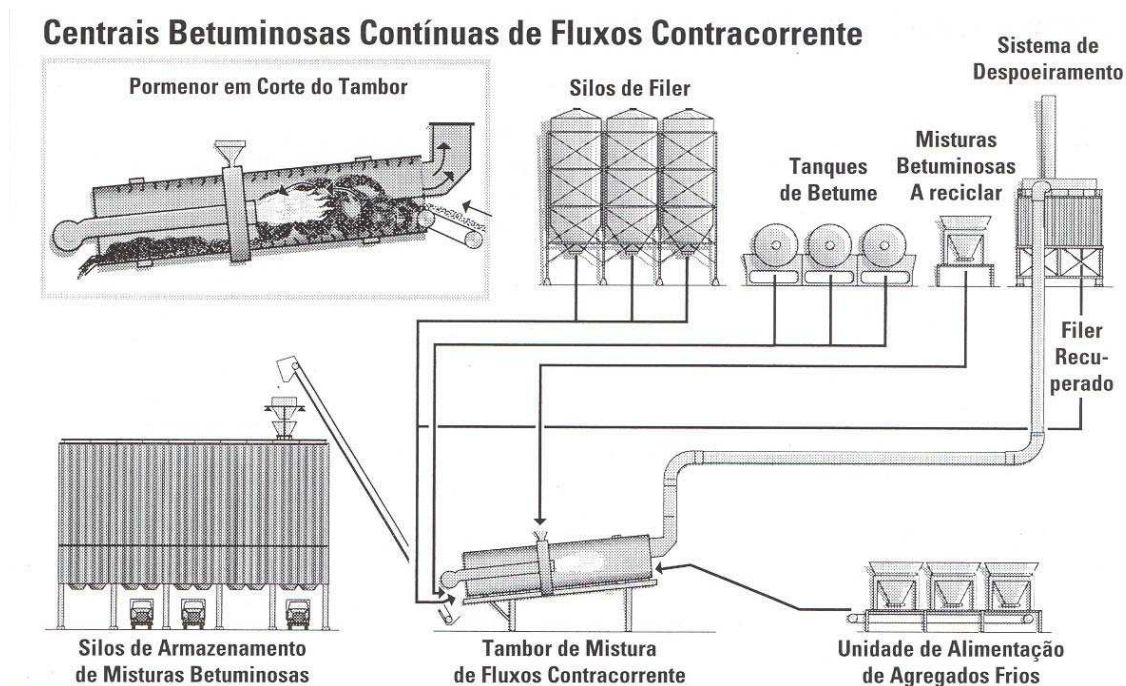


Figura 2.22 – Central betuminosa contínua de fluxo contracorrente (EAPA, 1998)

Este tipo de centrais caracteriza-se de acordo com a sua própria designação por ter fluxos contracorrente, isto é, pelo facto dos gases de combustão circularem no sentido contrário ao fluxo dos agregados.

De acordo com a figura 2.22 pode verificar-se que os agregados são introduzidos na extremidade oposta à chama. O material a reciclar é introduzido num anel central localizado na zona central do tambor. A boca do queimador está localizada na extremidade de um tubo que pelo facto de estar aquecido permite efectuar o aquecimento do material a reciclar. A extensão do tubo no interior do tambor é a necessária para efectuar esse aquecimento antes da mistura. Desta forma o betume e o material a reciclar nunca estão em contacto directo com a chama ou com os gases aquecidos.

Este processo permite, em condições óptimas, taxas de reciclagem até cerca de 50% (EAPA, 1998).

Central móvel de reciclagem de misturas betuminosas (trem de reciclagem)

Este tipo de centrais foi concebido para efectuar reciclagem no local da obra. A figura 2.23 esquematiza-as.

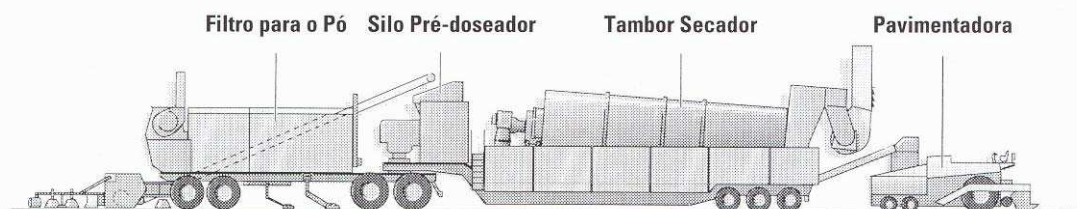
**Central Móvel para Reciclagem de Misturas Betuminosas**

Figura 2.23 – Central móvel para reciclagem de misturas betuminosas (EAPA, 1998)

Esta central está inserida num processo em série que ocorre numa sequência que se inicia com a fresagem, seguida de secagem, aquecimento e mistura e que culmina na pavimentação.

Assim o material depois de fresado é transportado para uma tremonha doseadora onde é doseado juntamente com os agregados novos. No tambor secador misturador os materiais são secos, aquecidos e misturados com o betume. O tambor é um tambor secador misturador de fluxos paralelos tradicional que está sobre um chassis rolante. A mistura que resulta deste processo é depois conduzida para a pavimentadora onde são conduzidas as operações habituais na pavimentação. A figura 2.24 ilustra a sequência dos processos.

Neste método, o ar com poeiras dentro do tambor, é emitido para o ambiente sem ser previamente purificado estando-lhe por isso associados problemas ambientais.

De acordo com EAPA (1998), os pavimentos assim construídos contêm frequentemente mais de 90% de material reciclado.

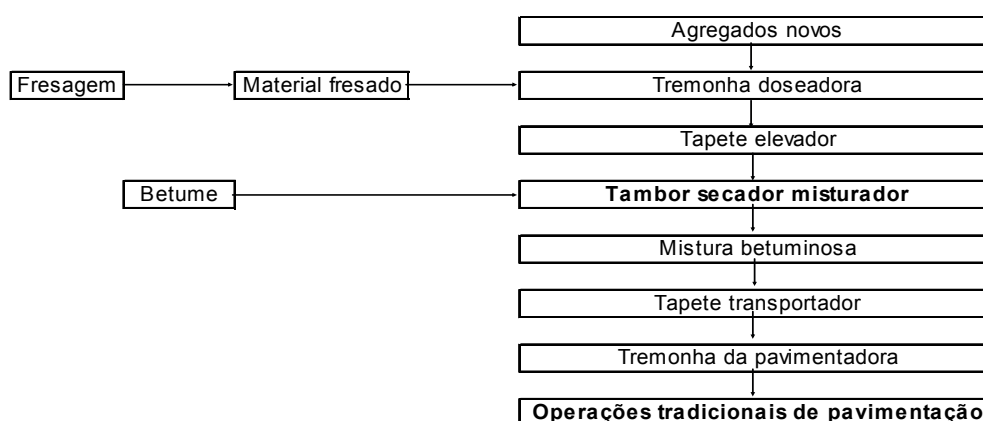


Figura 2.24 – Fluxo dos materiais e das operações da central móvel

**Centrais conversíveis ou mistas**

Na figura 2.25 apresenta-se uma central deste tipo com a representação esquemática do seu funcionamento.

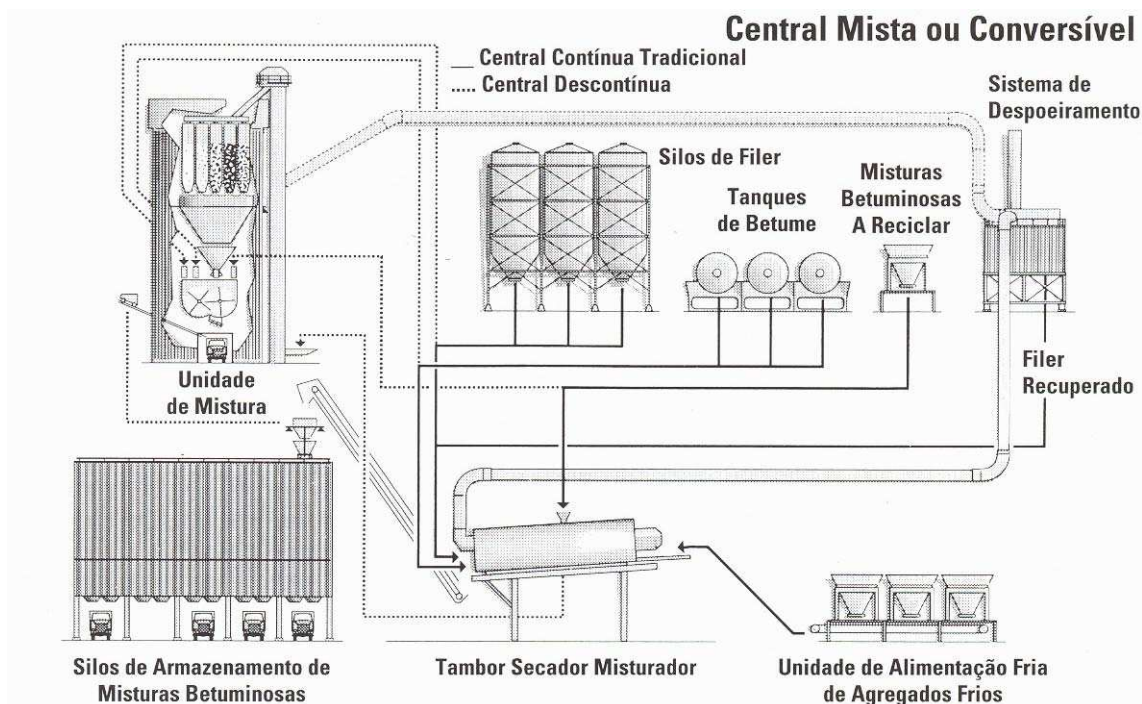


Figura 2.25 – Central betuminosa mista ou conversível (EAPA, 1998)

A característica mais importante deste tipo de centrais é que é possível fazê-las funcionar como centrais contínuas (tambor secador/misturador) ou como centrais descontínuas (EAPA, 1998).

Na hipótese de estar a funcionar como uma central continua tradicional a representação dos processos está representada com uma linha a cheio e quando está a funcionar como uma central descontínua está representada a tracejado.

Em qualquer situação, esta central permite a incorporação de material fresado a reciclar. Note-se que no caso da central estar a funcionar como central descontínua o tambor funciona apenas como tambor secador rotativo e se estiver a funcionar como central continua funciona como tambor secador misturador.

Outra situação, de uma central mista de duplo tambor, está representada na figura 2.26.

Neste caso a maior diferença prende-se com o tipo de tambor. Assim, se a central estiver a funcionar como central contínua, o tambor funciona como tambor de duplo invólucro num processo já descrito anteriormente.

A vantagem deste tipo de central é a de se criar um sistema flexível capaz de produzir grandes quantidades de uma mistura, quando funciona como central contínua, ou pequenas quantidades de misturas diferentes, quando funciona como central descontínua (EAPA, 1998).

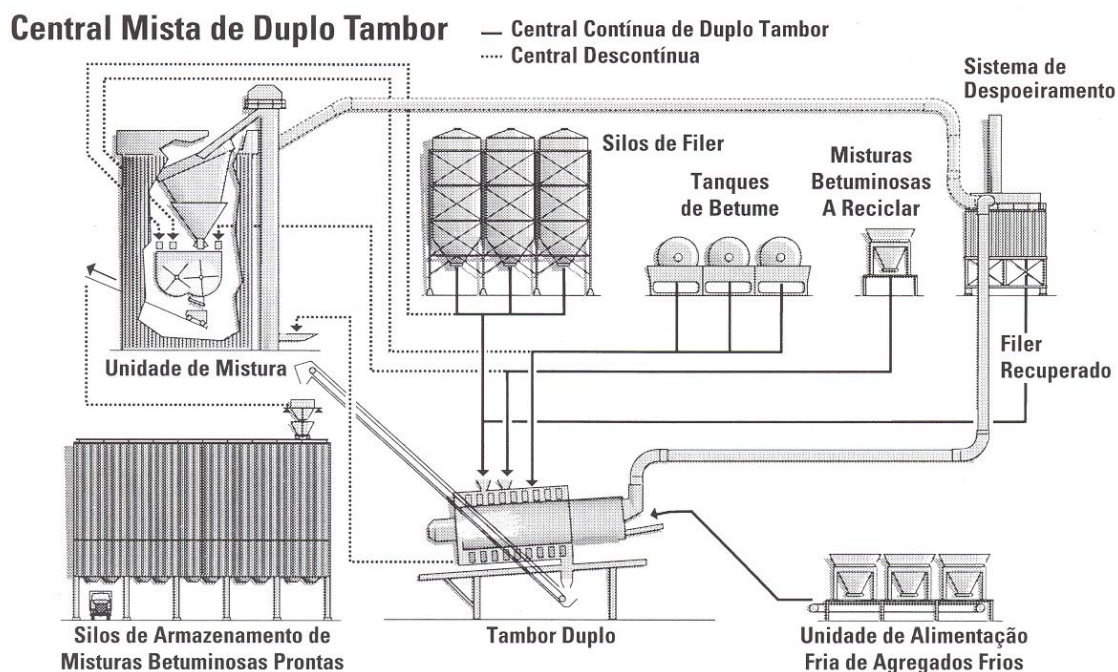


Figura 2.26 – Central betuminosa mista de duplo tambor (EAPA, 1998)

### Outras tecnologias em desenvolvimento, ainda não consideradas como disponíveis ou económicas

Nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas outras tecnologias que actualmente ainda não são utilizadas (pelo menos de forma corrente) ou porque não são consideradas disponíveis ou porque não são consideradas económicas. Em EAPA (1998) são referidas algumas dessas situações tais como:

- Utilização de um tambor secador misturador de duplo queimador;
- Utilização de energia eléctrica em substituição ou em combinação com os combustíveis tradicionais;
- Incorporação de aquecimento das misturas betuminosas a reciclar por microondas.

A utilização de um tambor secador misturador de duplo queimador pretende obter rendimentos elevados mesmo com os agregados muito húmidos. O processo baseia-se na concepção de um duplo tambor, isto é, num tambor secador de duplo queimador e num tambor misturador tradicional com queimador e pretende combinar, num só tambor, as vantagens dos princípios de transferência de calor de fluxo paralelo e de fluxo contracorrente. Dividindo o processo de transferência de calor em duas operações equilibradas, reduzem-se as velocidades dos gases no tambor secador, quando comparadas com outras centrais operando nas mesmas condições de humidade e que estejam a fabricar o mesmo tipo de mistura (EAPA, 1998).

A utilização de energia eléctrica em substituição dos combustíveis tradicionais tem como principal vantagem o facto de, após o processo de secagem, subsistir apenas vapor de água reduzindo assim a emissão de poluentes dado que não existem gases da combustão. Actualmente ainda não é economicamente viável a utilização desta técnica. A utilização da energia eléctrica pode ser feita em complemento com os combustíveis tradicionais.

A incorporação de aquecimento das misturas betuminosas a reciclar, por microondas, tem fornecido resultados especialmente promissores (EAPA, 1998). Neste processo as misturas betuminosas fresadas a reciclar são secas num sistema tradicional a uma temperatura de cerca de 135°C para que não se desenvolvam emissões gasosas. Depois são colocadas num tapete transportador que percorre o túnel do microondas até elevar a temperatura até cerca de 155°C. No fim do processo é adicionado e misturado um rejuvenescedor e a mistura final é armazenada em silos.

A utilização deste sistema de reciclagem de misturas betuminosas por microondas permite reduções acentuadas nas emissões e taxas de reciclagem da ordem de 90 a 100% (EAPA, 1998).

### 2.5.8. Controlo da qualidade

#### Controlo da qualidade dos materiais a reciclar

O controlo da qualidade do material betuminoso a reciclar tratado é realizado a partir de amostras colhidas com o objectivo de analisar a sua homogeneidade e caracterizar os *stocks* desses materiais.

De acordo com Brisa (2003) por cada 500 toneladas de aproveitamento de material tratado, que se vai utilizar no fabrico da mistura uma percentagem de material betuminoso reciclado inferior a 25 %, e por cada 200 toneladas de material tratado se, se vai utilizar uma percentagem de material betuminoso superior a essa percentagem, serão tomadas cinco amostras e de cada uma delas serão determinadas:

- Granulometria do material desagregado, segundo a NP EN 933-1;
- Percentagem de ligante, segundo a EN 12697-1;
- Granulometria dos agregados recuperados, segundo a EN 12697-2.

Para além disso, de duas delas serão determinadas, após recuperação do betume, de acordo com a EN 12697-3, as seguintes características:

- Penetração do ligante recuperado, segundo a EN 1426;
- Temperatura de amolecimento do ligante recuperado, segundo a EN 1427;
- Índice de penetração do ligante recuperado;
- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles do agregado recuperado, segundo a NP EN 1097-2;
- Massa volúmica e absorção de água do agregado recuperado, segundo a NP EN 1097-6.

No caso da MBR conter mais de 25% de MBF, em relação à massa total da mistura, serão ainda determinados:

- Ponto de fragilidade *Fraass*, segundo a EN 12593;
- Ductilidade, segundo a EN 13589.

#### Controlo da qualidade na execução

Durante a execução deverão ser controlados alguns aspectos mais específicos que estão definidos em Brisa (2003), tais como:

- Fabrico  
Ao começar o fabrico e pelo menos duas vezes por dia, será determinada a humidade, segundo a EN 12697-14, da MBF, na tremonha do tapete de carga a

partir do *stock* e na descarga da tolva de dosificação e alimentação ao misturador;

- Controlo da recepção da camada executada  
Para obras com mais de 70000 m<sup>2</sup>, MBR que contenham mais de 25% de MBF em relação à massa total da mistura ou quando existam dúvidas razoáveis sobre a qualidade da mistura, a Fiscalização poderá exigir a determinação em provetes extraídos do pavimento, para além da baridade e da espessura, a resistência à tracção indirecta, segundo a NLT-346, à temperatura de 5 °C, utilizando dispositivos de cargas (barras) de acordo com o artigo 2.2 da norma NLT-360 para determinação do módulo resiliente.

A resistência à tracção deverá ser determinada tanto a seco, directamente sobre os provetes extraídos, como em ambiente húmido, sobre provetes que tenham permanecido submersos durante 24 horas em água à temperatura de 60 °C.

### **Critérios de aceitação ou de rejeição**

Os critérios a cumprir por este tipo de misturas são os que estão definidos para as misturas sem reciclagem a quente e ainda as seguintes prescrições adicionais que se indicam a seguir (Brisa, 2003):

- A resistência média à tracção indirecta, segundo a norma NLT-346, à temperatura de 5 °C, utilizando os dispositivos de carga (barras) definidos no artigo 2.2 da norma NLT-360 para determinação do módulo resiliente, deverá cumprir os valores indicados no quadro 2.18.

Quadro 2.18 – Critérios a cumprir pelas misturas (Brisa, 2003)

| Tipo de mistura                                      | Aceitação         |                     | Penalização       |                     |
|------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
|                                                      | Seco (1)<br>(MPa) | Húmido (2)<br>(MPa) | Seco (1)<br>(MPa) | Húmido (2)<br>(MPa) |
| Betão betuminoso<br>e<br>Mistura<br>betuminosa densa | 2,5               | 1,9                 | 2,1               | 1,6                 |
| Macadame<br>betuminoso                               | 2,0               | 1,5                 | 1,6               | 1,2                 |

- 1) Directamente sobre os provetes extraídos
- 2) Sobre os provetes que tenham permanecido submersos durante 24 horas em água à temperatura de 60 °C.

Não mais de 20 % dos valores individuais da amostra deverão ser inferiores aos valores prescritos no quadro 2.18 para os casos de penalização.

Além disso, a resistência média dos provetes húmidos deverá ser sempre superior a 75% da resistência a seco.

Em Brisa (2003) prevê-se ainda que se não forem cumpridos os valores anteriores procede-se da seguinte maneira:

- Se a resistência média em seco, ou húmido, da mistura for inferior ao limite de penalização, será levantada a camada de mistura betuminosa correspondente ao lote controlado mediante fresagem e será reposta à conta do Empreiteiro;

- Se a resistência média em seco, ou húmido, estiver entre os níveis de aceitação e penalização, será aplicada uma penalização de 10 % à camada de mistura betuminosa correspondente ao lote controlado;
- Se não cumprir a prescrição de 75 % da resistência conservada, ou o número de valores individuais defeituosos superar os 20 %, aplicar-se-á uma penalização de 3 % à camada de mistura betuminosa correspondente ao lote controlado.

### 2.5.9. Custos

De acordo com PIARC (2002), os custos relacionados com a produção de misturas betuminosas com reciclagem a quente têm origem em diversos factores tais como:

- Disponibilidade de misturas fresadas;
- Procura de misturas fresadas;
- Preço do betume;
- Outras saídas para as misturas fresadas:
  - Reutilização sem processamento;
  - Misturas a frio com as misturas fresadas;
  - Depósitos em vazadouros.

Estas saídas alternativas têm como atractivo o facto de poderem ser usadas sem investimentos, conhecimentos ou custos significativos.

Os custos extra directamente associáveis à técnica da reciclagem a quente em relação à produção tradicional de misturas betuminosas são (PIARC, 2002):

- Adaptação e extensão da central de misturas betuminosas;
- Capacidades de armazenamento extra de outros materiais;
- Depreciação da adaptação e extensão da central;
- Trabalho extra;
- Controlo da qualidade extra das misturas fresadas;
- Controlo da qualidade extra das misturas recicladas.

Existem ainda outros factores que influenciam os custos associados à reciclagem a quente que são a legislação existente, a aceitação por parte dos donos de obra do recurso a esta técnica, a procura de misturas betuminosas na área de actuação da empresa e o desenvolvimento da técnica de reciclagem nessa mesma área. Estes factores tornam variáveis os custos dependendo da área ou do país de actuação em causa.

Inicialmente as misturas betuminosas fresadas eram depositadas em vazadouro. Posteriormente devido à crise petrolífera da década de 70 a poupança de custos com o betume constituía uma forte vantagem para o desenvolvimento da técnica de produção de misturas betuminosas com a adição de misturas fresadas. No entanto, a partir do momento em que um material passa a ter uma utilidade passa a ser procurado para ser utilizado e consequentemente ganha um valor económico e passa a ter um preço mais elevado.

Os investimentos na tecnologia aumentaram à medida que os requisitos eram mais exigentes (PIARC, 2002). A depreciação do custo de investimento amortizado sobre a produção total da central é bastante fácil. No entanto, se não for possível produzir misturas betuminosas com reciclagem com frequência, a amortização pode ser

dificultada. O mesmo acontece para o trabalho extra, isto é, se a capacidade de trabalho acrescida para se produzir misturas com reciclagem for frequentemente utilizada não haverá dificuldade em suportá-la. O factor decisivo para a frequência da utilização desta técnica é a aceitabilidade desta técnica por parte dos donos de obra.

Assim, de acordo com PIARC (2002), em países onde a produção de misturas betuminosas com reciclagem seja usual, não existe actualmente uma diferença significativa de preço entre as misturas betuminosas convencionais e as misturas betuminosas com reciclagem. Vários países dão conta de poupança com misturas com reciclagem comparada com as misturas betuminosas tradicionais, em valores que vão de 5 a 12 %. De qualquer forma, para além das questões económicas crescem ainda os benefícios ambientais, que são muito importantes em particular no momento actual.

O sucesso da técnica de reciclagem está dependente da transmissão e circulação de (PIARC, 2002):

- Conhecimento;
- Legislação e especificações;
- Aceitação por parte de todos os tipos de clientes;
- Equipamento;
- Produção e processamento de misturas betuminosas de forma rigorosa;
- Recomendação de misturas com reciclagem em documentos normativos e legislativos.



### 3. Misturas betuminosas a quente: materiais constituintes e formulação laboratorial

#### 3.1. Introdução

Como ferramenta na especificação de uma certa qualidade em pavimentos rodoviários é frequentemente utilizado o conceito de “pirâmide de exigências”. Este “modelo de pensamento” é usado na Holanda (PIARC, 2002).



Figura 3.1 – Pirâmide de exigências (PIARC, 2002)

Na pirâmide representada na figura 3.1 são definidos os seguintes níveis, do topo para a base:

- Nível 1: exigências do utente (ex. segurança, conforto, acessibilidade, tempo de viagem);
- Nível 2: exigências funcionais (ex. atrito, regularidade, redução do ruído, número de vias);
- Nível 3: exigências estruturais da construção (ex. resistência, capacidade de carga, durabilidade);
- Nível 4: propriedades elementares dos materiais (ex. resistência à fadiga e às deformações permanentes, espessura);
- Nível 5: exigências das matérias-primas e materiais de construção (ex. composição da mistura, porosidade, resistência ao choque, resistência ao polimento, propriedades reológicas do ligante, compatibilidade).

Este modelo permite transpor para decisões a serem tomadas pelos técnicos de estradas decisões políticas que são normalmente decisões tomadas ao mais alto nível. A partir

deste método um técnico de estradas pode determinar as exigências ao mais baixo nível através de relações entre níveis definidas em modelos.

De acordo com PIARC (2002) a relação entre os níveis 4 e 5 (níveis inferiores) corresponde aos métodos de formulação das misturas betuminosas. Um outro exemplo é o método construtivo como modelo para a relação entre o nível 4 e o nível 3. Se as especificações são atingidas ao mais baixo nível são produzidas misturas betuminosas com propriedades específicas. Estas propriedades são usadas em modelos de concepção para cálculo do pavimento para cumprir a capacidade de carga para um certo volume de tráfego expectável durante a vida útil desejada e tendo características suficientes de superfície para possibilitar uma viagem confortável e segura (PIARC, 2002).

Na maioria dos países os requisitos sobre misturas betuminosas são especificados neste momento ao mais baixo nível (nível 5). No passado os requisitos para a construção de estradas foram formulados apenas para o nível de topo (nível 1). Posteriormente devido ao desenvolvimento de modelos que representam as relações empíricas entre níveis foi possível especificar requisitos ao nível da base. Estes modelos são fortemente empíricos o que significa que são válidos apenas para materiais aprovados e conhecidos.

As misturas betuminosas são constituídas por agregados, betume e vazios. As suas propriedades mecânicas dependem das proporções relativas destes componentes e das suas características. A composição de uma mistura betuminosa é geralmente estabelecida com base num estudo de formulação no qual se definem os componentes a utilizar na mistura e suas proporções de acordo com as especificações do Caderno de Encargos.

Na figura 3.2 está representada a composição volumétrica de uma mistura betuminosa.

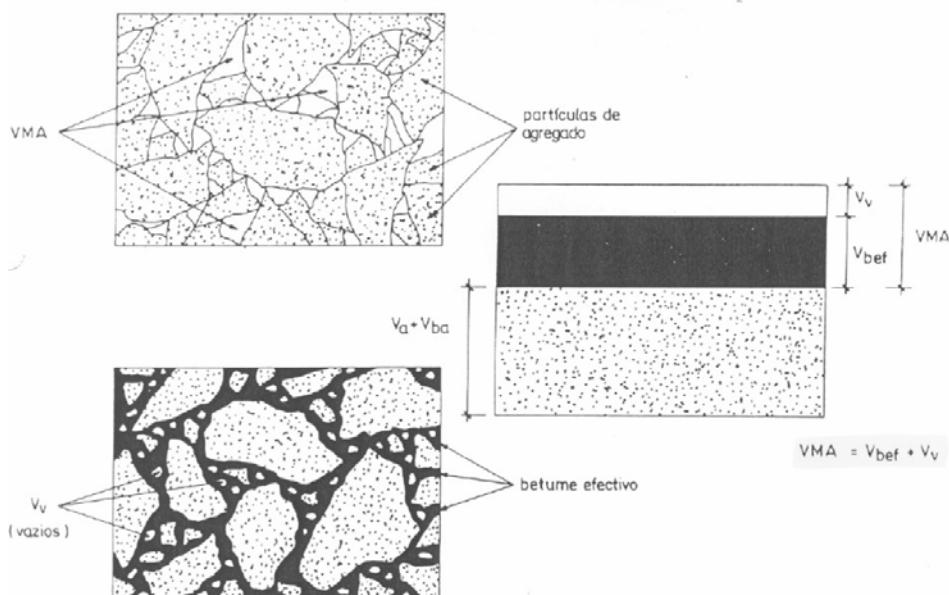


Figura 3.2 - Representação da composição volumétrica de uma mistura betuminosa (Azevedo, 1993)

A porosidade corresponde aos espaços vazios entre partículas de agregado revestidas por betume. O volume de vazios na mistura de agregados (VMA) corresponde aos

espaços entre partículas de agregados numa mistura compactada, isto é, ao volume de vazios (ou porosidade) acrescido do volume efectivo de betume. O volume efectivo de betume corresponde à parte do volume de betume que não foi absorvido pelos agregados e que garante a ligação entre as partículas de agregado.

Do ponto de vista do volume de vazios ( $V_v$ ) as misturas betuminosas podem ser classificadas em:

- Misturas betuminosas densas:  $V_v < 10\%$  (4 a 6%);
- Misturas betuminosas semi-densas:  $10\% < V_v < 15\%$ ;
- Misturas abertas:  $V_v > 15\%$  (20 a 30%).

As misturas betuminosas aplicadas em pavimentos devem obedecer a determinadas exigências de qualidade para que durante a sua vida útil desempenhem de forma adequada as funções das camadas de pavimento em que se inserem. De entre essas exigências destacam-se as seguintes (Antunes *et al.*, 2003):

- a) Durante a fase construtiva:
  - Trabalhabilidade;
  - Manutenção das características durante o fabrico e aplicação.
- b) Após a entrada em serviço:
  - Características estruturais
    - Rigidez;
    - Resistência ao fendilhamento;
    - Resistência às deformações permanentes.
  - Características superficiais
    - Coeficiente de atrito;
    - Drenagem superficial (macro-textura);
    - Minimização do encadeamento e reflectividade;
    - Minimização do desgaste dos pneus e da resistência ao rolamento;
    - Minimização do ruído de rolamento.
  - Durabilidade
    - Resistência às acções climáticas;
    - Resistência a produtos químicos;
    - Resistência ao desgaste induzido pela passagem dos veículos;
    - Resistência às acções internas (expansão, contracção);
    - Compatibilidade entre o agregado e o ligante betuminoso.

As misturas betuminosas diferem entre si de acordo com a aplicação a que se destinam essencialmente em termos do tipo do agregado utilizado (em particular a sua natureza e granulometria), do tipo de ligante betuminoso e do método de fabrico e aplicação em obra.

Nos pontos 3.2 e 3.3 deste capítulo procura-se descrever as principais características e ensaios a realizar sobre os materiais constituintes das misturas betuminosas: agregados e betume. No ponto 3.4 descrevem-se os principais métodos de formulação de misturas betuminosas.

Tendo em vista a supressão de barreiras técnicas que permitam a comercialização dos produtos no seio da comunidade Europeia o Conselho das Comunidades Europeias adoptou a Directiva nº 89/106/CEE, de 21 de Dezembro de 1988, vulgarmente designada por Directiva dos Produtos de Construção. Esta Directiva foi alterada pela

Directiva 93/68/CEE, em 22 de Junho de 2003. A transposição destas directivas para o direito nacional foi realizada através do Decreto-Lei nº 113/93, de 10 de Abril de 1993.

A Directiva dos Produtos de Construção estabelece, em linhas gerais, que os produtos de construção comercializados na Comunidade Europeia, quer sejam os empreendimentos de construção ou os materiais e sistemas neles incorporados, devem ser concebidos e realizados de forma a satisfazer certas condições reputadas de interesse público. Essas condições, consideradas como requisitos essenciais são: Resistência mecânica e estabilidade; Segurança contra incêndios; Higiene, saúde e ambiente; Segurança na utilização; Protecção contra o ruído e Economia de energia e retenção de calor.

A marcação CE consiste num instrumento de regulação da livre comercialização de produtos na Comunidade Europeia e exprime, por declaração do industrial, com ou sem intervenção de uma entidade certificadora, o cumprimento das directivas comunitárias aplicáveis.

A Directiva dos Produtos de Construção implica a necessidade de dar cumprimento às normas Europeias que especificam os produtos e que materializam a satisfação desses requisitos essenciais, normas estas que se designam por “normas harmonizadas”, bem como a adopção de todas as normas de ensaio que lhes estão associadas.

Actualmente a marcação CE já é obrigatória para o produto agregados sendo que nos próximos anos também incidirá sobre os produtos betume e misturas betuminosas. Deste modo, nos pontos seguintes deste capítulo, serão referidas as normas Europeias relativas aos produtos agregados, betumes e misturas betuminosas.

### 3.2. Agregados

Os agregados constituem 90 a 95 % da massa das misturas betuminosas e cerca de 75 a 85 % do seu volume. Deste modo constituem o maior componente das misturas betuminosas sendo que as suas características são de uma importância fundamental para o comportamento das misturas betuminosas em que se inserem.

Habitualmente os agregados utilizados na construção rodoviária são agregados provenientes do processamento mecânico de material rochoso. As rochas de acordo com o seu processo de formação podem ser ígneas, sedimentares e metamórficas.

As rochas ígneas formam-se por arrefecimento do magma na sua ascensão desde as zonas mais profundas do planeta. Podem ser intrusivas (ou plutónicas) ou extrusivas (ou vulcânicas) consoante se o magma solidificou lentamente em profundidade ou bruscamente à superfície. As rochas sedimentares formam-se à superfície da terra por acumulação de fragmentos de rochas pré-existentes (detríticas), por acumulação de restos de seres vivos (orgânicas) ou por precipitação química. As rochas metamórficas formam-se por alteração de rochas existentes por modificação das condições de temperatura e pressão que, a ocorrer, promovem alterações mineralógicas, estruturais e texturais dando origem a uma nova rocha.

Em Castelo Branco (2002) são apresentados para cada uma das três famílias de rochas descritas, alguns tipos de rochas e o seu potencial para a produção de agregados (figuras 3.3 a 3.5).

| ROCHAS ÍGNEAS     |              |                 |
|-------------------|--------------|-----------------|
| GRUPO             | ROCHA        | POTENCIAL       |
| Rochas Vulcânicas | Basalto      | Elevado a Médio |
|                   |              |                 |
| Rochas Plutónicas | Diorito      | Elevado         |
|                   | Granodiorito |                 |
|                   | Granito      |                 |
|                   | Sienito      |                 |
|                   | Outras       |                 |

Figura 3.3 – Potencial das rochas ígneas na produção de agregados (Castelo Branco, 2002)

| ROCHAS METAMÓRFICAS |               |                 |
|---------------------|---------------|-----------------|
| GRUPO               | ROCHA         | POTENCIAL       |
| Rochas diversas     | Corneana      | Elevado a Baixo |
|                     | Gneisse       |                 |
|                     | Metaquartzito |                 |
|                     | Xisto         |                 |
|                     | Micaxisto     |                 |

Figura 3.4 – Potencial das rochas metamórficas na produção de agregados (Castelo Branco, 2002)

| ROCHAS SEDIMENTARES                |                   |                 |
|------------------------------------|-------------------|-----------------|
| GRUPO                              | ROCHA             | POTENCIAL       |
| Rochas Detríticas não consolidadas | Areia             | Elevado         |
|                                    | Solos aluvionares | Elevado a Médio |
| Rochas de Precipitação Química     | Calcário          | Elevado         |
|                                    | Dolomito          | Elevado a Médio |
|                                    | Calcário margoso  | Médio a Baixo   |
|                                    | Marga Calcária    |                 |
|                                    | Marga             |                 |
| Outras                             | Grauvaque         | Médio a Baixo   |
|                                    | Conglomerado      |                 |
|                                    | Arenito           |                 |

Figura 3.5 – Potencial das rochas sedimentares na produção de agregados (Castelo Branco, 2002)

Os agregados calcários provenientes da britagem de rochas desse tipo são os mais abundantes na Península Ibérica. Devido a essa abundância e ao potencial para a produção de agregados que lhes está associado, a sua aplicação em camadas dos pavimentos generalizou-se. No entanto, pelo facto de serem materiais facilmente polimentáveis, não são adequados a camadas de desgaste, sendo normalmente utilizados nestas camadas os agregados provenientes de rochas ígneas.

A norma Portuguesa (e Europeia) NP EN 13043 – “Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação” estabelece uma série de definições em relação aos agregados a utilizar nas misturas betuminosas. Com o objectivo de clarificar alguns conceitos apresentam-se aqui algumas definições estabelecidas na norma:

- Agregado – material granular utilizado na construção. O agregado pode ser natural, artificial e reciclado.
- Agregado natural – agregado de origem mineral que foi sujeito apenas a processamento mecânico.
- Agregado artificial – agregado de origem mineral resultante de um processo industrial compreendendo modificações térmicas ou outras.
- Agregado reciclado – agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção.
- Dimensão do agregado – designação do agregado em termos das aberturas do peneiro inferior (d) e do superior (D), expressa como d/D. Esta designação admite a presença de algumas partículas retidas no peneiro superior (sobretamanhos) e de algumas partículas que passam no peneiro inferior (subtamanhos). A dimensão d, pode ser zero.
- Agregado grosso – designação dada aos agregados de maiores dimensões em que D é menor ou igual a 45 mm e d maior ou igual a 2 mm.
- Agregado fino – designação dada aos agregados com partículas de menores dimensões em que D é menor ou igual a 2 mm e em que a maior parte das partículas fica retida no peneiro de 0,063 mm. O agregado fino pode ser produzido a partir da desintegração natural da rocha ou do seixo e/ou da sua britagem, ou do tratamento dos agregados artificiais.
- Finos – fracção do agregado que passa no peneiro de 0,063 mm.
- Fíler – agregado cuja maior parte passa no peneiro com 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades.
- Fíler aditivado – fíler de origem mineral misturado com hidróxido de cálcio.
- Fíler comercial – fíler de origem mineral, produzido em separado.
- Agregado de granulometria extensa – agregado que consiste numa mistura de agregados grossos e finos. Pode ser produzido sem separação das fracções grossa e fina ou pela mistura de agregados grossos e agregados finos.
- Granulometria – distribuição dimensional das partículas que passam numa série especificada de peneiros, expressa pelas percentagens em massa.
- Subtamanho – parte do agregado que passa no peneiro de menor dimensão utilizado na definição da dimensão do agregado.
- Sobretamanho – parte do agregado que fica retida no peneiro de maior dimensão utilizado na definição da dimensão do agregado.

Podem então definir-se três grupos de agregados que são utilizados no fabrico das misturas betuminosas:

- Agregado grosso;
- Agregado fino;
- Fíler.

As características dos agregados podem dividir-se em dois grupos principais (Castelo Branco, 2002):

- Características independentes do processo de produção, como sejam:
  - As características químicas;
  - As características físicas;
  - As características mecânicas;
  - E as características relativas à alterabilidade.
- Características dependentes do processo de produção, como sejam:
  - As características relativas à forma das partículas;
  - E as características relativas ao estado de limpeza do agregado.

Para avaliação destas propriedades no âmbito da normalização Europeia existem grupos de normas de ensaio que se dedicam a estas propriedades e que constam do quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Grupos de normas Europeias de ensaio e respectivas propriedades

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| EN 932  | Ensaio das propriedades gerais dos agregados                     |
| EN 933  | Ensaio das propriedades geométricas dos agregados                |
| EN 1097 | Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados        |
| EN 1367 | Ensaio das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados |
| EN 1744 | Ensaio das propriedades químicas dos agregados                   |

Os agregados para serem comercializados tem de lhes colocar a marca CE o que obriga a um conjunto de ensaios iniciais e a um conjunto de ensaios durante a comercialização com uma determinada periodicidade de acordo com as normas Europeias. Para as misturas betuminosas os ensaios a realizar e sua periodicidade constam na norma NP EN 13043.

Nos Cadernos de Encargos actuais (ex: JAE, 1998) e em APORBET (1998) as normas de ensaio especificadas referem ainda outros procedimentos. No quadro 3.2 constam os principais métodos de ensaio para as propriedades a avaliar de acordo com JAE (1998).

Quadro 3.2 – Normas de ensaio para caracterização de agregados para misturas betuminosas de acordo com o Caderno de Encargos da JAE (1998)

| Propriedades                                   | Normas            |
|------------------------------------------------|-------------------|
| Granulometria                                  | LNEC E 233        |
| Equivalente de areia                           | LNEC E 199        |
| Índices de lamelação e alongamento             | BS 812            |
| Densidade das partículas                       | NP 83             |
| Massa volumica e absorção de água de inertes   | NP 954; NP 581    |
| Determinação do valor de azul-de-metileno      | AFNOR 18-592      |
| Percentagem de material britado                | NLT 58            |
| Ensaio de desgaste na máquina de "Los Angeles" | LNEC E 237        |
| Ensaio de polimento acelerado do agregado      | Procedimento LNEC |

### 3.2.1. Agregados grossos e finos

#### Granulometria

Na análise granulométrica (neste tipo de materiais realizada por peneiração pela EN 933-1) o material que fica retido, por passagem numa série de peneiros de malhas de aberturas progressivamente decrescentes é pesado. A massa de agregado que fica retido em cada um desses peneiros pode ser expressa em percentagem da massa total da amostra de agregado ensaiada. A partir da percentagem de material retido pode determinar-se a percentagem do material que passa em cada peneiro. Uma forma de expressar o resultado deste ensaio é a curva granulométrica que relaciona a percentagem de material passado em cada peneiro com o logaritmo da abertura do peneiro num sistema de coordenadas rectangulares e dá uma ideia da distribuição dos tamanhos das partículas de agregado.

A curva granulométrica do conjunto dos agregados que compõem uma mistura betuminosa pode apresentar um aspecto contínuo, descontínuo ou uniforme. As granulometrias adoptadas em Portugal, nomeadamente em camadas de base, de regularização e de desgaste tradicional são predominantemente do tipo contínuo. As granulometrias descontínuas são utilizadas para fabrico de misturas betuminosas rugosas. A granulometria uniforme é utilizada na mistura betuminosa drenante.

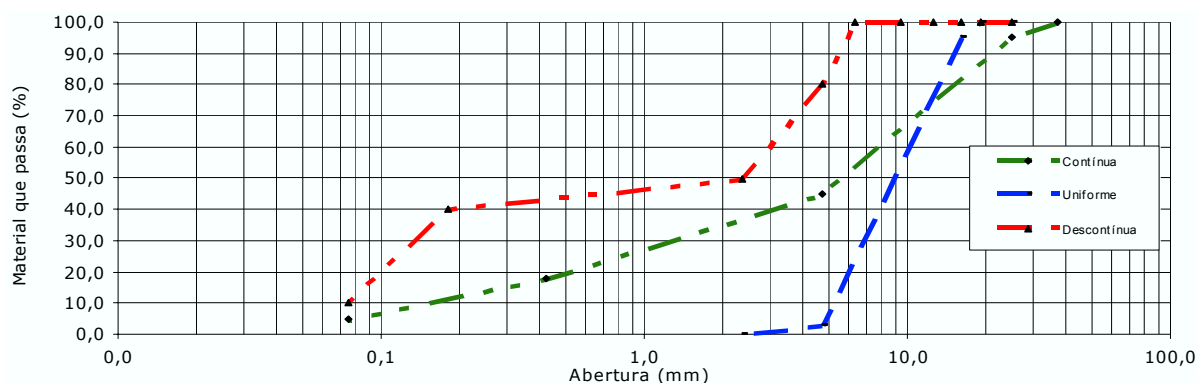


Figura 3.6 – Tipos de curvas granulométricas

A granulometria é uma das características mais importantes dos agregados para misturas betuminosas porque influencia de forma significativa as suas propriedades, como a rigidez, resistência à fadiga, resistência às deformações permanentes, durabilidade, permeabilidade e trabalhabilidade.

Outra característica geométrica importante é a dimensão máxima do agregado. Esta característica é importante para assegurar o bom desempenho das misturas betuminosas. A dimensão máxima do agregado não deve ser pequena demais para que não ocorram deformações permanentes excessivas. Por outro lado a dimensão máxima do agregado das misturas betuminosas é função da espessura da camada a que se destinam. Habitualmente considera-se que a dimensão máxima do agregado não deve exceder 1/3 da espessura da camada a construir.

#### Limpeza

A presença de elementos finos ou partículas argilosas na superfície dos agregados impede a ligação entre o betume e os agregados prejudicando o desempenho das

misturas betuminosas que se tornam menos duráveis. Deste modo os agregados devem cumprir os requisitos ao nível da limpeza.

As características de limpeza para os materiais finos que constituem os agregados para misturas betuminosas são avaliadas recorrendo-se ao ensaio de equivalente de areia (EN 933-8) ou ao ensaio de titulação pelo azul-de-metileno (EN 933-9). A nova especificação Europeia referente a agregados para misturas betuminosas prevê o ensaio de azul-de-metileno para caracterização da limpeza da fracção fina dos agregados e para o filer. Os cadernos de encargos actuais (ex: JAE (1998)) prevêem ensaios de determinação do Equivalente de Areia realizados sobre a mistura de agregados (sem adição de filer) e de Azul-de-metileno no material de dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$ .

### **Forma das partículas de agregado**

A forma do agregado grosso, afecta a resistência do esqueleto mineral da mistura devido à rotura que pode ocorrer das partículas lamelares e alongadas devido às acções dos equipamentos de compactação e do tráfego, podendo alterar a granulometria.

De acordo com Castelo Branco (2002) a forma das partículas pode ser avaliada pela sua dimensão (análise granulométrica), estado da superfície das partículas – rugosidade, angularidade e pelos índices de lamelação, alongamento e achatamento.

A presença de partículas com faces britadas e de textura rugosa proporcionam melhor interligação e maior atrito interno entre as partículas por aumentarem o número de pontos de contacto entre partículas.

De acordo com a normalização Europeia em vigor, estas características são evidenciadas por determinação do índice de forma (EN 933-4), do índice de achatamento (EN 933-3), da percentagem de partículas esmagadas ou parcialmente esmagadas e totalmente roladas (EN 933-5) e da angulosidade do agregado fino (933-6). Nos Cadernos de Encargos ainda em vigor estas características são evidenciadas por determinação dos índices de lamelação e alongamento e impondo a utilização de uma percentagem mínima de material britado.

### **Resistência à fragmentação, ao desgaste por atrito e ao polimento**

Durante as operações de fabrico e compactação das misturas betuminosas os agregados são submetidos a diversas acções mecânicas às quais deverão resistir sem sofrerem alterações significativas. Os agregados para misturas betuminosas devem ainda resistir ao desgaste provocado pela passagem dos veículos sobre os pavimentos para que a mistura betuminosa conserve as suas características mecânicas durante a sua vida útil.

Na normalização Europeia em vigor a resistência à fragmentação do agregado grosso é avaliada no ensaio de “Los Angeles” (EN 1097-2) e a resistência ao desgaste por atrito é avaliada no ensaio “Micro-Deval” (EN 1097-1). A resistência do agregado a perder a sua aspereza inicial, que permite que o pavimento possua uma rugosidade superficial adequada conferindo-lhe adequadas características anti-derrapantes, é avaliada no ensaio de resistência ao polimento do agregado grosso (EN 1097-8). Este ensaio é realizado em agregados a utilizar em camadas de desgaste.

Nos Cadernos de Encargos actuais são geralmente especificados valores máximos para o coeficiente de “Los Angeles” em relação aos agregados grossos das misturas

betuminosas e valores mínimos para o coeficiente de polimento acelerado para agregados para camadas de desgaste.

A relação entre o valor obtido no ensaio de “Los Angeles” e o bom comportamento em serviço nem sempre é uma relação directa. Os limites para o coeficiente de “Los Angeles” devem ter em conta a experiência local com agregados similares. Para os agregados graníticos nos quais se obtêm elevados coeficientes de “Los Angeles” mas que exibem bom comportamento em serviço, os cadernos de Encargos (ex: JAE, 1998) abrem excepções para esta propriedade permitindo um valor do coeficiente de “Los Angeles” mais elevado.

### Massa volúmica e absorção

O conhecimento da massa volúmica dos agregados empregues em misturas betuminosas é importante para o estabelecimento de relações entre massa e volume das misturas betuminosas. De acordo com a EN 1097-6 são definidas diferentes massas volúmicas para os agregados: massa volúmica das partículas secas em estufa, massa volúmica do material impermeável das partículas e massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca. As diferentes massas volúmicas distinguem-se por considerarem volumes diferentes (figura 3.7). A massa volúmica seca em estufa considera a massa da amostra seca em estufa e o volume das partículas de agregado incluindo os poros internos fechados e os poros acessíveis à água. A massa volúmica do material impermeável das partículas considera a massa da amostra seca em estufa e o volume das partículas de agregado incluindo os poros internos fechados mas excluindo os poros acessíveis de água. A massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca difere da massa volúmica seca na massa considerada pois considera a massa da amostra de agregado e a massa de água nos poros permeáveis à água.

O betume apresenta uma viscosidade superior à da água, não ocupando por isso todos os poros que são acessíveis à água (Azevedo, 1993). Assim, aparece o conceito de massa volúmica efectiva do material que tem em conta o volume do material impermeável e o volume dos poros permeáveis à água mas não preenchidos por betume.

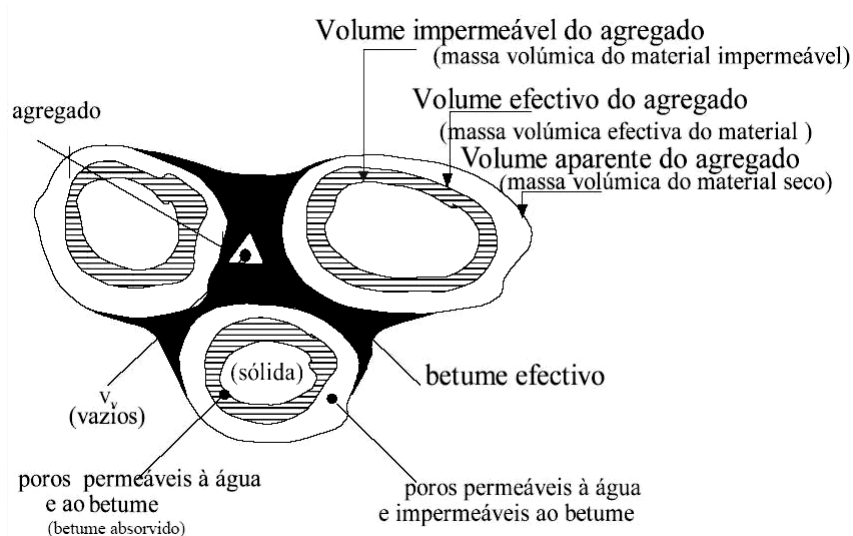


Figura 3.7 – Representação gráfica das massas volúmicas das partículas de agregados (Azevedo, 2004)

Do ponto de vista das propriedades mecânicas o betume que efectivamente importa considerar é o betume efectivo e os vazios a considerar são os vazios reais. O betume efectivo é que faz a ligação entre as partículas de agregados conferindo à mistura betuminosa determinadas propriedades mecânicas.

### **Outras propriedades**

Existem ainda outras propriedades que influenciam o comportamento dos agregados a utilizar como material de construção em misturas betuminosas. Essas propriedades devem ser avaliadas de acordo com a norma NP EN 13043 e incidem sobre diversas características que interessam a este tipo de aplicação do produto agregados.

#### **3.2.2. Fíler**

O fíler que compõe as misturas betuminosas pode ser:

- Fíler recuperado, proveniente da extracção das poeiras que juntamente com o ar e o vapor de água resultam do processo de secagem e aquecimento dos agregados durante o fabrico das misturas betuminosas nas centrais de produção de misturas betuminosas;
- Fíler comercial, que pode ser constituído por pó de calcário, cimento Portland, ou cal hidráulica devidamente apagada.

O fíler actua conjuntamente com o ligante betuminoso formando um “mástique” que liga as restantes partículas de agregados presentes na mistura betuminosa. A presença do fíler nas misturas betuminosas rigidifica a mistura betuminosa, aumentando o módulo de rigidez. O efeito rigidificante do fíler das misturas betuminosas, se for excessivo, pode ter como consequência um fendilhamento precoce das camadas betuminosas do pavimento devido à sua fragilização.

As propriedades a avaliar no fíler que constam na norma NP EN 13043 são propriedades geométricas, mecânicas e físicas e as propriedades químicas. Destas destacam-se as propriedades relacionadas com as características rigidificantes que são avaliadas nos ensaios de determinação dos “Vazios do fíler seco compactado (Rigden)” (EN 1097-4) e da “Variação do temperatura anel e bola”.

Em Portugal, as propriedades especificadas nos Cadernos de Encargos de obras de pavimentação para os materiais a utilizar como fíler de misturas betuminosas, são essencialmente a granulometria e a limpeza (JAE, 1998).

### **3.3. Betume**

#### **3.3.1. Introdução**

Os ligantes betuminosos podem ser classificados quanto à sua proveniência em naturais ou processados.

Os ligantes betuminosos naturais podem ser os asfaltos naturais e as rochas asfálticas. Os asfaltos naturais surgem na natureza em lagos como acontece em Trinidad e Tobago e nas Bermudas. De acordo com Juiz (2003) as rochas asfálticas podem ser extraídas de minas ou de pedreiras a céu aberto estando os principais depósitos situados em Gard (França), Neuchâtel (Suíça), Ragusa (Itália) e Ambrizete (Angola).

A maior parte dos ligantes betuminosos utilizados na pavimentação são processados podendo ser provenientes da destilação do petróleo (betume) e da destilação da hulha (alcatrão). Devido a problemas ambientais a utilização do alcatrão não é permitida em muitos países. Assim a maior parte do ligante betuminoso utilizado na pavimentação é o betume proveniente do petróleo.

Análises elementares de betumes asfálticos fabricados a partir de diversos crudes mostram que a maioria dos betumes asfálticos podem conter (Azevedo, 1993):

|            |    |   |       |
|------------|----|---|-------|
| Carbono    | 82 | a | 88 %  |
| Hidrogénio | 8  | a | 11 %  |
| Enxofre    | 0  | a | 6 %   |
| Oxigénio   | 0  | a | 1,5 % |
| Nitrogénio | 0  | a | 1 %   |

Cerca de 85% do betume obtido por destilação do petróleo é utilizado como material de pavimentação. O betume é constituído por carbono e hidrogénio numa percentagem de 90 a 95 % sendo por isso considerado um hidrocarboneto.

De acordo com Azevedo (2003b), as principais características dos ligantes betuminosos são:

- Durabilidade (reologia, coesão, adesão);
- Viscosidade (comportamento com a temperatura);
- Coesão (resistência e ligação);
- Adesão (capacidade de aderir ou ligar);
- Trabalhabilidade (mistura, colocação e compactação).

Uma das características mais importantes do betume é a sua viscosidade. O betume a temperaturas elevadas comporta-se como um líquido viscoso permitindo o envolvimento dos agregados e o fabrico e aplicação das misturas betuminosas. Para além do aquecimento existem outras formas de redução da viscosidade para o fabrico das misturas betuminosas que são a fluidificação, a emulsificação e mais recentemente a espuma de betume.

Nas misturas betuminosas produzidas a quente o processo de redução da viscosidade do betume é o aquecimento. Após o fabrico da mistura betuminosa, durante a aplicação o betume vai arrefecendo tornando-se mais viscoso, actuando como aglutinante e conferindo à mistura betuminosa a coesão necessária ao desempenho da sua função na estrutura do pavimento.

O betume é um material de natureza visco-elástica pelo que o seu comportamento depende da temperatura e do tempo de aplicação de carga. O betume quando sujeito a altas temperaturas, de acordo com o que já se referiu, comporta-se como um líquido viscoso semelhante a um fluído Newtoniano tal como o ar e a água. A baixas temperaturas comporta-se como um sólido elástico, frágil e muito fendilhável quando carregado. Para temperaturas intermédias, que são as ocorrem na maior parte da vida dos betumes, o comportamento do betume pode ser definido com o modelo clássico da mola e amortecedor em paralelo. Este modelo procura simular a deformação elástica de recuperação imediata e a recuperação viscosa. A estas deformações há ainda a somar alguma deformação plástica não recuperável.

Outro aspecto importante do comportamento do betume tem a ver com o seu envelhecimento. O envelhecimento do betume pode ocorrer principalmente por quatro processos: volatilização, oxidação, endurecimento físico e endurecimento por exsudação. A volatilização ocorre quando há perda dos componentes voláteis do betume a altas temperaturas. A oxidação ocorre dado que o betume é composto por moléculas orgânicas que em contacto com o oxigénio oxidam. O endurecimento físico ocorre quando o betume é exposto a baixas temperaturas durante longos períodos de tempo. O endurecimento por exsudação ocorre na mistura betuminosa quando um componente oleoso do betume se movimenta para os poros existentes no agregado. O envelhecimento do betume torna-o mais duro e portanto mais frágil conferindo à mistura betuminosa um pior comportamento mecânico.

Habitualmente divide-se o betume em dois grupos químicos: os asfaltenos e os maltenos. Os maltenos são ainda divididos em três fracções: aromática, saturada e resina.

Os asfaltenos são sólidos amorfos, insolúveis no heptano normal e são de cor preta ou castanha. São constituídos para além de carbono e hidrogénio, por algum nitrogénio, enxofre e oxigénio. São materiais aromáticos complexos de elevada polaridade com pesos moleculares bastante elevados sendo que a quantidade em que estão presentes influencia o comportamento do betume aumentando a dureza com uma maior quantidade. O betume é constituído numa percentagem de 5 a 25 % por asfaltenos.

As resinas são sólidos ou semi-sólidos solúveis no heptano normal, de cor castanha escura, contendo grandes quantidades de hidrogénio e carbono e pequenas quantidades de oxigénio, enxofre e nitrogénio. São muito polarizadas o que as torna muito adesivas. As resinas são agentes dispersores e peptizadores para os asfaltenos sendo que a proporção entre resinas e asfaltenos define se o betume apresenta uma característica do tipo solução (SOL) ou gelatinosa (GEL).

A fracção aromática, solúvel no tolueno, inclui os componentes aromáticos nafténicos, que são os de peso molecular mais baixo nos betumes. A fracção aromática representa a maior proporção do meio de dispersão para os asfaltenos peptizados. A fracção aromática representa 40 a 65 % do betume asfáltico e são líquidos viscosos de cor castanha.

A fracção saturada é constituída por óleos viscosos não polarizados de cor creme ou branca, é solúvel no heptano normal e inclui hidrocarbonetos alifáticos predominantemente leves. O betume é constituído numa percentagem de 5 a 20 % pela fracção saturada.

Quando se mantém constante a quantidade de asfaltenos e se varia a concentração das outras fracções verifica-se que (Azevedo, 1993):

- Aumentando a quantidade de aromáticos, mantendo constante a relação saturados/resinas, resulta pouca influência na reologia, apenas uma ligeira redução na susceptibilidade ao corte;
- Aumentando a quantidade de saturados, mantendo constante a relação aromáticos/resinas, o betume torna-se mais mole;
- A adição de resinas endurece o betume, reduz o índice de penetração e a susceptibilidade ao corte, devido ao aumento da viscosidade.

A quantidade de asfaltenos influencia de forma muito importante a reologia dos betumes sendo que, mantendo a temperatura constante, a viscosidade dos betumes aumenta com a concentração de asfaltenos.

As proporções dos diferentes grupos químicos variam em relação ao betume original com o decorrer do tempo e durante as operações de fabrico, aplicação e vida em serviço. A figura 3.8 ilustra a evolução de um índice de envelhecimento, bem como a presença dos diferentes grupos químicos com o tempo.

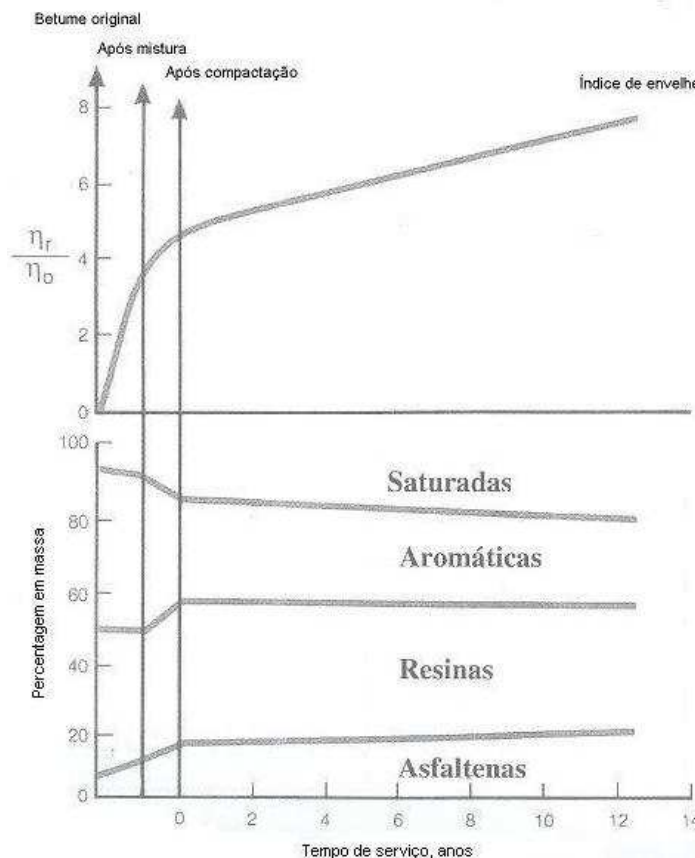


Figura 3.8 – Variação da composição de um betume asfáltico durante as operações de mistura e compactação da mistura betuminosa e durante o serviço (Shell, 2003)

O betume é habitualmente controlado através das suas propriedades físicas. Tradicionalmente essas propriedades são a penetração, a viscosidade e a temperatura de amolecimento. Esta abordagem que é a normalmente usada, em particular em Portugal, não é muito realista. Em primeiro lugar não são avaliadas directamente as propriedades que efectivamente interessam para o comportamento do betume no pavimento. Em segundo lugar porque o betume tem um comportamento variável com a temperatura pelo que a determinação da penetração à temperatura de 25° C poderá não evidenciar o betume com melhor comportamento às temperaturas previstas para o local de aplicação.

As deficiências do sistema penetração, viscosidade e temperatura de amolecimento originaram um programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) iniciado em 1987 e cujo produto foram novas especificações e ensaios para avaliar as propriedades dos betumes que constituem o sistema SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*).

Os ensaios e as especificações dos betumes assim definidas aplicam-se a betumes normais e modificados. Nesta metodologia o critério especificado permanece constante mas muda a temperatura à qual deve ser atingido. Isto permite ter em conta o local onde vai ser utilizado o betume.

Os méritos desta metodologia para betumes são:

- As propriedades medidas podem ser directamente relacionadas com o desempenho em serviço;
- As temperaturas de ensaio são as mesmas que ocorrem em serviço.

Os ensaios são idealizados para simular as três fases da vida do betume (figura 3.9):

1. Transporte, armazenamento e manuseamento;
2. Fabrico e aplicação;
3. Serviço no pavimento.

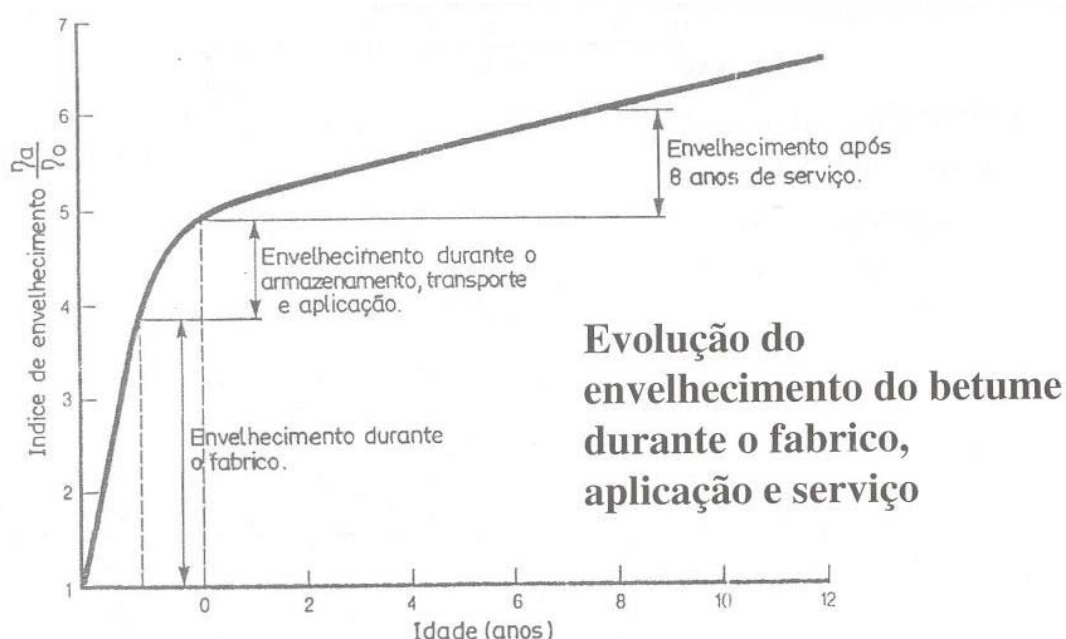


Figura 3.9 – Envelhecimento do betume durante o fabrico, armazenamento, transporte, aplicação e serviço (Azevedo, 1993)

### 3.3.2. Metodologia tradicional

Na normativa Europeia no âmbito da Marcação CE os produtos betumes para pavimentação, betumes modificados e betumes duros são especificados em normas diferentes e que são respectivamente a EN 12591, a prEN 14023 e a prEN 13924. Nestas normas são definidas as designações dos produtos, as propriedades a ensaiar e as especificações por propriedade.

Em Portugal os betumes para pavimentação seguem a especificação do LNEC E 80, cuja última revisão foi realizada em 1997 tendo por base a norma Europeia EN 12591.

Para os betumes modificados não existe em Portugal nenhuma norma, sendo que as especificações a que os mesmos devem obedecer se encontram nos Cadernos de Encargos das obras ou em APORBET (1998).

As propriedades e ensaios (segundo a normativa Europeia) que constam da especificação LNEC E 80 e EN 12591 sobre betumes para pavimentação são as seguintes (existem normas equivalentes nos Estados Unidos da América (normas ASTM) que também são apontadas na especificação LNEC E 80):

- Penetração (EN 1426)

Este ensaio permite classificar os betumes quanto à sua rigidez. O ensaio consiste em medir a profundidade de penetração que uma agulha normalizada com 100g atinge à temperatura de 25 °C durante 5 segundos. O resultado expressa-se em décimas de milímetro sendo que, quanto menor for a penetração, mais duro é o betume e consequentemente mais rígido e frágil.

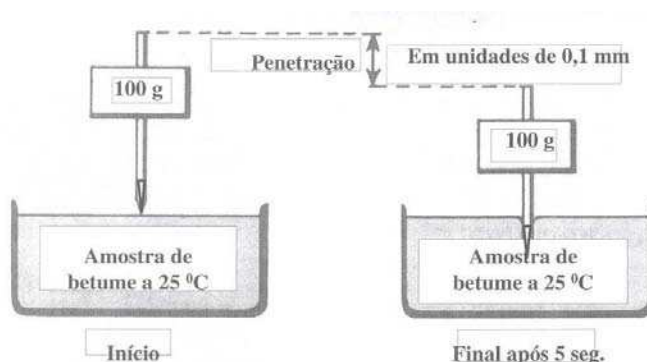


Figura 3.10 - Ensaio de penetração de betumes (Azevedo, 2003b)

- Temperatura de amolecimento (EN 1427)

A temperatura de amolecimento, também designada temperatura anel e bola (devido às características do próprio ensaio) permite determinar a temperatura a partir da qual o betume passa do estado sólido para o estado líquido. O ensaio consiste em aquecer uma amostra de betume inserida num anel e sobre a qual está apoiada uma bola com 3,5 gramas. À medida que a temperatura aumenta o betume vai amolecendo e sob a acção da massa da bola vai caindo até atingir uma placa colocada a uma distância definida. A temperatura a que esse momento ocorre é o resultado do ensaio. Os betumes mais duros, com menor penetração, têm temperaturas de amolecimento maiores.

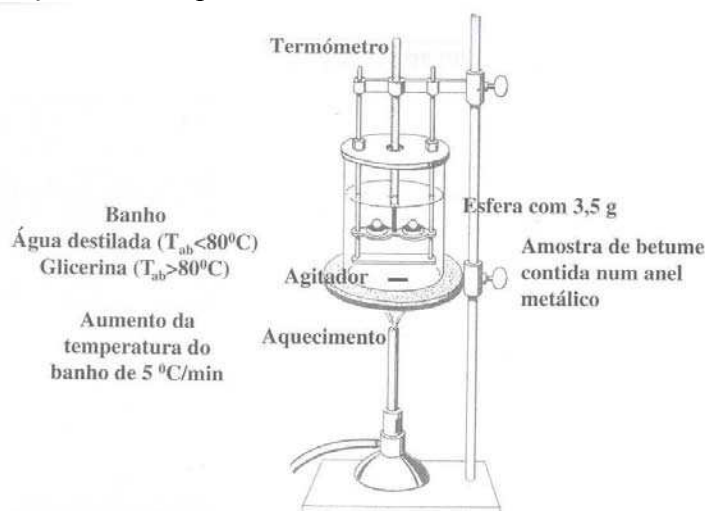


Figura 3.11 – Determinação da temperatura de amolecimento (Azevedo, 2003b)

- Viscosidade cinemática (EN 12595)

O betume é um material que à temperatura ambiente apresenta um comportamento viscoso. Para que possa adquirir uma menor viscosidade, que lhe permita obter uma trabalhabilidade suficiente para ser bombeado, manuseado e para que possa envolver os agregados um dos processos é o aquecimento. Este ensaio pretende avaliar a trabalhabilidade dum betume à temperatura de aplicação que é considerada neste ensaio de 135 °C. Este ensaio permite determinar as temperaturas ideais para mistura dos agregados com o betume e para compactação da mistura betuminosa.

- Solubilidade em tolueno ou xileno (EN 12592)

O betume é um material que se dissolve em alguns solventes orgânicos, como são o tolueno e o xileno. Através deste ensaio torna-se possível detectar a presença de outros compostos (como por exemplo compostos inorgânicos) que a existir são considerados impurezas.

- Temperatura de inflamação (EN 22592)

A temperatura de inflamação corresponde à temperatura à qual o material se inflama quando submetido à acção de um fonte externa de chama. Este ensaio é particularmente adequado para betumes fluidificados, dado que, os fluidificantes (naftas, gasolina e petróleo) são normalmente inflamáveis a baixas temperaturas. Este aspecto suscita cuidados de segurança adicionais com este tipo de materiais.

- Resistência ao endurecimento

O betume nas diversas operações de armazenamento, fabrico da mistura betuminosa, colocação no pavimento e ao longo da vida em serviço do pavimento vai endurecendo. Este ensaio permite avaliar o endurecimento durante os processos de armazenamento e fabrico. O endurecimento é caracterizado através da variação da massa que ocorre nos ensaios RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*, EN 12607-1) ou TFOT (*Thin Film Oven Test*, EN 12607-2). O ensaio consiste em sujeitar uma película de betume a um aquecimento em estufa. No caso do ensaio RTFOT aplica-se também uma rotação e injeção de ar. O ensaio RTFOT é um ensaio mais agressivo porque o betume fixa sujeito a uma maior oxidação pela injeção de ar sobre uma película muito fina de betume à volta dos frascos. O ensaio RTFOT é o preconizado na metodologia do SUPERPAVE. A perda de massa após endurecimento corresponde à perda de massa após o ensaio TFOT ou RTFOT. A amostra de betume que resulta destes ensaios pode novamente ser analisada em termos de penetração e de temperatura de amolecimento como medida do seu endurecimento. Após o ensaio de endurecimento (RTFOT ou TFOT) a penetração do betume diminui e a temperatura de amolecimento aumenta. Para além do valor da penetração e do valor da temperatura de amolecimento interessa também determinar o valor do aumento da temperatura de amolecimento, isto é, a diferença entre os pontos de amolecimento inicial e final. Esta grandeza permite evidenciar qual a diferença que existe entre as temperaturas de passagem do estado sólido para o estado fluido antes e depois do endurecimento.

Na especificação LNEC E80 constam as propriedades, os métodos de ensaio, os tipos de betumes e as correspondentes exigências de conformidade. São definidas 8 classes que são designadas pelo intervalo da penetração admissível para essa classe. Por exemplo um betume 35/50 terá uma penetração situada entre 35 e 50 décimas de milímetro. A especificação LNEC E80 define os intervalos de valores que cada betume, de acordo com a sua classe de penetração, deverá cumprir.

Conforme foi referido, os betumes modificados tem as suas características especificadas no documento da APORBET (1998) e nos cadernos de encargos. Neste tipo de betumes realizam-se os ensaios de penetração, temperatura de amolecimento e de resistência ao endurecimento tal como nos betumes convencionais e realizam-se ainda os seguintes ensaios:

- Ductilidade (EN 13589)

Este ensaio é realizado sobre um provete de betume em que se aplica um esforço de tracção a uma velocidade de deformação constante de 5 cm/min e a uma temperatura de 25 °C. A ductilidade é definida como sendo a distância máxima (em centímetros) que o provete se deforma até se atingir a rotura.

- Ponto de fragilidade de *Fraass* (EN 12593)

Este ensaio tem como objectivo avaliar o comportamento do betume a baixas temperaturas. Consiste em determinar a temperatura à qual uma lâmina de betume, submetida à flexão, fendilha.

- Estabilidade ao armazenamento (EN 13399)

Este ensaio permite aferir a possibilidade de segregação de um dos constituintes, quer por deficientes densidades quer por fabrico deficiente. O ensaio consiste em colocar uma amostra de betume a 180 °C num tubo de alumínio na vertical durante três dias e de seguida retirá-la e deixá-la arrefecer até à temperatura ambiente. Nesse momento é dividida em três partes nas quais são realizados ensaios de penetração, temperatura de amolecimento e retorno elástico.

- Retorno elástico (EN 13398)

A elasticidade é um aspecto muito importante dos betumes modificados dado que muitas vezes é com esse objectivo que são utilizados. O ensaio consiste na aplicação de uma torção de 180 °C numa amostra de betume e na medição ao fim de trinta minutos do ângulo recuperado. O resultado do ensaio é expresso em percentagem do ângulo recuperado em relação inicialmente aplicado.

### 3.3.3. Metodologia baseada no desempenho

#### 3.3.3.1. Metodologia SUPERPAVE

Os ensaios realizados sobre o ligante no âmbito da metodologia SUPERPAVE são efectuados para quantificar a desempenho do betume em três fases: no estado original do betume, após o fabrico e colocação da mistura betuminosa e durante o envelhecimento em serviço. O ensaio RTFOT permite obter uma amostra que simula o envelhecimento durante o fabrico e colocação da mistura betuminosa e o ensaio PAV que é realizado sobre amostras ensaiadas previamente no RTFOT permite simular o envelhecimento em serviço. No quadro 3.3 constam os ensaios preconizados na metodologia SUPERPAVE, os seus objectivos e as propriedades avaliadas.

Quadro 3.3 – Ensaio sobre betumes preconizados na metodologia SUPERPAVE  
(Teixeira, 2000)

| Equipamento                               | Objectivo                                                                                       | Propriedades do betume                                               |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Estufa de envelhecimento (RTFOT)          | Simula o envelhecimento que ocorre durante o processo de fabrico                                | Resistência ao envelhecimento (durabilidade) durante a construção    |
| Vaso de envelhecimento pressurizado (PAV) | Simula o envelhecimento do betume em serviço colocado no pavimento                              | Resistência ao envelhecimento (durabilidade) em serviço              |
| Reómetro de corte dinâmico (DSR)          | Define as propriedades do betume para as temperaturas de serviço, elevadas e intermédias        | Resistência às deformações permanentes e ao fendilhamento por fadiga |
| Viscosímetro rotativo (RV)                | Define as propriedades do betume para temperaturas elevadas que ocorrem no processo construtivo | Manuseamento e bombagem                                              |
| Ensaio de flexão em viga (BBR)            | Define as propriedades do betume para baixas temperaturas de serviço                            | Resistência ao fendilhamento devido a baixas temperaturas            |
| Ensaio de tracção directa (DTT)           | Define as propriedades do betume para baixas temperaturas de serviço                            | Resistência ao fendilhamento devido a baixas temperaturas            |

De seguida serão descritos os ensaios de envelhecimento e os ensaios mecânicos realizados sobre o betume de acordo com esta metodologia.

### **Ensaio para envelhecimento do betume**

#### Ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*)

O ensaio RTFOT permite prever o envelhecimento do betume durante as operações de fabrico da mistura betuminosa e sua colocação no pavimento. Consiste em expor filmes de betume ao calor e ao fluxo de ar e depois determinar a perda de massa verificada durante o ensaio que corresponde à perda de componentes voláteis do betume. O betume é colocado em frascos de acordo com a figura 3.12 que são sujeitos a temperaturas elevadas e à injeção de ar. Este ensaio também é realizado para obter amostras que são utilizadas para outros ensaios e em que se pretende ensaiar o betume representativo daquele que existe nas misturas betuminosas após fabrico e colocação.

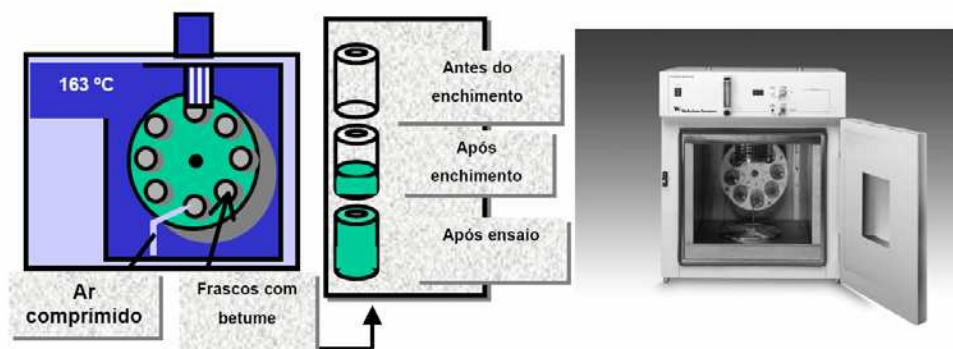


Figura 3.12 – RTFOT (Teixeira, 2000)

Ensaio PAV (*Pressure Ageing Vessel*)

O ensaio PAV expõe o betume a altas pressões e temperaturas durante 20 horas para simular os efeitos do envelhecimento a longo prazo (AI, 1997a).

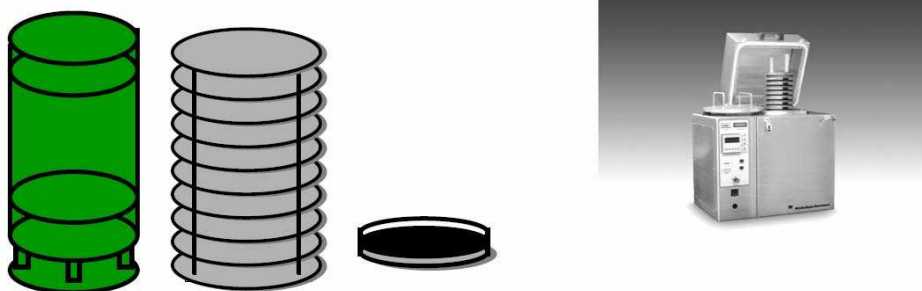


Figura 3.13 – Câmara de envelhecimento pressurizada (Teixeira, 2000)

De acordo com Teixeira (2000) o alcance do ensaio compreende um período de cinco a dez anos do pavimento em serviço. A amostra ensaiada no ensaio PAV foi submetida anteriormente ao ensaio RTFOT, dado que, o envelhecimento a longo prazo ocorre após o fabrico e colocação da mistura betuminosa.

O ensaio consiste em colocar a amostra proveniente do ensaio RTFOT no interior da câmara que se encontra dentro de uma estufa à temperatura desejada para o ensaio (poderá ser a temperatura de dimensionamento) onde é aplicada uma pressão de 2070 MPa que se mantém constante durante 20 horas. Concluída esta fase o betume é retirado da câmara e mantido 30 minutos na estufa à temperatura de 163 °C.

As vantagens associadas a este método são as seguintes (Teixeira, 2000):

- Limita a perda de voláteis, pelo que se torna mais representativo das condições em serviço;
- Os processos de oxidação são acelerados, sem no entanto recorrer a temperaturas muito elevadas;
- Obtém-se, de uma só vez, uma quantidade de amostra adequada à realização de vários ensaios de caracterização;
- A técnica de ensaio é muito simples, aspecto que permite ponderar a sua adopção na caracterização de betumes de forma continuada.

Ensaios mecânicos sobre o betume

No quadro 3.4 são apresentados os ensaios mecânicos a realizar sobre o betume bem como a condição de envelhecimento sobre a qual os ensaios deverão ser realizados.

Quadro 3.4 - Condição de envelhecimento do betume para o ensaio SUPERPAVE (AI, 1997a)

| Ensaio SUPERPAVE no betume       | Condição de envelhecimento do betume |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| Reómetro de corte dinâmico (DSR) | Betume original                      |
|                                  | Betume envelhecido no RTFOT          |
|                                  | Betume envelhecido no PAV            |
| Viscosímetro rotativo (RV)       | Betume original                      |
| Ensaio de flexão em viga (BBR)   | Betume envelhecido no PAV            |
| Ensaio de tracção directa (DTT)  | Betume envelhecido no PAV            |

Ensaio RV (*Rotational Viscometer*)

O viscosímetro rotativo foi adoptado pelo SUPERPAVE para determinação da viscosidade do betume a temperaturas elevadas (acima dos 100 °C). O objectivo do ensaio é averiguar se o betume a temperaturas elevadas apresenta uma viscosidade adequada às operações de bombagem e de mistura permitindo o bom envolvimento dos agregados.



Figura 3.14 – Viscosímetro rotativo (Teixeira, 2000)

A viscosidade rotacional é determinada medindo o esforço de torção necessário para manter uma velocidade de rotação constante de uma lâmina cilíndrica quando submersa numa amostra de ligante betuminoso a uma temperatura constante (AI, 1997a). Normalmente a velocidade de rotação é de 20 rpm e a temperatura de ensaio é de 135 °C.

O viscosímetro pode ser também utilizado para traçar gráficos de temperatura-viscosidade para estimativa das temperaturas de mistura e de compactação a utilizar no fabrico e aplicação da mistura betuminosa.

A especificação do SUPERPAVE para o resultado deste ensaio é de 3 Pa.s podendo no entanto, em algumas situações, não ser respeitado este limite se ficarem garantidos, de outra forma, os objectivos deste ensaio que são a garantia de bombagem e manuseamento do betume. Por vezes o tipo de saída digital dos viscosímetros é dado em centipoise (cP) pelo que terá de ser feita a conversão para comparação com a especificação ( $1000 \text{ cP} = 1 \text{ Pa.s}$ ).

Ensaio DSR (*Dynamic Shear Rheometer*)

Dado que o comportamento do betume depende quer do tempo de carga quer da temperatura, o ensaio ideal para ligantes betuminosos deve incluir ambos os factores (AI, 1997a).

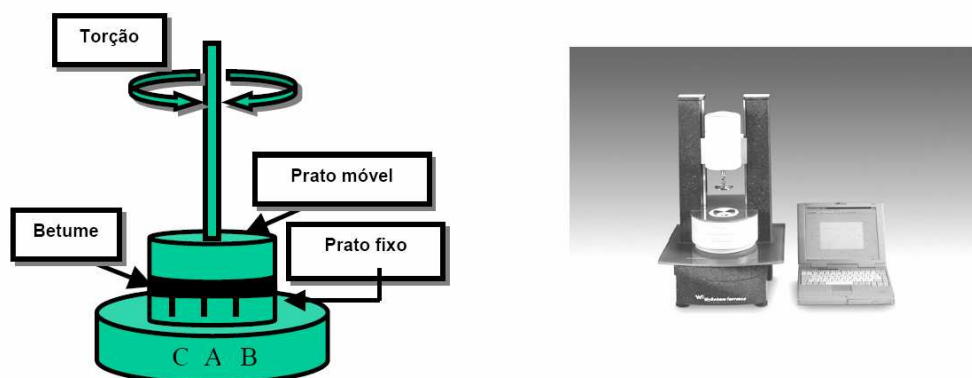


Figura 3.15 – Reómetro de corte (Teixeira, 2000)

Um equipamento capaz de efectuar um ensaio com tais características é o reómetro de corte directo (DSR). Este equipamento permite caracterizar o comportamento visco-elástico do betume, quantificando o módulo complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) do betume para uma dada temperatura e frequência. Deste modo é possível caracterizar a componente elástica e viscosa do betume em serviço para uma gama de temperaturas médias e elevadas.

Note-se que um betume não fica bem definido quanto ao seu comportamento apenas com o valor do módulo complexo. A figura 3.16 procura demonstrar este aspecto evidenciando que um betume com o mesmo módulo complexo pode ter comportamentos distintos consoante o seu ângulo de fase. Conclui-se assim da importância deste parâmetro.

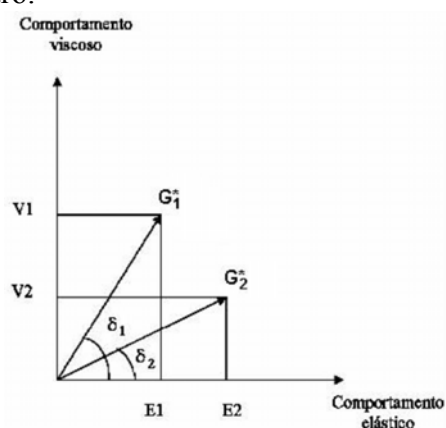


Figura 3.16 – Comportamento visco-elástico do betume (adaptado de AI, 1997a)

O ensaio DSR consiste na colocação da amostra de betume entre dois pratos paralelos do equipamento, sendo o inferior fixo e o superior com capacidade de rodar em torno do seu eixo vertical. O prato superior, quando submetido a um esforço de torção, desloca-se (ver figura 3.15) de A para B, de B para C e de C para A. O ensaio é conduzido a uma frequência de 10 radianos por segundo que corresponde a 1.59 Hz.

Na figura 3.17 pode observar-se os cálculos a efectuar para determinação do módulo complexo e do ângulo de fase do betume. De acordo com o quadro 3.4 pode observar-se que o ensaio pode ser conduzido sobre o betume original, sobre o betume após RTFOT e sobre o betume após PAV.

O betume existente numa mistura betuminosa, logo após a execução da camada do pavimento, apresenta uma determinada rigidez que vai aumentando com o tempo devido a fenómenos de oxidação do betume (Teixeira, 2000). Deste modo os problemas de deformações permanentes ao nível das misturas betuminosas são colocados numa fase inicial da sua vida útil. Por outro lado, a oxidação do betume que ocorre ao longo do tempo, endurece-o tornando a mistura betuminosa mais rígida (com melhor comportamento às deformações permanentes) mas também mais frágil, tornando críticos os problemas relacionados com a fadiga. Assim, os ensaios realizados com betumes sem envelhecimento, após RTFOT ou após PAV pretendem caracterizar o betume em diferentes etapas da sua vida útil e em que as suas propriedades são diferentes.

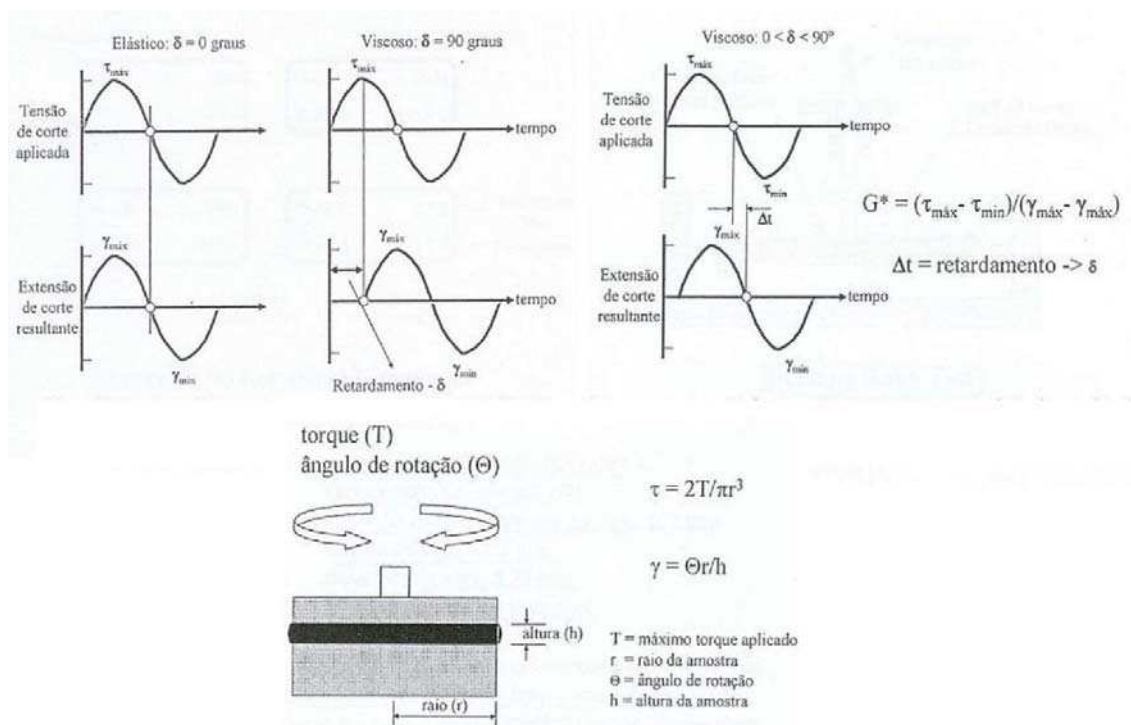


Figura 3.17 – Ensaio DSR (Ribeiro, 2002)

#### Ensaio BBR (*Bending Beam Rheometer*)

As misturas betuminosas inseridas em pavimentos que experimentam descidas de temperatura rápidas e significativas experimentam fenómenos de retracção que provocam tensões de tracção nas camadas do pavimento. Estas tensões de tracção se resultarem de descidas de temperatura muito rápidas não são absorvidas pela mistura betuminosa e originam o fendilhamento térmico.

O ensaio de flexão em viga (BBR) foi desenvolvido com o objectivo de avaliar o comportamento de um betume ao fendilhamento por retracção térmica. Deste modo o ensaio BBR em conjunto com o ensaio DSR permitem adquirir o conhecimento sobre o comportamento do betume em termos de rigidez para uma vasta gama de temperaturas.

O ensaio consiste basicamente, na aplicação de um carregamento num provete de betume com forma prismática, mantido durante o ensaio num banho termostático, constituído por uma mistura de água, etilenoglicol e metanol (Teixeira, 2000). O carregamento tal como se pode ver nas figuras 3.18 e 3.19 é efectuado através de uma carga aplicada no ponto central do provete que está apoiado em dois pontos.

A temperatura a que se realiza o ensaio está relacionada com a temperatura mínima de serviço expectável. A amostra de betume ensaiada resulta do processo de envelhecimento PAV. Assim o betume ensaiado procura simular o betume que se encontra em serviço na camada betuminosa do pavimento após o envelhecimento resultante dos processos de mistura, colocação e de algum envelhecimento em serviço.

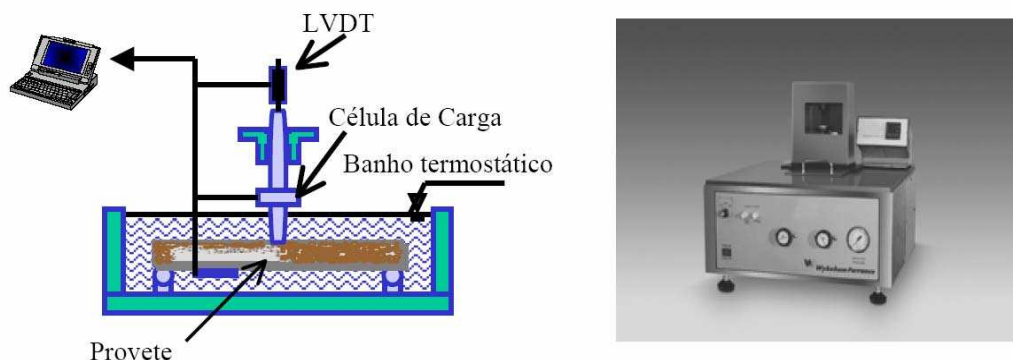


Figura 3.18 – Ensaio de flexão em viga de um betume (Teixeira, 2000)

O ensaio prevê a aplicação de uma força de 1 N durante 240 segundos sendo a rigidez do betume a baixas temperaturas quantificada como sendo o quociente entre a tensão instalada na secção transversal localizada sob o ponto de aplicação da carga e a respectiva extensão observada ao fim de 60 segundos (Teixeira, 2000). Os valores que o equipamento adquire são a força aplicada e a deformação sofrida pela viga a meio vão.

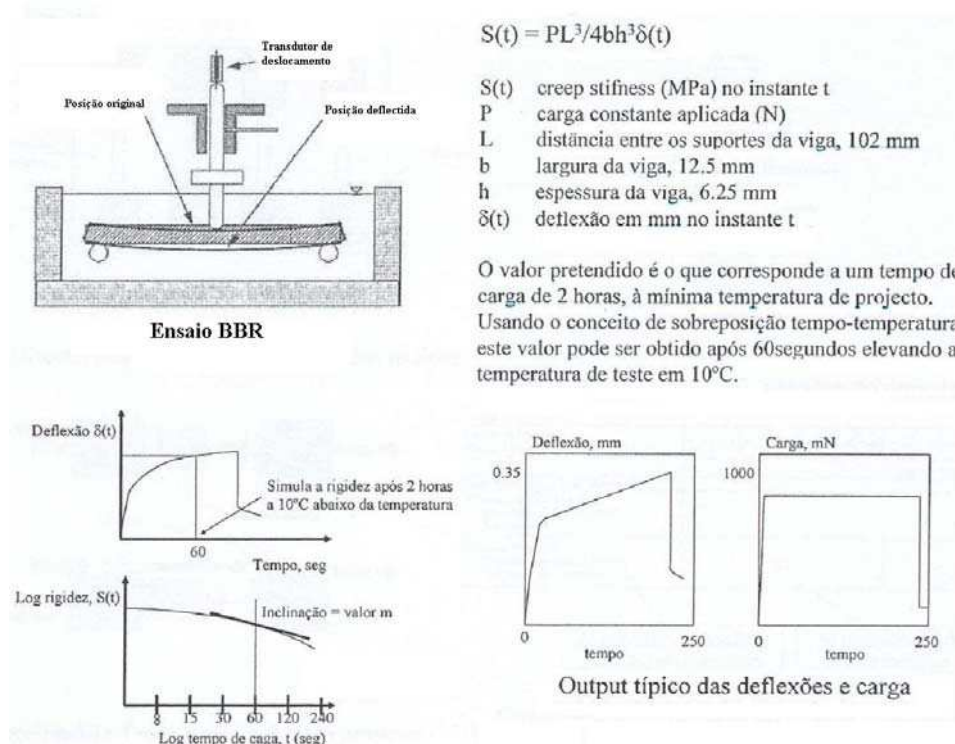


Figura 3.19 – Ensaio BBR (adaptado de Ribeiro (2002))

Na figura 3.19 é possível observar as condições de ensaio, o aspecto dos gráficos obtidos bem como as grandezas medidas e os cálculos efectuados.

#### DTT (*Direct Tension Test*)

Apesar da rigidez poder ser utilizada para estimar a rotura ou as propriedades resistentes, para alguns ligantes (especialmente betumes modificados) a relação entre rigidez e propriedades resistentes não é bem conhecida (AI, 1997a). Assim, surge a

necessidade de medir a resistência do betume e a capacidade de esticar antes de romper (extensão na rotura) num outro ensaio que é o ensaio de tracção directa.

O ensaio apenas é exigido para betumes que apresentem uma tensão de cedência entre os 300 MPa e os 600 MPa para as temperaturas mínimas de serviço no pavimento e consiste em submeter o provete a um carregamento por tracção directa, a uma velocidade de incremento de carga constante até à rotura, sendo que a extensão de rotura é dada pela razão entre a variação de comprimento do provete e o seu comprimento inicial.

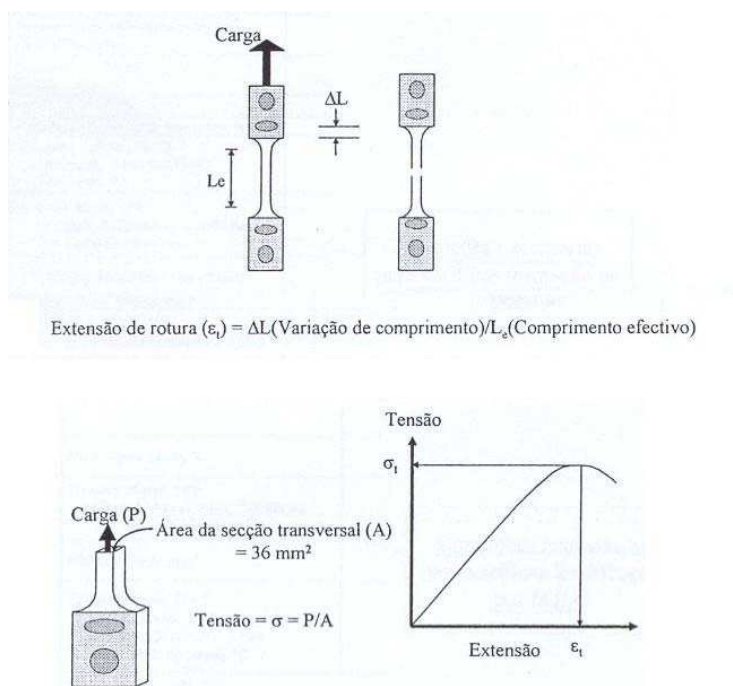


Figura 3.20 – Ensaio de tracção directa de um betume (adaptado de Ribeiro (2002))

A extensão na rotura corresponde à máxima tensão instalada no provete, não sendo necessariamente igual ao valor da tensão no momento da rotura (Teixeira, 2000). O ensaio é executado no intervalo de temperaturas às quais o betume exhibe geralmente o comportamento frágil. A amostra ensaiada resulta do processo de envelhecimento PAV (ou seja, é sobre amostra que simula o betume em serviço).

O sistema de classificação SUPERPAVE considera os resultados obtidos nos ensaios anteriormente descritos. As exigências em relação às propriedades físicas permanecem constantes para todas as classes de desempenho PG (*performance grades*) (AI, 1997a). No entanto, as temperaturas às quais estas propriedades devem ser alcançadas variam de acordo com o clima onde o betume vai ser usado. Um betume de classe PG 52-40 é um betume concebido para suportar as condições projectadas de um ambiente em que a temperatura média do pavimento dos sete dias mais quentes consecutivos é 52 °C e a temperatura mínima projectada para o pavimento é -40 °C. A especificação SUPERPAVE fixa os valores das propriedades a atingir nos ensaios que deverão ser determinadas às temperaturas previstas para o clima do local de aplicação.

Os objectivos de cada ensaio foram atrás discutidos. As propriedades que esta metodologia SUPERPAVE procura ter em conta são:

- Segurança;
- Bombagem e manuseamento;
- Deformações permanentes;
- Envelhecimento excessivo;
- Fendilhamento por fadiga;
- Fendilhamento a baixa temperatura;
- Endurecimento físico no armazenamento.

A fiabilidade neste método é considerada como a percentagem de probabilidade num só ano de que a temperatura não exceda as temperaturas consideradas em projecto (a menor e a média das sete maiores) num determinado pavimento. A fiabilidade a considerar pode ser de 50 ou de 98 %.

### 3.3.3.2. Metodologia Europeia

No âmbito da implementação da Marcação CE em ligantes betuminosos, foi criada uma nova comissão técnica no CEN (*Comité Européen de Normalisation* – CEN/TC 336) cujo objectivo é desenvolver normas com base no desempenho identificando as propriedades fundamentais que determinam o comportamento ou o desempenho dos ligantes betuminosos para todos os tipos de aplicação. O desenvolvimento destas normas corresponde a uma segunda fase ao nível da especificação dos ligantes betuminosos que sucede a uma primeira que levou à metodologia descrita em 3.3.2 e que consistiu na harmonização das normas existentes nos países da União Europeia. A estrutura da comissão integra 4 grupos de trabalho (WG – *Working Groups*) que se dedicam aos vários tipos de ligantes betuminosos: Ligantes betuminosos para pavimentação (WG1), Emulsões e betumes fluidificados (WG2), Betumes modificados (WG3) e Betumes industriais (WG4)).

Dentro de cada WG são criados novos grupos (TG – *Task Groups*) que se dedicam aos diferentes aspectos para desenvolver normas com base no desempenho. No WG1 (ligantes betuminosos para pavimentação) existem 5 TG sendo que os TG1, TG2 e o TG3 dizem respeito aos métodos de ensaio, o TG4 à qualidade e o TG5 às especificações.

Os métodos de ensaio que se encontram incluídos no âmbito desta vertente do desempenho dos ligantes betuminosos em termos de normalização Europeia são os seguintes (Azevedo, 2004):

- TG1 Elevadas Temperaturas (Deformação):
  - Módulo Complexo (DSR);
  - Consistência (Método de ensaio Australiano);
  - Viscosidade Aparente;
  - Viscosidade de Corte Zero (x2 métodos);
  - Ponto de Amolecimento, R&B;
  - Viscosidade Absoluta.
- TG2 Baixas Temperaturas (Fendilhamento):
  - Reómetro para Ensaio de Vigas à Flexão (BBR);
  - Ensaio de Tracção Directa (DTT).
- TG3 Envelhecimento (Durabilidade):

- Curto prazo – RTFOT, TFOT, RFT
  - RFTOT Modificado
- Longo prazo – PAV
  - HiPAT
  - RCAT
  - LT RFT

Alguns dos equipamentos a utilizar nestes ensaios foram descritos na metodologia SUPERPAVE. Deste conjunto de ensaios alguns já possuem norma Europeia de ensaio (ex: ensaio RTFOT (EN 12607-1)) e outros encontram-se em fase de preparação.

### **3.4. Formulação laboratorial**

#### **3.4.1. Introdução**

Os principais constituintes das misturas betuminosas são os agregados, o betume e o ar. A formulação de uma mistura betuminosa consiste na selecção e no estabelecimento das dosagens dos seus constituintes, de modo a encontrar um material económico, se possível com a utilização de materiais locais, que garanta um desempenho óptimo em serviço (Azevedo, 1993). As misturas betuminosas têm ainda que possuir determinadas propriedades impostas pelo Caderno de Encargos da obra onde vão ser aplicadas.

Até 1945 as principais exigências colocadas às misturas betuminosas para pavimentação resumiam-se, na maior parte dos casos, a que fossem duráveis e económicas (Azevedo, 1993). O aumento do volume de tráfego e das cargas por eixo tornaram as misturas tradicionais, que até então tinham comportamentos satisfatórios e duráveis, inadequadas para suportar estas novas solicitações mais agressivas.

A formulação destes materiais pode efectuar-se através de três abordagens distintas (Azevedo, 2004):

- Formulação por métodos empíricos;
- Formulação por “receita” (métodos empíricos);
- Formulação por métodos racionais, denominados algumas vezes “fundamentais”.

Actualmente as duas primeiras abordagens são as que são utilizadas na maioria das situações. Nestes métodos os procedimentos são relativamente expeditos e os critérios são também relativamente fáceis de cumprir, no entanto são totalmente baseados no conhecimento de composições que se comportaram com sucesso na prática. A designação formulação por “receita” deve-se ao facto de o tipo de agregados, a granulometria e muitas vezes as dosagens de cada um dos constituintes, bem como o modo de fabrico, colocação e compactação da mistura betuminosa, serem estabelecidos em especificações (Azevedo, 1993). Estas especificações são elaboradas tendo por base a utilização de determinados materiais e a existência de determinadas condições de tráfego e clima. Deste modo este método de formulação fica sujeito a um certo número de condicionantes. Por outro lado, estas especificações por “receita” estabelecem a curva granulométrica dos agregados mas não têm em conta outras propriedades importantes dos agregados para o sucesso da mistura betuminosa, como por exemplo, a forma e a absorção.

A dosagem de betume pode ser expressa em teor ou em percentagem. O teor em betume de uma mistura betuminosa refere-se à percentagem correspondente à massa de betume em relação à massa de agregados que compõem a mistura betuminosa. A percentagem de betume de uma mistura betuminosa refere-se à percentagem correspondente à massa de betume em relação à massa de mistura betuminosa (agregados e betume incluídos).

Inicialmente, o critério para o estabelecimento da dosagem de betume de uma mistura betuminosa, para um dado tipo de agregado e granulometria, era efectuado com base no índice de vazios da mistura betuminosa, impondo um limite superior para este, para que a quantidade de ligante fosse suficiente para preencher os vazios no agregado compactado (Azevedo, 1993). O conceito de saturação possibilita a obtenção de misturas betuminosas com durabilidade adequada, embora conduza também à obtenção de misturas betuminosas instáveis e escorregadias quando colocadas numa camada em serviço e que possuem uma percentagem de betume excessiva facilitando o aparecimento de deformações permanentes.

O facto do conceito de saturação não ser satisfatório, não invalidava a teoria de que a quantidade de betume necessária é função do espaço disponível na estrutura do agregado compactado (Azevedo, 1993). Assim para ultrapassar os problemas detectados surgiram critérios que apontavam para um limite inferior para o índice de vazios. Esses critérios procuravam ter em conta que o betume deverá ser o suficiente para preencher os vazios, atendendo a exigências de durabilidade, mas não deverá ser excessivo de modo a evitar fenómenos de exsudação do betume à medida que a mistura betuminosa se densifica com o tempo e por acção do tráfego. Os vazios são função de diversos factores para além da dosagem de betume tais como as características do agregado, a energia de compactação utilizada e a própria natureza do betume (efeito de lubrificação). A aplicação deste critério tem no entanto, desde logo, um problema que consiste no facto de nem todo o betume utilizado preencher os vazios da mistura de agregados uma vez que parte dele é absorvido pelos poros de agregado.

A segunda característica a ser utilizada para determinação da percentagem de betume, de estudo em laboratório, foi a superfície específica do agregado (Azevedo, 1993). Esta abordagem baseia-se no conceito de que os agregados deverão estar totalmente revestidos na sua superfície por uma película de betume, ou seja, a percentagem de betume assim determinada deverá cobrir totalmente a superfície específica do agregado. A determinação da percentagem de betume (terá de se converter o teor em betume das expressões 3.1 e 3.2 em percentagem) a partir da superfície específica da mistura de agregados pode efectuar-se utilizando algumas fórmulas empíricas. As fórmulas mais conhecidas são a desenvolvida por *Duriez* (1950) e por *Vallerga* (1953).

$$\text{Expressão de Duriez:} \quad Tb = \alpha \times K \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad (3.1)$$

$$\text{Expressão de Vallerga:} \quad Tb = 0,0015a + 0,03b + 0,17c \quad (3.2)$$

Onde:

- Tb - Teor em betume, (em relação à massa de agregados), em %;
- $\alpha = 2,65 / \gamma_a$  - Em que  $\gamma_a$  é a massa volúmica das partículas secas da mistura das fracções do agregado que compõem a mistura betuminosa;

|          |   |                                                                                             |
|----------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| K        | - | Módulo de riqueza (tradução do termo francês <i>module de richesse</i> );                   |
| $\Sigma$ | - | Superfície específica do agregado, em m <sup>2</sup> /kg;                                   |
| a        | - | Percentagem do agregado retido no peneiro ASTM nº10;                                        |
| b        | - | Percentagem do agregado que passa no peneiro ASTM nº10 e fica retido no peneiro ASTM nº200; |
| c        | - | Percentagem do agregado que passa no peneiro ASTM nº200.                                    |

Em relação ao parâmetro K são recomendados valores em SETRA/LCPC (1984). Estes valores são função da dimensão máxima dos agregados e do tipo de camada e encontram-se indicados a seguir:

- K=3,4; Granulometria do tipo 0/10; Camada de desgaste.
- K=3,3; Granulometria do tipo 0/14; Camada de regularização.
- K=2,5; Granulometria do tipo 0/20; Camada de base.
- K=2,0; Granulometria do tipo 0/31,5; Camada de sub-base.

Em Portugal, de acordo com a APORBET (1998) os valores aconselhados para K para camadas betuminosas a frio são os seguintes:

- K=3,0 a 3,5; Camadas de base;
- K=3,3 a 3,8; Camadas de regularização.

Para a determinação da superfície específica a expressão indicado em APORBET (1998) é a seguinte:

$$\Sigma = \frac{0,25 \times G + 2,3 \times S + 12 \times s + 135 \times f}{100} \quad (3.3)$$

Onde:

- G - proporção ponderal de elementos superiores a 6,3 mm;
- S - proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315 e 6,3 mm;
- s - proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,075 e 0,315 mm;
- f - proporção ponderal de elementos inferiores a 0,075 mm.

A validade destas fórmulas está limitada aos materiais locais, para os parâmetros para as quais foram desenvolvidas e geralmente a misturas muito densas (Azevedo, 1993). Acresce ainda que, para além do adequado revestimento dos agregados, outros factores interessam para determinar a dosagem de betume tais como a forma do agregado, a sua textura superficial e a absorção e que nesta abordagem não são contemplados. No entanto, com o objectivo de que os métodos de formulação tenham tempo e custos reduzidos, são ainda frequentemente utilizadas porque permitem iniciar os estudos de formulação com misturas com composição próxima da óptima.

Por último, foram introduzidas nos métodos empíricos características determinadas em ensaios mecânicos, nomeadamente a estabilidade (Azevedo, 1993). Os critérios estabelecidos foram definidos por correlação dos resultados desses ensaios laboratoriais, obtidos sobre provetes fabricados em laboratório, com o comportamento das mesmas misturas verificado *in situ* sob a acção do tráfego e das condições climáticas. Assim a formulação das misturas betuminosas passou a ter os seguintes objectivos:

- Uma determinada estabilidade, de modo a resistir às acções do tráfego sem evidenciar deformações;

- Uma determinada porosidade mínima, após compactação, embora de modo a permitir um ligeiro aumento de densidade quando entrar em serviço, sob a acção do tráfego pesado, sem evidenciar refluimento do betume ou perda de estabilidade;
- Uma determinada trabalhabilidade, de modo a permitir uma eficiente colocação e compactação do material;
- Uma determinada durabilidade, durante a sua vida útil.

A figura 3.21 pretende exemplificar a ponderação entre as variáveis estabilidade e durabilidade em função do teor em betume. Como se pode observar a formulação de uma mistura é sempre uma solução de compromisso entre as diversas propriedades que interessam ao seu comportamento.

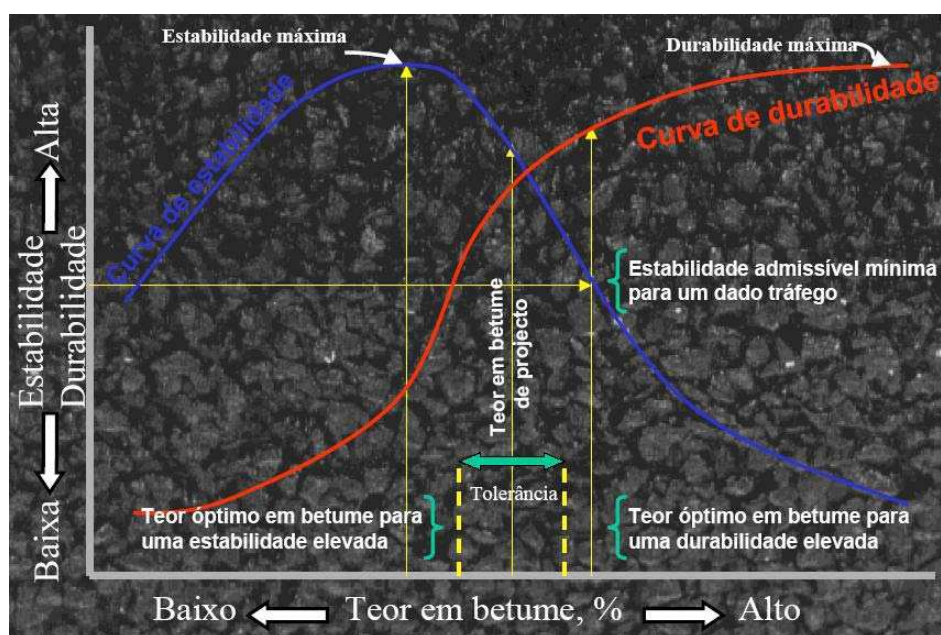


Figura 3.21 – Relação entre a estabilidade e a durabilidade de uma mistura betuminosa com o teor em betume (Azevedo, 2004)

Há alguns anos atrás começou a sentir-se a necessidade de um método que tivesse em conta, de uma forma mais completa, as propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa. Esta necessidade deriva do facto de os pavimentos estarem sujeitos a solicitações muito severas em termos de tráfego e de as exigências dos utentes serem hoje em dia maiores do que eram há alguns anos atrás. Impõe-se por isso que as propriedades assumidas pelo projectista e que importam ao funcionamento estrutural do pavimento sejam verificadas no material a aplicar nas camadas que o constituem. Este processo é o que ocorre por exemplo nos betões que são especificados enquanto material de construção nas suas diversas classes de resistência à compressão tal como são também especificados pelos projectistas. Estes aspectos chamaram à atenção da comunidade científica para a necessidade de rever os métodos de formulação modernizando-os.

Os principais aspectos que se procurou abordar de forma a tornar os estudos laboratoriais mais representativos das condições *in situ* foram os métodos de compactação e os ensaios mecânicos. A preparação dos provetes em laboratório é

efectuada por processos de compactação com base no impacto, calcamento ou vibração e os ensaios mecânicos efectuados variam desde os de compressão uniaxial e os de compressão diametral até aos triaxiais. Os ensaios podem ser empíricos, fundamentais ou de simulação. Os ensaios empíricos permitem conhecer genericamente o comportamento das misturas mas não determinam as suas propriedades intrínsecas. Nestes ensaios as condições de carregamento e compactação não são representativas das condições de serviço. Os ensaios fundamentais permitem determinar as propriedades intrínsecas das misturas. O ensaio de flexão por fadiga é um ensaio deste tipo e que permite determinar o módulo de rigidez de uma mistura (propriedade intrínseca) e a sua vida à fadiga (propriedade do seu comportamento). Os ensaios de simulação permitem simular e reproduzir em laboratório os processos de compactação *in situ* ou a actuação do tráfego. Alguns exemplos de equipamentos concebidos com este objectivo são o compactador giratório e o equipamento *Wheel Tracking*. Os ensaios fundamentais e de simulação permitem submeter as misturas betuminosas a estados de tensão e de deformação mais representativos das condições *in situ*.

Assim, a tendência é a de substituir ou complementar os métodos empíricos por métodos racionais, baseados em ensaios mecânicos dos quais resultem propriedades fundamentais dos materiais, que traduzam o comportamento quando em serviço (Azevedo, 1993).

A complexidade destes ensaios que permitem determinar as propriedades necessárias à garantia de um comportamento adequado da mistura betuminosa *in situ* acarreta custos e tempo acrescidos.

Como tal na Bélgica desenvolveram-se métodos analíticos de formulação de misturas betuminosas. Estes métodos permitem caracterizar as misturas betuminosas com base em cálculos analíticos e baseiam-se em relações matemáticas ou analíticas entre os diferentes parâmetros da composição volumétrica.

Posteriormente desenvolveram-se novos procedimentos e equipamentos de compactação em laboratório para simular de forma mais realista a compactação *in situ*. As misturas assim obtidas permitem efectuar a formulação de misturas betuminosas com base em parâmetros volumétricos. O desenvolvimento do compactador de corte giratório constitui um equipamento desenvolvido com esse propósito.

Nos últimos anos foram desenvolvidos ensaios fundamentais e de simulação para melhor avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas *in situ* e que são utilizados nos métodos de formulação racionais. Estes métodos são mais realistas porque se baseiam em ensaios de laboratório com melhor correlação com o comportamento verificado *in situ*. Uma metodologia com este objectivo é a do Programa SHRP e que vem descrita em AI (1997b).

De acordo com os objectivos da mistura a formular devem ser ponderadas de forma diferente as diversas variáveis que influenciam as propriedades das misturas betuminosas. No quadro 3.5 referem-se as principais propriedades que traduzem o comportamento das misturas betuminosas, bem como as variáveis que podem afectar essas mesmas propriedades.

Quadro 3.5 – Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas  
(Azevedo, 1993)

| Propriedades                                                | Definição                                                                                                                           | Variáveis que afectam as propriedades das misturas                                     |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Flexibilidade                                               | Aptidão da mistura em se adaptar às deformações das camadas subjacentes.                                                            | Granulometria;<br>Teor em betume;<br>Rigidez do betume.                                |
| Estabilidade                                                | Resistência às deformações plásticas (usualmente a altas temperaturas e longos tempos de carga)- condições para baixos $E_{mist}$ . | Textura da superfície do agregado;<br>Granulometria;<br>Teor em betume.                |
| Durabilidade                                                | Resistência às acções climáticas (ar e água) e à acção abrasiva do tráfego.                                                         | Granulometria;<br>Teor em betume;<br>Grau de compactação;<br>Sensibilidade à água.     |
| Resistência à fadiga                                        | Aptidão da mistura em sofrer esforços de flexão repetidos, sem romper.                                                              | Granulometria;<br>Teor em betume;<br>Rigidez do betume;<br>Grau de compactação.        |
| Resistência à derrapagem – misturas para camada de desgaste | Aptidão da mistura para proporcionar um adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado.                          | Tipo e textura do agregado;<br>Resistência do agregado ao polimento;<br>Granulometria. |
| Impermeabilidade                                            | Aptidão da mistura em proteger as camadas inferiores do acesso da água.                                                             | Granulometria;<br>Teor em betume;<br>Grau de compactação.                              |
| Trabalhabilidade                                            | Facilidade encontrada durante as operações de fabrico, colocação e compactação.                                                     | Granulometria;<br>Teor em betume;<br>Tipo de betume e de agregado.                     |

Em Portugal, de acordo com os Cadernos de Encargos actuais (JAE, 1998) e de acordo com o documento da APORBET (1998) as propriedades das misturas betuminosas a determinar no âmbito do estudo de formulação de uma mistura betuminosa têm vindo a ser determinadas em ensaios que seguem, na sua maioria, normas ASTM.

Tal como para os agregados e para o betume também têm vindo a ser desenvolvidas normas Europeias para o produto misturas betuminosas no âmbito da Marcação CE.

A norma EN 13108 (*Bituminous mixtures – Material Specifications*) é composta por diversas partes e integra as especificações para diversos tipos de misturas betuminosas bem como as especificações relativas ao controlo de produção industrial e ao tipo de ensaios a realizar. Cada parte da norma EN 13108 correspondente a um tipo de mistura betuminosa é composta por requisitos gerais, requisitos empíricos e requisitos fundamentais ou racionais. Esses requisitos correspondentes às propriedades da mistura betuminosa são divididos em classes de acordo com os valores das propriedades em causa. O quadro 3.6 apresenta as diferentes partes desta norma e a sua aplicabilidade às misturas betuminosas aplicadas em Portugal.

A norma EN 12697 (*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt*) também é composta por diversas partes e integra diversos métodos de ensaio das misturas betuminosas. É composta por partes que se dedicam aos mais variados aspectos

relacionados com os ensaios de misturas betuminosas e que vão desde a determinação das dimensões de um provete de mistura betuminosa (Parte 29), determinação de propriedades volumétricas (ex: Parte 8), ensaio *Marshall* (Parte 34) e determinação de propriedades como a resistência à fadiga (Parte 24) ou a rigidez (Parte 26).

Quadro 3.6 - Norma EN 13108

| Norma       |                                                                                                      | Misturas betuminosas utilizadas em Portugal                                                   |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| EN 13108-1  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 1 – Asphalt concrete</i>                      | Betão betuminoso, mistura betuminosa densa, macadame betuminoso, argamassas betuminosas, etc. |
| EN 13108-2  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 2 – Asphalt concrete for very thin layers</i> | Micro betão betuminoso rugoso                                                                 |
| EN 13108-3  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 3 – Soft asphalt</i>                          | Não aplicável                                                                                 |
| EN 13108-4  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 4 – Hot rolled asphalt</i>                    | Não aplicável                                                                                 |
| EN 13108-5  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 5 – Stone mastic asphalt</i>                  | Não aplicável                                                                                 |
| EN 13108-6  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 6 – Mastic asphalt</i>                        | Mastique betuminoso                                                                           |
| EN 13108-7  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 7 – Porous asphalt</i>                        | Mistura betuminosa drenante                                                                   |
| EN 13108-8  | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 8 – Reclaimed asphalt</i>                     | Misturas betuminosas re-utilizadas                                                            |
| EN 13108-20 | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 20 – Type testing</i>                         | -                                                                                             |
| EN 13108-21 | - <i>Bituminous Mixtures – Material Specification Part 21 – Factory production control</i>           | -                                                                                             |

Na figura 3.22 está representada a sequência de operações apresentada em Azevedo (2004) no processo de formulação laboratorial.

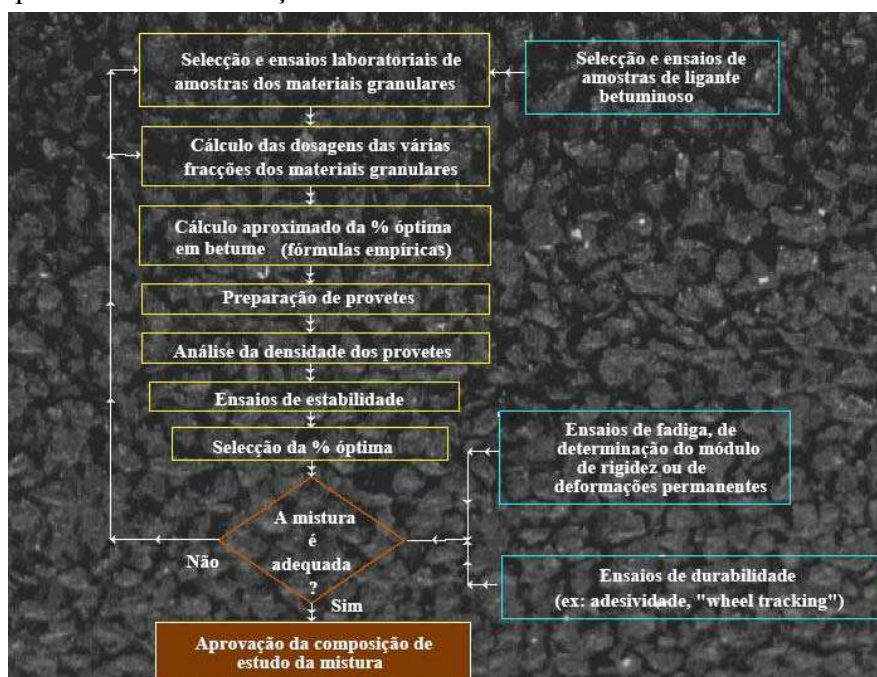


Figura 3.22 – Esquema do processo de formulação laboratorial de uma mistura betuminosa (Azevedo, 2004)

Os principais métodos de formulação e que se passarão a descrever de seguida são os seguintes:

- Método de *Marshall*;
- Método de *Hveem*;
- Método de *Hubbard-Field*;
- Método de *Smith* ou Triaxial do *Asphalt Institute*;
- Método de *Duriez*;
- Método utilizado no Reino Unido;
- Método utilizado na Bélgica;
- Método SUPERPAVE.

### 3.4.2. Método de *Marshall*

Este método de formulação foi desenvolvido nos E.U.A., por *Bruce Marshall* do *Mississippi Highway Department*, e implementado pelo *U.S. Corps of Engineers* durante a II Guerra Mundial, para formulação e controle de misturas para pavimentos aeroportuários em zonas operacionais (Azevedo, 1993). Baseia-se na realização do ensaio *Marshall* e aplica-se na formulação de misturas densas em que dimensão máxima dos agregados é menor que 25 mm. Neste método o processo de compactação (do tipo impacto) usa um número normalizado de pancadas por topo, com um martelo de compactação também normalizado (figura 3.23).

As principais características da mistura betuminosa consideradas neste método são a porosidade, a estabilidade e a deformação. A estabilidade é a força para a qual se dá a rotura do material num ensaio de compressão realizado no estabilómetro *Marshall* (figura 3.24). O ensaio é realizado sobre um provete cilíndrico de 101,6 mm de diâmetro por 63,4 mm de altura, após ser sujeito a um banho de imersão em água a 60 °C durante 30 a 40 minutos. O provete é colocado entre duas meias canas de aço, fazendo-se a aproximação dos pratos da máquina a uma velocidade constante de 50,8 mm/s. A deformação *Marshall* corresponde à deformação sofrida até à rotura.



Figura 3.23 – Compactador *Marshall*



Figura 3.24 – Estabilómetro *Marshall*

O número de provetes a preparar deve ser de quatro por cada percentagem de betume para cada composição granulométrica estudada. Para cada composição granulométrica são estudadas cinco percentagens de betume diferentes separadas por intervalos de 0,5%. Estas cinco percentagens correspondem a duas percentagens superiores e a duas

inferiores de uma percentagem óptima inicialmente definida através das fórmulas que se baseiam na superfície específica (terá de se converter o teor em betume obtido com estas fórmulas para percentagem de betume). Os provetes são preparados compactando as misturas com o compactador de *Marshall* através da aplicação de 35, 50 e 75 pancadas em cada lado do provete consoante a classe de tráfego seja ligeira, média ou pesada, ou de acordo com o fixado no caderno de encargos.

Este método envolve os passos do processo de formulação da figura 3.22 excepto os ensaios de durabilidade, ensaios de fadiga e ensaios às deformações permanentes.

Desde a sua implementação o procedimento de ensaio e o critério têm sofrido consideráveis melhorias e encontra-se bastante difundido por todo o mundo dada a sua simplicidade e baixos custos envolvidos com o equipamento necessário para a realização dos ensaios (Azevedo, 1993). Uma das alterações efectuadas ao método original do *Corps of Engineers* dos E.U.A., foi a substituição da percentagem do volume de vazios preenchido por betume (grau de saturação em betume) pelo volume de vazios na mistura de agregados compactada (VMA) porque se constatou que era mais importante existir uma certa percentagem mínima de vazios no agregado do que vazios preenchidos por betume. A segunda alteração importante diz respeito a considerar-se apenas o betume que garante a ligação entre as partículas de agregado (betume efectivo), excluindo portanto a quantidade que foi absorvida pelos poros do agregado. Para tal é necessário determinar a absorção de betume pelos agregados, sendo que, a determinação da Baridade Máxima Teórica (BMT) cujo procedimento de ensaio corresponde à norma ASTM D 2041, constitui um dos métodos mais directos e seguros de a obter. Conhecendo o valor da BMT, a quantidade de betume, a quantidade de agregado e as respectivas massas volúmicas pode determinar-se a percentagem de betume absorvido pelos agregados.

Para cada provete moldado são determinadas as diversas propriedades. Os resultados dos quatro provetes correspondentes a cada percentagem de betume são convertidos em valores médios em relação a essas propriedades (baridade aparente, volume de vazios, volume de vazios do esqueleto mineral da mistura de agregados, volume de vazios preenchidos com betume, estabilidade de *Marshall* e deformação de *Marshall*). Considerando esses valores médios podem traçar-se os gráficos que relacionam essas grandezas com a percentagem de betume. Assim, habitualmente traçam-se seis gráficos: estabilidade *Marshall*, deformação *Marshall*, baridade da mistura compactada, volume de vazios, volume de vazios do esqueleto mineral da mistura de agregados e o volume de vazios preenchidos por betume em relação ao VMA (ou grau de saturação de betume).

A percentagem de betume óptima resulta da ponderação dos valores das percentagens de betume às quais corresponde a baridade aparente máxima, a estabilidade máxima e um valor intermédio do intervalo definido nas especificações para o volume de vazios. Posteriormente é feita a verificação em relação às diversas propriedades correspondentes à percentagem óptima de betume que foi definida.

Inicialmente para o critério da estabilidade era imposto apenas um valor mínimo. Considerando que misturas com estabilidades elevadas são difíceis de compactar e não apresentam flexibilidade adequada, a administração inglesa na norma BS 594 de 1985 especifica valores máximos para a estabilidade *Marshall* em função da categoria de

tráfego. Em Portugal, em alguns Cadernos de Encargos (ex: JAE, 1998) e no documento da APORBET (1998) também é aplicado o critério da estabilidade máxima para algumas misturas betuminosas.

Outro critério importante é a rigidez de *Marshall* que corresponde ao quociente entre a estabilidade e a deformação de *Marshall*. Em Portugal este critério é estabelecido também nalguns Cadernos de Encargos (Brisa, 2003) e pretende controlar a rigidez da mistura. Em camadas espessas é necessário uma rigidez elevada para que as camadas resistam à fadiga e às deformações permanentes. Em camadas delgadas, utilizadas sobre camadas de base em materiais granulares não tratados, é necessário uma rigidez baixa para resistir à fadiga dado que esse tipo de pavimentos exhibe extensões elevadas implicando uma necessidade de flexibilidade.

O procedimento de ensaio subjacente ao método de *Marshall* encontra-se normalizado pela *American Society for Testing and Materials* – ASTM – nas normas ASTM D 1559 e ASTM D 5581 e em Portugal na norma portuguesa NP 142. Actualmente, no âmbito da normalização Europeia, está em preparação uma norma para o ensaio de *Marshall* (pr EN 12697-34).

O método de *Marshall* tem sido criticado em particular o facto:

- Critérios para aceitação da mistura não se baseiam em propriedades físicas fundamentais que não são avaliadas no ensaio mecânico associado ao método;
- Processo de compactação não conduz a materiais representativos dos compactados com o equipamento de obra;
- Este método não é aplicável a materiais não tradicionais;
- Baixa reprodutibilidade.

O facto de os critérios de aceitação não se basearem em propriedades físicas fundamentais pode conduzir a misturas com propriedades diferentes das assumidas no projecto podendo conduzir a uma vida útil menor. O grau de compactação é uma propriedade com influência crucial no comportamento das misturas betuminosas (ver quadro 3.5). Assim, ao estudar em laboratório misturas com baridades muito diferentes das obtidas em obra, devido às diferenças entre os métodos de compactação, podemos estar a estudar misturas em laboratório não representativas das misturas da obra. Em relação ao equipamento de compactação interessa não só a energia que o mesmo consegue aplicar mas também a forma como é aplicada (no método de *Marshall* é através da queda de um martelo e nas obras são compactadores de cilindros de rolos ou de pneus). Nos Estados Unidos, considera-se que o compactador *kneading* (compactação por calcamento), utilizado no método de *Hveem*, prepara provetes mais representativos, em relação ao martelo de *Marshall* (Azevedo, 1993). Actualmente existe a possibilidade de utilizar equipamentos ainda mais representativos como são os compactadores giratórios ou os cilindros de rolos.

O método de *Marshall*, como se trata de um método empírico aplica-se às misturas para as quais foi estudado e para as quais os limites são especificados, não se aplicando por exemplo a materiais inovadores.

Outras questões que se colocam à aplicação do método de *Marshall* estão relacionadas com a dificuldade de identificação do pico nos gráficos de evolução da baridade e da

estabilidade da mistura com a percentagem de betume, dificultando os valores a considerar para determinação da percentagem óptima de betume.

Em Portugal o método de *Marshall* é sem dúvida o método mais adoptado (para as misturas às quais é aplicável) em complemento com especificações do tipo receita dadas nos Cadernos de Encargos (JAE, 1998; Brisa, 2003) e no documento da APORBET (1998).

### 3.4.3. Método de *Hveem*

Os conceitos básicos do método de *Hveem* foram originalmente desenvolvidos por *Francis Hveem* quando foi Engenheiro residente da *California Division of Highways* no fim dos anos 1920 e 1930 (NAPA, 2002).

A filosofia básica do método de *Hveem* pode ser resumida nos três seguintes pontos (Vallerga, 1985):

1. As misturas betuminosas a quente requerem betume suficiente para envolver cada partícula de agregado num filme de betume de espessura suficiente (permitindo a sua absorção por parte do agregado).
2. As misturas betuminosas a quente requerem estabilidade suficiente para resistir às cargas do tráfego. Esta estabilidade é gerada pelo atrito interno entre as partículas de agregados e a coesão (ou tensão de tracção) criada pelo betume.
3. As misturas betuminosas a quente têm maior durabilidade com um filme de betume mais espesso.

Este método pretende determinar a percentagem de betume óptima baseando-se na superfície específica do agregado que pode ser determinada através da sua granulometria. Foi desenvolvido um equipamento de compactação (Compactador *Kneading* (figura 3.25)) para aproximar as condições de compactação laboratoriais às de obra. Foi também desenvolvido um equipamento para determinar a estabilidade (Estabilómetro de *Hveem* (figura 3.26)) pois constatou-se que, mesmo para uma percentagem de betume adequada em termos de superfície específica dos agregados, outras características dos agregados eram importantes e condicionavam as deformações dos pavimentos.



Figura 3.25 - Compactador *Kneading* (NAPA, 2002)

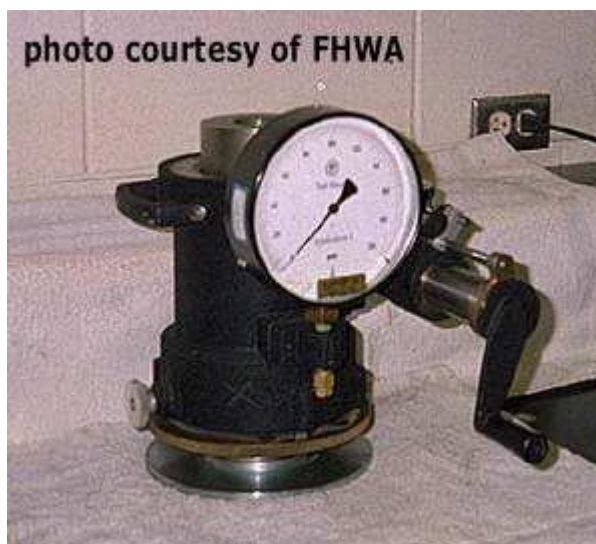


Figura 3.26 - Estabilômetro de *Hveem* (NAPA, 2002)

Inicia-se o estudo de formulação pela determinação da percentagem “ótima” em betume, estimada a partir do cálculo da superfície específica, por meio do ensaio CKE (*Centrifuge Kerosene Equivalent*, na terminologia inglesa) (Azevedo, 1993). O ensaio do equivalente de querosene centrifugado (CKE) (AASHTO T 270-94) é realizado sobre o material que passa no peneiro nº4 ASTM e permite determinar o valor da percentagem de betume inicial.

A seguir são preparados provetes com 64 mm de altura e com 102 mm de diâmetro com três percentagens de betume diferentes que são a percentagem de betume inicial, uma percentagem abaixo da inicial e outra acima. Os provetes são compactados com um número de pancadas e uma energia de compactação definidas. Assim são aplicadas 10 a 50 pancadas para uma pressão de 1,7 MPa e 150 pancadas para uma pressão 3,45 MPa. A compactação é realizada com o compactador *kneading* de acordo com a norma ASTM D 1561.

O ensaio triaxial é realizado no estabilômetro a 60 °C sendo a carga aplicada a uma velocidade lenta e constante. As pressões laterais decorrentes do sucessivo incremento da tensão vertical são registadas durante o ensaio. O ensaio não prossegue até à rotura e o mesmo provete é utilizado, após o ensaio triaxial, no ensaio com o coesímetro, para determinar o valor da deformação num ensaio de fluência a 60 °C.

Estabeleceu-se uma escala em que o valor da estabilidade relativa de 100 corresponde a um sólido rígido (incompressível que não transmite pressão lateral) e o valor de 0 corresponde a um líquido (caso em que a pressão lateral igualaria a pressão vertical).

O método de *Hveem* determina a percentagem ótima de betume como sendo aquela que origina um valor de estabilidade requerido, num ensaio não destrutivo, que utiliza o coesímetro e o estabilômetro *Hveem* (ensaio de compressão triaxial), respeitando os critérios propostos pelo *Asphalt Institute*. Neste método os critérios principais são impostos para o valor da estabilidade mínima em função da classe de tráfego e para o valor máximo da deformação obtido no ensaio de fluência a 60°C. Também se considera adequada uma porosidade de cerca de 4%.

Para determinação da resistência à água das misturas compactadas realiza-se ainda um ensaio de imersão em água sobre provetes do mesmo material.

Os critérios de aceitação da mistura baseiam-se em correlações empíricas que foram obtidas a partir do comportamento das misturas betuminosas colocadas nos pavimentos em determinadas condições de tráfego e clima.

#### 3.4.4. Método de *Hubbard-Field*

Um dos primeiros métodos de formulação de misturas foi desenvolvido por volta dos anos 20, para misturas do tipo *sheet asphalt* (mistura a quente de uma areia bem graduada e filler, com betume) (Azevedo, 1993). Actualmente já não é praticamente utilizado. O ensaio consiste em avaliar a resistência máxima desenvolvida durante um ensaio mecânico.

Neste método de formulação são preparados provetes de 25 mm de diâmetro e 50 mm de altura nos quais é determinada a baridade. As percentagens de betume a estudar correspondem à obtida por aplicação das fórmulas relacionadas com a superfície específica e também as percentagens 0,5% acima e abaixo desse valor.

O carregamento é efectuado através de um orifício normalizado com 45 mm de abertura, a uma temperatura de 60 °C e a uma velocidade de carregamento rápida e constante (figura 3.27). A rotura dos provetes é originada por punçoamento. O resultado do ensaio, que consiste na resistência máxima desenvolvida pelos provetes corresponde ao valor da estabilidade.

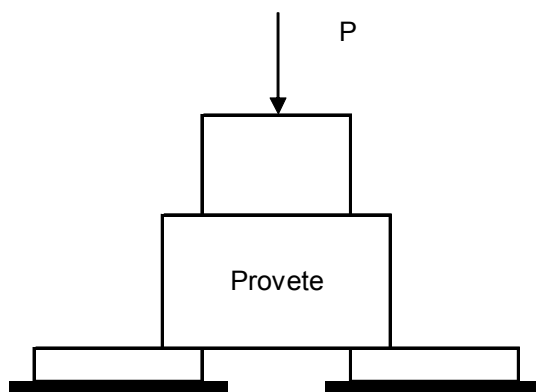


Figura 3.27 - Esquema do ensaio do método de *Hubbard-Field*

Quando as cargas de tráfego aumentaram e se começaram a utilizar misturas com agregados de dimensões maiores, o ensaio foi adaptado a essas misturas, aumentando-se a dimensão do provete e correspondentemente a dimensão dos moldes de preparação daqueles (Azevedo, 1993).

Os valores da baridade, estabilidade, porosidade e volume de vazios do esqueleto mineral de cada provete são registados e dão origem a gráficos que correlacionam essas variáveis com a percentagem de betume. Estes gráficos usavam-se para seleccionar a percentagem óptima em betume através da sua comparação com os critérios de formulação que foram desenvolvidos empiricamente pelo *Asphalt Institute* comparando os resultados do ensaio de *Hubbard-Field* com o comportamento da mistura betuminosa

observado no pavimento. A percentagem óptima de betume é determinada a partir dos gráficos para que todos os critérios da formulação sejam respeitados.

#### 3.4.5. Método de *Smith* ou Triaxial do *Asphalt Institute*

Os métodos empíricos, como os de *Hubbard-Field*, *Hveem* e *Marshall*, envolvem a adopção de critérios desenvolvidos a partir de correlações entre resultados de laboratório e de campo. Por se reconhecer ser desejável uma abordagem mais racional *Smith, V. R.* e o *Asphalt Institute* aplicaram os princípios do ensaio de compressão triaxial, à formulação de misturas betuminosas (Azevedo, 1993).

Neste ensaio a carga vertical é aplicada por incrementos estáticos e é medida a pressão lateral transmitida. Os provetes são fabricados com dimensão “racional”, isto é, com uma altura superior a duas vezes o diâmetro e são compactados por compactação estática de duplo efeito ou utilizando o compactador *kneading* (ver figura 3.25). O ensaio é realizado à temperatura ambiente.

Os dados obtidos no ensaio são utilizados para serem obtidos os parâmetros ângulo de atrito interno e coesão. Através de ensaios laboratoriais de muitas misturas, cujo comportamento em serviço era conhecido, foi definida uma tabela de avaliação que delineava zonas de misturas satisfatórias e não satisfatórias, num gráfico com o ângulo de atrito interno em função da coesão (Azevedo, 1993).

O ensaio triaxial é um ensaio que possibilita a determinação de propriedades “racionais”. No entanto pelo facto de os resultados de campo e de laboratório não estarem ainda bem correlacionados este método não é ainda muito utilizado.

#### 3.4.6. Método de *Duriez*

Este método de formulação foi aplicado durante anos em França (NF P 98-251). Ainda hoje é utilizado de forma complementar a outros métodos de formulação de misturas betuminosas com o objectivo de avaliar a influência da água na perda de adesividade.

Os provetes necessários a este método de formulação são compactados por compressão aplicada nas duas extremidades, com uma curva granulométrica e um tipo de betume fixos para várias percentagens de betume. A percentagem de betume média a estudar é a que é determinada pela expressão de *Duriez* com base na superfície específica e em torno da qual deverão situar-se as outras percentagens a estudar.

A dimensão dos provetes varia consoante a dimensão máxima (D) do agregado da mistura betuminosa a estudar. Para misturas betuminosas em que  $D < 14$  mm os provetes deverão ter 80 mm de diâmetro e 190 mm de altura enquanto que para misturas betuminosas em que  $D > 14$  mm os provetes deverão ter 120 mm de diâmetro e 270 mm de altura.

São preparados vários provetes (o número de provetes depende de D) para cada percentagem de betume e para os quais se determina a baridade e o volume de vazios. Parte desses provetes são imersos em água durante um determinado período de tempo antes de serem ensaiados e a outra metade é ensaiada seca. O ensaio consiste em submeter os provetes a ensaios de compressão simples para obtenção da sua estabilidade

sendo imposto um deslocamento axial à velocidade de 1 mm/s. O ensaio pode ser realizado às temperaturas de 0, 18 e 50 °C.

Para cada percentagem de betume são traçados os gráficos relativos à estabilidade e à adesividade. O valor da percentagem de betume óptima corresponde à média dos valores correspondentes à máxima estabilidade e máxima adesividade. Os valores da baridade e da porosidade correspondentes à percentagem de betume óptima têm de cumprir as especificações para a mistura ser aceite.

### 3.4.7. Método utilizado no Reino Unido

No Reino Unido a formulação de misturas betuminosas de granulometria contínua tem sido efectuada com base em “receitas”, de acordo com a norma BS 4987, encontrando-se especificadas as bandas para as granulometrias e percentagens de betume, em função da dimensão máxima do agregado e natureza dos materiais granulares utilizados, sendo depois fixada em obra a baridade de referência da mistura, com base em estudos efectuados em trechos experimentais (Azevedo, 1993). As excepções são uma versão do método de *Marshall* e de um método racional desenvolvido na Universidade de *Nottingham*.

As “receitas” resultam da experiência acumulada na construção de pavimentos e da observação do comportamento das misturas betuminosas sob diferentes condições de tráfego e clima. A partir de certa altura passou a considerar-se importante que as misturas fossem duráveis e económicas originando a evolução das normas BS 594 (última versão em 2003).

Nos anos 70 o método de *Marshall* foi adoptado no Reino Unido embora com algumas diferenças em relação ao método de *Marshall* original. Desde então diversas normas foram sendo elaboradas onde foram introduzidas algumas modificações sendo a mais actual a BS 598 de 2004. Este método foi desenvolvido no Reino Unido e aplica-se mesmo a misturas com agregados de dimensões superiores a 25 mm. São preparados três provetes para cada percentagem de betume, com um mínimo de cinco percentagens a estudar em intervalos de 0,5%. O valor médio a estudar é determinado em função da quantidade de agregados retidos no peneiro ASTM nº 8 (2,36 mm). A compactação efectua-se no compactador *Marshall* com 50 ou 75 pancadas de acordo com o tráfego previsto. Os gráficos a traçar são quatro: resistência (carga de rotura), deformação (na rotura), massa volúmica aparente da mistura betuminosa e massa volúmica dos agregados compactados em função da percentagem de betume. A percentagem óptima é determinada como sendo o valor médio das percentagens correspondentes à máxima resistência, máxima massa volúmica aparente e máxima massa volúmica dos agregados compactados acrescido de um valor empírico que é dado na norma em função da quantidade de agregados retidos no peneiro ASTM nº 8 contidos na mistura betuminosa. A aceitação do valor óptimo assim definido está condicionada apenas ao cumprimento de critérios de resistência e de deformação máxima em função do tráfego previsto não sendo aplicados critérios volumétricos. Como se referiu na descrição do método de *Marshall* este método inglês teve o mérito de introduzir restrições à carga de rotura máxima.

Recentemente foi desenvolvido na Universidade de *Nottingham* um método de formulação que tem em consideração o cumprimento de certos parâmetros volumétricos

e a avaliação de propriedades fundamentais. Para tal foi desenvolvido um novo equipamento denominado *Nottingham Asphalt Tester* (NAT). O NAT efectua um ensaio de compressão diametral ou de tracção indirecta repetida e um ensaio de compressão directa ou um ensaio estático de fluência. Estes ensaios permitem determinar o módulo de rigidez e a resistência à fadiga (os primeiros) e a resistência às deformações permanentes (os últimos).

O método de *Nottingham* baseia-se em três parâmetros básicos que são a curva granulométrica dos agregados, a percentagem de betume e o grau de compactação da mistura betuminosa e pode ser dividido em duas fases.

Numa primeira fase os agregados são caracterizados nas suas propriedades físicas e são estabelecidas as curvas granulométricas a estudar com base numa versão modificada (para fixar os passados no peneiro nº200) da curva da máxima densidade de *Fuller*. De seguida são preparados provetes com as composições granulométricas definidas anteriormente, com diferentes percentagens de betume e com diferentes energias de compactação. A compactação é efectuada com o martelo vibrador utilizando-se o conceito de *Percentage Refusal Density* (PRD) que traduz uma percentagem de massa volúmica máxima acima da qual a mistura é rejeitada. Assim para PRD correspondente a 100% virá o valor mínimo para o volume de vazios e a máxima massa volúmica que a mistura poderá ter. Depois dos provetes fabricados são determinadas algumas propriedades volumétricas como o volume de vazios, o volume de vazios no esqueleto mineral da mistura de agregados e o grau de saturação de betume.

Relativamente aos provetes correspondentes às misturas cujas propriedades volumétricas cumprem os valores especificados é iniciada uma segunda fase. Nesta fase os provetes são ensaiados no equipamento NAT para caracterização mecânica das misturas. São realizados os seguintes ensaios (Azevedo, 1993):

- Ensaio de compressão diametral com carregamento repetido, para determinação da rigidez da mistura;
- Ensaio de compressão simples com carregamento constante no tempo (fluência), para avaliação da resistência às deformações permanentes;
- Ensaio de compressão simples com carregamento repetido, para avaliação da resistência às deformações permanentes.

O equipamento NAT é um equipamento pneumático e que permite a aquisição automática dos resultados dos ensaios por um computador. Os valores das propriedades mecânicas devem respeitar os valores especificados. Se das misturas estudadas, várias respeitarem os valores impostos para as propriedades volumétricas e para as propriedades mecânicas, então outros critérios deverão ser ponderados como os que interessam aos aspectos económicos e de durabilidade. A durabilidade pode ser avaliada pelo ensaio de tracção indirecta medindo o módulo de rigidez antes, durante e após o condicionamento dos provetes e a saturação parcial em água.

#### 3.4.8. Método utilizado na Bélgica

O comportamento de uma mistura betuminosa depende muito da sua composição em termos volumétricos. O método analítico de formulação de misturas betuminosas permite determinar em termos volumétricos a composição da mistura betuminosa em

termos de composição granulométrica dos agregados, de percentagem de betume e de volume de vazios.

O primeiro método de formulação analítico foi proposto pelo *Belgium Road Research Center* e foi publicado em 1987 no *Code de Bonne Pratique* CRR 61/87. Este método foi entretanto melhorado em 1996.

Inicialmente aplicava-se apenas às misturas betuminosas densas com um volume de vazios inferior a 7% e com curva granulométrica contínua. Posteriormente foi possível estudar as misturas betuminosas ricas em mástique e as misturas betuminosas porosas devido ao desenvolvimento de novas fórmulas para cálculo volumétrico da composição.

Este método de composição é constituído por três fases. A primeira consiste, como em qualquer método, na selecção dos componentes elementares da mistura; a segunda fase consiste numa determinação analítica da composição base da mistura; por último, a terceira fase consiste na verificação da composição base, por meio de ensaios mecânicos (Azevedo, 1993). Os ensaios mecânicos procuram avaliar o módulo de rigidez, a lei de fadiga do material e lei de deformações permanentes.

A composição das misturas corresponde, geralmente, a três tipos diferentes: as misturas de esqueleto de gravilha (misturas porosas), de esqueleto de areia (misturas densas) e as de esqueleto de filer (mástiques betuminosos). Essa composição pode ser representada num diagrama triangular que representa as proporções de cada um desses componentes (gravilha, areia e filer) e que permite classificar as misturas (porosas, densas, e mástiques) de acordo com a proporção de cada componente. A composição volumétrica é determinada a partir do diagrama triangular ou de fórmulas, tendo sido desenvolvidos para o efeito um conjunto de programas de computador para tornar o processo mais expedito.

Para verificação da composição das misturas com esqueleto de areia é utilizado o ensaio *Marshall* sobre os quais são avaliados diversos parâmetros volumétricos e mecânicos do ensaio *Marshall*. Para verificação da composição das misturas com esqueleto de gravilha são moldados provetes *Marshall* para avaliação das propriedades volumétricas e é realizado o estudo Cantabro para verificar a sua coesão. Para verificação da composição das misturas com esqueleto de filer são moldados provetes *Marshall* para avaliação das propriedades volumétricas e é realizado o ensaio com o equipamento *Wheel Tracking* para avaliar a resistência às deformações permanentes.

Muitas vezes, os resultados dos ensaios mecânicos podem ser insatisfatórios e conduzir a uma modificação dos componentes elementares da mistura, e por conseguinte a um regresso à fase inicial, ou a uma alteração da composição de base, ou seja a um regresso à fase intermédia (Azevedo, 1993).

#### 3.4.9. Método SUPERPAVE

Em 1987, o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) começou a desenvolver um novo sistema de especificação de misturas betuminosas (AI, 1997b). O produto final da investigação sobre misturas betuminosas do SHRP foi um novo sistema designado SUPERPAVE, que é uma abreviatura de *Superior Performing Asphalt Pavements* (AI, 1997b). O método de formulação SUPERPAVE procura responder à necessidade de

uma alternativa aos métodos empíricos através de uma formulação racional tendo como suporte o comportamento dos pavimentos e dos materiais que os constituem. Surgiu como necessidade de uma melhor correlação entre as propriedades exigidas aos materiais e as propriedades efectivamente importantes ao seu desempenho *in situ*.

O SUPERPAVE representa um sistema melhorado de especificação de ligantes betuminosos e agregados, desenvolvendo a formulação de misturas betuminosas, e analisando e estabelecendo previsões sobre o desempenho dos pavimentos (AI, 1997b).

Os agregados devem possuir uma resistência ao corte que os torne resistentes à aplicação de cargas repetidas. A resistência ao corte, dado que os agregados possuem uma coesão relativamente pequena, tem origem fundamentalmente no ângulo de atrito interno. Assim os agregados cúbicos e rugosos conferem uma maior resistência que os agregados redondos e de textura lisa. Ao serem carregados os agregados tendem a criar um imbricamento maior ficando as partículas individuais mais próximas. O atrito interno confere a possibilidade de os agregados se imbricarem e cria uma massa que é quase tão resistente como as partículas individuais (AI, 1997b). Habitualmente impõe-se um valor mínimo para as faces britadas dos agregados e um valor limitado para a adição de areia natural (que possuem grão redondo). Um melhor comportamento das misturas betuminosas do ponto de vista das deformações permanentes pode ser atingido seleccionando agregados que possibilitem uma maior resistência ao corte.

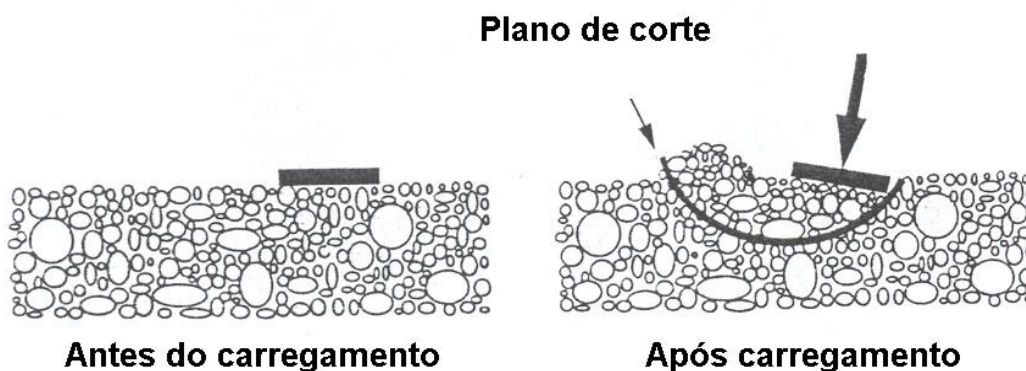


Figura 3.28 - Comportamento ao corte dos agregados (AI, 1997b)

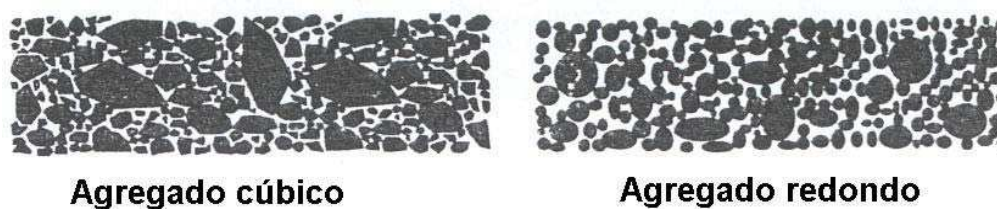


Figura 3.29 - Esqueleto pétreo dos agregados (AI, 1997b)

As especificações relativas aos agregados compreendem dois tipos de propriedades: as propriedades de consenso e as propriedades intrínsecas (AI, 1997b). As propriedades de consenso são as que consensualmente se concluiu que são críticas no desempenho da mistura e nas quais se chegou a um acordo quanto à especificação de valores. Esses valores devem estar de acordo com o nível de tráfego e a posição da camada no pavimento. Essas propriedades são a angulosidade do agregado grosso, a angulosidade

do agregado fino, as partículas lamelares e alongadas e o conteúdo em argila. As propriedades intrínsecas são as propriedades acerca das quais não se chegou a um consenso sobre a especificação de valores dado que são dependentes da fonte. Essas propriedades são a dureza, solvibilidade e a presença de materiais contaminantes.

A curva granulométrica para os agregados de misturas densas é escolhida de acordo com o método SUPERPAVE e com as curvas granulométricas indicadas pelos Cadernos de Encargos. Nos gráficos do método SUPERPAVE estão representadas em ordenadas a percentagem de passados e nas abcissas a abertura do peneiro ASTM elevada à potência 0,45 (figura 3.30). Para traçar a curva granulométrica são indicados pontos de controlo, a linha de máxima densidade e uma zona restrita. Os pontos de controlo são pontos onde a curva tem de passar obrigatoriamente. A linha de máxima densidade representa uma linha à qual a mistura betuminosa se deve aproximar o mais possível. A zona restrita é uma zona onde a curva nunca pode passar, sendo a sua localização função do diâmetro nominal dos agregados e sendo o seu objectivo limitar a inclusão de elevadas quantidades de areia fina natural e garantir um adequado volume de vazios no esqueleto de agregado mineral. A abordagem na concepção da estrutura de agregados assegura que os agregados vão desenvolver um esqueleto pétreo forte resistente às deformações permanentes e ao mesmo tempo permitindo os vazios suficientes para aumento da durabilidade da mistura. A melhoria do desempenho é geralmente alcançada com curvas granulométricas que passem abaixo da zona restrita (AI, 1997b).

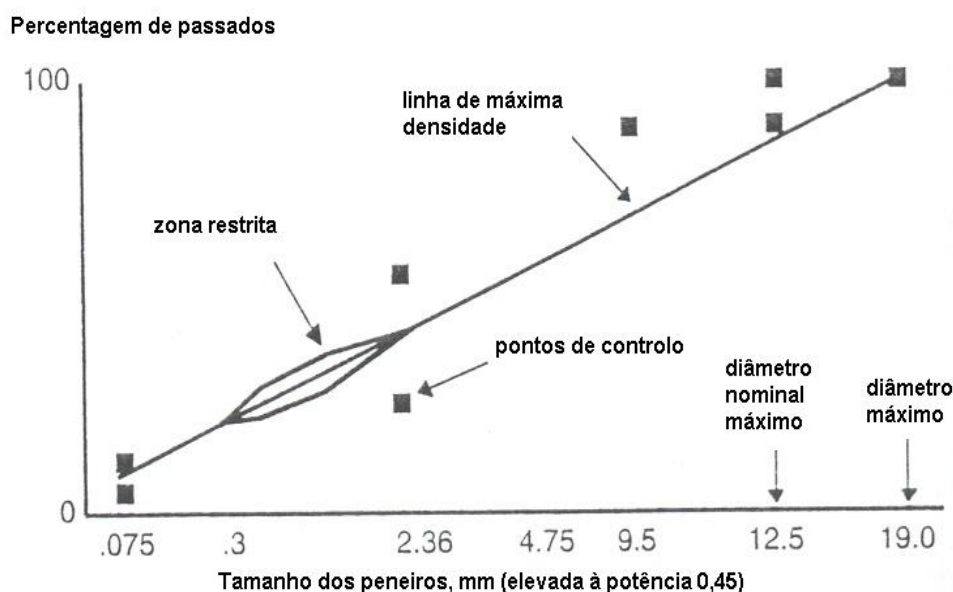


Figura 3.30 - Limites da granulometria SUPERPAVE (AI, 1997b)

O betume (ver ponto 3.3.3) é especificado em termos de uma classe de desempenho definida pela temperatura mínima prevista para o pavimento e a média das temperaturas dos sete dias mais quentes consecutivos do ano. Assim o betume a utilizar deverá enquadrar-se nas propriedades previstas para a classe de betume escolhida e que são determinadas de acordo com as temperaturas especificadas.

No método SUPERPAVE são analisados os comportamentos das misturas betuminosas em relação às deformações permanentes, em relação ao fendilhamento por fadiga e ao fendilhamento a baixas temperaturas.

Um comportamento melhor do ponto de vista das deformações permanentes em relação às misturas betuminosas pode ser conseguido utilizando um betume mais rígido e ao mesmo tempo com um comportamento melhor a altas temperaturas, para além de, conforme se referiu atrás, seleccionar agregados que possibilitem uma maior resistência ao corte. O fendilhamento por fadiga pode ser prevenido de várias formas como são a previsão adequada do tráfego, a utilização de camadas de misturas betuminosas espessas, a utilização de materiais secos e mantendo a fundação seca. A mistura tem de possuir resistência à tracção suficiente para suportar as tensões induzidas pelo tráfego e uma resistência à fadiga adequada para as suportar repetidas vezes. O fendilhamento a baixas temperaturas é controlado escolhendo um betume mole e resistente ao envelhecimento e pode ocorrer num só ciclo ou por acumulação de ciclos de baixas temperaturas. Os vazios da mistura betuminosa não devem ser demasiados porque também contribuem para o envelhecimento do betume, seu endurecimento e consequente fragilização.

O método de formulação de misturas betuminosas SUPERPAVE encontra-se dividido em três níveis de exigência em função das solicitações a que o pavimento onde irá ser aplicada a mistura estará sujeito. Esses níveis encontram-se no quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Níveis do método de formulação SUPERPAVE (adaptado de AI, 1997b)

| Nível | SUPERPAVE              | Tráfego     | Requisitos                                                                   |
|-------|------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Formulação volumétrica | $\leq 10^6$ | Seleção dos materiais e proporções volumétricas                              |
| 2     | Análise intermédia     | $\leq 10^7$ | Formulação volumétrica + ensaios para previsão do desempenho                 |
| 3     | Análise completa       | $> 10^7$    | Formulação volumétrica + ensaios para previsão do desempenho em maior número |

O nível 1 deste método de formulação aplica-se para um tráfego ligeiro ( $NAEP_{80kN} \leq 10^6$ ). Este método consiste em efectuar uma avaliação volumétrica da mistura sendo que os materiais constituintes devem cumprir as respectivas especificações. No nível 1 estão compreendidas três fases principais:

- Seleção dos materiais (agregados e betume);
- Determinação da curva granulométrica da mistura de agregados;
- Determinação da percentagem de betume da mistura betuminosa.

No nível 1 do método de formulação SUPERPAVE os provetes da mistura betuminosa são compactados com o compactador giratório (figura 3.31 e 3.32) que procura reproduzir as condições de compactação *in situ*.

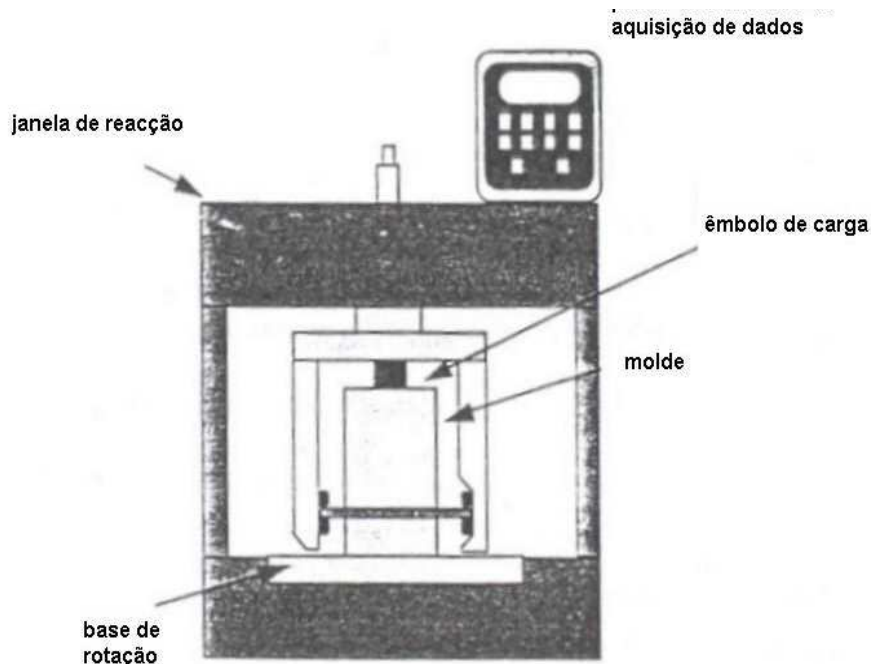


Figura 3.31 – Compactador de corte giratório SUPERPAVE (AI, 1997b)

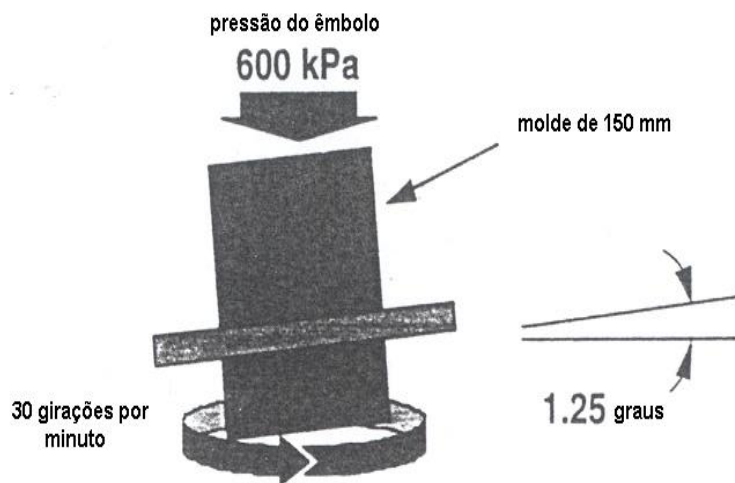


Figura 3.32 – Configuração do molde do compactador de corte giratório SUPERPAVE (AI, 1997b)

Este equipamento permite avaliar no decorrer da compactação a massa volúmica da mistura betuminosa compactada e o volume de vazios em função do número de rotações. Deste modo pode obter-se a curva de densificação da mistura betuminosa. Na curva de densificação são determinados três pontos que correspondem a três níveis de compactação e que são expressos pela percentagem da massa volúmica máxima teórica em função do número de rotações (N).



Figura 3.33 – Características da mistura devido à compactação do compactador de corte giratório SUPERPAVE (AI, 1997b)

As misturas betuminosas são formuladas para um nível de energia de compactação específico. No método SUPERPAVE esta é função do número de rotações de formulação,  $N_{\text{formulação}}$  (AI, 1997b). O valor de  $N_{\text{formulação}}$  é utilizado para variar a energia de compactação de formulação da mistura sendo função do tráfego e do clima (média das temperaturas dos sete dias mais quentes consecutivos do ano). Os outros dois valores de rotações que interessam ao método de formulação são o número de rotações inicial ( $N_{\text{inicial}}$ ) e o número máximo de rotações ( $N_{\text{máximo}}$ ). Os provetes de ensaio são moldados utilizando o valor de  $N_{\text{máximo}}$  sendo o valor de  $N_{\text{inicial}}$  utilizado para estimar a compactabilidade da mistura. Os valores de  $N_{\text{inicial}}$  e de  $N_{\text{máximo}}$  são obtidos a partir do valor de  $N_{\text{formulação}}$  de acordo com as seguintes expressões:

$$\log N_{\text{máximo}} = 1,10 \times \log N_{\text{formulação}} \quad (3.4)$$

$$\log N_{\text{inicial}} = 0,45 \times \log N_{\text{formulação}} \quad (3.5)$$

A curva granulométrica e a percentagem de betume são determinadas de modo a que o volume de vazios do esqueleto mineral de agregados e o volume desses vazios preenchidos por betume respeitem os valores especificados em AI (1997b) e que são função respectivamente da dimensão máxima nominal dos agregados e do tráfego.

Com os agregados que cumprem as especificações para as diversas propriedades, variando a dosagem de cada um, definem-se as curvas granulométricas a estudar. As curvas deverão situar-se próximo da linha de máxima densidade da curva de potência 0,45, de forma a passar entre os pontos de controlo e fora da zona restrita.

Após a definição das curvas granulométricas a estudar é necessária uma primeira avaliação das propriedades dos agregados. Estas propriedades são as quatro propriedades de consenso, a massa volúmica do material impermeável, a massa volúmica das partículas secas da mistura de agregados e as propriedades intrínsecas. Estas propriedades devem respeitar as respectivas especificações.

No quadro 3.8 são definidas as seguintes massas volúmicas para a mistura de agregados e para a mistura betuminosa e que variam de acordo com o volume a considerar.

Quadro 3.8 – Massas volúmicas da mistura de agregados e da mistura betuminosa

| Massa volúmica                                                                | Símbolo | Volume considerado                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Massa volúmica da mistura de agregados das partículas secas                   | Gsb     | Volume aparente de cada partícula de agregado                                             |
| Massa volúmica da mistura de agregados do material impermeável das partículas | Gsa     | Volume do material impermeável de cada partícula de agregado                              |
| Massa volúmica efectiva da mistura de agregados                               | Gse     | Volume efectivo de cada partícula de agregado                                             |
| Massa volúmica máxima teórica da mistura betuminosa                           | Gmm     | Volume total da mistura betuminosa com excepção do volume de vazios da mistura betuminosa |
| Massa volúmica da mistura betuminosa compactada                               | Gmb     | Volume total da mistura betuminosa compactada                                             |

Após esta fase de avaliação das propriedades dos agregados é determinada a percentagem de betume para ensaio (portanto, em relação à massa da mistura) através de uma expressão definida em AI (1997b). Esta expressão utiliza-se para cada mistura de agregados a estudar (cada qual com uma determinada curva granulométrica associada) e baseia-se no conhecimento das propriedades dos agregados, na estimativa da massa volúmica efectiva e na estimativa da percentagem volumétrica de betume absorvido e efectivo. Estas estimativas baseiam-se em expressões definidas em AI (1997b).

Após a selecção das misturas de agregados a estudar e da percentagem de betume para ensaio, as misturas são compactadas com o compactador de corte giratório para se obterem as curvas densificação das misturas (após terem sido sujeitas a um envelhecimento de curto prazo de modo a simular as operações de fabrico e aplicação *in situ*) até  $N_{\text{máximo}}$ . A massa volúmica da mistura compactada em cada momento da densificação (para cada N) é estimada a partir da massa da amostra, da altura do provete que está a ser compactado medida nesse momento e do raio do molde. Tal implica um erro inerente ao facto do provete poder não ocupar o molde em todo o seu diâmetro devido a irregularidades que existem. Assim no fim da densificação, para  $N_{\text{máximo}}$ , é determinada através de ensaio a massa volúmica da mistura compactada real do provete. O quociente entre a massa volúmica da mistura compactada real do provete e a massa volúmica da mistura compactada estimada para  $N_{\text{máximo}}$  é o factor de correcção que é aplicado a todos os valores estimados da massa volúmica da mistura compactada para os diferentes N. Após a determinação da massa volúmica máxima teórica, a curva de densificação pode ser traçada a partir do quociente da massa volúmica da mistura compactada real (portanto já corrigida) para cada N e da massa volúmica máxima teórica. A percentagem da massa volúmica máxima teórica (C) de uma mistura para um determinado valor de giros (N) é definida pela seguinte expressão:

$$C(N) = \frac{Gmb(N)}{Gmm} \times 100 \quad (3.6)$$

O valor do volume de vazios do esqueleto mineral da mistura de agregados (VMA) e o valor da percentagem desse volume de vazios ocupados por betume (VFA) para  $N_{\text{formulação}}$  podem ser obtidos pelas seguintes expressões:

$$\text{VMA} = 100 - \left[ \frac{C(N_{\text{formulação}}) \times G_{\text{mm}} \times P_a}{G_{\text{sb}}} \right] \quad (3.7)$$

$$\text{VFA} = 100 \times \left[ \frac{\text{VMA} - V_v}{\text{VMA}} \right] \quad (3.8)$$

Onde:

$V_v$  - Volume de vazios

$P_a$  - Percentagem de agregados na mistura betuminosa

As curvas obtidas para se poderem comparar entre si e com as especificações, são convertidas para curvas estimadas com o mesmo valor de vazios teórico de  $N_{\text{formulação}}$ . Este valor de referência do volume de vazios é 4% para  $N_{\text{formulação}}$ . Este aspecto obriga a mover as curvas horizontalmente no gráfico que relaciona  $N$  com  $C(N)$ . Assim a percentagem em betume ensaiada tem de ser convertida para esta nova curva. De acordo com AI (1997b) a expressão para correcção da percentagem de betume de forma a estimar a percentagem de betume convertida para um volume de vazios de 4% é a seguinte:

$$P_{b_{\text{convertida}}} = P_{b_{\text{ensaiada}}} - [0,4 \times (4 - V_a)] \quad (3.9)$$

Onde:

$P_{b_{\text{convertida}}}$  - Percentagem convertida de betume, em relação à massa da mistura, para um volume de vazios de 4%;

$P_{b_{\text{ensaiada}}}$  - Percentagem de betume ensaiada, em relação à massa da mistura, com a qual se obteve para  $N_{\text{formulação}}$  um volume de vazios  $V_a$ ;

$V_a$  - Volume de vazios que se obteve para  $N_{\text{formulação}}$  no ensaio  
 $V_a(N_{\text{formulação}}) = 100 - C(N_{\text{formulação}})$

Os valores de VMA e de VFA determinados no ensaio para  $N_{\text{formulação}}$  e  $V_v = V_a$  têm também de ser convertidos para  $V_v = 4\%$  tal como os valores de  $C(N_{\text{inicial}})$  e de  $C(N_{\text{máximo}})$ . Assim os valores de  $\text{VMA}_{\text{convertido}}$ ,  $\text{VFA}_{\text{convertido}}$ ,  $C(N_{\text{inicial convertido}})$  e de  $C(N_{\text{máximo convertido}})$  podem ser obtidos pelas seguintes expressões:

$$\text{VMA}_{\text{convertido}} = \text{VMA}_{\text{ensaio}} + X \times (4 - V_a) \quad \text{sendo} \quad \begin{aligned} X &= 0,1 \text{ se } V_a < 4 \\ X &= 0,2 \text{ se } V_a > 4 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\text{VFA}_{\text{convertido}} = 100 - \frac{\text{VMA}_{\text{convertido}} - 4}{\text{VMA}_{\text{convertido}}} \quad (3.11)$$

$$C(N_{\text{inicial convertido}}) = C(N_{\text{inicial}}) - (4 - V_a) \quad (3.12)$$

$$C(N_{\text{máximo convertido}}) = C(N_{\text{máximo}}) - (4 - V_a) \quad (3.13)$$

De acordo com AI (1997b) o valor máximo de  $C(N_{\text{inicial convertido}})$  é 89% e de  $C(N_{\text{máximo convertido}})$  é 98%. Os valores de  $\text{VMA}_{\text{inicial convertido}}$  e  $\text{VFA}_{\text{inicial convertido}}$  têm de cumprir os critérios especificados em AI(1997b). Tem ainda ser verificada a relação filer/betume de acordo com o critério SUPERPAVE.

Das curvas granulométricas estudadas podem agora seleccionar-se as que cumprem as especificações para que sobre uma delas ou mais sejam continuados os estudos.

Com a curva granulométrica seleccionada são moldados provetes variando a percentagem de betume. De acordo com AI (1997b) são estudadas as seguintes quatro percentagens de betume:  $Pb_{convertida}$ ;  $Pb_{convertida} - 0,5\%$ ;  $Pb_{convertida} + 0,5\%$  e  $Pb_{convertida} + 1,0\%$ .

Para cada percentagem de betume é necessário medir as percentagens da massa volúmica máxima teórica atingidas para  $N_{inicial}$ ,  $N_{formulação}$  e  $N_{máximo}$ . Para  $N_{formulação}$  para cada percentagem de betume são determinados os parâmetros  $V_v$ ,  $VMA$  e  $VFA$ .

Com os valores de  $V_v$ ,  $VMA$  e de  $VFA$  traçam-se três gráficos com essas grandezas em função da percentagem de betume (quatro pontos em cada gráfico). Determina-se a percentagem de betume que corresponde a um  $V_v$  de 4% e verifica-se se este valor cumpre os critérios SUPERPAVE em termos de  $VMA$ ,  $VFA$ ,  $C(N_{inicial})$ ,  $C(N_{máximo})$  e relação filer/betume.

A última etapa deste nível do método de formulação é a avaliação da sensibilidade à água. Assim são moldados 6 provetes da mistura escolhida com um volume de vazios ( $V_v$ ) de 7%. Três desses seis provetes são provetes de controlo. Os outros três provetes são submetidos a um conjunto de etapas que envolvem a saturação, o gelo e o degelo. Todos os provetes são avaliados em termos de resistência à tracção indirecta. O quociente entre as médias das resistências à tracção indirecta do segundo conjunto de provetes sobre o primeiro tem de ser superior a 80%.

Os níveis 2 e 3 do método de formulação SUPERPAVE envolvem ensaios de avaliação do desempenho e modelos de previsão do desempenho. Os ensaios de avaliação do desempenho que foram desenvolvidos envolvem dois equipamentos novos que são o ensaio de corte (*SUPERPAVE Shear Tester* - SST (figura 3.34)) e o ensaio de tracção indirecta (*Indirect Tensile Tester* – ITT (figura 3.35)).

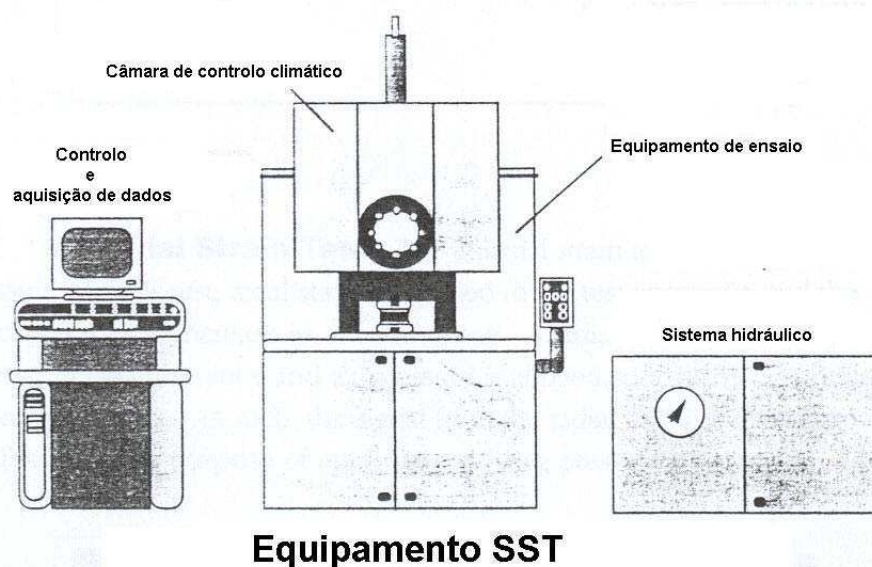


Figura 3.34 – Equipamento SST (*SUPERPAVE Shear Tester*) (AI, 1997b)



Figura 3.35 – Equipamento ITT (*Indirect Tensile Tester*) (Shell, 2003)

Nestes equipamentos é possível realizar vários ensaios de acordo com o quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Ensaios a realizar com o equipamento SST e ITT

| Equipamento                                           | Ensaio                                                           |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Equipamento SST<br>( <i>SUPERPAVE Shear Tester</i> )  | Ensaio volumétrico                                               |
|                                                       | Ensaio de extensão uniaxial                                      |
|                                                       | Ensaio de corte repetido a taxa de tensão constante              |
|                                                       | Ensaio de corte repetido a altura constante                      |
|                                                       | Ensaio de corte simples a altura constante                       |
|                                                       | Ensaio de corte a altura constante com varrimento de frequências |
| Equipamento ITT<br>( <i>Indirect Tensile Tester</i> ) | Ensaio de fluência por tracção indirecta                         |
|                                                       | Ensaio de avaliação da resistência à tracção indirecta           |

A previsão SUPERPAVE de desempenho é realizada através de um programa informático que utiliza 4 modelos a partir dos resultados obtidos nos ensaios. Esses modelos e os seus objectivos constam do quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Modelos do método de formulação SUPERPAVE

| Modelos                             | Objectivo                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modelo de propriedades do material; | Os resultados dos ensaios de desempenho são utilizados no modelo de propriedades do material para determinar as propriedades não lineares elásticas, visco-elásticas, plásticas e de fractura                                              |
| Modelo dos efeitos ambientais;      | O modelo dos efeitos ambientais calcula a temperatura do material em função da profundidade e das características térmicas dos materiais                                                                                                   |
| Modelo de resposta do pavimento;    | O modelo de resposta do pavimento utiliza os resultados dos modelos de propriedades dos materiais e de efeitos ambientais para prever as tensões e extensões utilizando uma abordagem bi-dimensional e axissimétrica de elementos finitos. |
| Modelo de degradação do pavimento.  | Os resultados do modelo de propriedades dos materiais e de resposta do pavimento são utilizados no modelo de degradação do pavimento para prever as deformações permanentes, a fadiga e o fendilhamento a baixas temperaturas.             |

O nível 2 do programa SUPERPAVE envolve ensaios de avaliação do desempenho a uma temperatura efectiva ( $T_{ef}$ ). Devido ao facto das deformações permanentes e fendilhamento por fadiga ocorrerem a temperaturas diferentes são utilizadas duas temperaturas efectivas:  $T_{ef(DP)}$  e  $T_{ef(FF)}$  (AI, 1997b). Ambas as temperaturas são determinadas no programa informático SUPERPAVE e são função da temperatura média anual do ar, espessura da camada e fiabilidade escolhida pelo utilizador.

O nível 3 envolve uma avaliação mais rigorosa do desempenho do pavimento dado que envolve uma gama de temperaturas (4°, 20° e 40°) mais alargada. Este aspecto permite a utilização do modelo de efeitos ambientais para prever de forma mais eficiente o desempenho do pavimento (AI, 1997b).

No quadro 3.11 constam os ensaios efectuados para cada um dos níveis de formulação (2 e 3). O procedimento dos ensaios a realizar são descritos em AI (1997b).

Quadro 3.11 – Ensaios para avaliação do desempenho (adaptado de AI, 1997b)

| Nível do método de formulação | Modo de degradação do pavimento                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               | Deformações permanentes <sup>1</sup>                                                                                                                                                                                                                   | Fendilhamento por fadiga                                                                                                                                                                                                                   | Fendilhamento a baixas temperaturas                                                                                                                                                              |
| 2 (Intermédia)                | <p>Ensaio de corte simples a altura constante a <math>T_{ef(DP)}</math></p> <p>Ensaio de corte a altura constante com varrimento de frequências a <math>T_{ef(DP)}</math></p>                                                                          | <p>Ensaio de corte simples a altura constante a <math>T_{ef(FF)}</math></p> <p>Ensaio de corte a altura constante com varrimento de frequências a <math>T_{ef(FF)}</math></p> <p>Ensaio de tracção indirecta a <math>T_{ef(FF)}</math></p> | <p>Ensaio de fluência por tracção indirecta a -20, -10 e 0 °C</p> <p>Ensaio de tracção indirecta a -10 °C.</p> <p>Módulo de fluência do betume e sua variação no tempo no reómetro de flexão</p> |
| 3 (Completa)                  | <p>Ensaio de corte a altura constante com varrimento de frequências a 4, 20 e 40 °C</p> <p>Ensaio de extensão uniaxial a 4, 20 e 40 °C</p> <p>Ensaio volumétrico a 4, 20 e 40 °C</p> <p>Ensaio de corte simples a altura constante a 4, 20 e 40 °C</p> | <p>Ensaio de tracção indirecta a -10, 4 e 20 °C</p>                                                                                                                                                                                        | <p>Ensaio de fluência por tracção indirecta a -20, -10 e 0 °C</p> <p>Módulo de fluência do betume e sua variação no tempo no reómetro de flexão</p>                                              |

<sup>1</sup> Para verificar a deformação terciária, os níveis 2 e 3, requerem o ensaio de corte repetido a tensão constante à temperatura  $T_c$  (temperatura crítica).

As deformações permanentes terciárias ocorrem quando uma mistura betuminosa densifica até um volume de vazios muito baixo, normalmente menos de 2 ou 3 % (AI, 1997b). A avaliação da deformação terciária é realizada com o ensaio de corte repetido a tensão constante à temperatura crítica ( $T_c$ ) calculada pelo programa informático SUPERPAVE e depende de  $T_{ef(DP)}$  e do número de rotações de formulação  $N_{\text{formulação}}$ .

Os resultados dos ensaios são introduzidos no programa informático SUPERPAVE que calcula o valor das deformações permanentes *in situ* para uma carga padrão aplicada ao pavimento à temperatura real do pavimento e também o módulo de rigidez.

Para a avaliação do fendilhamento por fadiga considera-se uma temperatura efectiva para todo o ano. As tensões nas camadas são função da temperatura e rigidez respectivas quando sujeitas a uma carga padrão. Para cada ano calcula-se a energia dissipada e a energia dissipada acumulada sendo esta utilizada para estimar a percentagem de área fendilhada durante o período de vida do pavimento.

O programa SUPERPAVE é utilizado para prever o fendilhamento a baixas temperaturas com base nos resultados de ensaios anteriores e recorrendo à mecânica da fractura. O objectivo é definir o valor do espaçamento entre fendas. Para definir a percentagem óptima de betume utiliza-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência às deformações permanentes, ao fendilhamento por fadiga e ao fendilhamento a baixas temperaturas expressos respectivamente pelo valor da profundidade da rodeira, percentagem de área fendilhada do pavimento e espaçamento do fendilhamento e traçam-se gráficos em função das percentagens de betume utilizadas nos ensaios. A percentagem óptima de betume encontra-se num intervalo definido pela intersecção dos valores de percentagens de betume que cumprem os requisitos de cada uma das propriedades a analisar e que são sugeridas no nível 2 de formulação do SUPERPAVE.

O nível 3 do método de formulação do SUPERPAVE difere do nível 2 porque abrange um maior número de condições nas quais a mistura estudada pode ser aplicada. Este nível envolve novos ensaios como o ensaio de extensão uniaxial e o ensaio volumétrico para avaliar a influência do comportamento não linear elástico das misturas betuminosas na ocorrência das deformações permanentes. Os ensaios do nível 2 são conduzidos no nível 3 com várias temperaturas.

A avaliação do desempenho efectuada pode ser feita em misturas a estudar que podem ser totalmente diferentes (diferentes curvas granulométricas, diferentes percentagens de betume, ou outras diferenças) ou que podem apenas diferir na percentagem de betume (no âmbito de um processo de formulação).

### **3.4.10. Formulação de misturas recicladas**

#### **3.4.10.1. Método do *Asphalt Institute***

Uma mistura reciclada a quente é uma mistura de misturas betuminosas fresadas e de novos materiais formulada para atingir uma mistura de pavimentação com propriedades físicas específicas (AI, 1981). O método de formulação do *Asphalt Institute* para misturas betuminosas recicladas a quente preconiza a utilização tanto do método *Marshall* como do método *Hveem* utilizados na formulação de misturas betuminosas convencionais, acrescentando apenas alguns procedimentos para a análise dos agregados e material fresado tendo como objectivo a satisfação do fuso granulométrico das especificações, e a avaliação do ligante envelhecido para a determinação da percentagem de ligante novo e/ou agente rejuvenescedor (se necessário).

De acordo com AI (1981) este método de formulação foi desenvolvido para misturas betuminosas em que a proporção de material fresado varie de 20 a 70%. O procedimento segue as etapas indicadas na figura 3.36 seguindo-se uma explicação de algumas das etapas de acordo com AI (1981).

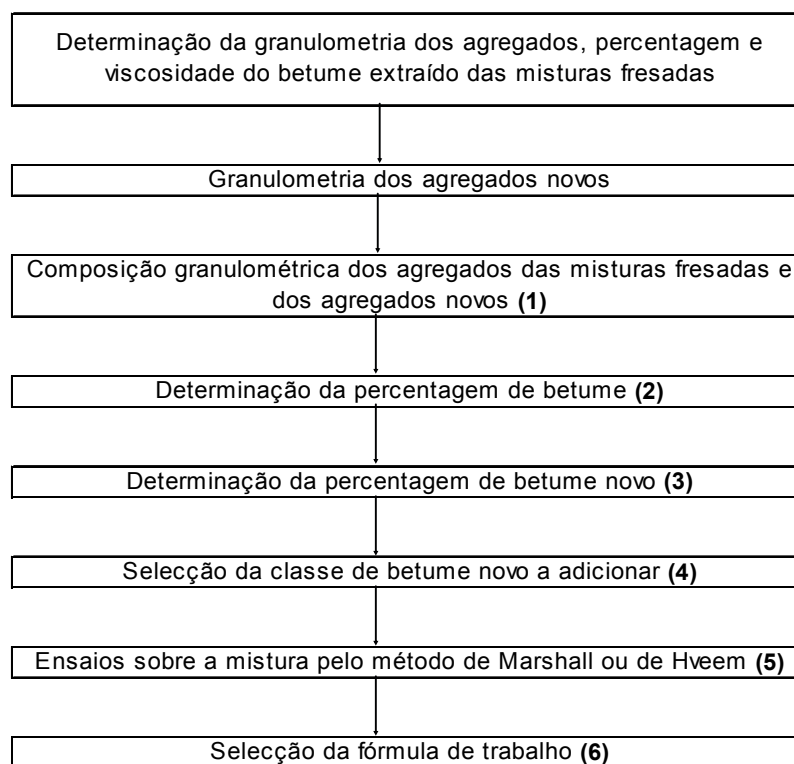


Figura 3.36 – Organograma para formulação de misturas betuminosas pelo método do AI

**(1) Composição granulométrica dos agregados das misturas fresadas e dos agregados novos**

Utilizando as análises granulométricas dos agregados contidos nas misturas betuminosas fresadas e dos agregados novos determina-se as respectivas proporções na mistura.

**(2) Determinação da percentagem de betume**

A percentagem de betume pode ser determinada pelo CKE (*California Kerosene Equivalent*) ou pode ser calculado pela seguinte expressão (já referida no capítulo 2 para cálculo da percentagem de betume residual na reciclagem com emulsões):

$$P_{\text{total}} = (0,035 \times a + 0,045 \times b + K \times c + F) \quad (3.14)$$

Onde:

$P_{\text{total}}$  - percentagem total aproximada de betume para a mistura reciclada em relação à massa total da mistura;

$a$  - percentagem de agregados retidos no peneiro nº8 (ASTM);

$b$  - percentagem de agregados passados no peneiro nº8 (ASTM) e retidos no peneiro nº 200;

$c$  - percentagem de agregados passados no peneiro nº200;

$K$  - constante, função da quantidade de material que passa no peneiro nº200. Pode assumir os seguintes valores:

- $K = 0,15$  para 11-15% de passados no peneiro nº 200
- $K = 0,18$  para 6-10% de passados no peneiro nº 200

- $K = 0,20$  para 5% ou menos de passados no peneiro nº 200

F - factor de absorção dos agregados com valores entre 0 e 2%. Na falta de dados utilizar 0,7 a 1,0 %.

### (3) Determinação da percentagem de betume novo

Neste passo estima-se a percentagem de ligante novo na mistura.

$$Pb_N = P_{btotal} - (Pb_{MBF} \times TR/100) \quad (3.15)$$

$Pb_N$  - percentagem de betume novo expressa como percentagem da massa total da mistura;

$P_{btotal}$  - percentagem de betume determinada em (2);

$Pb_{MBF}$  - percentagem de betume das misturas betuminosas fresadas;

TR - taxa de reciclagem.

### (4) Selecção da classe de betume

Determina-se percentagem de betume novo em relação à percentagem de betume total ( $Pb_N/P_{btotal}$ ). O betume novo é seleccionado através da viscosidade que lhe é requerida e é determinada num gráfico log-log que relaciona a viscosidade com a percentagem de betume novo (*viscosity blending chart*).

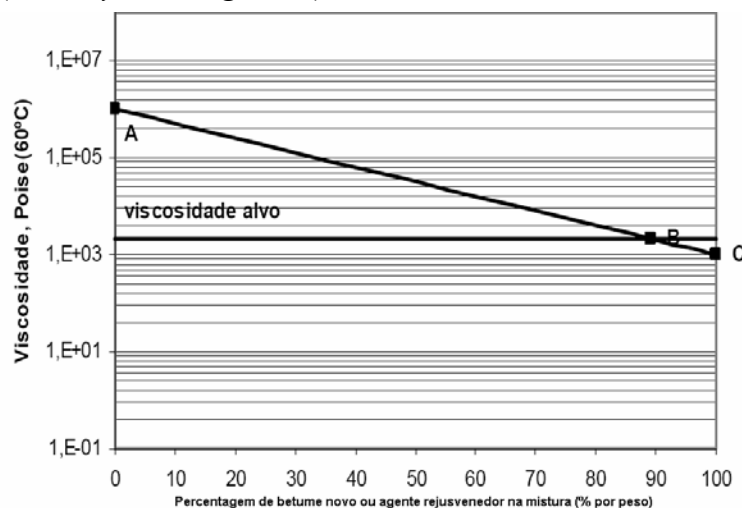


Figura 3.37 – Determinação da viscosidade requerida para o betume novo ou agente rejuvenecedor a adicionar (Lima, 2003)

O processo consiste em marcar o ponto A que corresponde à viscosidade do betume da mistura fresada. Marca-se uma linha horizontal correspondendo a viscosidade alvo (2000 Poise). Marca-se o ponto B correspondente à percentagem de betume novo em relação ao betume total. Une-se os pontos A e B e prolonga-se a recta até se encontrar o ponto C. A viscosidade do betume novo deverá ser a correspondente ao ponto C.

### (5) Ensaios sobre a mistura pelo método de *Marshall* ou de *Hveem*

Realizam-se os ensaios convencionais de acordo com o método de formulação adoptado (*Hveem* ou *Marshall*).

### (6) Selecção da fórmula de trabalho

Determina-se a fórmula de trabalho.

### 3.4.10.2. Método SUPERPAVE

O método de formulação de misturas betuminosas SUPERPAVE, dado que se trata de um método racional baseado em propriedades fundamentais que traduzem o comportamento dos pavimentos *in situ*, pode ser aplicado a misturas não tradicionais como são as misturas betuminosas recicladas fabricadas a quente em central. No entanto inicialmente para composição das misturas a estudar têm de ser executadas algumas etapas para selecção do ligante novo a utilizar (em função, quer das propriedades que a mistura reciclada deverá ter, quer das propriedades do ligante recuperado das misturas betuminosas fresadas) e para composição granulométrica da mistura de agregados. Após terem sido executadas estas etapas, a formulação da mistura reciclada segue o mesmo procedimento da formulação de misturas betuminosas utilizando a metodologia SUPERPAVE

Para selecção do betume foram desenvolvidos gráficos (*blending chart*) do tipo dos desenvolvidos no método do *Asphalt Institute* para avaliação dos parâmetros obtidos no ensaio com o reómetro de corte directo (DSR).

*Kandhall* (1997) propôs três abordagens para selecção do ligante novo, em termos de classe de desempenho, de acordo com a taxa de reciclagem a utilizar. Assim se a taxa de reciclagem for inferior a 15% o betume (PG – *performance grade*) a seleccionar será o mesmo que seria se a taxa de reciclagem fosse 0% (mistura tradicional). Se a taxa de reciclagem se situar entre 15 e 25% o betume escolhido será um grau abaixo daquele que seria escolhido se a taxa de reciclagem fosse 0%, isto é, se a classe PG fosse escolhida para taxa de reciclagem for 0%. Se a taxa de reciclagem for superior a 25% deve ser utilizado o gráfico (*blending chart*) para selecção da temperatura máxima para a classe PG do betume e a temperatura mínima deve ser pelo menos um grau abaixo que aquele que seria especificado para um betume se a taxa de reciclagem fosse 0%.

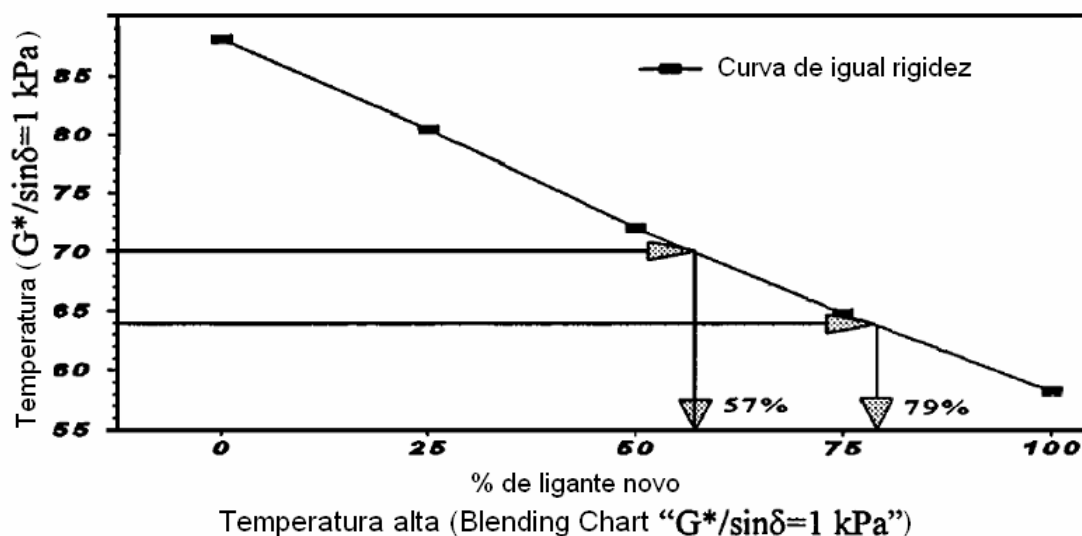
O sistema de classificação SUPERPAVE com base no desempenho foi concebido para melhorar o desempenho dos pavimentos com misturas betuminosas seleccionando o ligante betuminoso com propriedades físicas que permitam resistir às acções às quais as misturas em serviço são sujeitas em termos de fadiga, deformações permanentes, fendilhamento térmico e às acções durante o fabrico e a aplicação. Estas propriedades dependem da temperatura à qual são avaliadas. A selecção do ligante betuminoso novo a utilizar tem em conta a definição de três temperaturas: alta, intermédia e baixa. Em *Kandhall* (1997) é apresentado um quadro com a definição dessas temperaturas que aqui é apresentado no quadro 3.12.

Quadro 3.12 – Temperaturas para selecção do ligante betuminoso

| Temperatura | Nº de ensaios | Definição                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta        | 2             | A menor temperatura de:<br>a) Temperatura à qual $G^*/\sin\delta$ do betume original é igual a 1 kPa<br>b) Temperatura à qual $G^*/\sin\delta$ do betume após RTFOT é igual a 2,2 kPa                                                       |
| Intermédia  | 1             | Temperatura à qual $G^*\times\sin\delta$ do resíduo do betume após RTFOT e PAV é igual a 5 MPa                                                                                                                                              |
| Baixa       | 3             | A maior temperatura de:<br>a) Temperatura à qual $S=300$ MPa e $m>0,300$<br>b) Temperatura à qual $S<300$ MPa e $m=0,300$<br>Ou se $300 \text{ MPa} < S < 600 \text{ MPa}$ e $m\geq 0,300$<br>c) Temperatura à qual extensão de rotura é 1% |

Nota: S e m correspondem aos valores da rigidez e da taxa de variação da rigidez com o tempo obtidas no ensaio BBR.  $G^*$  e  $\delta$  correspondem aos valores do módulo complexo e ângulo de fase obtidos no ensaio DSR.

Conforme se referiu para selecção do betume são construídos gráficos tendo por base os resultados dos ensaios com o reómetro de corte. O tipo de gráficos (*blending charts*) a utilizar é apresentado na figura 3.38.

Figura 3.38 – Gráficos de temperatura (*Temperature blending charts*) (Kandhall, 1997)

São também traçados gráficos de temperatura com as grandezas  $G^*/\sin\delta=2,2$  kPa e  $G^*\times\sin\delta=5,0$  MPa. O objectivo é definir para uma determinada classe de betume (PG) a percentagem de betume novo na mistura dos dois betumes.

Outra abordagem pode ser efectuada através de critérios de desempenho. Essa abordagem é realizada através de gráficos do tipo dos que vem da figura 3.39.

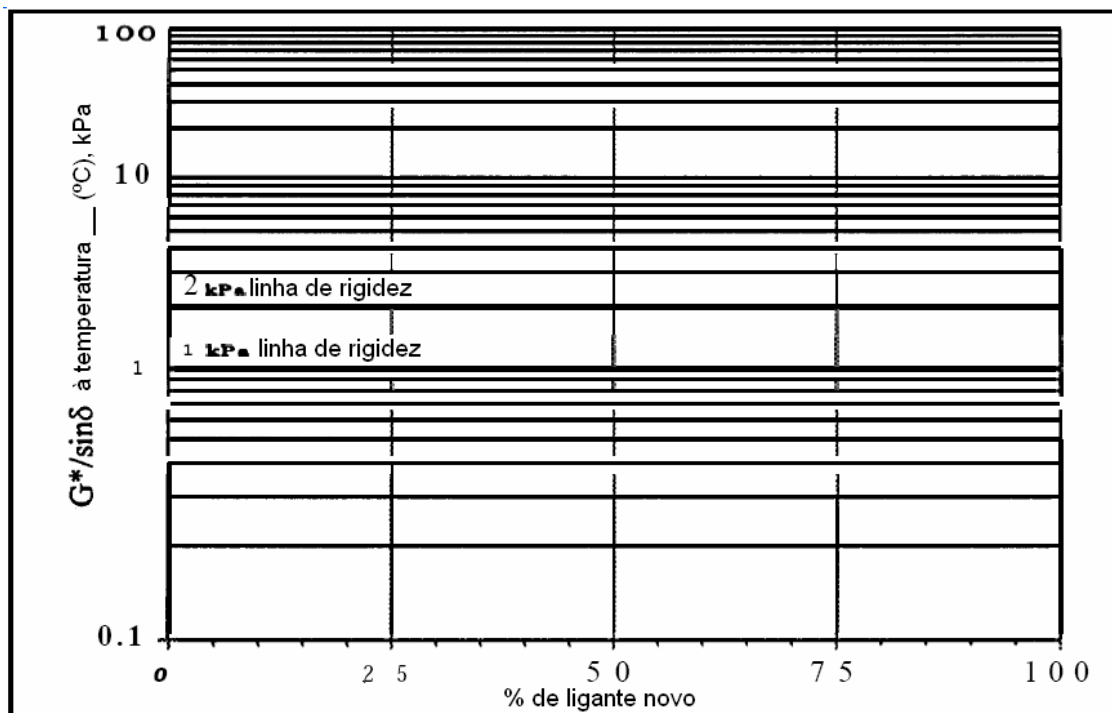


Figura 3.39 – Gráfico da rigidez com a percentagem de betume novo (Kandhall, 1997)

Em Kandhall (1997) fazem-se recomendações para a selecção do ligante novo. Algumas delas são as seguintes:

- O valor da temperatura alta da classe de desempenho do ligante da mistura reciclada pode ser determinado apenas num gráfico (*blending chart*) de temperatura. O gráfico da temperatura alta “ $G^*/\sin\delta=1$  kPa” é preferível ao gráfico da temperatura alta “ $G^*/\sin\delta=2,2$  kPa” porque é mais fácil de traçar (não é necessário efectuar o ensaio RTFOT);
- Apesar do gráfico da temperatura intermédia “ $G^*\times\sin\delta=5$  MPa” ter a utilidade expectável de determinar a taxa de reciclagem máxima, conduz geralmente taxas de reciclagem altas e não usuais, que não correspondem à experiência com a reciclagem de misturas betuminosas a quente. É recomendável que o gráfico da temperatura não seja utilizado actualmente. Mais estudos incidindo na especificação SUPERPAVE em relação ao fendilhamento por fadiga são recomendáveis, especialmente em relação à temperatura ou critério de rigidez à temperatura intermédia;
- Foram propostas três abordagens para escolha da classe de desempenho do ligante novo. O gráfico recomendado para selecção da classe de desempenho do ligante novo foi o gráfico com as linhas de rigidez de 1,0 kPa e de 2,0 kPa. A rigidez de 1,0 kPa é utilizada para determinar a dosagem máxima do ligante betuminoso novo (ou taxa de reciclagem mínima) no ligante reciclado. A rigidez de 2,0 kPa é utilizada para determinar a dosagem mínima do ligante betuminoso novo (ou taxa de reciclagem máxima) no ligante reciclado devido à incapacidade do critério do gráfico “ $G^*\times\sin\delta=5$  MPa” o fazer.

### 3.4.11. Breves comentários. Método de formulação utilizado neste trabalho.

Os estudos de formulação de misturas betuminosas têm como objectivo a obtenção das proporções dos seus componentes (fórmula do estudo), de acordo com as propriedades avaliadas e com os critérios em que se baseia o método de formulação utilizado.

Num caso concreto de uma obra, em que se pretenda aplicar uma mistura betuminosa numa camada de um pavimento, após a obtenção da fórmula do estudo tem de ser feita a sua transposição para a central de fabrico para ser realizado o trecho experimental. A composição da mistura betuminosa aplicada no trecho experimental tem de ser aprovada pela fiscalização e deverá ser o mais próxima possível da composição obtida no estudo de formulação. A composição da mistura betuminosa aplicada no trecho experimental e aprovada pela fiscalização constitui a fórmula de trabalho. Durante a execução da camada de pavimento, a fórmula de trabalho constitui a referência do ponto de vista do controlo da qualidade, sendo a esta composição que deverão ser aplicadas as tolerâncias de fabrico.

Os métodos de formulação empíricos são aplicáveis apenas aos materiais para os quais foram concebidos. Normalmente são menos dispendiosos e demorados do que os métodos de formulação racionais. Por outro lado, nas condições às quais são aplicáveis, são métodos que já foram comprovados com a experiência.

Os métodos de formulação racionais ao avaliarem as propriedades fundamentais das misturas betuminosas permitem inclusivamente verificar os pressupostos do projecto do pavimento. Por outro lado, a utilização de materiais não tradicionais nas misturas betuminosas pode ser conseguida recorrendo a este tipo de métodos de formulação, tornando-os por isso ferramentas importantes para a inovação.

As maiores exigências dos utentes e as crescentes preocupações ambientais tornam desejável que se utilizem métodos de formulação que conduzam à obtenção de misturas betuminosas com a qualidade exigível e com a maior durabilidade possível.

A adopção de métodos empíricos na formulação de misturas betuminosas recicladas sem qualquer procedimento adicional, não é adequada pelo facto de estes se destinarem a misturas betuminosas que utilizem materiais tradicionais. No entanto esses métodos poderão constituir uma boa ferramenta para encurtar a quantidade de misturas a estudar no âmbito do processo de formulação. Assim neste trabalho utilizou-se o método de *Marshall* para selecção das misturas sobre as quais incidiram os estudos “racionais”. O método adoptado foi o seguinte:

- i. Caracterização das misturas fresadas (da mistura, do betume e dos agregados);
- ii. Pré-selecção do betume novo a utilizar na mistura através das expressões referidas no capítulo 2 e de acordo com a caracterização do betume das misturas fresadas, para que o betume da mistura reciclada cumpra as especificações para o tipo de mistura a estudar;
- iii. Selecção dos agregados novos a utilizar após sua caracterização. Determinação das suas proporções para que o fuso granulométrico da mistura reciclada seja cumprido tendo em conta a granulometria dos agregados contidos na mistura fresada;

- iv. Estudo de *Marshall* para selecção da percentagem óptima total de betume da mistura, isto é, contabilizando nessa percentagem o betume das misturas fresadas e o betume novo a adicionar;
- v. Avaliação das propriedades “ racionais” (módulo de rigidez, vida à fadiga e resistência às deformações permanentes) da mistura reciclada;
- vi. Comparação dos valores das propriedades analisadas no estudo racional com os valores obtidos para as mesmas propriedades de uma mistura tradicional, formulada pelo método de *Marshall*, com os mesmos materiais novos, mas sem qualquer introdução de misturas fresadas. Outra alternativa poderia ser a sua comparação com valores requeridos em projecto ou em especificações.

Os estudos efectuados constituem o capítulo 4 deste trabalho.

## 4. Caso em estudo

### 4.1. Enquadramento

A parte experimental deste trabalho consistiu em realizar os estudos de formulação e de avaliação das características mecânicas de uma mistura betuminosa com reciclagem a quente tendo em vista a sua posterior aplicação em obra.

A mistura a estudar tratou-se de uma mistura betuminosa densa para aplicação em camada de regularização. O material fresado era proveniente da obra de reabilitação da A1 no sublanço Albergaria/Aveiro Sul e a mistura com reciclagem foi aplicada num trecho experimental da obra da SCUT da Costa da Prata, ambas da Mota-Engil Engenharia e Construção, SA.

O Caderno de Encargos da Brisa (Brisa, 2003) para o sublanço Albergaria/Aveiro Sul da A1, de onde é proveniente o fresado, já previa nas suas cláusulas técnicas especiais a possibilidade de ser utilizada esta técnica construtiva. Por razões diversas relacionadas com essa obra não foi possível recorrer à utilização desta técnica mas tomou-se como referência esse Caderno de Encargos na execução do trecho experimental na obra da SCUT da Costa da Prata.

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório Central da Mota-Engil excepto os ensaios de avaliação da resistência à fadiga, do módulo de rigidez e da resistência às deformações permanentes que foram conduzidos num outro laboratório (CICCOPN). Os ensaios de carga realizados *in situ*, para caracterização da camada de mistura betuminosa densa reciclada aplicada, foram realizados pela Consulstrada. Os procedimentos de ensaio seguidos foram os habitualmente utilizados nesses laboratórios.

### 4.2. Formulação da mistura betuminosa

#### 4.2.1. Caracterização dos materiais a utilizar na mistura betuminosa

##### 4.2.1.1. Material fresado

O material fresado é proveniente da fresagem do pavimento da A1 no sublanço Albergaria/Aveiro Sul. A espessura média fresada foi de cerca de 8 cm pelo que as misturas betuminosas fresadas foram o betão betuminoso drenante, o betão betuminoso subjacente ao drenante e em certas zonas o macadame betuminoso. Inicialmente fresaram-se o betão betuminoso drenante e o betão betuminoso subjacente ao drenante de forma separada. Posteriormente por razões relacionadas com a obra a fresagem foi realizada nas duas camadas simultaneamente pelo que o *stock* foi constituído pelo conjunto das duas misturas betuminosas sendo este o material fresado considerado nos estudos. Foi efectuada a caracterização do material fresado, dos agregados recuperados e do betume recuperado.

Em relação ao material fresado foi efectuada a análise granulométrica (LNEC E 233), a determinação do teor em água (NP 84) e a determinação da percentagem em betume por centrifugação (ASTM D 2172). Os resultados encontram-se nos quadros seguintes.

Quadro 4.1 – Análise granulométrica da mistura betuminosa fresada

| Peneiros ASTM |            | Percentagem acumulada do material que passa | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa |
|---------------|------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Abertura (mm) | Designação |                                             |                                               |
| 37,5          | 1 ½"       | 100,0                                       |                                               |
| 25,0          | 1"         | 99,1                                        | ≤ 100                                         |
| 19,0          | ¾"         | 95,3                                        |                                               |
| 12,5          | ½"         | 73,2                                        |                                               |
| 9,5           | 3/8"       | 53,9                                        |                                               |
| 4,75          | nº 4       | 29,0                                        |                                               |
| 2,00          | nº 10      | 13,6                                        |                                               |
| 0,850         | nº 20      | 6,3                                         |                                               |
| 0,425         | nº 40      | 3,5                                         |                                               |
| 0,180         | nº 80      | 1,4                                         |                                               |
| 0,075         | nº 200     | 0,5                                         |                                               |

O Caderno de Encargos da Brisa impõe que o material fresado após tratamento passe todo no peneiro ASTM de 25 mm (1"). Assim o material fresado a utilizar deverá excluir a fracção acima dessa dimensão.

Quadro 4.2 – Percentagem de betume e teor em água da mistura betuminosa fresada

| Ensaio                    | Procedimento | Valor obtido | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa |
|---------------------------|--------------|--------------|-----------------------------------------------|
| Percentagem de betume (%) | ASTM D 2172  | 4,4          | -                                             |
| Teor em água (%)          | NP 84        | 0,8          | ≤ 5                                           |

Em relação aos agregados recuperados foram efectuados os mesmos ensaios que se realizam habitualmente sobre os agregados novos para misturas betuminosas tradicionais.

No quadro 4.3 constam as análises granulométricas (JAE S.8-53) efectuadas aos agregados recuperados da mistura betuminosa fresada.

Quadro 4.3 – Análise granulométrica dos agregados recuperados da mistura betuminosa fresada

| Peneiros ASTM |            | Percentagem acumulada do material que passa |
|---------------|------------|---------------------------------------------|
| Abertura (mm) | Designação |                                             |
| 25,0          | 1"         | 100,0                                       |
| 19,0          | ¾"         | 99,6                                        |
| 16,0          | 5/8"       | 99,1                                        |
| 12,5          | ½"         | 92,6                                        |
| 9,5           | 3/8"       | 78,7                                        |
| 6,3           | ¼"         | 59,5                                        |
| 4,75          | nº 4       | 51,2                                        |
| 2,36          | nº 8       | 35,7                                        |
| 2,00          | nº 10      | 32,5                                        |
| 0,850         | nº 20      | 20,9                                        |
| 0,425         | nº 40      | 15,6                                        |
| 0,180         | nº 80      | 10,3                                        |
| 0,075         | nº 200     | 7,2                                         |

No quadro 4.4 constam os resultados dos ensaios realizados para determinação da limpeza dos agregados recuperados da mistura betuminosa fresada.

Quadro 4.4 - Características de limpeza dos agregados recuperados da mistura betuminosa fresada

| Ensaio                             | Procedimento | Valor obtido | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa para a Mistura Betuminosa Densa |
|------------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Equivalente de areia (%)           | LNEC E 199   | 58           | $\geq 50$                                                                     |
| Azul-de-metileno (g / 100 g finos) | NF P 15-592  | 0,40         | -                                                                             |

Analisando o quadro 4.4 verifica-se que a especificação relativa ao valor do equivalente de areia fica satisfeita. O Caderno de Encargos da Brisa não especifica um valor limite para o azul-de-metileno. Para a mistura betuminosa densa em APORBET (1998) especifica-se o valor máximo de 0,8. Tomando em consideração esse valor verifica-se que essa propriedade também é satisfeita.

No quadro 4.5 constam os resultados dos ensaios realizados para determinação da massa volúmica e da absorção de água (ASTM C127/C128).

Quadro 4.5 – Massa volúmica e absorção de água dos agregados recuperados

|                                      |                                                                 |                                               | Valor obtido |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|
| Material passado no peneiro ASTM nº4 | Partículas secas (g/cm <sup>3</sup> )                           |                                               | 2,54         |
|                                      | Material impermeável (g/cm <sup>3</sup> )                       |                                               | 2,67         |
|                                      | Partículas saturadas com a superfície seca (g/cm <sup>3</sup> ) |                                               | 2,60         |
|                                      | Absorção (%)                                                    | Valor obtido                                  | 1,61         |
|                                      |                                                                 | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa | $\leq 1$     |
| Material retido no peneiro ASTM nº4  | Partículas secas (g/cm <sup>3</sup> )                           |                                               | 2,56         |
|                                      | Material impermeável (g/cm <sup>3</sup> )                       |                                               | 2,64         |
|                                      | Partículas saturadas com a superfície seca (g/cm <sup>3</sup> ) |                                               | 2,59         |
|                                      | Absorção (%)                                                    | Valor obtido                                  | 1,15         |
|                                      |                                                                 | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa | $\leq 1$     |

O valor de 1% especificado no Caderno de Encargos da Brisa para a absorção de água é demasiado conservativo. De acordo com APORBET (1998) o valor máximo para absorção de água dos agregados para a mistura betuminosa densa deverá ser de 3 % tendo sido este o valor considerado. Os agregados recuperados da mistura betuminosa fresada satisfazem este limite.

Para avaliação da forma foram realizados os ensaios para determinação dos índices de lamelação e alongamento (BS 812). Para avaliação da resistência ao desgaste foi efectuado o ensaio de desgaste de Los Angeles (LNEC E 237). No quadro 4.6 constam os resultados dos ensaios efectuados.

Quadro 4.6 - Forma e resistência ao desgaste dos agregados da mistura betuminosa fresada

| Ensaio                                        | Procedimento | Valor obtido | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa para a Mistura Betuminosa Densa |
|-----------------------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Índice de alongamento (%)                     | BS812        | 24           | $\leq 25$                                                                     |
| Índice de lamelação (%)                       |              | 18           | $\leq 25$                                                                     |
| Desgaste de Los Angeles (granulometria B) (%) | LNEC E 237   | 30           | $\leq 30$                                                                     |

Sobre o betume recuperado no evaporador rotativo (EN 12697-3) foram efectuados os ensaios de penetração, temperatura de amolecimento e massa volúmica do ligante.

Quadro 4.7 – Características do betume recuperado da mistura betuminosa fresada

| Ensaio                                       | Procedimento | Valor obtido | Especificação do Caderno de encargos da Brisa |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------------------------|
| Penetração de ligantes betuminosos (1/10 mm) | EN 1426      | 17           | > 15 (valor médio de cinco determinações)     |
| Temperatura de amolecimento (°C)             | EN 1427      | 65,8         | -                                             |
| Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )          | JAE P3.3-53  | 1,059        | -                                             |

Analisando os quadros anteriores verifica-se que as propriedades avaliadas se encontram dentro dos limites especificados no Caderno de Encargos da Brisa.

#### 4.2.1.2. Betume novo

O betume novo a utilizar foi um betume 35/50 fornecido pela *Shell*. Nesta primeira fase do estudo este betume foi o escolhido por ser o exigido no Caderno de Encargos da Brisa para as misturas betuminosas densas tradicionais e também para a mistura betuminosa reciclada.

Dado que o betume da mistura betuminosa reciclada irá ser constituído por este betume e pelo betume proveniente das misturas fresadas que é mais duro tem de se aferir se a junção dos dois permite obter um betume com características adequadas. Este aspecto pode ser acautelado utilizando expressões existentes na bibliografia e que relacionam os valores da penetração e da temperatura de amolecimento dos betumes componentes com os do betume da mistura reciclada final. Estas propriedades serão analisadas no tratamento dos dados no ponto 4.2.2 deste trabalho e durante os estudos, através de ensaios realizados sobre o betume recuperado da mistura betuminosa reciclada. As características do betume novo (pré) seleccionado são apresentadas no quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Características do betume novo utilizado

| Ensaio                                              |                                                       | Procedimento | Valor obtido                                                                                                  |           | Especificação LNEC E80 (betume 35/50) |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|
| Penetração do ligante betuminoso (1/10 mm)          |                                                       | EN 1426      | 39                                                                                                            |           | 35 a 50                               |
| Temperatura de amolecimento (°C)                    |                                                       | EN 1427      | 53,5                                                                                                          |           | 50 a 58                               |
| Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )                 |                                                       | JA E P3.3-53 | 1,041                                                                                                         |           | -                                     |
| Viscosidade cinemática (mm <sup>2</sup> /s) [135°C] |                                                       | AASHTO TP 48 | 490                                                                                                           |           | ≥ 370                                 |
|                                                     |                                                       |              | Gama de temperatura de fabrico da mistura (para a qual a viscosidade varia entre 170 ± 20 mm <sup>2</sup> /s) | 158 a 164 | -                                     |
|                                                     |                                                       |              | Gama de temperatura de compactação (para a qual a viscosidade varia entre 280 ± 30 mm <sup>2</sup> /s)        | 148 a 153 | -                                     |
|                                                     |                                                       |              |                                                                                                               |           |                                       |
| Resistência ao endurecimento (RTFOT)                | Variação de massa (%)                                 | ASTM D 2872  | 0,0                                                                                                           |           | ≤ 0,5                                 |
|                                                     | Penetração do ligante betuminoso após RTFOT (1/10 mm) | EN 1426      | 23                                                                                                            |           | ≥ 21                                  |
|                                                     | Temperatura de amolecimento após RTFOT (°C)           | EN 1427      | 56,5                                                                                                          |           | ≥ 52                                  |
|                                                     | Aumento da temperatura de amolecimento (°C)           | -            | 3                                                                                                             |           | ≤ 11                                  |

Analisando o quadro 4.8 verifica-se que o betume utilizado cumpre os requisitos da especificação LNEC E80 para um betume 35/50.

#### 4.2.1.3. Agregados novos

Os agregados novos a utilizar na mistura betuminosa são calcários provenientes da pedra de Cantanhede da Mota-Engil. O filer recuperado é proveniente dos agregados calcários utilizados. As principais características são de seguida descritas.

No quadro 4.9 constam as análises granulométricas (JA E S.8-53) efectuadas aos agregados.

Quadro 4.9 – Análise granulométrica dos agregados novos a utilizar na mistura betuminosa

| Peneiros ASTM |            | Percentagem acumulada do material que passa |            |             |                  |
|---------------|------------|---------------------------------------------|------------|-------------|------------------|
| Abertura (mm) | Designação | Pó de britagem 0/5                          | Brita 5/15 | Brita 15/25 | Filer recuperado |
| 25,0          | 1"         | 100,0                                       | 100,0      | 100,0       | 100,0            |
| 19,0          | ¾"         | 100,0                                       | 100,0      | 81,6        | 100,0            |
| 16,0          | 5/8"       | 100,0                                       | 100,0      | 55,9        | 100,0            |
| 12,5          | ½"         | 100,0                                       | 99,6       | 18,5        | 100,0            |
| 9,5           | 3/8"       | 100,0                                       | 82,9       | 2,3         | 100,0            |
| 6,3           | ¼"         | 100,0                                       | 35,2       | 1,2         | 100,0            |
| 4,75          | nº 4       | 96,4                                        | 8,8        | 1,0         | 100,0            |
| 2,36          | nº 8       | 66,4                                        | 2,0        | 0,9         | 98,9             |
| 2,00          | nº 10      | 60,3                                        | 1,9        | 0,9         | 98,6             |
| 0,850         | nº 20      | 35,4                                        | 1,7        | 0,9         | 96,6             |
| 0,425         | nº 40      | 25,8                                        | 1,6        | 0,9         | 94,0             |
| 0,180         | nº 80      | 16,9                                        | 1,6        | 0,9         | 85,9             |
| 0,075         | nº 200     | 10,9                                        | 1,5        | 0,8         | 60,7             |

No quadro 4.10 estão os resultados dos ensaios realizados para determinação da massa volúmica e da absorção de água (ASTM C127/C128).

Quadro 4.10 – Massa volúmica e absorção de água dos agregados novos a utilizar na mistura betuminosa

|                                      |                                                    | Valor obtido                                  |            |             |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------|-------------|
|                                      |                                                    | Pó de britagem 0/5                            | Brita 5/15 | Brita 15/25 |
| Material passado no peneiro ASTM nº4 | Partículas secas (g/cm³)                           |                                               | 2,53       |             |
|                                      | Material impermeável (g/cm³)                       |                                               | 2,66       |             |
|                                      | Partículas saturadas com a superfície seca (g/cm³) |                                               | 2,58       |             |
|                                      | Absorção (%)                                       | Valor obtido                                  | 1,87       |             |
|                                      |                                                    | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa | ≤ 1        |             |
| Material retido no peneiro ASTM nº4  | Partículas secas (g/cm³)                           |                                               |            | 2,61        |
|                                      | Material impermeável (g/cm³)                       |                                               |            | 2,71        |
|                                      | Partículas saturadas com a superfície seca (g/cm³) |                                               |            | 2,65        |
|                                      | Absorção (%)                                       | Valor obtido                                  |            | 1,38        |
|                                      |                                                    | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa |            | ≤ 1         |
| Material passado no peneiro ASTM ¾"  | Partículas secas (g/cm³)                           |                                               |            | 2,61        |
|                                      | Material impermeável (g/cm³)                       |                                               |            | 2,70        |
|                                      | Partículas saturadas com a superfície seca (g/cm³) |                                               |            | 2,64        |
|                                      | Absorção (%)                                       | Valor obtido                                  |            | 1,24        |
|                                      |                                                    | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa |            | ≤ 1         |

Tomando em consideração o valor especificado em APORBET (1998) para a absorção de água ( $\leq 3\%$ ) verifica-se que essa propriedade fica satisfeita por todos os agregados.

No quadro 4.11 constam os resultados dos ensaios realizados para determinação da limpeza dos agregados. Os ensaios realizados foram a determinação do equivalente de

areia (LNEC E 199) e a determinação do valor do azul-de-metileno (NF P 15-592) e foram realizados sobre o pó de britagem.

Quadro 4.11 – Características de limpeza dos agregados novos a utilizar na mistura betuminosa

| Ensaio                             | Procedimento | Valor obtido | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa para a Mistura Betuminosa Densa |
|------------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Equivalente de areia (%)           | LNEC E 199   | 59           | $\geq 50$                                                                     |
| Azul-de-metileno (g / 100 g finos) | NF P 15-592  | 0,78         | -                                                                             |

O valor do equivalente de areia cumpre a especificação do Caderno de Encargos da Brisa. O valor do azul-de-metileno, tomando em consideração o valor especificado em APORBET (1998) ( $\leq 0,8$ ), também cumpre a especificação.

Sobre as britas foram realizados ensaios para avaliação da forma e da resistência ao desgaste. Para avaliação da forma foram realizados os ensaios para determinação dos índices de lamelação e alongamento (BS 812). Para avaliação da resistência ao desgaste foi efectuado o ensaio de desgaste de Los Angeles (LNEC E 237). No quadro 4.12 constam os resultados dos ensaios efectuados.

Quadro 4.12 – Forma e resistência ao desgaste dos agregados novos a utilizar na mistura

| Ensaio                                        | Procedimento | Valor obtido |             | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa para a Mistura Betuminosa Densa |
|-----------------------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                                               |              | Brita 5/15   | Brita 15/25 |                                                                               |
| Índice de alongamento (%)                     | BS812        | 22           | 25          | $\leq 25$                                                                     |
| Índice de lamelação (%)                       |              | 19           | 20          | $\leq 25$                                                                     |
| Desgaste de Los Angeles (granulometria B) (%) | LNEC E 237   | -            | 27          | $\leq 30$                                                                     |

Em relação ao filer recuperado de natureza calcária para além da análise granulométrica que consta do quadro 4.9 foi ainda determinada a sua massa volúmica e a sua superfície específica. Os resultados obtidos constam do quadro 4.13.

Quadro 4.13 – Características do filer utilizado na mistura betuminosa

| Ensaio                                     | Procedimento | Valor obtido |
|--------------------------------------------|--------------|--------------|
| Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )        | LNEC E 64    | 2,69         |
| Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g) | LNEC E 65    | 3509         |

Analisando os quadros anteriores, em que constam as propriedades determinadas sobre os agregados novos, verifica-se que as especificações são todas satisfeitas, exceptuando o valor da absorção de água, se for considerado o valor especificado pelo Caderno de

Encargos da Brisa. No entanto, considerando o valor especificado em APORBET (1998), essa propriedade cumpre a especificação.

#### 4.2.2. Tratamento dos dados

De acordo com o Caderno de Encargos da Brisa denomina-se por MBR as misturas betuminosas recicladas e por MBF as misturas betuminosas fresadas. De seguida descrevem-se as grandezas utilizadas para tratar os dados provenientes da caracterização das MBF para sua incorporação nas MBR a estudar. Esta abordagem foi feita também em Picado-Santos (2003) embora com algumas diferenças na nomenclatura. A nomenclatura adoptada neste trabalho é a seguinte:

- TR - Taxa de reciclagem;
- TRa - Taxa de reciclagem de agregado;
- Pa<sub>MBF</sub> - Percentagem de agregados na mistura betuminosa fresada (MBF);
- Pa<sub>N</sub> - Percentagem de agregados novos na mistura betuminosa reciclada (MBR);
- Patotal - Percentagem de agregados na mistura betuminosa reciclada (MBR);
- TRb - Taxa de reciclagem de betume;
- Pb<sub>MBF</sub> - Percentagem de betume na mistura betuminosa fresada (MBF);
- Pb<sub>N</sub> - Percentagem de betume novo na mistura betuminosa reciclada (MBR);
- Pbtotal - Percentagem de betume na mistura betuminosa reciclada (MBR) ou percentagem de betume total.

O valor de TR é definido como o quociente entre as massas de MBF e MBR. O seu valor representa a percentagem de MBF presente em 100 % de MBR, ou seja, a taxa de reciclagem da mistura betuminosa. As expressões das taxas de reciclagem dos componentes betume e agregados são as seguintes:

$$TRa = TR \times \frac{Pa_{MBF}}{Patotal} \quad (4.1)$$

$$TRb = TR \times \frac{Pb_{MBF}}{Pbtotal} \quad (4.2)$$

Estes valores representam a proporção de betume ou de agregados provenientes das MBF na totalidade de betume ou de agregados presentes nas MBR. Em relação aos materiais novos, dado que a soma de todos os materiais na mistura tem de ser 100%, as suas proporções têm de verificar a seguinte relação:

$$Pa_N + Pb_N = 100 - TR \quad (4.3)$$

Note-se ainda que a soma de Patotal e de Pbtotal é igual à totalidade da MBR, isto é:

$$Patotal + Pbtotal = 100 \quad (4.4)$$

A totalidade dos agregados (conjunto dos agregados novos e dos agregados provenientes da MBF) tem de respeitar o fuso granulométrico para a mistura

betuminosa em causa. Para a mistura betuminosa densa, de acordo com o Caderno de Encargos da Brisa, o fuso granulométrico é o que consta no quadro 4.14.

Quadro 4.14 – Fuso do Caderno de Encargos da Brisa para a Mistura Betuminosa Densa

| Peneiros ASTM |            | Percentagem acumulada do material que passa |     |
|---------------|------------|---------------------------------------------|-----|
| Abertura (mm) | Designação |                                             |     |
| 25,0          | 1"         | 100                                         | 100 |
| 19,0          | 3/4"       | 90                                          | 100 |
| 16,0          | 5/8"       |                                             |     |
| 12,5          | 1/2"       | 73                                          | 87  |
| 9,5           | 3/8"       |                                             |     |
| 6,3           | 1/4"       |                                             |     |
| 4,75          | nº 4       | 45                                          | 60  |
| 2,36          | nº 8       |                                             |     |
| 2,00          | nº 10      | 32                                          | 46  |
| 0,850         | nº 20      |                                             |     |
| 0,425         | nº 40      | 16                                          | 23  |
| 0,180         | nº 80      | 9                                           | 18  |
| 0,075         | nº 200     | 5                                           | 10  |

Considerando  $P_{MBR}(i)$ ,  $P_{MBF}(i)$  e  $P_N(i)$  os valores dos passados acumulados dos agregados da mistura betuminosa reciclada, mistura betuminosa fresada e dos agregados novos respectivamente e ainda  $F_{min}(i)$  e  $F_{max}(i)$  os valores do fuso a respeitar, relativamente ao peneiro (i) tem-se que:

$$P_{MBR}(i) = TRa \times P_{MBF}(i) + (1 - TRa) \times P_N(i) \quad (4.5)$$

e

$$F_{min}(i) \leq P_{MBR}(i) \leq F_{max}(i) \quad (4.6)$$

Para uma taxa de reciclagem TR a proporção de agregados do material fresado na totalidade dos agregados (TRa) fica definida para qualquer percentagem de betume total (Pbtot) a estudar. A granulometria dos agregados da mistura betuminosa fresada tem de ser também conhecida. Assim podemos determinar um novo fuso apenas para os agregados novos a adicionar. Esse fuso fica definido pelos valores de  $P_N(i)$  para cada peneiro (i). Esse fuso define-se colocando as expressões anteriores em função de  $P_N(i)$ , resultando nas seguintes expressões:

$$P_N(i) \geq F_{min}(i) - \frac{TRa \times P_{MBF}(i)}{(1 - TRa)} \quad (4.7)$$

e

$$P_N(i) \leq F_{max}(i) - \frac{TRa \times P_{MBF}(i)}{(1 - TRa)} \quad (4.8)$$

Os valores de  $P_N(i)$  assim estabelecidos para cada peneiro (i) definem o fuso para os agregados novos para uma determinada percentagem de betume total (Pbtot) a estudar.

Neste trabalho foram estudadas quatro taxas de reciclagem: 15, 20, 25 e 30%. Considerando Pbtot de 5 % (valor intermédio próximo da percentagem de betume óptima habitual em misturas betuminosas densas) podemos obter os fusos para os

agregados novos que constam do quadro 4.15. Note-se que esta simplificação foi considerada após algumas experiências em que se verificou que a alteração da percentagem de betume total a considerar no cálculo (por exemplo entre 4 e 6 %) não influenciava de forma relevante os fusos dos agregados novos obtidos. Em todo o caso poder-se-á verificar o cumprimento do fuso granulométrico recuperando os agregados da mistura betuminosa reciclada (MBR) fabricada em laboratório e em obra.

Quadro 4.15 - Fuso granulométrico para os agregados novos que vão compor a mistura betuminosa para cada taxa de reciclagem

| Peneiros ASTM |            | TR=15% |      | TR=20% |      | TR=25% |      | TR=30% |      |
|---------------|------------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| Abertura (mm) | Designação | Min.   | Max. | Min.   | Max. | Min.   | Max. | Min.   | Max. |
| 25,0          | 1"         | 100    | 100  | 100    | 100  | 100    | 100  | 100    | 100  |
| 19,0          | ¾"         | 88     | 100  | 88     | 100  | 87     | 100  | 86     | 100  |
| 16,0          | 5/8"       |        |      |        |      |        |      |        |      |
| 12,5          | ½"         | 70     | 86   | 68     | 86   | 66     | 85   | 65     | 85   |
| 9,5           | 3/8"       |        |      |        |      |        |      |        |      |
| 6,3           | ¼"         |        |      |        |      |        |      |        |      |
| 4,75          | nº 4       | 44     | 62   | 43     | 62   | 43     | 63   | 42     | 64   |
| 2,36          | nº 8       |        |      |        |      |        |      |        |      |
| 2,00          | nº 10      | 32     | 48   | 32     | 49   | 32     | 51   | 32     | 52   |
| 0,850         | nº 20      |        |      |        |      |        |      |        |      |
| 0,425         | nº 40      | 16     | 24   | 16     | 25   | 16     | 26   | 16     | 26   |
| 0,180         | nº 80      | 9      | 19   | 9      | 20   | 9      | 21   | 8      | 21   |
| 0,075         | nº 200     | 5      | 11   | 4      | 11   | 4      | 11   | 4      | 11   |

De acordo com os fusos determinados fixaram-se as proporções em que os agregados novos entram na mistura de agregados novos. No quadro 4.16, são apresentadas as proporções de cada agregado novo, em 100% de agregados novos a introduzir na mistura.

Quadro 4.16 – Proporção de cada agregado novo a introduzir na mistura

| AGREGADO           | TAXA DE RECICLAGEM (TR) |        |        |        |
|--------------------|-------------------------|--------|--------|--------|
|                    | TR=15%                  | TR=20% | TR=25% | TR=30% |
| Pó de britagem 0/5 | 55                      | 55     | 55     | 54     |
| Brita 5/15         | 17                      | 17     | 17     | 17     |
| Brita 15/25        | 25                      | 25     | 25     | 25     |
| Filer              | 3                       | 3      | 3      | 4      |
| TOTAL              | 100%                    | 100%   | 100%   | 100%   |

No capítulo 2 foram apresentadas as expressões que relacionam as características de penetração, de temperatura amolecimento e de viscosidade do ligante da mistura reciclada em função dos ligantes que o compõem (betume novo e betume das misturas fresadas). Dessas foram utilizadas as primeiras duas expressões (2.8 e 2.9) que são as seguintes:

- Penetração

$$\log pen_{MBR} = TRb \times \log pen_{MBF} + (1 - TRb) \times \log pen_N \quad (2.8)$$

- Temperatura de amolecimento

$$TAB_{MBR} = TRb \times TAB_{MBF} + (1 - TRb) \times TAB_N \quad (2.9)$$

Onde:

$pen_{MBR}$  - Penetração do betume da MBR;

- $pen_{MBF}$  - Penetração do betume da MBF;  
 $pen_N$  - Penetração do betume novo;  
 $TAB_{MBR}$  - Temperatura de amolecimento do betume da MBR;  
 $TAB_{MBF}$  - Temperatura de amolecimento do betume da MBF;  
 $TAB_N$  - Temperatura de amolecimento do betume novo;  
 $TRb$  - Percentagem de betume da MBR em 100% do betume da MBR, ou taxa de reciclagem de betume.

Nesta fase do trabalho ainda não são conhecidas as percentagens de betume que vão ser utilizadas nas misturas (percentagem óptima em betume, ou, percentagem em betume resultante do estudo de formulação). No entanto já se determinou a percentagem de betume da mistura fresada ( $Pb_{MBF} = 4,4\%$ ). Assim para cada taxa de reciclagem e para cada percentagem de betume é possível definir o valor de  $TRb$  (expressão 4.2). O valor de  $100-TRb$  corresponde à percentagem de betume novo no betume total da mistura betuminosa reciclada. Os valores de  $TRb$  e de  $100-TRb$  constam do quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Valores de  $TRb$  para cada  $TR$  e para cada  $Pb_{total}$

| $Pb_{total}$<br>(%) | TR=15%       |                  | TR=20%       |                  | TR=25%       |                  | TR=30%       |                  |
|---------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|
|                     | $TRb$<br>(%) | $100-TRb$<br>(%) | $TRb$<br>(%) | $100-TRb$<br>(%) | $TRb$<br>(%) | $100-TRb$<br>(%) | $TRb$<br>(%) | $100-TRb$<br>(%) |
| 4,0                 | 16,5         | 83,5             | 22,0         | 78,0             | 27,5         | 72,5             | 33,0         | 67,0             |
| 4,5                 | 14,7         | 85,3             | 19,6         | 80,4             | 24,4         | 75,6             | 29,3         | 70,7             |
| 5,0                 | 13,2         | 86,8             | 17,6         | 82,4             | 22,0         | 78,0             | 26,4         | 73,6             |
| 5,5                 | 12,0         | 88,0             | 16,0         | 84,0             | 20,0         | 80,0             | 24,0         | 76,0             |
| 6,0                 | 11,0         | 89,0             | 14,7         | 85,3             | 18,3         | 81,7             | 22,0         | 78,0             |

O Caderno de Encargos da Brisa impõe que a percentagem de ligante novo a adicionar seja pelo menos 60 % da percentagem de betume total da mistura betuminosa reciclada. Deste modo o valor de  $100-TRb$  deverá ser superior a 60 %. Analisando o quadro 4.17 pode verificar-se que para as percentagens de betume entre 4 e 6% onde certamente se encontrará o valor óptimo da percentagem de betume da mistura os valores de  $100-TRb$  são sempre superiores a 60 %.

Conhecendo os valores de  $TRb$  é possível estimar as características de penetração e temperatura de amolecimento da mistura reciclada final. Para tal são necessários os valores de  $pen_N$ ,  $TAB_N$ ,  $pen_{MBF}$  e de  $TAB_{MBF}$  que já são conhecidos. O quadro 4.18 apresenta estes valores.

Quadro 4.18 – Estimativa dos valores de penetração e de temperatura de amolecimento da mistura reciclada final

| $pen_{MBF}$                                                                                       | 17     | $TAB_{MBF}$ | 65,8 | Percentagem de betume total ( $Pb_{total}$ ) |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------|------|----------------------------------------------|------|------|------|------|
| $pen_N$                                                                                           | 39     | $TAB_N$     | 53,5 | 4,0%                                         | 4,5% | 5,0% | 5,5% | 6,0% |
| Estimativa da penetração e temperatura de amolecimento do ligante da mistura betuminosa reciclada | TR=15% | $pen_{MBR}$ | 34   | 35                                           | 35   | 35   | 35   | 36   |
|                                                                                                   |        | $TAB_{MBR}$ | 55,5 | 55,3                                         | 55,1 | 55,0 | 54,9 | 54,9 |
|                                                                                                   | TR=20% | $pen_{MBR}$ | 32   | 33                                           | 34   | 34   | 35   | 35   |
|                                                                                                   |        | $TAB_{MBR}$ | 56,2 | 55,9                                         | 55,7 | 55,5 | 55,3 | 55,3 |
|                                                                                                   | TR=25% | $pen_{MBR}$ | 31   | 32                                           | 32   | 33   | 34   | 34   |
|                                                                                                   |        | $TAB_{MBR}$ | 56,9 | 56,5                                         | 56,2 | 56,0 | 55,8 | 55,8 |
|                                                                                                   | TR=30% | $pen_{MBR}$ | 30   | 31                                           | 31   | 32   | 32   | 32   |
|                                                                                                   |        | $TAB_{MBR}$ | 57,6 | 57,1                                         | 56,7 | 56,5 | 56,2 | 56,2 |

Nota: os valores da penetração estão em décimas de milímetro e os valores da temperatura de amolecimento estão em graus centígrados

De acordo com a especificação LNEC E80 para um betume 35/50 a penetração está compreendida entre 35 e 50 (1/10 mm) e a temperatura de amolecimento entre 50 a 58 (°C). De acordo com os valores estimados do quadro 4.18 pode verificar-se que a penetração varia entre 30 e 36 décimas de milímetro e a temperatura de amolecimento entre 54,9 e 57,6 °C. Assim pode concluir-se que a temperatura de amolecimento se situa dentro do intervalo especificado mas a penetração assume valores que na sua generalidade são inferiores a 35 (1/10 mm). Dado que os valores da penetração são inferiores aos exigidos, sendo portanto o betume mais duro podendo assim conduzir a uma maior fragilização da mistura betuminosa, dever-se-ia recorrer à utilização de rejuvenescedores ou a um betume novo mais mole (por exemplo da classe 50/70). Analisando o quadro 4.18 poder-se-ia também simplesmente optar pela não utilização de taxas de reciclagem superiores a 15 %.

De qualquer forma, optou-se no presente caso de estudo, por manter o betume novo 35/50 (1/10mm) considerando todas as taxas de reciclagem em estudo sem adição de rejuvenescedores mas tendo como preocupação aferir estes valores no betume recuperado dos provetes *Marshall* moldados em laboratório e na mistura aplicada em obra.

#### 4.2.3. Estudo de *Marshall*

As normas de referência para a execução do estudo *Marshall* foram a norma NP 142 e a norma ASTM D 5581. Conforme se referiu foram estudadas quatro taxas de reciclagem: 15%, 20%, 25% e 30%. Foram moldados provetes *Marshall* com diferentes percentagens de betume total da mistura reciclada final. Inicialmente consideram-se as percentagens de betume total 4%, 4,5%, 5%, 5,5% e 6% seguindo o processo habitual. Posteriormente e em função dos resultados moldaram-se provetes com as percentagens em betume de 2%, 2,5%, 3% e 3,5%. O quadro 4.19 complementa o quadro 4.17 para estas percentagens de betume.

Quadro 4.19 – Valores de TRb para cada TR e para cada Pbttotal

| Pbttotal (%) | TR=15%  |             | TR=20%  |             | TR=25%  |             | TR=30%  |             |
|--------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
|              | TRb (%) | 100-TRb (%) | TRb (%) | 100-TRb (%) | TRb (%) | 100-TRb (%) | TRb (%) | 100-TRb (%) |
| 2,0          | 33,0    | 67,0        | 44,0    | 56,0        | 55,0    | 45,0        | 66,0    | 44,0        |
| 2,5          | 26,4    | 73,6        | 35,2    | 64,8        | 44,0    | 56,0        | 52,8    | 47,2        |
| 3,0          | 22,0    | 78,0        | 29,3    | 70,7        | 36,7    | 63,3        | 44,0    | 56,0        |
| 3,5          | 18,9    | 81,1        | 25,1    | 74,9        | 31,4    | 68,6        | 37,7    | 62,3        |

Foi considerada uma mistura de controlo, com os mesmos materiais novos mas sem qualquer introdução de material fresado, ou seja uma mistura com 0 % de taxa de reciclagem. Nesta mistura os agregados novos entraram nas proporções que constam do quadro 4.20.

Quadro 4.20 – Proporção de cada agregado na mistura de agregados

| AGREGADO           | TAXA DE RECICLAGEM |
|--------------------|--------------------|
|                    | TR=0%              |
| Pó de britagem 0/5 | 44                 |
| Brita 5/15         | 25                 |
| Brita 15/25        | 25                 |
| Fíler              | 6                  |
| TOTAL              | 100%               |

Nesta mistura betuminosa densa tradicional, tal como habitualmente, apenas foi necessário moldar provetes com percentagens de betume entre 4 e 6 %.

De acordo com o Caderno de Encargos da Brisa as características a apresentar pela mistura betuminosa densa como resultado do estudo de *Marshall* (com aplicação de 75 pancadas por face na compactação) são apresentadas no quadro 4.21.

Quadro 4.21 – Propriedades da mistura betuminosa densa a avaliar no estudo *Marshall* de acordo com Brisa (2003)

| Propriedade                                               | Especificação  |
|-----------------------------------------------------------|----------------|
| Estabilidade (kgf)                                        | > 1000         |
| Deformação (mm)                                           | 3 a 5          |
| Módulo de rigidez <i>Marshall</i> (kgf/mm)                | > 250 e < 815* |
| Porosidade (%)                                            | 3 a 5          |
| Grau de saturação em betume (GSB) (%)                     | 75 a 85        |
| Volume de vazios da mistura de agregados (VMA) (%)        | ≥ 14           |
| Resistência conservada (%)                                | > 80           |
| Percentagem de betume (%)                                 | ≥ 5,1          |
| Teor em betume (%)                                        | ≥ 5,0**        |
| Percentagem de betume novo em relação ao betume total (%) | ≥ 60***        |
| Relação ponderal fíler total / betume                     | ≥ 1,2          |

\* Este limite superior aplica-se às misturas com reciclagem a quente de acordo com as cláusulas técnicas especiais do Caderno de Encargos (8kN/mm=815 kgf/mm)

\*\* Este limite aplica-se às misturas com reciclagem a quente para camadas intermédias

\*\*\* Este limite aplica-se às misturas com reciclagem a quente

Os resultados do estudo *Marshall* estão resumidos nos quadros 4.22 a 4.26 respectivamente para as taxas de reciclagem de 0, 15, 20, 25 e 30 %. As figuras 4.1 a 4.15 representam graficamente os resultados da estabilidade, baridade e porosidade.

Quadro 4.22 – Estudo de *Marshall* (TR = 0%)

| Taxa de reciclagem (TR) = 0% |                                  |                                                       |                   |            |            |                                |                    |
|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|------------|------------|--------------------------------|--------------------|
| Pbtot<br>(%)                 | Baridade<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Baridade<br>máxima<br>teórica<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Porosidade<br>(%) | VMA<br>(%) | GSB<br>(%) | Força<br>de<br>rotura<br>(kgf) | Deformação<br>(mm) |
| 4,0                          | 2,333                            | 2,484                                                 | 6,1               | 13,1       | 53,8       | 850                            | 2,8                |
| 4,5                          | 2,351                            | 2,472                                                 | 4,9               | 12,9       | 62,2       | 1039                           | 2,9                |
| 5,0                          | 2,371                            | 2,449                                                 | 3,2               | 12,7       | 74,8       | 1258                           | 3,0                |
| 5,5                          | 2,374                            | 2,437                                                 | 2,6               | 13,0       | 80,1       | 1199                           | 3,3                |
| 6,0                          | 2,360                            | 2,422                                                 | 2,5               | 14,0       | 81,7       | 1028                           | 3,7                |

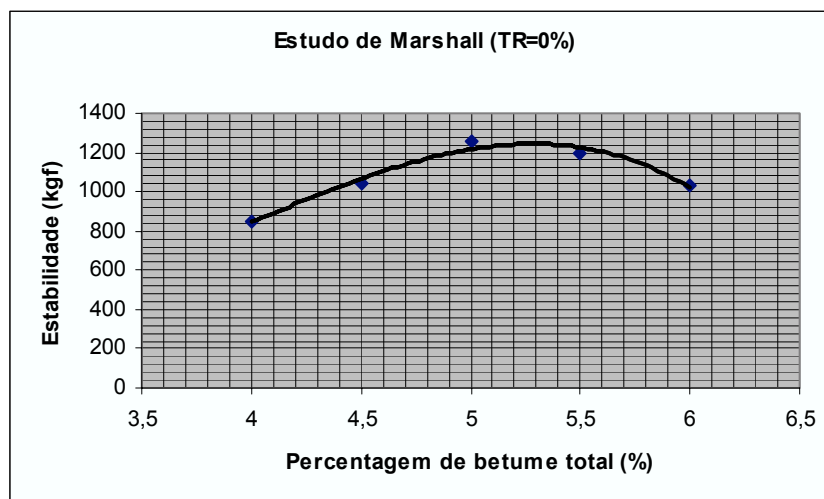


Figura 4.1 – Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=0%)

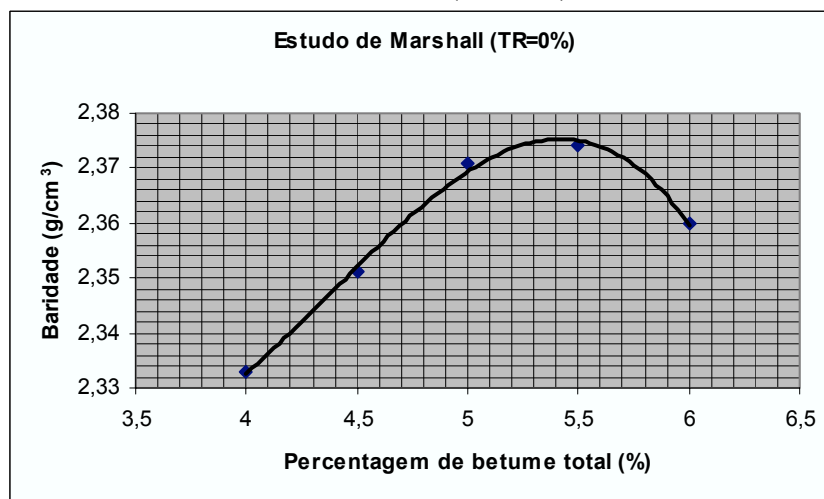


Figura 4.2 – Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=0%)

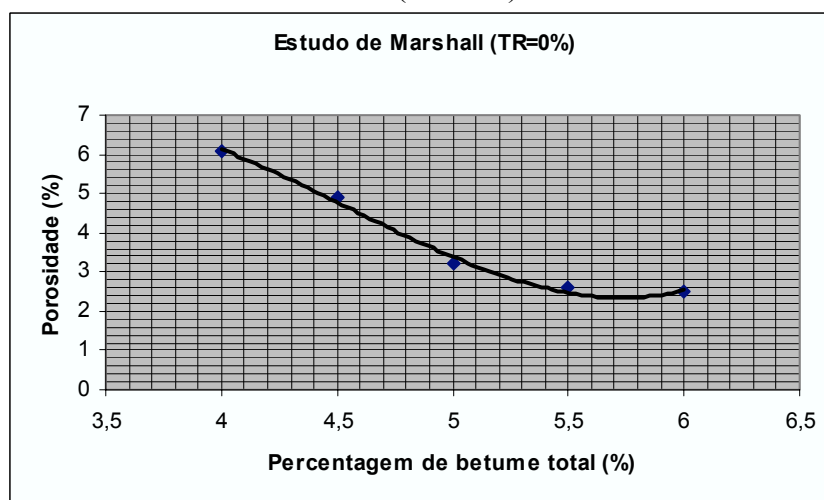


Figura 4.3 – Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura final (TR=0%)

Quadro 4.23 – Estudo de *Marshall* (TR = 15%)

| Taxa de reciclagem (TR) = 15% |                               |                                              |                |         |         |                       |                 |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|----------------|---------|---------|-----------------------|-----------------|
| Pbtotal (%)                   | Baridade (g/cm <sup>3</sup> ) | Baridade máxima teórica (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosidade (%) | VMA (%) | GSB (%) | Força de rotura (kgf) | Deformação (mm) |
| 2,0                           | 2,249                         | 2,580                                        | 12,8           | 14,0    | 8,5     | 1285                  | 4,1             |
| 2,5                           | 2,287                         | 2,561                                        | 10,7           | 13,0    | 17,8    | 1644                  | 2,8             |
| 3,0                           | 2,318                         | 2,530                                        | 8,4            | 12,3    | 31,8    | 1764                  | 3,3             |
| 3,5                           | 2,349                         | 2,511                                        | 6,4            | 11,6    | 44,3    | 1810                  | 2,5             |
| 4,0                           | 2,370                         | 2,502                                        | 5,3            | 11,2    | 53,1    | 1493                  | 2,7             |
| 4,5                           | 2,410                         | 2,484                                        | 3,0            | 10,2    | 70,8    | 1382                  | 3,8             |
| 5,0                           | 2,424                         | 2,462                                        | 1,6            | 10,2    | 84,8    | 1182                  | 4,5             |
| 5,5                           | 2,416                         | 2,449                                        | 1,3            | 10,9    | 87,7    | 1036                  | 4,5             |
| 6,0                           | 2,402                         | 2,428                                        | 1,1            | 11,9    | 91,0    | 964                   | 5,6             |

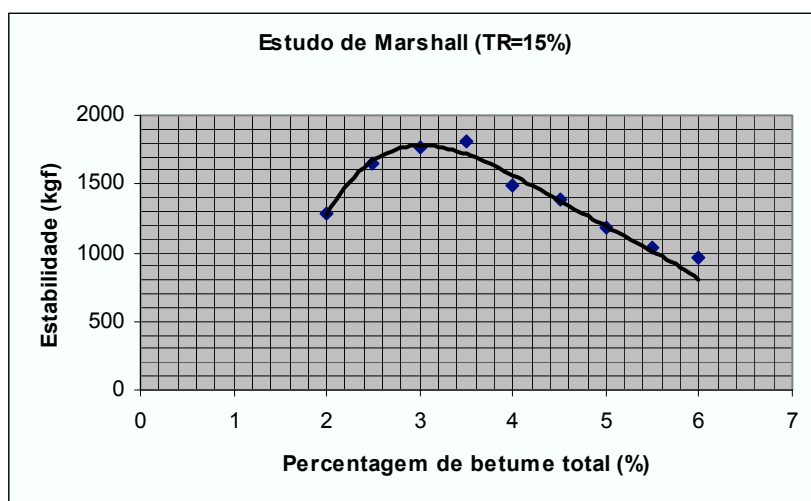
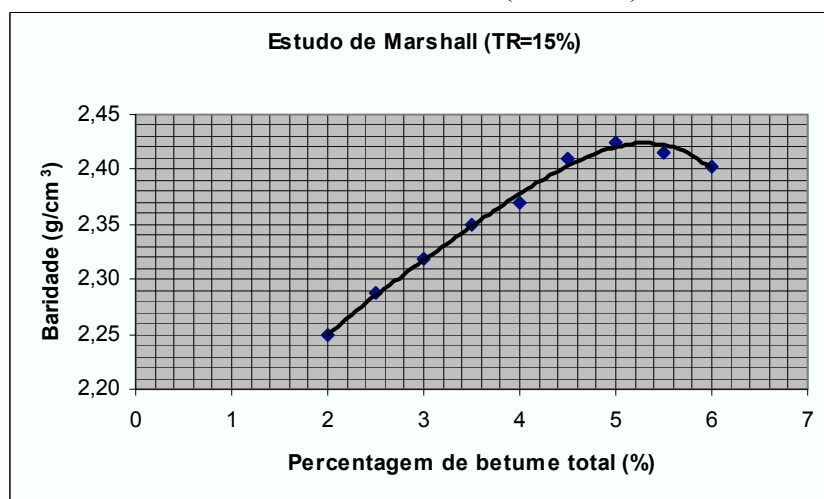
Figura 4.4 – Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=15%)

Figura 4.5 – Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=15%)

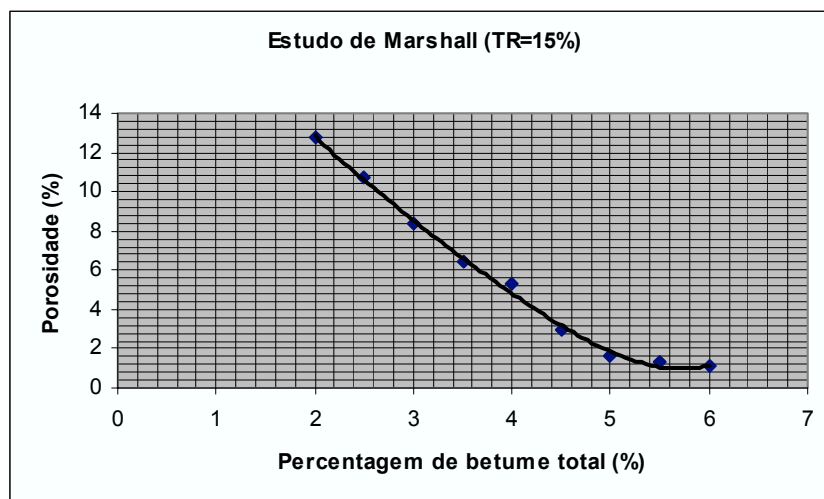


Figura 4.6 – Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=15%)

Quadro 4.24 – Estudo de *Marshall* (TR = 20%)

| Taxa de reciclagem (TR) = 20% |                               |                                              |                |         |         |                       |                 |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|----------------|---------|---------|-----------------------|-----------------|
| Pbtotal (%)                   | Baridade (g/cm <sup>3</sup> ) | Baridade máxima teórica (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosidade (%) | VMA (%) | GSB (%) | Força de rotura (kgf) | Deformação (mm) |
| 2,0                           | 2,263                         | 2,582                                        | 12,4           | 13,4    | 8,1     | 1050                  | 3,7             |
| 2,5                           | 2,271                         | 2,556                                        | 11,2           | 13,6    | 17,9    | 1390                  | 3,0             |
| 3,0                           | 2,304                         | 2,539                                        | 9,2            | 12,8    | 27,5    | 1684                  | 2,7             |
| 3,5                           | 2,344                         | 2,515                                        | 6,8            | 11,7    | 42,0    | 1556                  | 2,7             |
| 4,0                           | 2,384                         | 2,503                                        | 4,8            | 10,7    | 55,5    | 1550                  | 2,7             |
| 4,5                           | 2,406                         | 2,486                                        | 3,2            | 10,3    | 68,8    | 1366                  | 3,6             |
| 5,0                           | 2,417                         | 2,465                                        | 2,0            | 10,4    | 81,2    | 1289                  | 3,8             |
| 5,5                           | 2,410                         | 2,446                                        | 1,5            | 11,1    | 86,7    | 1049                  | 4,8             |
| 6,0                           | 2,398                         | 2,427                                        | 1,2            | 12,0    | 90,1    | 946                   | 6,0             |

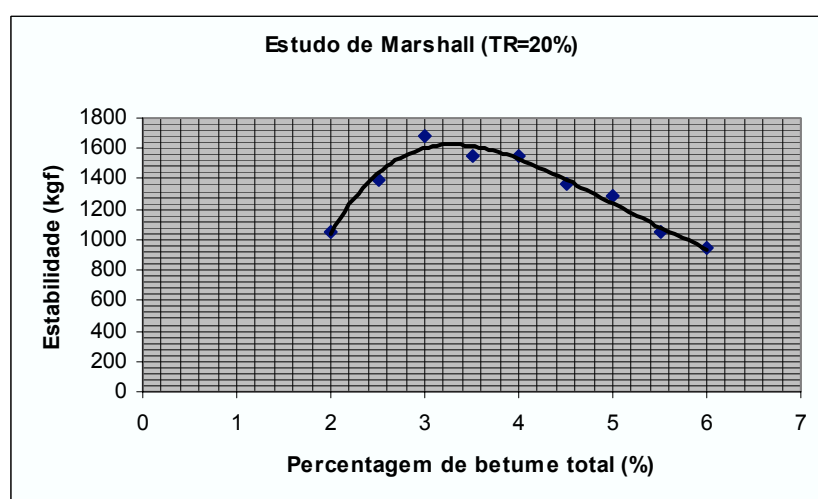


Figura 4.7 – Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=20%)

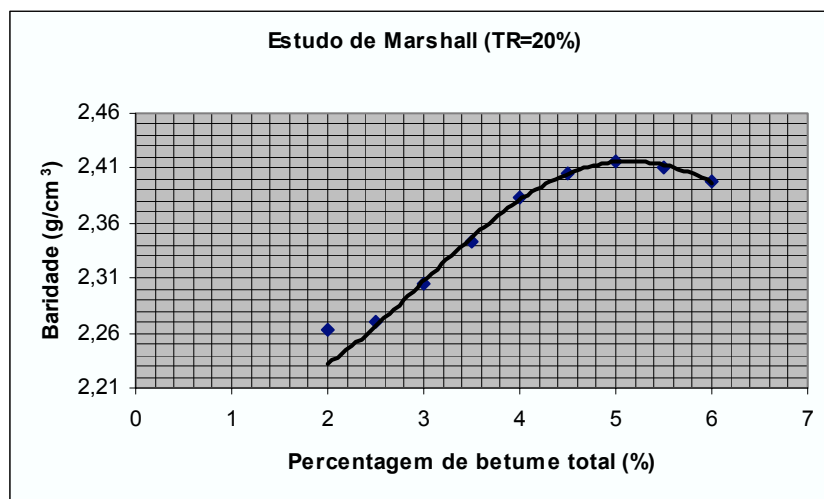


Figura 4.8 – Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=20%)

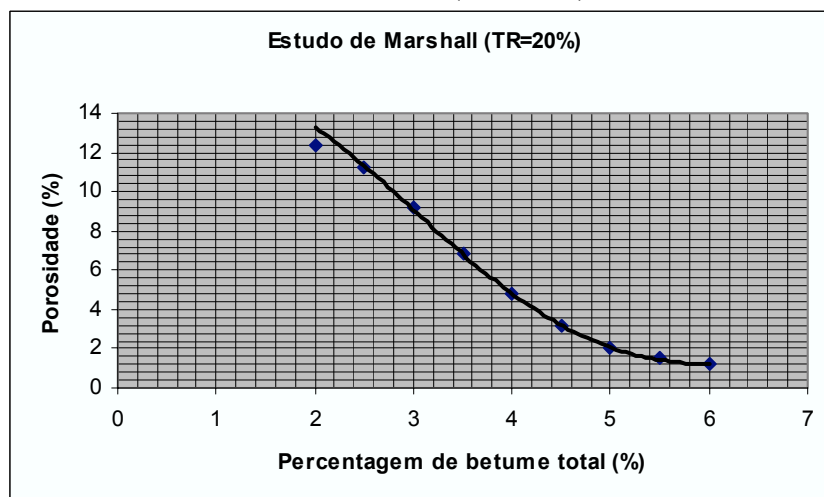


Figura 4.9 – Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=20%)

Quadro 4.25 – Estudo de *Marshall* (TR = 25%)

| Taxa de reciclagem (TR) = 25% |                  |                                 |                |         |         |                       |                 |
|-------------------------------|------------------|---------------------------------|----------------|---------|---------|-----------------------|-----------------|
| Pbtotal (%)                   | Baridade (g/cm³) | Baridade máxima teórica (g/cm³) | Porosidade (%) | VMA (%) | GSB (%) | Força de rotura (kgf) | Deformação (mm) |
| 2,0                           | 2,258            | 2,575                           | 12,3           | 13,6    | 9,4     | 1080                  | 3,5             |
| 2,5                           | 2,272            | 2,560                           | 11,3           | 13,5    | 16,6    | 1464                  | 3,1             |
| 3,0                           | 2,310            | 2,544                           | 9,2            | 12,5    | 26,4    | 1744                  | 2,7             |
| 3,5                           | 2,350            | 2,524                           | 6,9            | 11,4    | 39,7    | 1636                  | 2,4             |
| 4,0                           | 2,375            | 2,511                           | 5,4            | 11,0    | 50,6    | 1486                  | 3,6             |
| 4,5                           | 2,395            | 2,475                           | 3,2            | 10,7    | 69,7    | 1245                  | 3,6             |
| 5,0                           | 2,411            | 2,465                           | 2,2            | 10,6    | 79,2    | 1111                  | 4,0             |
| 5,5                           | 2,408            | 2,449                           | 1,7            | 11,1    | 85,0    | 1025                  | 5,0             |
| 6,0                           | 2,395            | 2,426                           | 1,3            | 12,1    | 89,4    | 845                   | 6,3             |

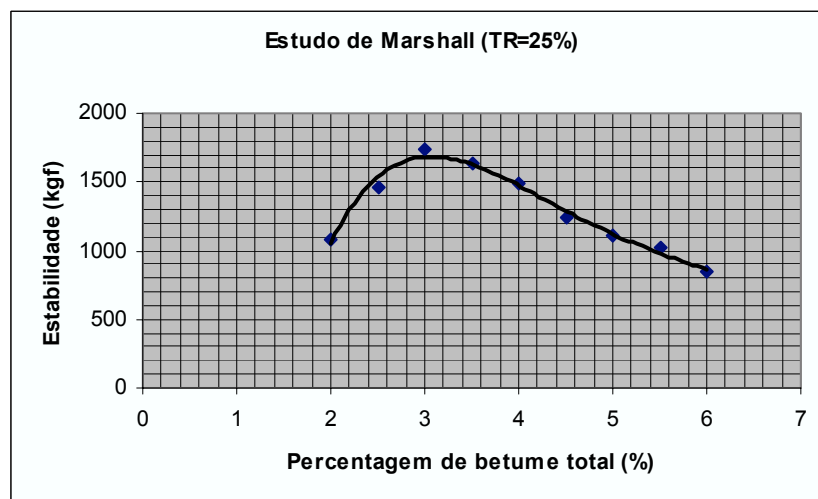


Figura 4.10 – Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=25%)

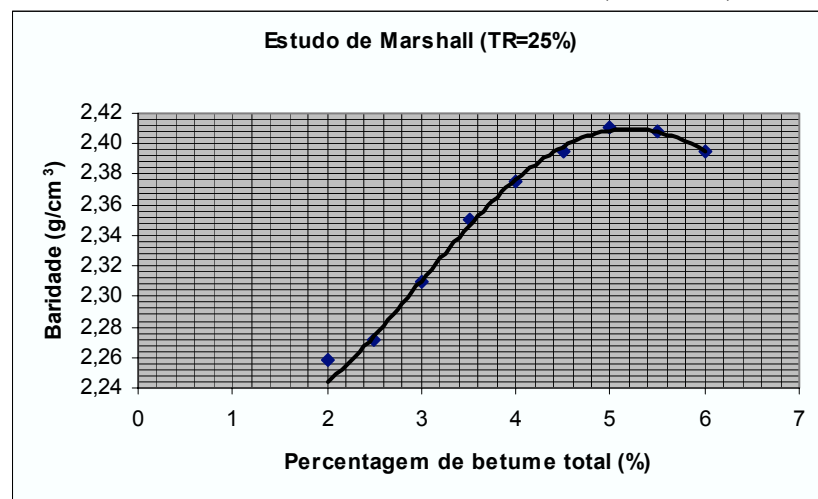


Figura 4.11 – Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=25%)

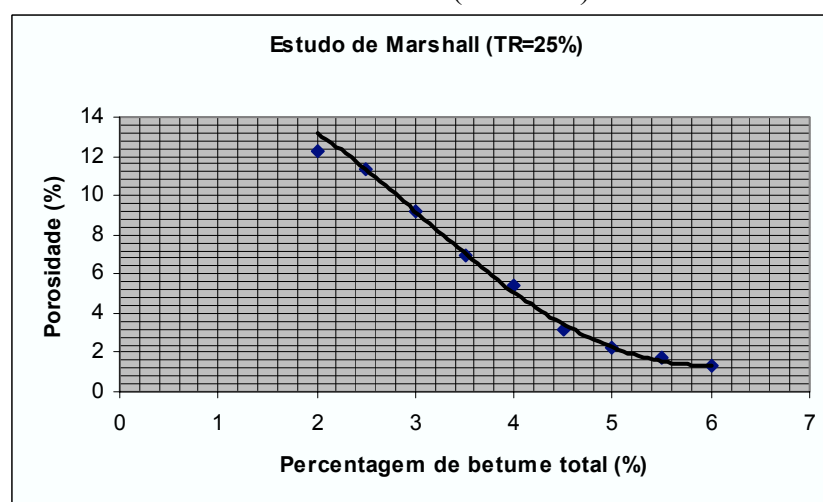


Figura 4.12 – Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=25%)

Quadro 4.26 – Estudo de *Marshall* (TR = 30%)

| Taxa de reciclagem (TR) = 30% |                               |                                              |                |         |         |                       |                 |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|----------------|---------|---------|-----------------------|-----------------|
| Pbtotal (%)                   | Baridade (g/cm <sup>3</sup> ) | Baridade máxima teórica (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosidade (%) | VMA (%) | GSB (%) | Força de rotura (kgf) | Deformação (mm) |
| 2,0                           | 2,262                         | 2,577                                        | 12,2           | 13,4    | 9,0     | 804                   | 4,0             |
| 2,5                           | 2,266                         | 2,560                                        | 11,5           | 13,7    | 16,3    | 1372                  | 3,4             |
| 3,0                           | 2,298                         | 2,534                                        | 9,3            | 12,9    | 28,0    | 1815                  | 2,9             |
| 3,5                           | 2,332                         | 2,510                                        | 7,1            | 12,1    | 41,4    | 1723                  | 3,0             |
| 4,0                           | 2,370                         | 2,500                                        | 5,2            | 11,1    | 53,3    | 1656                  | 3,3             |
| 4,5                           | 2,405                         | 2,477                                        | 2,9            | 10,3    | 71,8    | 1583                  | 3,6             |
| 5,0                           | 2,414                         | 2,464                                        | 2,0            | 10,4    | 80,5    | 1293                  | 3,7             |
| 5,5                           | 2,410                         | 2,440                                        | 1,2            | 11,0    | 88,9    | 1161                  | 4,3             |
| 6,0                           | 2,401                         | 2,419                                        | 0,8            | 11,8    | 93,7    | 1032                  | 7,0             |

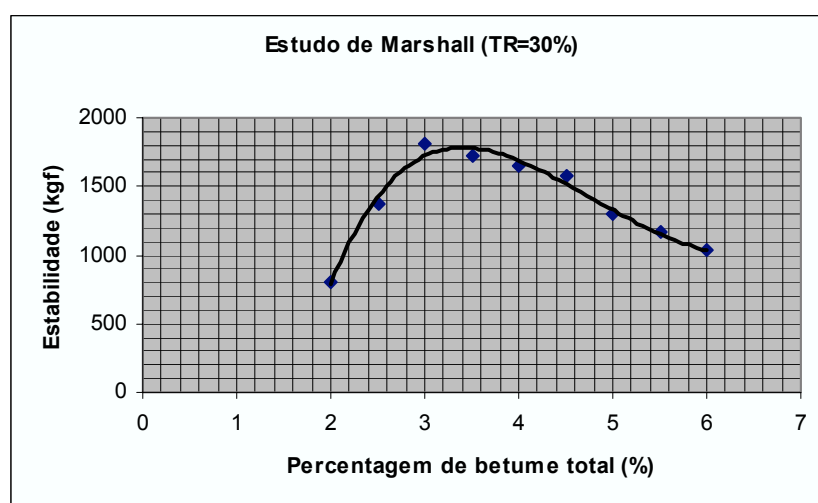
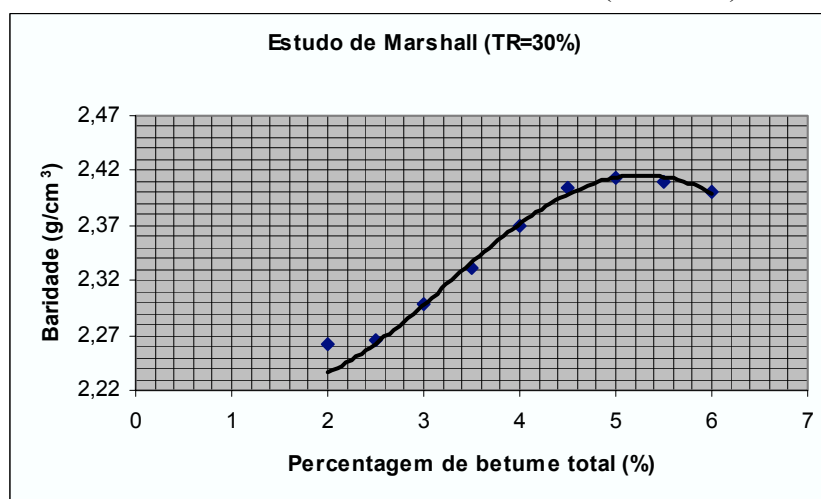
Figura 4.13 – Estabilidade de *Marshall* em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=30%)

Figura 4.14 – Baridade aparente em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=30%)

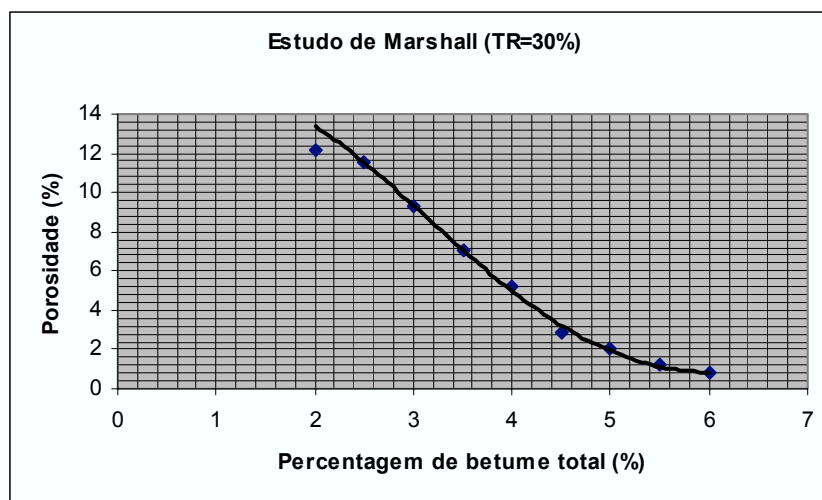


Figura 4.15 – Porosidade em função da percentagem de betume total da mistura reciclada final (TR=30%)

Os valores da baridade aparente ( $\gamma$ ) são determinados por determinados pelo procedimento ASTM D 2726. A baridade máxima teórica (BMT) é determinada pelo procedimento ASTM D 2041. Conhecidas estas duas grandezas é possível determinar a porosidade ( $V_v$ ), o volume de vazios da mistura de agregados (VMA) e o grau de saturação em betume (GSB) através das seguintes expressões:

$$V_v = \frac{BMT - \gamma}{BMT} \times 100 \quad (4.9)$$

$$VMA = 100 - \frac{\gamma \times Pa}{\gamma_a} \times 100 \quad (4.10)$$

$$GSB = \frac{VMA - V_v}{VMA} \times 100 \quad (4.11)$$

Onde:

- $V_v$  - Volume de vazios ou porosidade (%);
- $BMT$  - Baridade máxima teórica ( $\text{g/cm}^3$ );
- $\gamma$  - Baridade aparente da mistura compactada ( $\text{g/cm}^3$ );
- $VMA$  - Volume de vazios da mistura de agregados (%);
- $Pa$  - Percentagem ponderal de agregados na mistura betuminosa (%);
- $\gamma_a$  - Massa volúmica do material agregado ( $\text{g/cm}^3$ );
- $GSB$  - Grau de saturação de betume (%).

A partir dos resultados representados nos quadros e gráficos anteriores a percentagem ótima de betume pode ser determinada. Este valor é determinado considerando-se a média das percentagens de betume correspondentes à máxima baridade, máxima estabilidade e o valor da percentagem de betume correspondente ao valor intermédio do intervalo definido no Caderno de Encargos da Brisa para a porosidade. Para a mistura betuminosa densa o intervalo admitido para os valores da porosidade é de 3 a 5 % sendo portanto considerada a percentagem de betume correspondente à porosidade de 4 %. O quadro 4.27 resume os cálculos efectuados.

Quadro 4.27 – Determinação da percentagem óptima de betume total (Pbttotal)

| Taxa de reciclagem (%) | Percentagem de betume (%) |                     |                  |              |
|------------------------|---------------------------|---------------------|------------------|--------------|
|                        | Máxima baridade           | Máxima estabilidade | Porosidade de 4% | Valor óptimo |
| TR= 0                  | 5,4                       | 5,2                 | 4,8              | 5,1          |
| TR= 15                 | 5,4                       | 3,2                 | 4,2              | 4,3          |
| TR= 20                 | 5,0                       | 3,3                 | 4,3              | 4,2          |
| TR= 25                 | 5,2                       | 3,0                 | 4,3              | 4,2          |
| TR= 30                 | 5,2                       | 3,4                 | 4,2              | 4,3          |

Como se pode verificar a variável determinante para a definição do valor óptimo da percentagem de betume é a presença de material fresado. Verifica-se também que para as taxas de reciclagem de 15 % e 30 % o valor óptimo da percentagem de betume é o mesmo (4,3 %) apesar da proporção de betume novo e de betume envelhecido (proveniente do material fresado) relativamente à totalidade de betume ser diferente. Aplicando a expressão 4.2 para as taxas de reciclagem de 15 % e de 30% a proporção de betume novo relativamente ao betume total é de respectivamente 85 % e 69 %.

Para a percentagem óptima as propriedades de cada mistura a considerar constam do quadro 4.28.

Quadro 4.28 – Propriedades das misturas betuminosas para a percentagem óptima de betume total (Pbttotal)

| Propriedade                                               | Taxa de reciclagem (%) |         |         |         |         | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------------------------|
|                                                           | TR = 0                 | TR = 15 | TR = 20 | TR = 25 | TR = 30 |                                               |
| Estabilidade (kgf)                                        | 1260                   | 1440    | 1480    | 1400    | 1600    | > 1000                                        |
| Deformação (mm)                                           | 3,0                    | 3,2     | 3,0     | 3,2     | 3,2     | 3 a 5                                         |
| Módulo de rigidez Marshall (kgf/mm)                       | 420                    | 450     | 493     | 438     | 500     | > 250 e < 815                                 |
| Porosidade (%)                                            | 3,3                    | 3,6     | 4,2     | 4,4     | 4,0     | 3 a 5                                         |
| GSB (%)                                                   | 76                     | 66      | 60      | 58      | 64      | 75 a 85                                       |
| VMA (%)                                                   | 12,8                   | 10,5    | 10,7    | 11,0    | 10,8    | ≥ 14                                          |
| Resistência conservada (%)                                | 92                     | 88      | 85      | 86      | 84      | > 80                                          |
| Percentagem de betume (%)                                 | 5,1                    | 4,3     | 4,2     | 4,2     | 4,3     | ≥ 5,1                                         |
| Teor em betume (%)                                        | -                      | 4,5     | 4,4     | 4,4     | 4,5     | ≥ 5,0                                         |
| Percentagem de betume novo em relação ao betume total (%) | -                      | 85      | 79      | 74      | 69      | ≥ 60                                          |

Verifica-se que nas misturas com incorporação de material fresado as propriedades percentagem de betume, teor em betume, grau de saturação em betume e volume de vazios do esqueleto mineral não cumprem as especificações. A mistura tradicional cumpre todos os valores excepto o volume de vazios do esqueleto mineral.

Outro aspecto que tem de ser verificado é a escolha do betume novo. Assim dos provetes com percentagem de betume de 4,5 % para cada mistura estudada, recuperou-se o betume no evaporador rotativo e determinou-se a penetração e a temperatura de amolecimento. Os resultados constam do quadro 4.29.

Quadro 4.29 – Penetração e temperatura de amolecimento do betume das misturas betuminosas com 4,5% de betume (provetes *Marshall*)

| Propriedade                                  | Procedimento | Misturas com percentagem de betume de 4,5% |      |        |      |        |      |        |      |
|----------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
|                                              |              | TR=15%                                     |      | TR=20% |      | TR=25% |      | TR=30% |      |
|                                              |              | V.O.                                       | V.E. | V.O.   | V.E. | V.O.   | V.E. | V.O.   | V.E. |
| Penetração (1/10 mm)                         | EN 1426      | 35                                         | 35   | 35     | 33   | 34     | 32   | 30     | 31   |
| Temperatura de amolecimento anel e bola (°C) | EN 1427      | 54,1                                       | 55,3 | 54,7   | 55,9 | 57,7   | 56,5 | 56,5   | 57,1 |

Nota: V.O. (valor obtido) corresponde ao valor obtido no ensaio após recuperação do betume e V.E. (valor estimado) corresponde ao valor obtido através das fórmulas para previsão das características do betume da mistura reciclada final.

Da análise do quadro verifica-se que as expressões para previsão das características do betume se aproximam bastante dos valores obtidos nos ensaios sobre o betume recuperado. No entanto, os valores obtidos para o betume ensaiado correspondem não só à combinação dos betumes das misturas fresadas e do betume novo como também a um envelhecimento provocado pelo fabrico em laboratório das misturas betuminosas recicladas (neste caso, fabrico de provetes com percentagem de betume de 4,5% para estudo *Marshall*).

Analisando os valores tendo como referência a especificação LNEC para um betume 35/50 verifica-se que a temperatura de amolecimento se encontra dentro dos limites do intervalo especificado (50 a 58 °C) mas a penetração à semelhança do que acontece com as estimativas não se encontra dentro do intervalo para a penetração.

Em projecto, considera-se que o betume que efectivamente se encontra nas camadas betuminosas do pavimento sofreu um envelhecimento de 35% em relação ao seu valor inicial conservando portanto 65% da sua penetração inicial. Apesar do processo de fabrico de misturas betuminosas em laboratório não ser tão agressivo como o processo de fabrico industrial não deixa de ocorrer um certo envelhecimento. Assim o betume 35/50 continuou a ser o betume novo utilizado sendo que nas placas que irão ser cortadas do pavimento deverão ser averiguadas as propriedades do betume para verificar se a penetração conserva ou não 65% de 35 (1/10mm) de penetração que corresponde ao valor mínimo inicial imposto.

Aos agregados recuperados dos mesmos provetes (com 4,5 % de percentagem de betume) foram efectuadas análises granulométricas para verificação do fuso, que constam da figura 4.16 e do quadro 4.30.

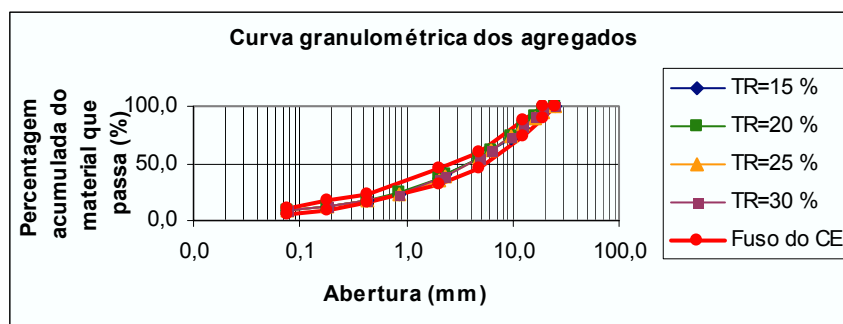


Figura 4.16 – Curva granulométrica dos agregados recuperados dos provetes moldados com percentagem de betume total de 4,5 % e fuso do Caderno de Encargos da Brisa

Quadro 4.30 – Análise granulométrica (procedimento JAE S.8-53) dos agregados recuperados dos provetes moldados com percentagem de betume total de 4,5 %

| Peneiros ASTM |            | Percentagem acumulada do material que passa |       |       |       |      |     |
|---------------|------------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|------|-----|
| Abertura (mm) | Designação | Taxa de reciclagem (%)                      |       |       |       | Fuso |     |
|               |            | TR=15                                       | TR=20 | TR=25 | TR=30 |      |     |
| 25,0          | 1"         | 100                                         | 100   | 100   | 100   | 100  | 100 |
| 19,0          | 3/4"       | 95                                          | 97    | 95    | 97    | 90   | 100 |
| 16,0          | 5/8"       | 89                                          | 92    | 89    | 92    |      |     |
| 12,5          | 1/2"       | 81                                          | 83    | 84    | 83    | 73   | 87  |
| 9,5           | 3/8"       | 72                                          | 73    | 73    | 73    |      |     |
| 6,3           | 1/4"       | 62                                          | 62    | 61    | 62    |      |     |
| 4,75          | nº 4       | 55                                          | 55    | 55    | 55    | 45   | 60  |
| 2,36          | nº 8       | 40                                          | 40    | 39    | 39    |      |     |
| 2,00          | nº 10      | 36                                          | 36    | 35    | 36    | 32   | 46  |
| 0,850         | nº 20      | 23                                          | 24    | 23    | 23    |      |     |
| 0,425         | nº 40      | 17                                          | 18    | 17    | 17    | 16   | 23  |
| 0,180         | nº 80      | 12                                          | 13    | 12    | 12    | 9    | 18  |
| 0,075         | nº 200     | 8                                           | 9     | 9     | 8     | 5    | 10  |

Os agregados dos provetes moldados encontram-se dentro do fuso do Caderno de Encargos, concluindo-se da validade do procedimento de doseamento dos agregados novos e dos agregados das misturas fresadas.

Dado que o objectivo dos estudos é o de validar a utilização de uma mistura betuminosa densa com incorporação de material fresado decidiu-se estudar, através de ensaios fundamentais, as misturas provenientes do método de formulação de *Marshall*.

O valor da percentagem de betume para este tipo de misturas e para este tipo de agregados é habitualmente o que se obteve no método de *Marshall* para a mistura tradicional (5,1%) sendo aliás o valor mínimo imposto para as misturas betuminosas densas de acordo com o Caderno de Encargos da Brisa. Assim, decidiu-se estudar também as misturas com reciclagem com uma percentagem de betume igual a esse valor mínimo. Deste modo contornar-se-ia um eventual *déficit* de betume que poderia ser resultado do método de *Marshall* não ter sido pensado para este tipo de misturas não tradicionais. As taxas de reciclagem estudadas foram 15 % e 30 %. A escolha das misturas betuminosas com reciclagem a estudar pretendeu também seleccionar misturas suficientemente diferentes e sobre as quais se pudessem tirar conclusões.

As características das misturas a estudar encontram-se no quadro 4.31.

Quadro 4.31 – Propriedades das misturas betuminosas para o valor óptimo e para o valor mínimo (de acordo com o Caderno de Encargos) da percentagem em betume

|                                                           | Taxa de reciclagem (%) |       |      |       |      |                                               |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|-------|------|-------|------|-----------------------------------------------|
| Propriedade                                               | TR =0                  | TR=15 |      | TR=30 |      | Especificação do Caderno de Encargos da Brisa |
| Percentagem de betume total (%)                           | 5,1                    | 4,3   | 5,1  | 4,3   | 5,1  | ≥ 5,1                                         |
| Teor em betume (%)                                        | -                      | 4,5   | 5,4  | 4,5   | 5,4  | ≥ 5,0                                         |
| Percentagem de betume novo em relação ao betume total (%) | -                      | 85    | 87   | 69    | 74   | ≥ 60                                          |
| Estabilidade (kgf)                                        | 1260                   | 1440  | 1120 | 1600  | 1280 | > 1000                                        |
| Deformação (mm)                                           | 3,0                    | 3,2   | 4,0  | 3,2   | 4,2  | 3 a 5                                         |
| Módulo de rigidez Marshall (kgf/mm)                       | 420                    | 450   | 280  | 500   | 305  | > 250 e < 815                                 |
| Porosidade (%)                                            | 3,3                    | 3,6   | 1,8  | 4,0   | 1,6  | 3 a 5                                         |
| GSB (%)                                                   | 76                     | 66    | 84   | 64    | 82   | 75 a 85                                       |
| VMA (%)                                                   | 12,8                   | 10,5  | 10,5 | 10,8  | 10,2 | ≥ 14                                          |
| Resistência conservada (%)                                | 92                     | 88    | 90   | 84    | 87   | > 80                                          |

As fórmulas de trabalho correspondentes a estas misturas são apresentadas no quadro 4.32.

Quadro 4.32 – Fórmulas de trabalho das misturas a estudar

| Mistura<br>Componente             | TR=0%         | TR=15%        |               | TR=30%        |               |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                   | Pbtotal=5,1 % | Pbtotal=4,3 % | Pbtotal=5,1 % | Pbtotal=4,3 % | Pbtotal=5,1 % |
| Misturas betuminosas fresadas (%) | 0,0           | 15,0          | 15,0          | 30,0          | 30,0          |
| Pó de britagem 0/5 (%)            | 41,8          | 44,8          | 44,3          | 36,2          | 35,8          |
| Brita 5/15 (%)                    | 23,7          | 13,8          | 13,7          | 11,4          | 11,3          |
| Brita 15/25 (%)                   | 23,7          | 20,4          | 20,2          | 16,7          | 16,5          |
| Filer recuperado (%)              | 5,7           | 2,4           | 2,4           | 2,7           | 2,6           |
| Percentagem de betume novo (%)    | 5,1           | 3,6           | 4,4           | 3,0           | 3,8           |
| Total (%)                         | 100,0         | 100,0         | 100,0         | 100,0         | 100,0         |

#### 4.2.4. Avaliação das propriedades fundamentais da mistura betuminosa

##### 4.2.4.1. Introdução

No Caderno de Encargos da Brisa (2003) aponta-se a taxa de reciclagem máxima de 15 % se as misturas fresadas contiverem betumes modificados. No entanto prevê-se que, caso se recorra a metodologias fundamentais com execução de ensaios de determinação de módulos de rigidez, resistência à fadiga e resistência às deformações permanentes em que as misturas recicladas demonstrem possuir propriedades mecânicas adequadas, esses e outros limites podem ser ultrapassados. A adequação da mistura betuminosa reciclada pode ser avaliada por comparação com as propriedades assumidas em projecto. No presente trabalho a adequação das misturas betuminosas densas recicladas

será avaliada por comparação com as mesmas propriedades de uma mistura betuminosa densa tradicional.

#### 4.2.4.2. Propriedades fundamentais de uma mistura betuminosa

##### 4.2.4.2.1. Módulo de rigidez e resistência à fadiga

O estado de tensão a que um elemento do pavimento é sujeito, quando em serviço, sob a acção do tráfego é muito difícil de reproduzir (Azevedo, 1993). Para tal contribui o facto de no movimento do rodado as tensões tangenciais mudarem de sentido. De acordo com Azevedo (1993) o ensaio que melhor reproduz as condições *in situ* é talvez o de compressão triaxial de carregamento repetido, apesar de ser difícil nesse ensaio, reproduzir o efeito da inversão do sentido das tensões tangenciais.

As propriedades mecânicas que traduzem o comportamento viscoelástico de uma mistura betuminosa dependem da temperatura e do tempo de carregamento. Estas propriedades são estudadas aplicando um carregamento sinusoidal que se traduz pela seguinte expressão:

$$\sigma = \sigma_0 \times \text{sen}(w \times t) \quad (4.12)$$

A resposta do material face à solicitação aplicada consiste numa deformação também sinusoidal com a mesma frequência ( $w \times t$ ) mas apresentando um atraso em relação à carga a que corresponde o ângulo de fase ( $\phi$ ) e pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \text{sen}(w \times t - \phi) \quad (4.13)$$

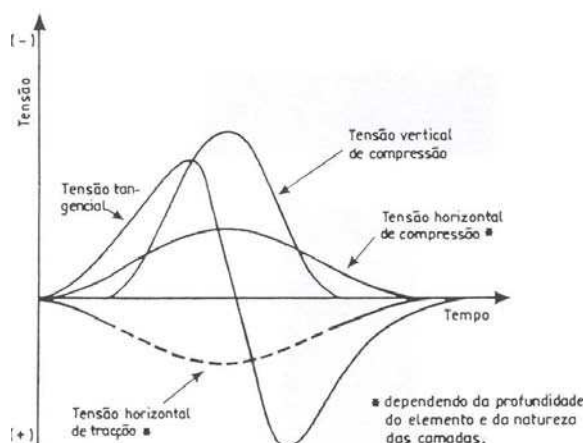


Figura 4.17 - Tensões induzidas por uma carga em movimento (Azevedo, 1993)

O módulo complexo da mistura betuminosa é definido como o quociente entre a tensão aplicada e a extensão produzida de acordo com a seguinte expressão:

$$E^* = |E^*| \times [\cos(\phi) + i \times \text{sen}(\phi)] \quad (4.14)$$

ou

$$E^* = |E^*| \times \cos(\phi) + |E^*| \times i \times \sin(\phi) \quad (4.15)$$

Considerando:

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\phi) \quad (4.16)$$

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\phi) \quad (4.17)$$

Vem:

$$E^* = E_1 + i \times E_2 \quad (4.18)$$

$E_1$  é a componente real do módulo e representa a energia armazenada no material e  $E_2$  é a componente imaginária do módulo e representa a energia perdida por atrito interno no seio do material. O módulo complexo pode ser representado pelo seu valor em módulo  $|E^*|$  e pelo ângulo de fase  $\phi$  dados pelas seguintes expressões:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (4.19)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (4.20)$$

Estes dois parâmetros constituem a forma mais corrente de representar as propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa para uma dada frequência de aplicação de carga e temperatura.

A fadiga das misturas betuminosas dos pavimentos consiste no fenómeno de aparecimento de fendilhamento devido às cargas repetidas do tráfego. A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade que elas apresentam para resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura (Pais, 1999). Geralmente é expressa por uma relação entre a extensão  $\varepsilon_t$  e o número de aplicações de carga  $N$  em que para a extensão  $\varepsilon_t$  se atinge a ruína tal como se apresenta na expressão seguinte:

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^b \quad (4.21)$$

As constantes  $a$  e  $b$  são determinadas em laboratório e dependem da composição da mistura betuminosa.

Uma outra forma de expressar a resistência à fadiga é a energia dissipada. O objectivo é expressar a resistência à fadiga através de uma única relação independentemente do tipo de ensaio, das condições de ensaio e do tipo de mistura betuminosa utilizada. Uma relação desse tipo torna possível prever o comportamento à fadiga de misturas betuminosas em laboratório sob uma grande variedade de condições, tendo por base resultados de ensaios de fadiga (Pais, 1999). Uma relação deste tipo é a seguinte:

$$W_N = A \times (N)^z \quad (4.22)$$

As constantes  $A$  e  $z$  são determinadas experimentalmente,  $W_N$  representa a energia dissipada acumulada até à fadiga e  $N$  representa a resistência à fadiga.

De acordo com Azevedo (1993) os ensaios e métodos mais utilizados para avaliação do comportamento das misturas betuminosas à fadiga e para avaliação do módulo de rigidez são os seguintes:

- 1 Flexão simples, sujeitando vigas a cargas com formas pulsatórias ou sinusoidais, com carregamento central em um ou em dois pontos; ou sujeitando vigas em consola, de forma trapezoidal ou provetes cilíndricos, a carregamento sinusoidal;
- 2 Flexão com apoio, sujeitando lajes ou vigas, cargas repetidas, colocadas sobre apoios flexíveis em todo o seu comprimento, para simular um estado de tensão mais representativo;
- 3 Tracção simples, com aplicação de cargas pulsatórias ou sinusoidais a provetes cilíndricos;
- 4 Compressão diametral, com aplicação de cargas pulsatórias a provetes cilíndricos;
- 5 Ensaios de fractura, sobre provetes com uma fenda induzida, utilizando os princípios da mecânica da fractura para prever a vida à fadiga;
- 6 Ensaios com a máquina de *Wheel Tracking* (carga rolante de vai-vém);
- 7 Configurações à escala real, em troços de pavimentos reais sujeitos a tráfego controlado, ou em “fossas” laboratoriais, em pistas lineares e circulares.

A repetição das cargas pode ser feita com variação sinusoidal no tempo ou com outro tipo de variação no tempo, com tensão ou extensão imposta.

No caso dos ensaios com tensão imposta a amplitude da carga (ou tensão) vai ser constante nas várias aplicações de carga (ensaio conduzido com controlo de carga), pelo que a deformação do provete vai aumentando à medida que a rigidez do material diminui; no caso dos ensaios com extensão imposta a amplitude do deslocamento (ou deformação) é constante para as várias aplicações de carga (ensaio conduzido com controlo do deslocamento), pelo que a tensão no provete diminui à medida que a rigidez do material diminui (Azevedo, 1993). O quadro 4.33 mostra as diferenças entre os dois modos de carregamento.

Quadro 4.33 - Diferenças entre os dois modos de carregamento nos ensaios de resistência à fadiga (Pais, 1999)

| Factor                                             | Ensaios em tensão controlada                                                          | Ensaios em extensão controlada                                                                    |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Espessura da camada betuminosa                     | Camadas espessas                                                                      | Camadas finas                                                                                     |
| Definição da rotura, número de aplicações de carga | Rotura bem definida                                                                   | Rotura arbitrária. Esta é definida quando a rigidez do provete atinge uma percentagem da inicial. |
| Dispersão dos resultados                           | Menor dispersão                                                                       | Maior dispersão                                                                                   |
| Número de provetes a ensaiar                       | Menor número                                                                          | Maior número                                                                                      |
| Envelhecimento da mistura betuminosa               | O envelhecimento aumenta a rigidez e possivelmente um aumento da resistência à fadiga | O envelhecimento aumenta a rigidez e este provoca uma redução da resistência à fadiga             |
| Resistência à fadiga no critério da extensão       | Menor vida                                                                            | Maior vida                                                                                        |
| Efeito da composição da mistura betuminosa         | Mais sensível                                                                         | Menos sensível                                                                                    |
| Dissipação de energia                              | Rápida                                                                                | Lenta                                                                                             |
| Propagação de fendas                               | Rápida em relação ao que ocorre nos pavimentos                                        | Mais representativo do que ocorre nos pavimentos                                                  |
| Efeito dos períodos de repouso                     | Efeito benéfico                                                                       | Menor efeito benéfico                                                                             |

No quadro 4.34 pode ver-se o efeito da variação de alguns factores que influenciam a resistência à fadiga na sua evolução. Os dois principais factores que afectam a resistência à fadiga das misturas betuminosas são a percentagem de betume e a porosidade da mistura betuminosa (Pais, 1999).

Quadro 4.34 - Influência da composição das misturas betuminosas no comportamento à fadiga (Pais, 1999)

| Factor                    | Evolução do factor  | Efeito da evolução do factor |                               |
|---------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|
|                           |                     | Ensaio em tensão controlada  | Ensaio em extensão controlada |
| Viscosidade do betume     | Aumento             | Aumenta                      | Reduz                         |
| Percentagem de betume     | Aumento             | Aumenta                      | Aumenta                       |
| Granulometria do agregado | Aberta para fechada | Aumenta                      | Reduz                         |
| Porosidade                | Redução             | Aumenta                      | Aumenta                       |
| Temperatura               | Redução             | Aumenta                      | Reduz                         |

#### 4.2.4.2.2. Resistência às deformações permanentes

As deformações permanentes de um pavimento podem resultar de deformações da fundação ou das próprias camadas do pavimento e tem como consequência o aparecimento de rodeiras causando deficiências na regularidade geométrica. A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas pode ser avaliada em laboratório.

Os ensaios utilizados para caracterizar a resposta dos materiais betuminosos do ponto de vista das deformações permanentes, são os seguintes (Azevedo, 1993):

- 1 Ensaio de compressão simples, com aplicação de cargas estáticas, ou repetidas;
- 2 Ensaio de compressão triaxial, com aplicação de cargas estáticas, ou repetidas;
- 3 Ensaio de corte, com aplicação de cargas estáticas, ou repetidas;
- 4 Ensaio de cargas rolantes de vai-vém, tal como a máquina de *Wheel Tracking* sobre lajetas de material.

As características das misturas betuminosas influenciam de forma distinta a resistência à fadiga ou a resistência às deformações permanentes. Assim por exemplo a vida à fadiga aumenta com a percentagem de betume enquanto que a resistência às deformações permanentes piora. No quadro 4.35 pode ver-se o efeito da variação de alguns factores que influenciam a resistência às deformações permanentes na sua evolução.

Quadro 4.35 – Efeito da variação de alguns factores no comportamento às deformações permanentes (Azevedo, 1993)

|                      | Factor                      | Variação               | Efeito                                           |
|----------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|
| Agregado             | Textura superficial         | Lisa a rugosa          | Melhora                                          |
|                      | Granulometria               | Descontínua a contínua | Melhora                                          |
|                      | Forma                       | Arredondada a cúbica   | Melhora                                          |
|                      | Dimensão máxima             | Aumento                | Melhora                                          |
| Betume               | Rigidez a)                  | Aumento                | Melhora                                          |
| Mistura              | Teor em betume              | Aumento                | Prejudica                                        |
|                      | Porosidade b)               | Aumento                | Prejudica                                        |
|                      | VMA                         | Aumento                | Prejudica c)                                     |
| Condições de serviço | Processos de compactação    | d)                     | d)                                               |
|                      | Temperatura                 | Aumento                | Prejudica                                        |
|                      | Estado de tensão/deformação | Aumento                | Prejudica                                        |
|                      | Repetição de carga          | Aumento                | Prejudica                                        |
|                      | Teor em água                | Seco para húmido       | Prejudica no caso da mistura ser sensível à água |

a) Refere-se à rigidez correspondente à temperatura para a qual a aptidão para a formação de cavados é determinante. A utilização de betumes modificados aumenta o módulo de rigidez do betume para as temperaturas críticas, aumentando assim a resistência da mistura betuminosa às deformações permanentes.

b) Quando a porosidade das misturas é inferior a 3 % também aumenta a potencialidade da contribuição das camadas betuminosas superiores para o desenvolvimento das deformações permanentes.

c) É vulgarmente considerado que valores de VMA muito baixos, inferiores a 10 %, deverão ser evitados.

d) O processo de compactação, quer em laboratório, quer em obra influencia a estrutura do esqueleto mineral da mistura betuminosa e a influência no comportamento às deformações permanentes é muito diversa.

De acordo com Azevedo (1993), a escolha do equipamento deve ter em conta a aptidão de cada ensaio em representar o estado de tensão *in situ* e a sua simplicidade de execução sendo que estes factores podem ser tidos em conta da seguinte forma:

- 1 Reproduzir as condições *in situ* tanto quanto possível
  - O estado de tensão induzido pelo tráfego.
  - O carácter repetitivo das solicitações.
- 2 Simplicidade
  - Facilidade na preparação dos provetes.
  - Quantidade máxima de material necessário para a fabricação dos provetes em laboratório.
  - Facilidade de utilização dos provetes extraídos dos pavimentos.
  - Compatibilidade dos resultados obtidos noutros laboratórios.
  - Dispendio de um mínimo de verbas quer em equipamentos novos, quer nos dispositivos suplementares necessários, para adaptar equipamentos existentes.
  - Simplicidade do equipamento necessário.
  - Possibilidade de utilização do mesmo equipamento noutros ensaios.
  - Número de parâmetros a medir, para posterior aplicação nos métodos de formulação de misturas e no dimensionamento de pavimentos.

#### 4.2.4.2.3. Metodologia utilizada neste trabalho

Neste trabalho os ensaios para avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga foram realizados em ensaios de flexão simples com carregamento central em dois pontos e em extensão controlada.

A definição da ruína por fadiga fica definida considerando que é atingida quando a rigidez inicial, que vai decrescendo ao longo do ensaio, atinge 50% do seu valor inicial. O equipamento utilizado pode ser visto na figura 4.18.



Figura 4.18 – Equipamento utilizado para os ensaios de módulo de rigidez e de resistência à fadiga

A resistência às deformações permanentes foi avaliada através do ensaio de simulação *Wheel Tracking*. O equipamento utilizado pode ser visto na figura 4.19.



Figura 4.19 – Equipamento *Wheel Tracking*

As condições dos ensaios constam dos pontos 4.2.4.4 (módulo de rigidez e resistência à fadiga) e 4.2.4.5 (resistência às deformações permanentes).

#### 4.2.4.3.Preparação dos provetes para ensaio

Os provetes para a realização dos ensaios para avaliação das propriedades fundamentais foram extraídos de placas moldadas em laboratório. As condições para preparação da mistura betuminosa constam no quadro 4.36.

Quadro 4.36 – Condições de preparação das misturas betuminosas a estudar

|                             |      | Placa             |         |         |         |         |
|-----------------------------|------|-------------------|---------|---------|---------|---------|
|                             |      | TR=0%             | TR=15%  |         | TR=30%  |         |
|                             |      | Pbtotal           | Pbtotal | Pbtotal | Pbtotal | Pbtotal |
|                             |      | 5,1%              | 4,3%    | 5,1%    | 4,3%    | 5,1%    |
| Massa da mistura betuminosa | (kg) | 113               | 114     | 115     | 114     | 115     |
| Capacidade da misturadora   | (l)  | 200               |         |         |         |         |
| Dimensões do molde          | (cm) | 100 × 60 × 7,7    |         |         |         |         |
| Equipamento de compactação  |      | Cilindro de rolos |         |         |         |         |

Para a realização dos ensaios de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga e para a realização dos ensaios para avaliação da resistência às deformações permanentes foi necessário moldar duas placas com as dimensões do molde por cada mistura a estudar.

A temperatura de compactação oscilou entre 135 a 150 °C e a temperatura de mistura entre 160 a 170 °C. Estas temperaturas foram conseguidas por aquecimento dos materiais em estufa. Inicialmente as temperaturas a que se pretendia aquecer os materiais eram: betume a 160 °C, o material fresado a 140 °C e os agregados novos a 160 °C. No entanto após algumas experiências considerou-se que a temperatura de aquecimento dos agregados teria de ser aumentada para se conseguir obter uma temperatura de compactação adequada, situando-se então em cerca de 190 °C.

As figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 mostram a moldagem das placas (processo de mistura e compactação).



Figuras 4.20 e 4.21 – Processo de mistura



Figuras 4.22 e 4.23 - Processo de compactação

A partir das placas fabricadas em laboratório foram extraídos os provetes para ensaio. As figuras 4.24 e 4.25 demonstram o modo como se extraíram os provetes para ensaio. Os provetes para o ensaio da avaliação da resistência à fadiga tinham as dimensões  $40 \times 5 \times 6,3$  cm e os provetes para o ensaio da avaliação da resistência às deformações permanentes as dimensões  $30 \times 26 \times 7,7$  cm. Todos os provetes foram extraídos com uma orientação definida em relação ao sentido de compactação para que a aplicação das solicitações em ambos os ensaios traduza o comportamento das misturas betuminosas quando aplicadas em obra sobre a acção dos equipamentos de espalhamento e compactação numa primeira fase, e posteriormente em serviço sob a acção das cargas do tráfego.

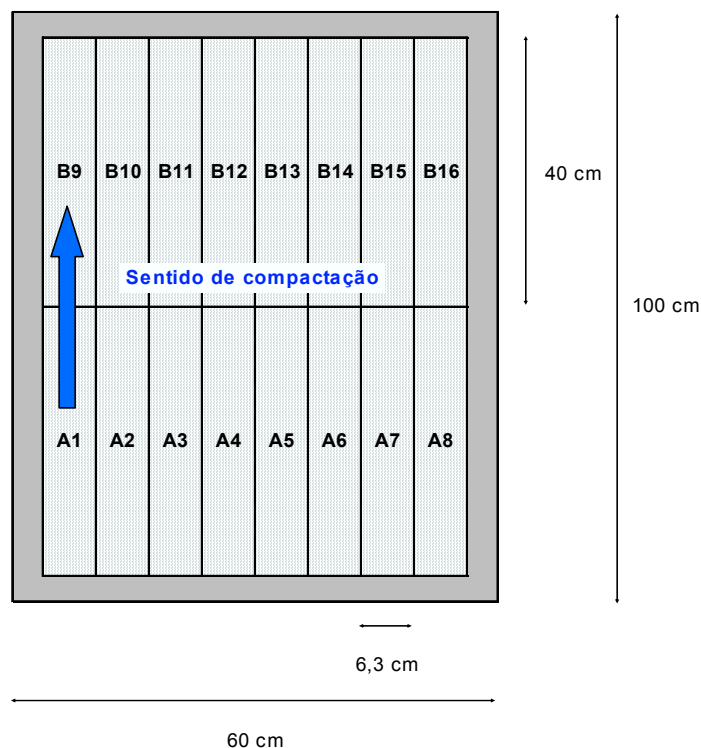


Figura 4.24 – Corte de provetes para o ensaio de fadiga

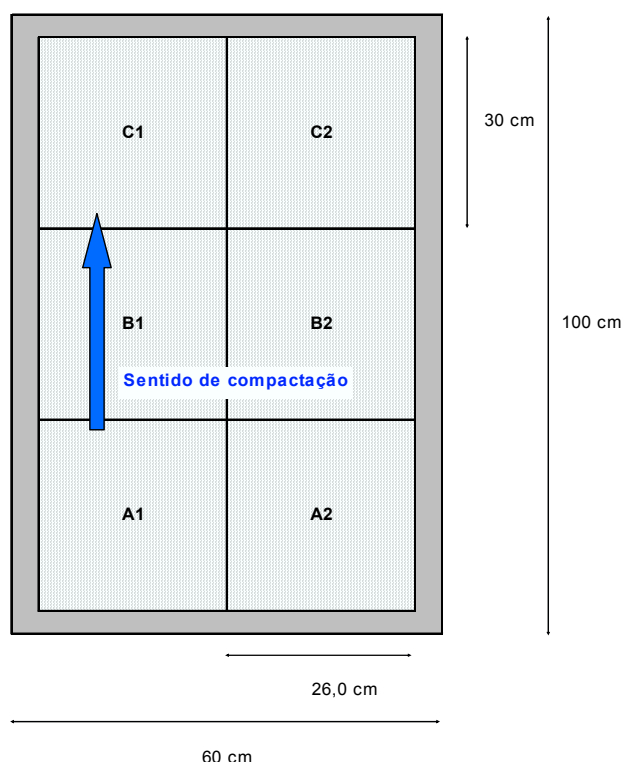


Figura 4.25 – Corte de provetes para o ensaio de deformações permanentes

#### 4.2.4.4. Avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga

A avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga foi realizada com o equipamento de flexão em quatro pontos, em extensão controlada, apresentado na figura 4.18.

Os ensaios foram conduzidos de acordo com as condições indicadas no quadro 4.37.

Quadro 4.37 – Condições do ensaio de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| Normas de ensaio              | AASHTO TP 8 - 94 |
| Temperatura do ensaio (°C)    | 20,0             |
| Frequência (Hz)               | 10,0             |
| Número de patamares de ensaio | 4                |

Os resultados dos ensaios constam das diferentes misturas e para as diversas extensões ensaiadas constam dos quadros resumo e gráficos que se seguem:

- TR = 0 %; P<sub>total</sub> = 5,1 %
  - Resumo dos resultados – Quadro 4.38
  - Evolução do módulo de rigidez durante os ciclos de carga – Figuras 4.26 a 4.29
  - Evolução da energia dissipada acumulada durante os ciclos de carga – Figuras 4.30 a 4.33
  - Lei de fadiga – Figura 4.34
- TR = 15 %; P<sub>total</sub> = 4,3 %
  - Resumo dos resultados – Quadro 4.39
  - Evolução do módulo de rigidez durante os ciclos de carga – Figuras 4.35 a 4.38

- Evolução da energia dissipada acumulada durante os ciclos de carga – Figuras 4.39 a 4.42
- Lei de fadiga – Figura 4.43
- TR = 15 %; Pbtotat= 5,1 %
  - Resumo dos resultados – Quadro 4.40
  - Evolução do módulo de rigidez durante os ciclos de carga – Figuras 4.44 a 4.47
  - Evolução da energia dissipada acumulada durante os ciclos de carga – Figuras 4.48 a 4.51
  - Lei de fadiga – Figura 4.52
- TR = 30 %; Pbtotat= 4,3 %
  - Resumo dos resultados – Quadro 4.41
  - Evolução do módulo de rigidez durante os ciclos de carga – Figuras 4.53 a 4.56
  - Evolução da energia dissipada acumulada durante os ciclos de carga – Figuras 4.57 a 4.60
  - Lei de fadiga – Figura 4.61
- TR = 30 %; Pbtotat= 5,1 %
  - Resumo dos resultados – Quadro 4.42
  - Evolução do módulo de rigidez durante os ciclos de carga – Figuras 4.62 a 4.65
  - Evolução da energia dissipada acumulada durante os ciclos de carga – Figuras 4.66 a 4.69
  - Lei de fadiga – Figura 4.70

A rigidez inicial, que consta dos quadros resumo, corresponde à rigidez após 50 ciclos de carga.

Quadro 4.38 – Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa tradicional (com taxa de reciclagem de 0%) e com percentagem de betume total de 5,1%

| Mistura betuminosa densa |                       |             | TR = 0% |        |                      |                 | Pb total = 5,1%          |                        |                             |
|--------------------------|-----------------------|-------------|---------|--------|----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Patamares de ensaio      | Referência do provete | Comprimento | Largura | Altura | Baridade             | Rigidez inicial | Nº de ciclos até à ruína | Ângulo de fase inicial | Energia dissipada acumulada |
| ( $\mu\epsilon$ )        |                       | (mm)        | (mm)    | (mm)   | (g/cm <sup>3</sup> ) | (MPa)           |                          | (graus)                | (MJ/m <sup>3</sup> )        |
| 650                      | A4                    | 403         | 64,54   | 50,24  | 2,33                 | 4845            | 8490                     | 38,8                   | 6,043                       |
|                          | A5                    | 403         | 63,80   | 50,33  | 2,33                 | 5039            | 7580                     | 39,4                   | 5,449                       |
|                          | A6                    | 403         | 64,19   | 51,47  | 2,33                 | 5306            | 9020                     | 41,1                   | 6,651                       |
| 500                      | A1                    | 403         | 64,67   | 53,52  | 2,34                 | 5838            | 24770                    | 35,4                   | 12,068                      |
|                          | A2                    | 403         | 63,87   | 52,25  | 2,33                 | 5583            | 26110                    | 38,7                   | 11,701                      |
|                          | A3                    | 403         | 63,74   | 50,84  | 2,32                 | 5207            | 36110                    | 35,7                   | 15,451                      |
| 350                      | A7                    | 403         | 64,11   | 50,01  | 2,34                 | 5815            | 91630                    | 33,1                   | 21,022                      |
|                          | A8                    | 403         | 64,33   | 50,12  | 2,34                 | 5576            | 44050                    | 32,9                   | 10,465                      |
|                          | B9                    | 401         | 64,73   | 50,41  | 2,34                 | 6190            | 51970                    | 33,3                   | 13,580                      |
| 200                      | B13                   | 401         | 64,30   | 50,73  | 2,32                 | 5941            | 1293780                  | 30,5                   | 70,801                      |
|                          | B15                   | 401         | 63,78   | 50,65  | 2,34                 | 6578            | 1151500                  | 29,0                   | 93,037                      |
|                          | B16                   | 401         | 65,23   | 50,70  | 2,34                 | 7216            | 732800                   | 30,8                   | 62,586                      |

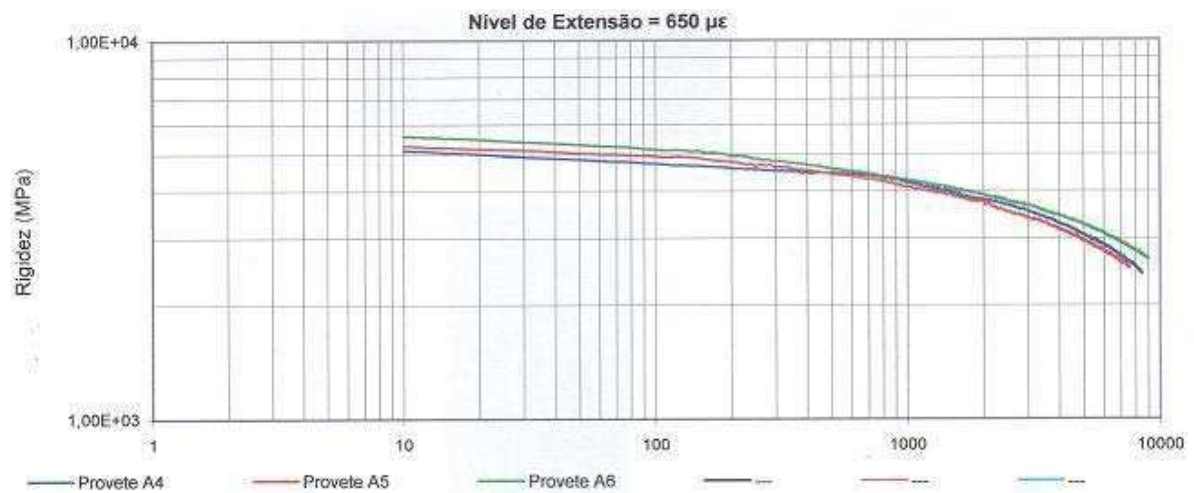


Figura 4.26 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (TR=0%; Pbtot=5,1%)

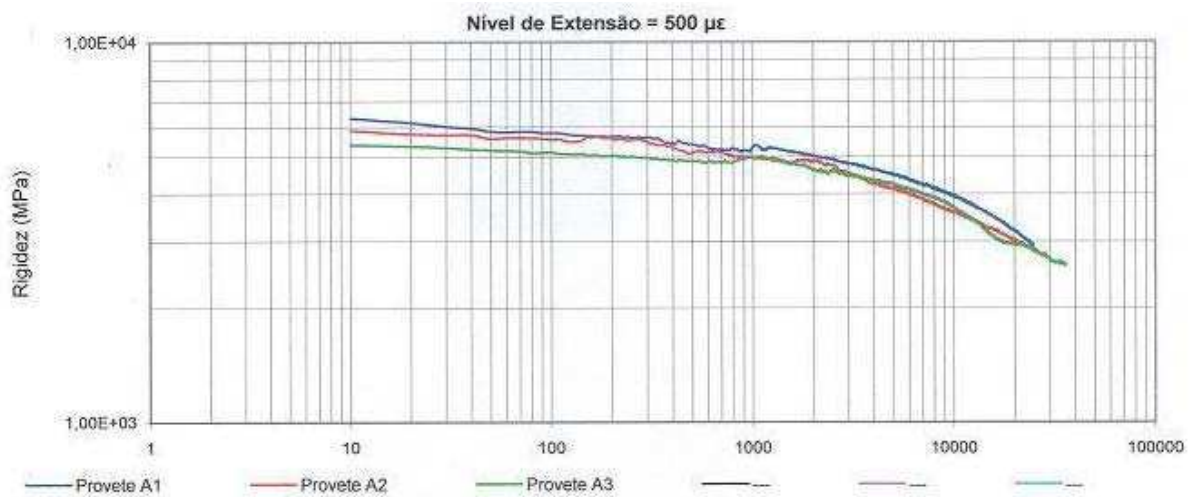


Figura 4.27 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=0%; Pbtot=5,1%)

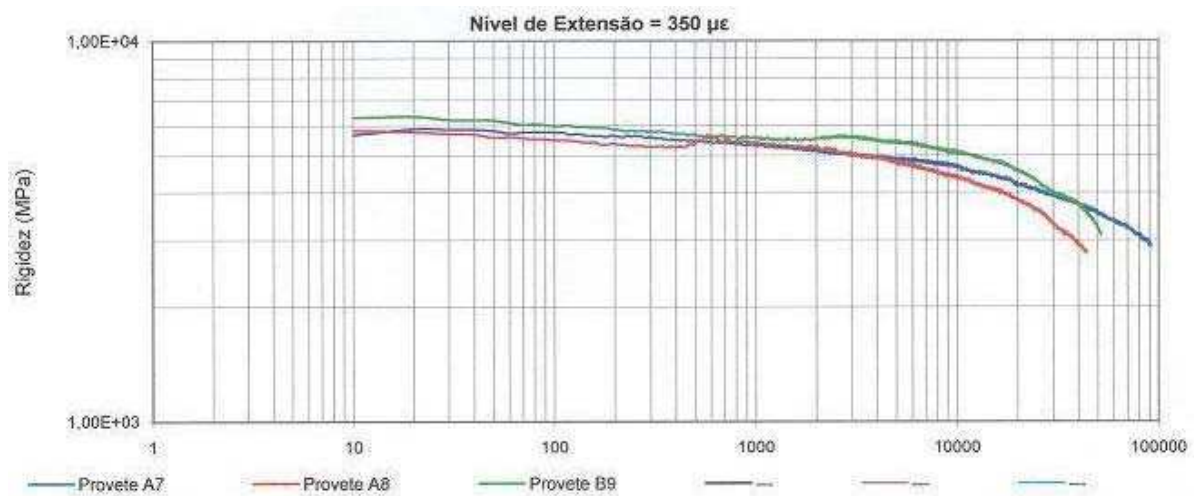


Figura 4.28 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 350  $\mu\epsilon$  (TR=0%; Pbtot=5,1%)

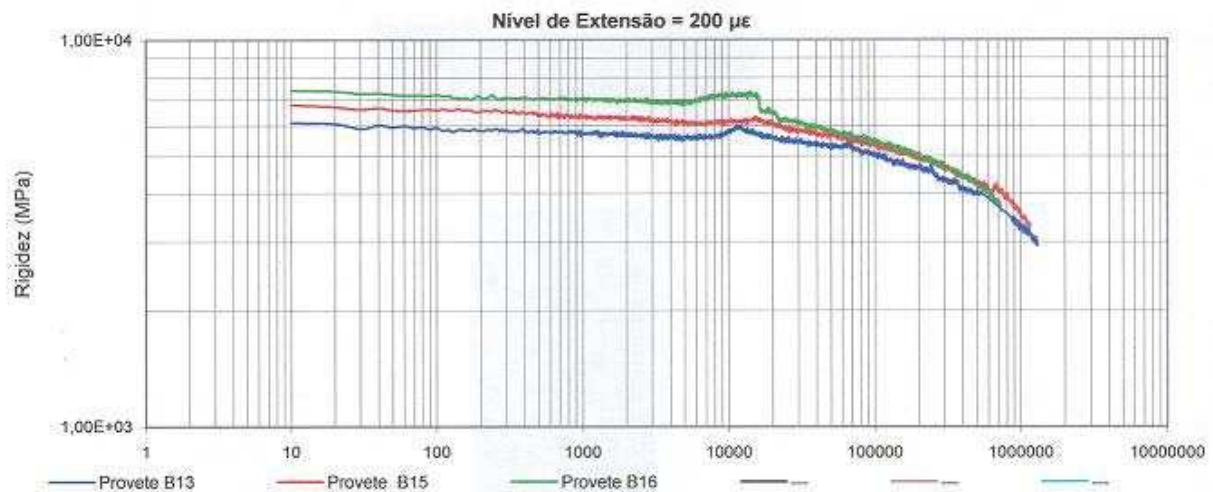


Figura 4.29 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de  $200 \mu\epsilon$  ( $TR=0\%$ ;  $P_{btotal}=5,1\%$ )

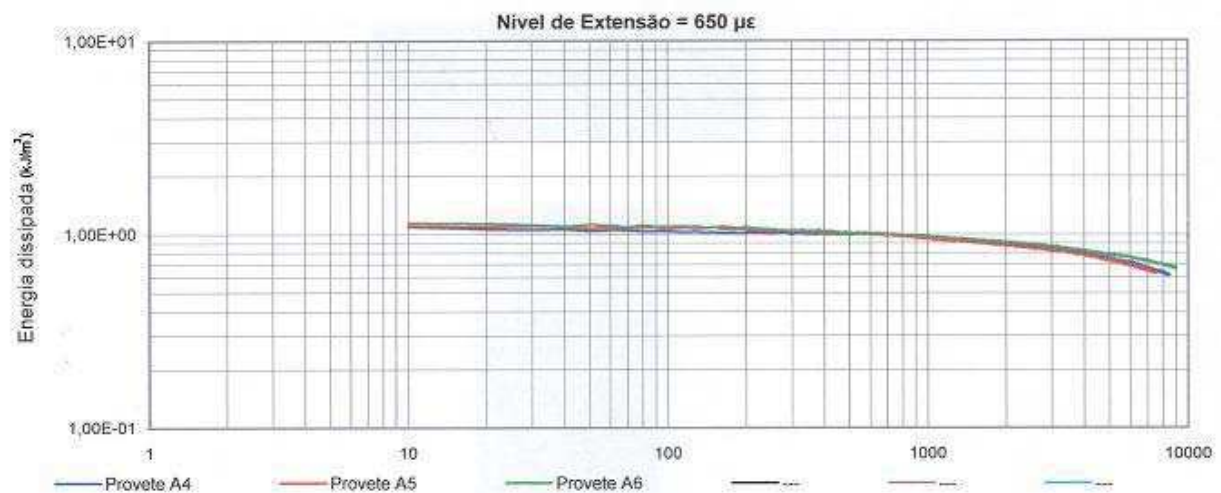


Figura 4.30 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de  $650 \mu\epsilon$  ( $TR=0\%$ ;  $P_{btotal}=5,1\%$ )

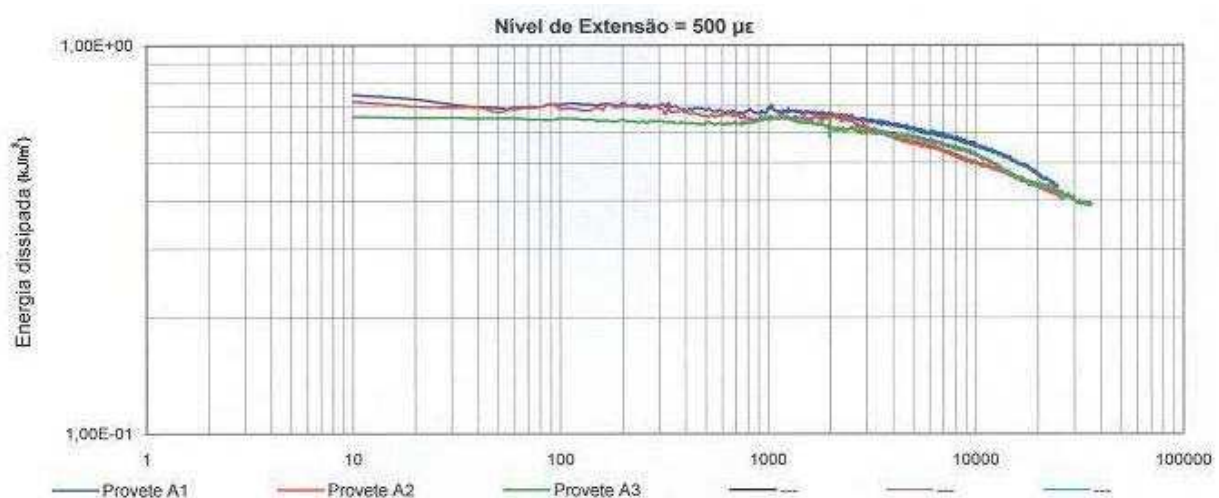


Figura 4.31 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de  $500 \mu\epsilon$  ( $TR=0\%$ ;  $P_{btotal}=5,1\%$ )

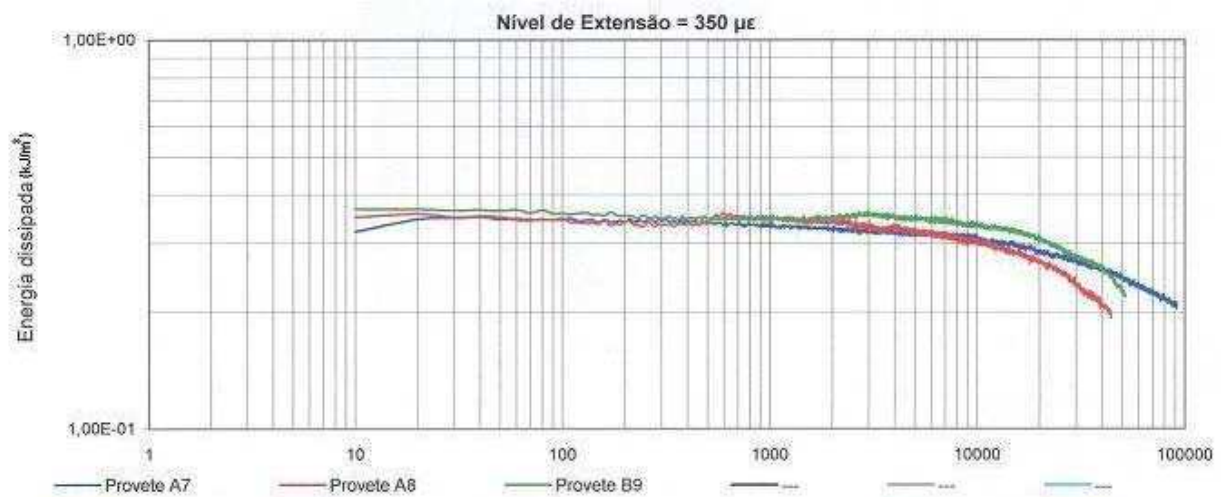


Figura 4.32 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 350  $\mu\epsilon$  (TR=0%; Pbtot=5,1%)

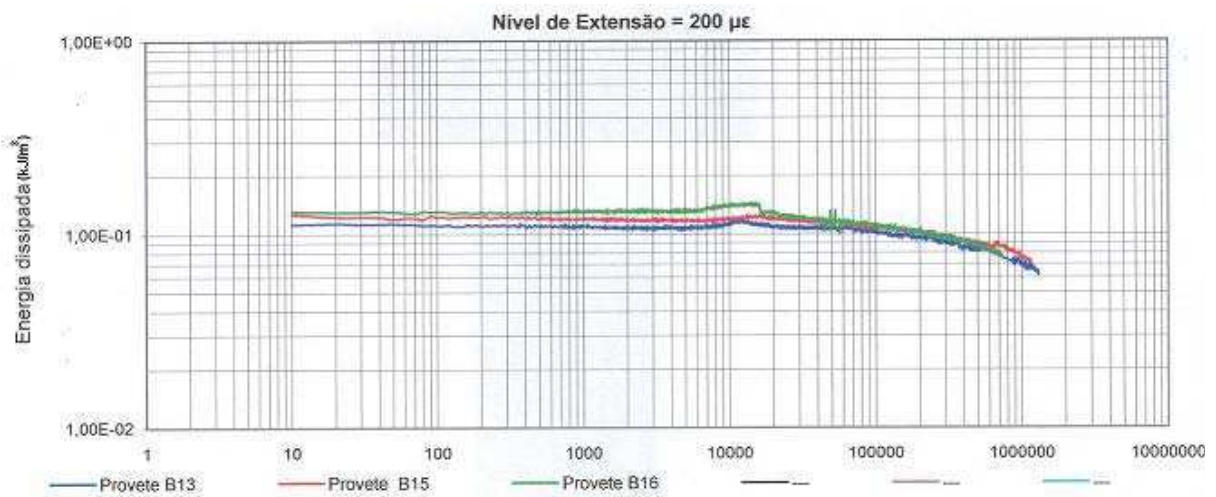


Figura 4.33 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 200  $\mu\epsilon$  (TR=0%; Pbtot=5,1%)

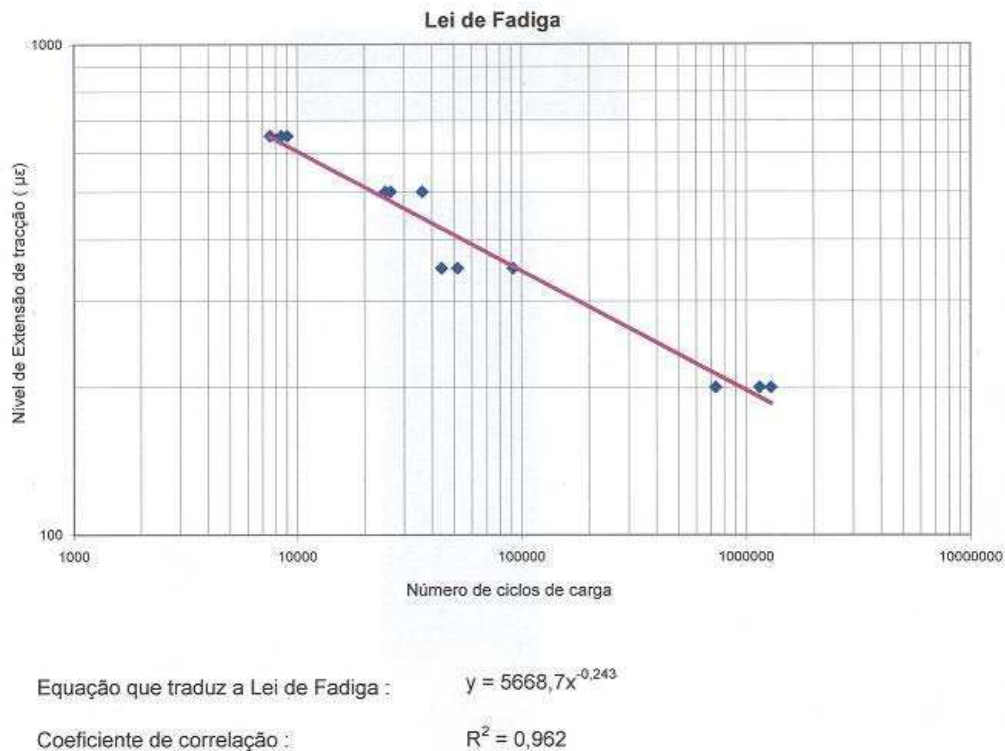


Figura 4.34 – Lei de fadiga (TR=0%; Pbtot=5,1%)

Quadro 4.39 – Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 4,3%

| Mistura betuminosa densa |                       |             |         |        | TR = 15%             |                 | Pb total = 4,3%          |                        |                             |
|--------------------------|-----------------------|-------------|---------|--------|----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Patamares de ensaio      | Referência do provete | Comprimento | Largura | Altura | Baridade             | Rigidez inicial | Nº de ciclos até à ruína | Ângulo de fase inicial | Energia dissipada acumulada |
| (µε)                     |                       | (mm)        | (mm)    | (mm)   | (g/cm <sup>3</sup> ) | (MPa)           |                          | (graus)                | (MJ/m <sup>3</sup> )        |
| 650                      | A1                    | 400         | 63,06   | 52,40  | 2,40                 | 6156            | 7760                     | 37,9                   | 6,412                       |
|                          | A3                    | 400         | 63,71   | 52,71  | 2,39                 | 6482            | 9590                     | 39,8                   | 8,048                       |
|                          | B16                   | 400         | 62,47   | 52,89  | 2,40                 | 7204            | 13860                    | 35,0                   | 12,460                      |
| 500                      | A4                    | 400         | 63,12   | 52,73  | 2,38                 | 6189            | 76660                    | 35,5                   | 36,864                      |
|                          | A5                    | 400         | 63,47   | 52,93  | 2,38                 | 6562            | 47600                    | 34,3                   | 22,591                      |
|                          | A7                    | 400         | 63,40   | 52,74  | 2,39                 | 7388            | 30980                    | 32,3                   | 17,636                      |
| 380                      | B9                    | 400         | 62,82   | 52,20  | 2,40                 | 7895            | 149580                   | 30,8                   | 49,364                      |
|                          | B10                   | 400         | 63,16   | 52,73  | 2,39                 | 7621            | 261000                   | 30,6                   | 81,317                      |
|                          | B11                   | 400         | 63,46   | 52,25  | 2,38                 | 7849            | 246920                   | 32,2                   | 79,195                      |
| 300                      | B12                   | 400         | 65,17   | 52,16  | 2,38                 | 8426            | 601860                   | 31,7                   | 125,704                     |
|                          | B13                   | 400         | 59,65   | 52,22  | 2,39                 | 7723            | 1128330                  | 29,4                   | 220,414                     |
|                          | B15                   | 400         | 62,55   | 51,98  | 2,40                 | 8164            | 415420                   | 32,8                   | 86,748                      |

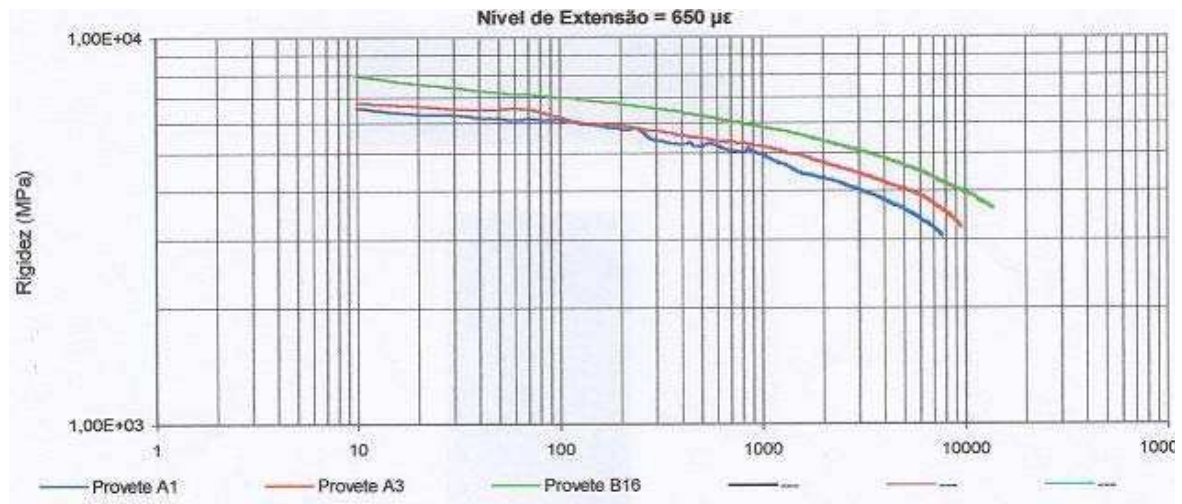


Figura 4.35 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

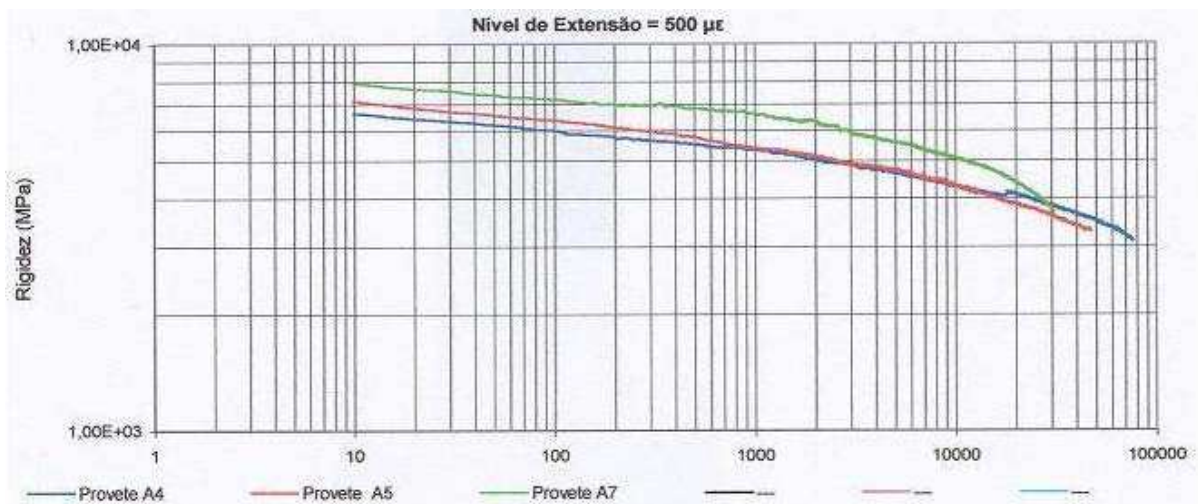


Figura 4.36 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

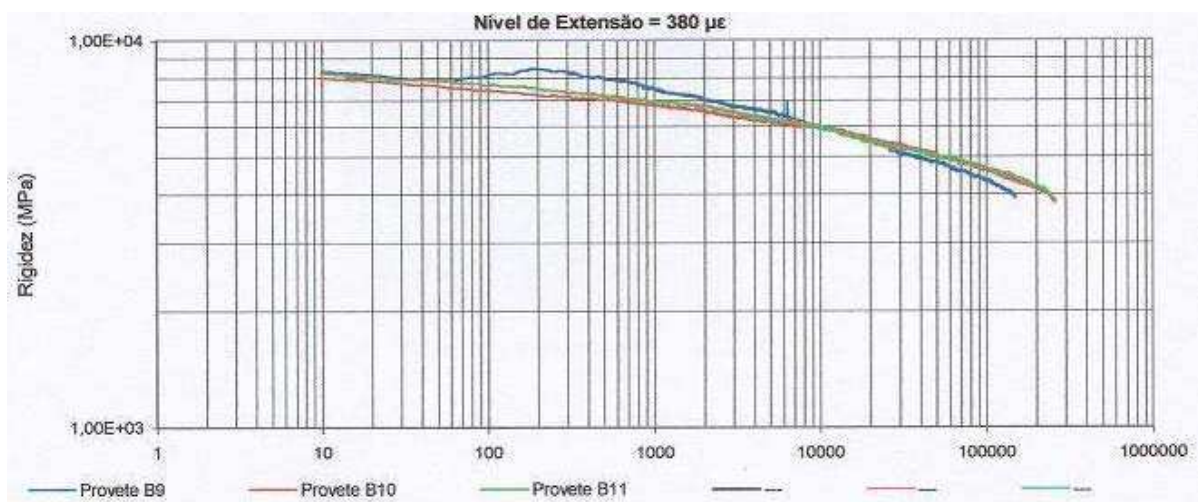


Figura 4.37 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

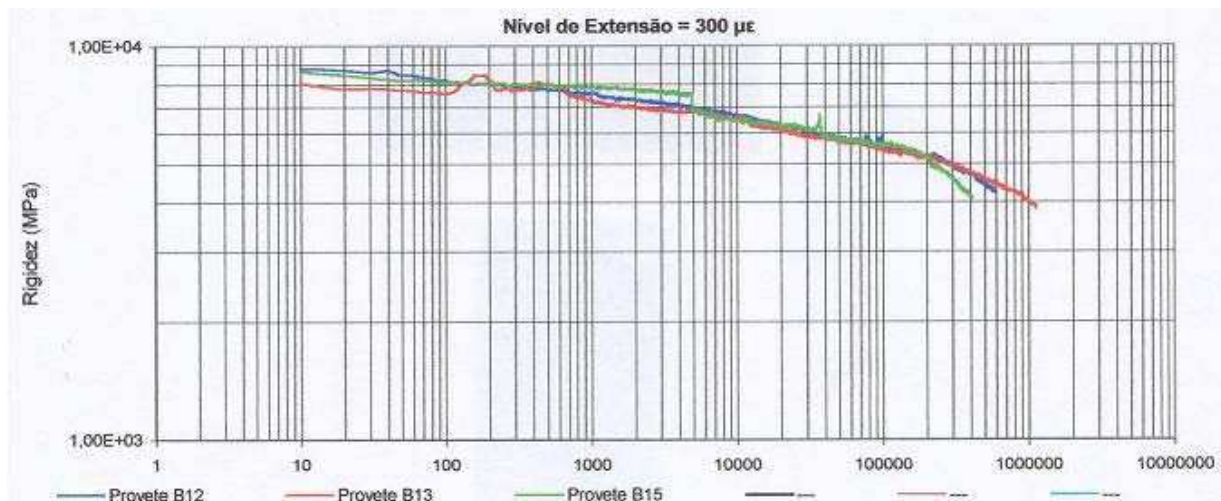


Figura 4.38 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 300  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

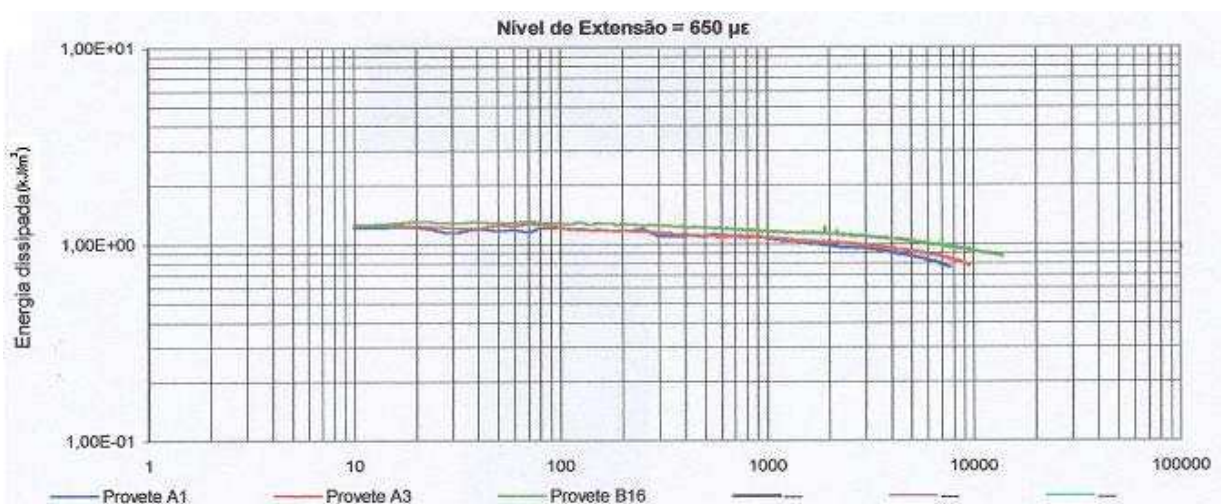


Figura 4.39 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

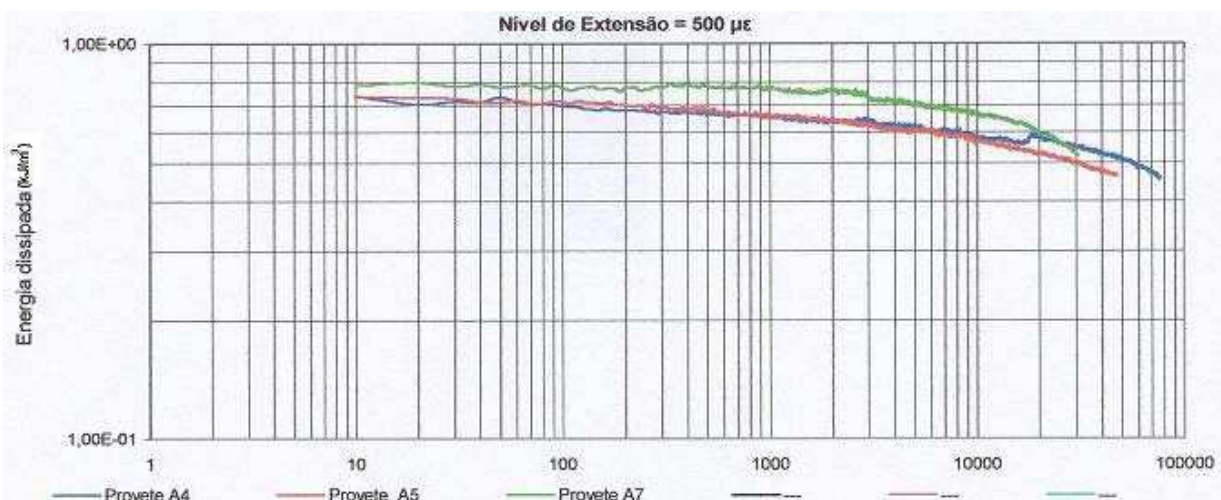


Figura 4.40 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

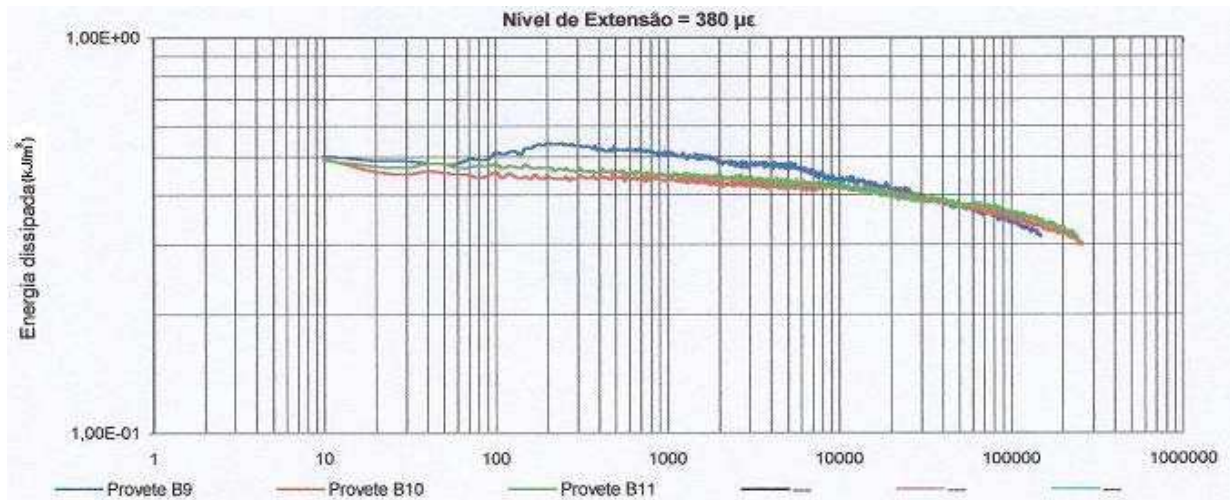


Figura 4.41 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

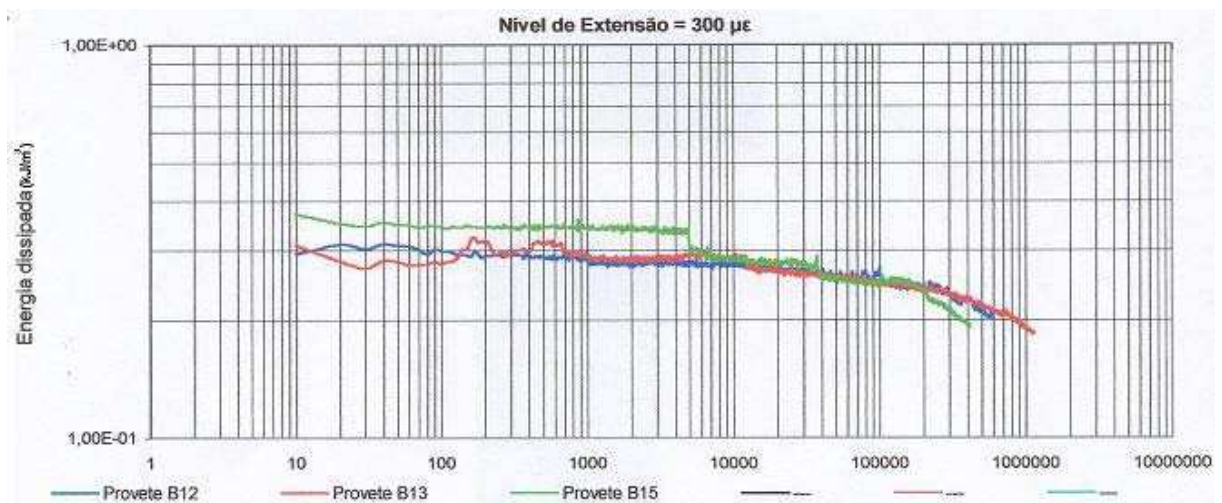


Figura 4.42 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 300  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=4,3%)

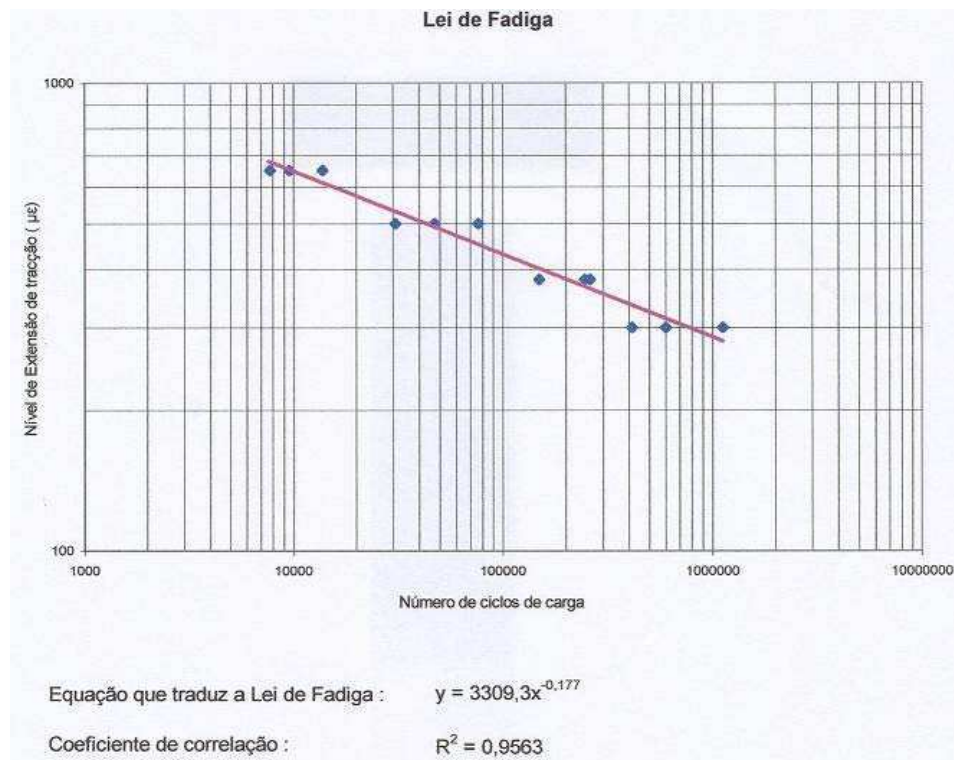


Figura 4.43 – Lei de fadiga (TR=15%; Pbtot=4,3%)

Quadro 4.40 – Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 5,1%

| Mistura betuminosa densa |                       |             |         | TR = 15% |                      |                 | Pb total = 5,1%          |                        |                             |
|--------------------------|-----------------------|-------------|---------|----------|----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Patamares de ensaio      | Referência do provete | Comprimento | Largura | Altura   | Baridade             | Rigidez inicial | Nº de ciclos até à ruína | Ângulo de fase inicial | Energia dissipada acumulada |
| ( $\mu\epsilon$ )        |                       | (mm)        | (mm)    | (mm)     | (g/cm <sup>3</sup> ) | (MPa)           |                          | (graus)                | (MJ/m <sup>3</sup> )        |
| 800                      | A4                    | 400         | 63,08   | 50,50    | 2,34                 | 3386            | 16770                    | 39,0                   | 12,310                      |
|                          | A5                    | 400         | 63,12   | 51,11    | 2,32                 | 4064            | 12280                    | 42,5                   | 10,489                      |
|                          | A6                    | 400         | 62,75   | 51,04    | 2,31                 | 3854            | 11930                    | 39,1                   | 10,267                      |
| 650                      | A2                    | 400         | 63,02   | 51,09    | 2,32                 | 4354            | 55150                    | 39,2                   | 31,743                      |
|                          | A3                    | 400         | 62,92   | 50,90    | 2,31                 | 3923            | 51390                    | 35,4                   | 27,556                      |
|                          | B13                   | 400         | 63,92   | 51,62    | 2,35                 | 5306            | 29280                    | 36,1                   | 20,422                      |
| 500                      | A7                    | 400         | 63,58   | 51,04    | 2,34                 | 4885            | 185610                   | 33,9                   | 70,288                      |
|                          | A8                    | 400         | 64,11   | 50,54    | 2,36                 | 5241            | 173700                   | 34,6                   | 69,133                      |
|                          | B9                    | 400         | 63,94   | 51,99    | 2,36                 | 5279            | 112560                   | 34,8                   | 45,036                      |
| 380                      | B10                   | 400         | 63,71   | 51,43    | 2,35                 | 5830            | 501900                   | 34,3                   | 125,639                     |
|                          | B11                   | 400         | 63,18   | 51,38    | 2,34                 | 5631            | 618950                   | 32,1                   | 150,093                     |
|                          | B12                   | 400         | 63,19   | 50,96    | 2,34                 | 5610            | 436330                   | 32,2                   | 107,868                     |

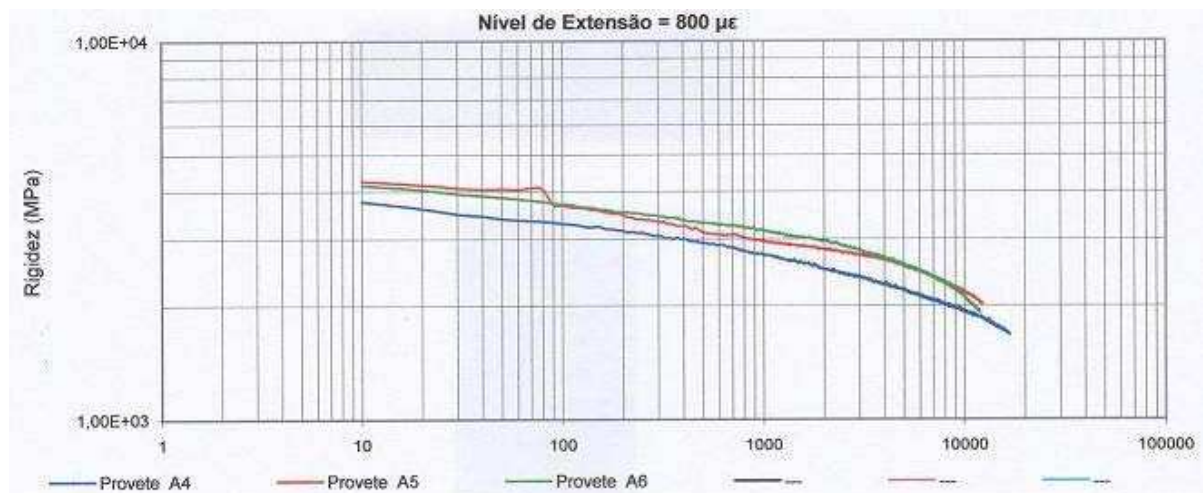


Figura 4.44 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 800  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

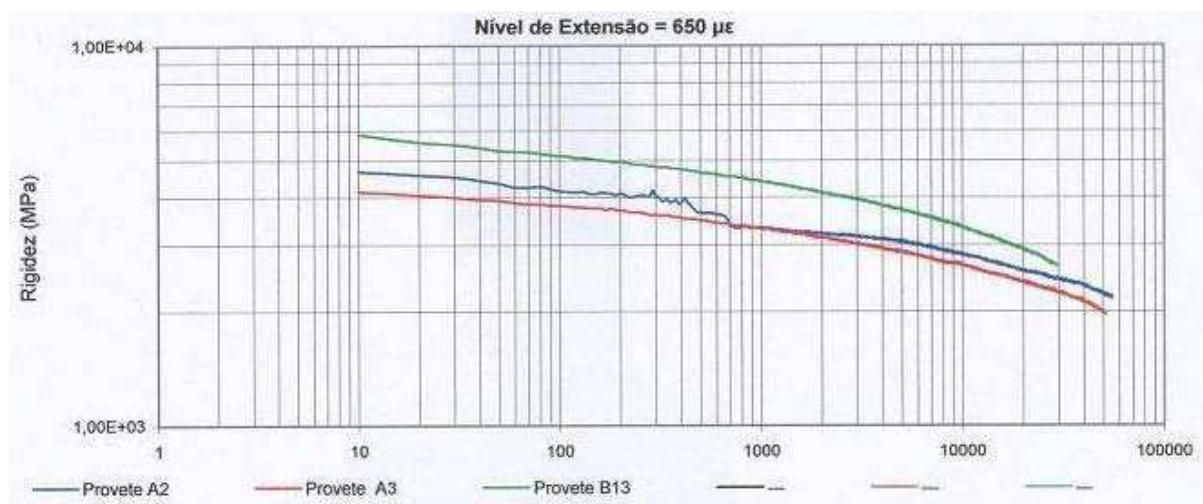


Figura 4.45 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

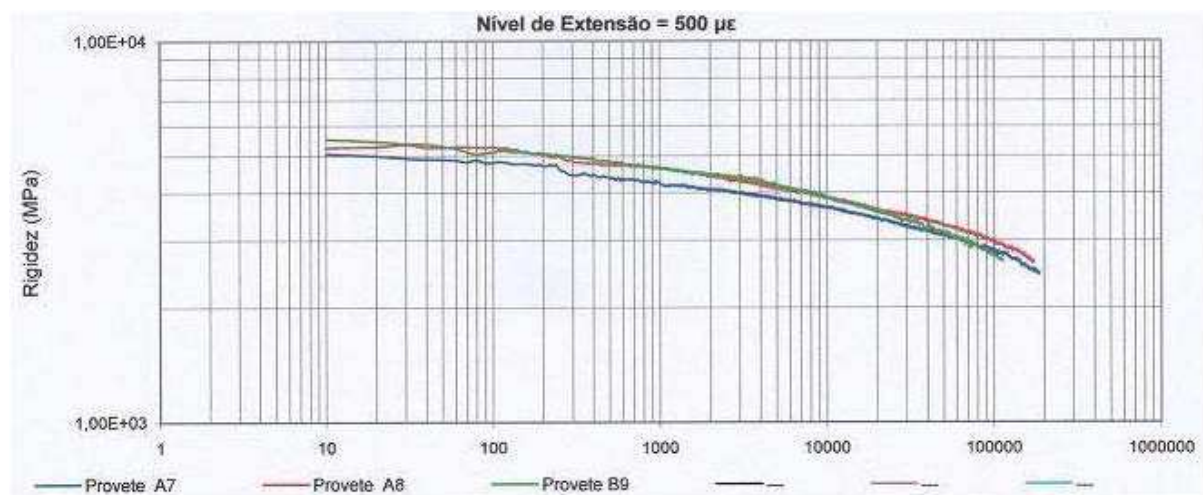


Figura 4.46 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

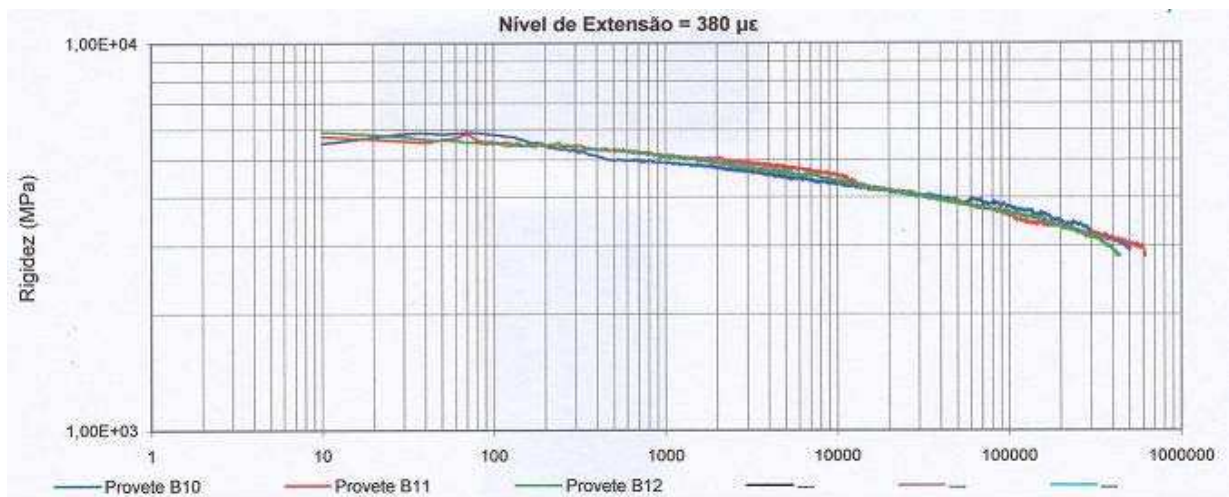


Figura 4.47 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

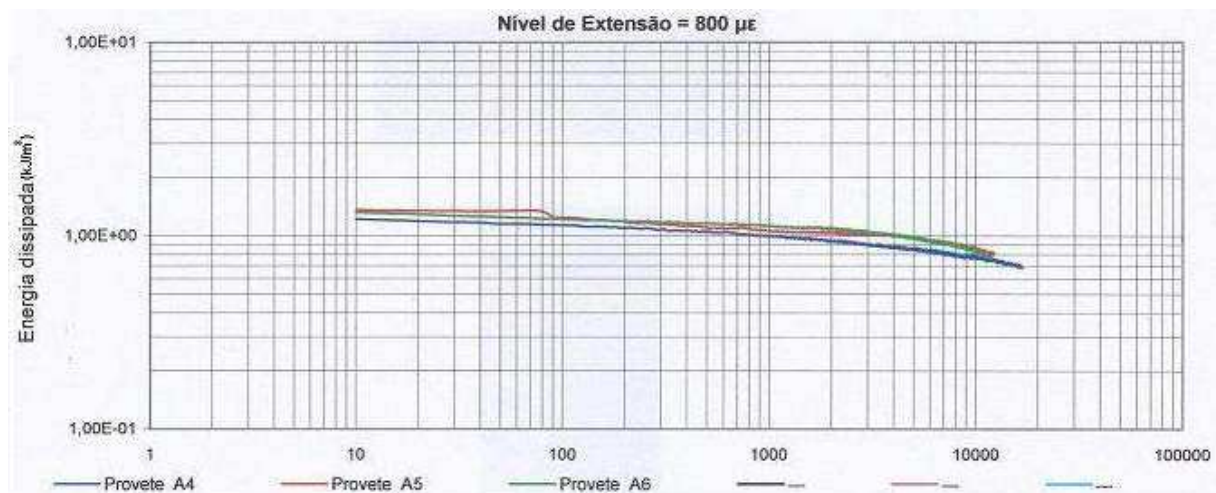


Figura 4.48 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 800  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

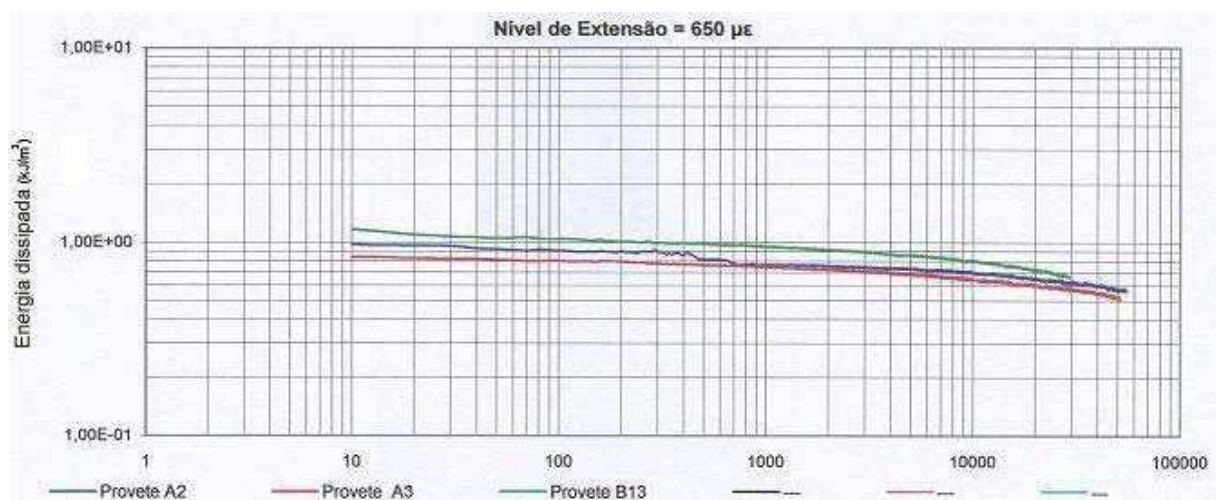


Figura 4.49 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

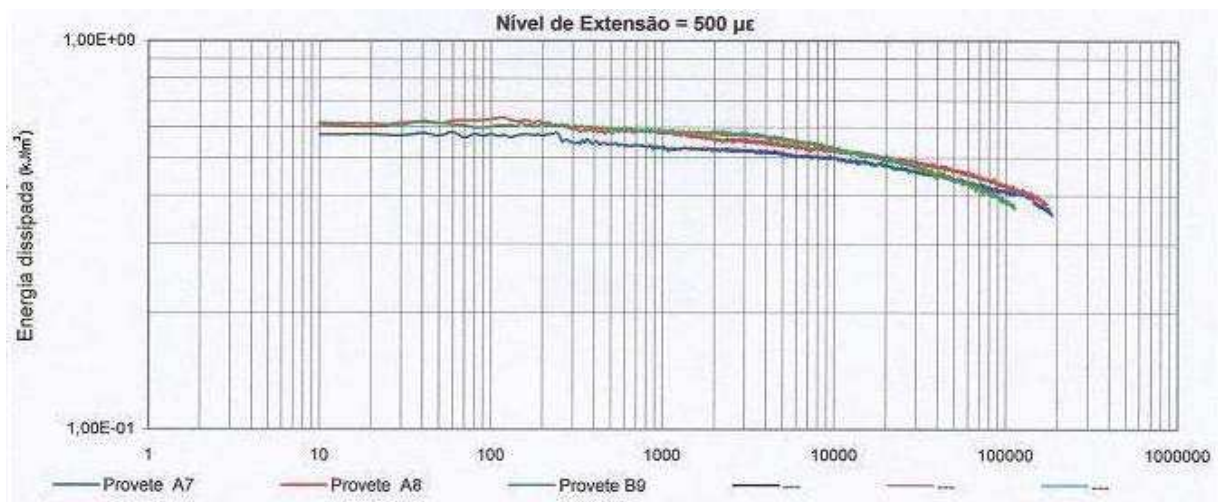


Figura 4.50 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

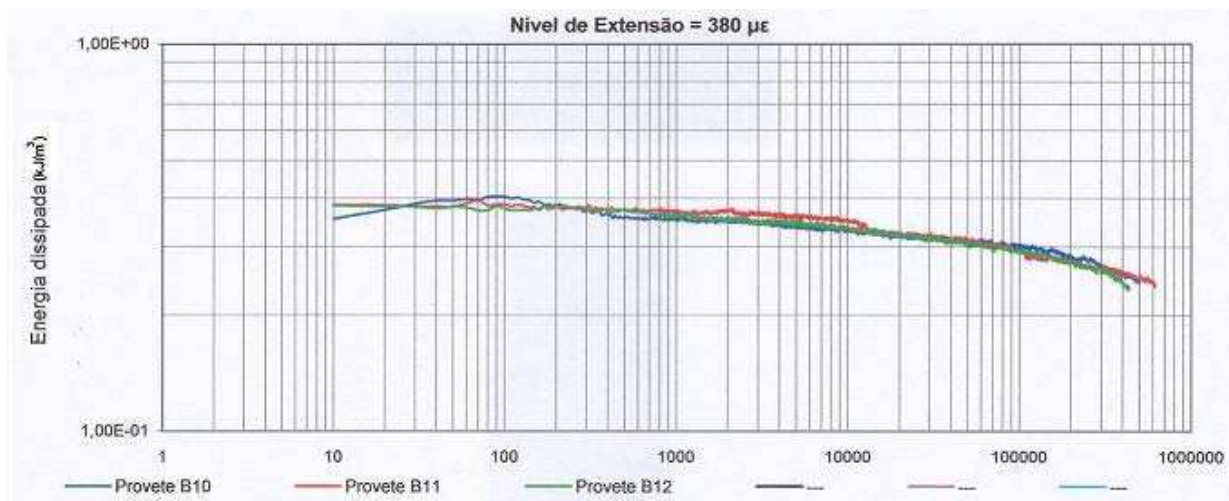


Figura 4.51 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=15%; Pbtot=5,1%)

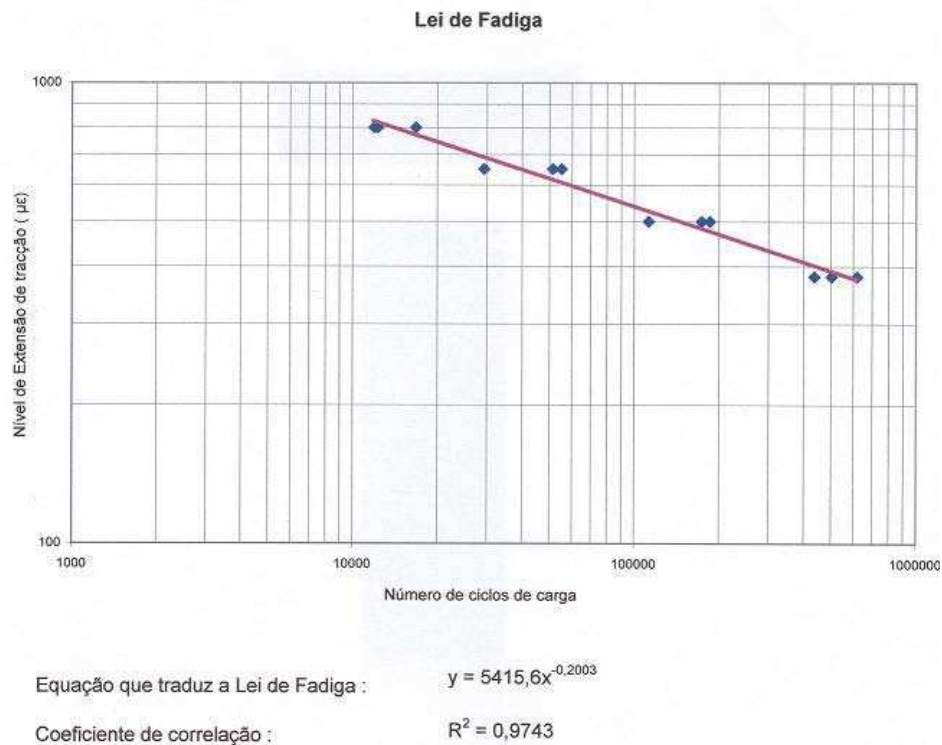


Figura 4.52 – Lei de fadiga (TR=15%; Pbtot=5,1%)

Quadro 4.41 – Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 4,3%

| Mistura betuminosa densa |                       | TR = 30%    |         |        |                      |                 | Pb total = 4,3%          |                        |                             |
|--------------------------|-----------------------|-------------|---------|--------|----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Patamares de ensaio      | Referência do provete | Comprimento | Largura | Altura | Baridade             | Rigidez inicial | Nº de ciclos até à ruína | Ângulo de fase inicial | Energia dissipada acumulada |
| (µε)                     |                       | (mm)        | (mm)    | (mm)   | (g/cm <sup>3</sup> ) | (MPa)           |                          | (graus)                | (MJ/m <sup>3</sup> )        |
| 500                      | A2                    | 400         | 62,20   | 51,50  | 2,34                 | 7983            | 13750                    | 31,9                   | 7,832                       |
|                          | A3                    | 400         | 62,19   | 51,51  | 2,33                 | 7698            | 11670                    | 31,3                   | 6,703                       |
|                          | A5                    | 400         | 62,87   | 51,04  | 2,34                 | 7438            | 12820                    | 32,3                   | 7,466                       |
| 380                      | A7                    | 400         | 62,48   | 51,10  | 2,35                 | 8738            | 41510                    | 30,1                   | 15,412                      |
|                          | A8                    | 400         | 62,43   | 51,43  | 2,36                 | 9170            | 18170                    | 30,9                   | 7,302                       |
|                          | B9                    | 400         | 62,15   | 49,28  | 2,34                 | 7965            | 20900                    | 28,6                   | 7,549                       |
| 290                      | B10                   | 400         | 61,21   | 50,55  | 2,34                 | 8550            | 49000                    | 27,6                   | 10,561                      |
|                          | B11                   | 400         | 62,36   | 51,42  | 2,34                 | 8790            | 60750                    | 28,8                   | 12,221                      |
|                          | B12                   | 400         | 61,33   | 51,41  | 2,34                 | 7959            | 76370                    | 27,1                   | 15,304                      |
| 180                      | B13                   | 400         | 62,29   | 51,71  | 2,35                 | 7999            | 1080000                  | 22,7                   | 74,166                      |
|                          | B14                   | 400         | 62,37   | 51,47  | 2,35                 | 8939            | 1113200                  | 23,9                   | 83,045                      |
|                          | B15                   | 400         | 62,95   | 51,86  | 2,35                 | 9474            | 2290000                  | 24,9                   | 124,464                     |

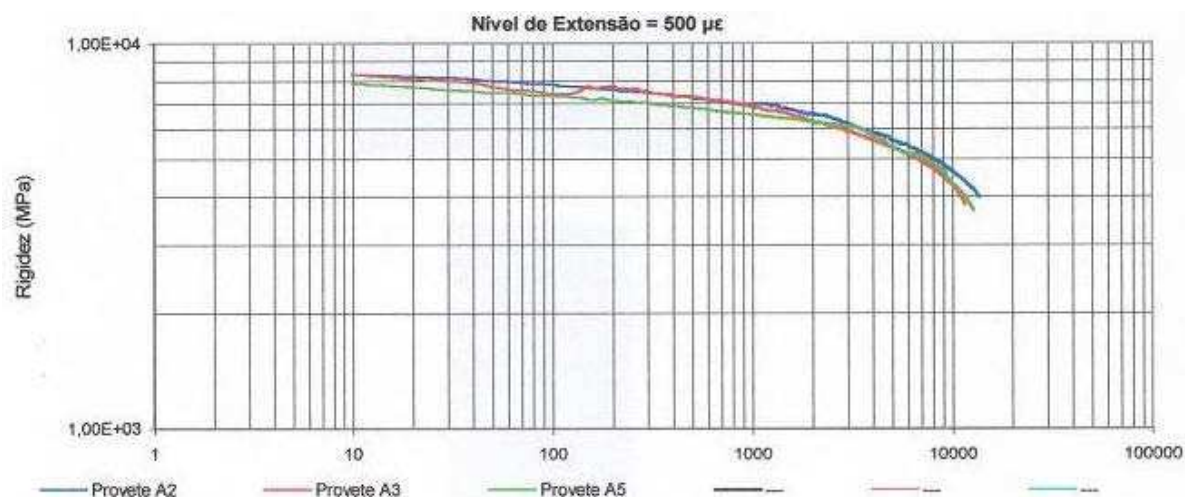


Figura 4.53 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)

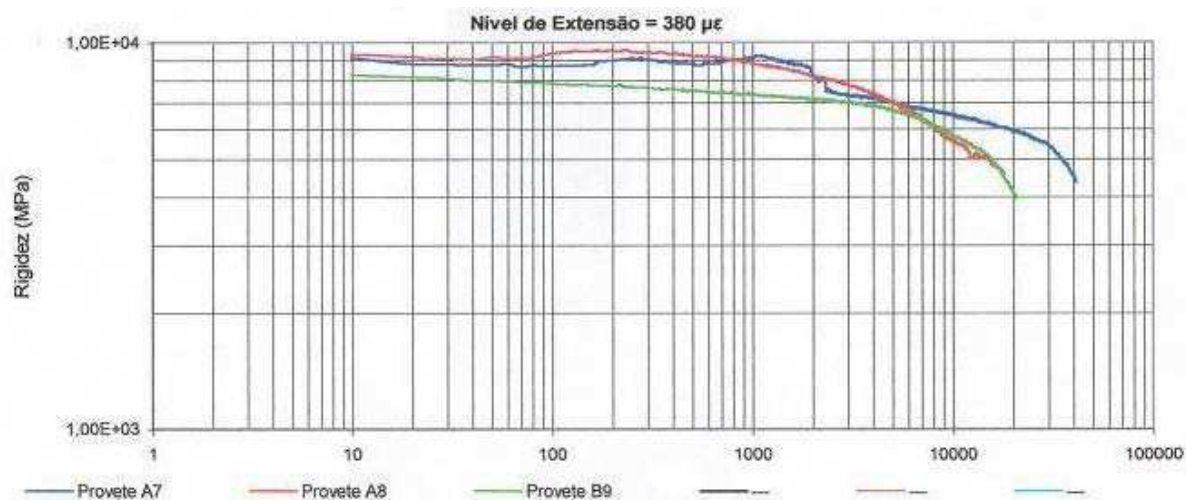


Figura 4.54 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)

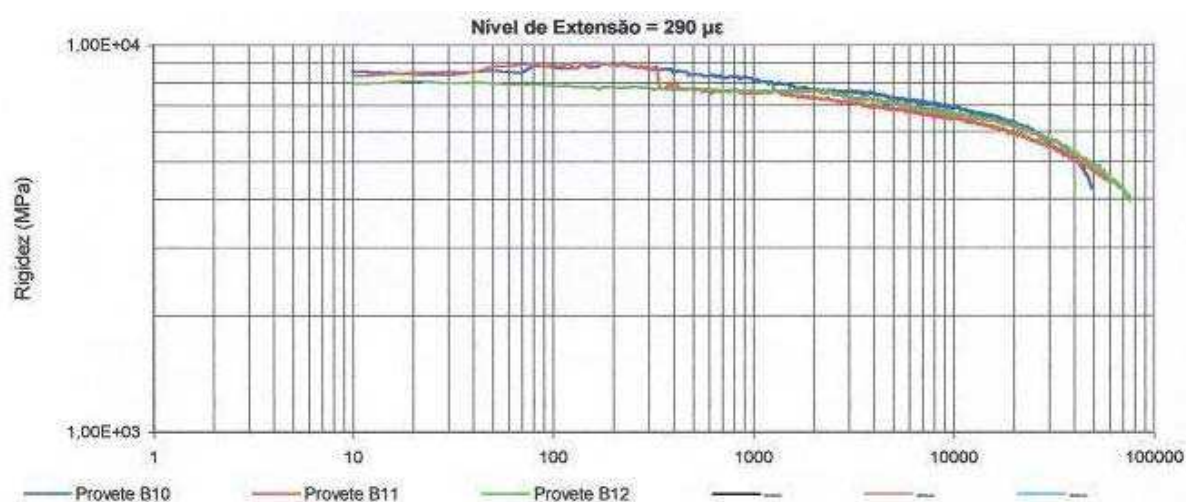


Figura 4.55 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 290  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)

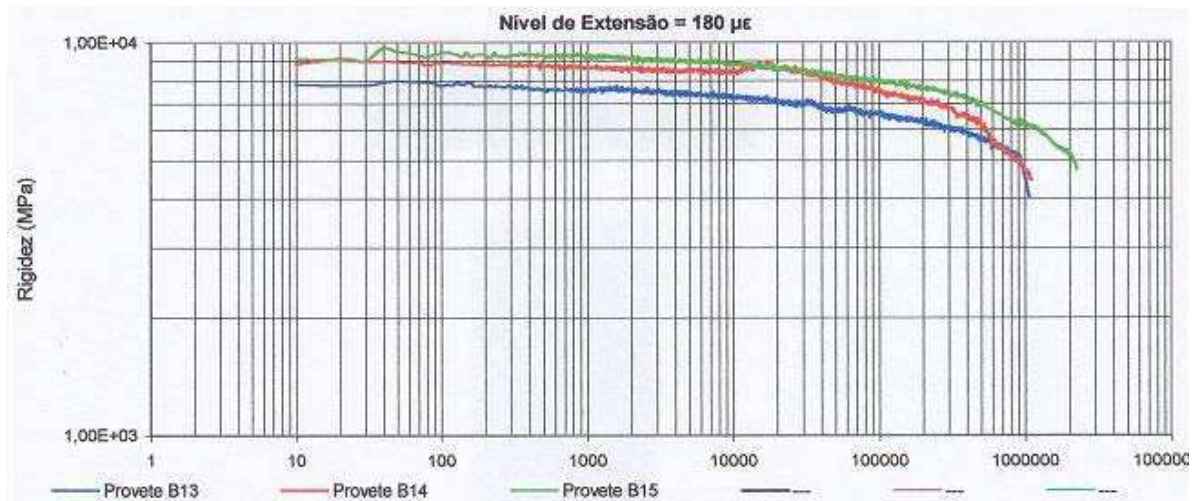


Figura 4.56 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 180 µε (TR=30%; Pbtot=4,3%)

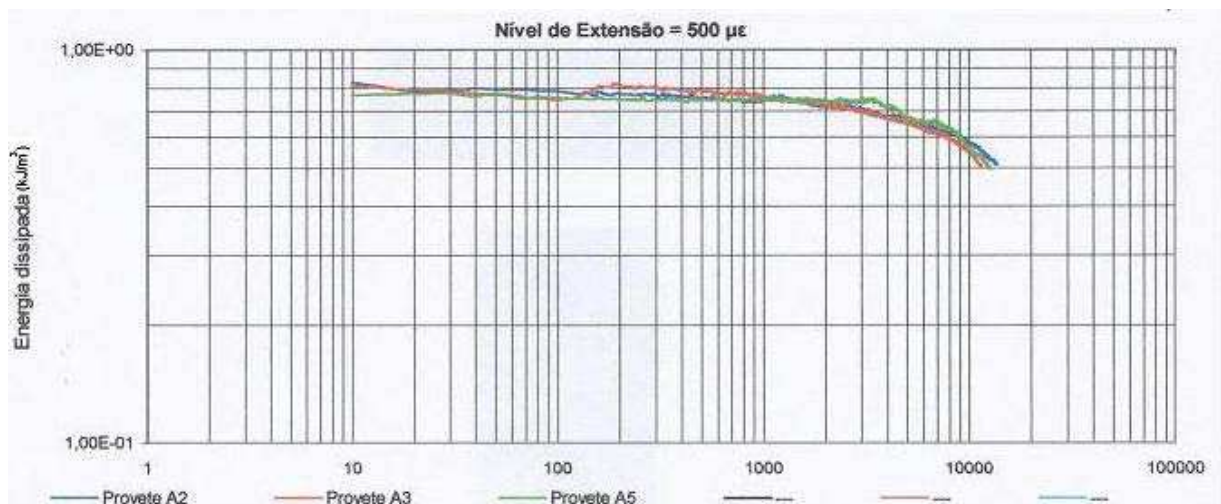


Figura 4.57 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500 µε (TR=30%; Pbtot=4,3%)

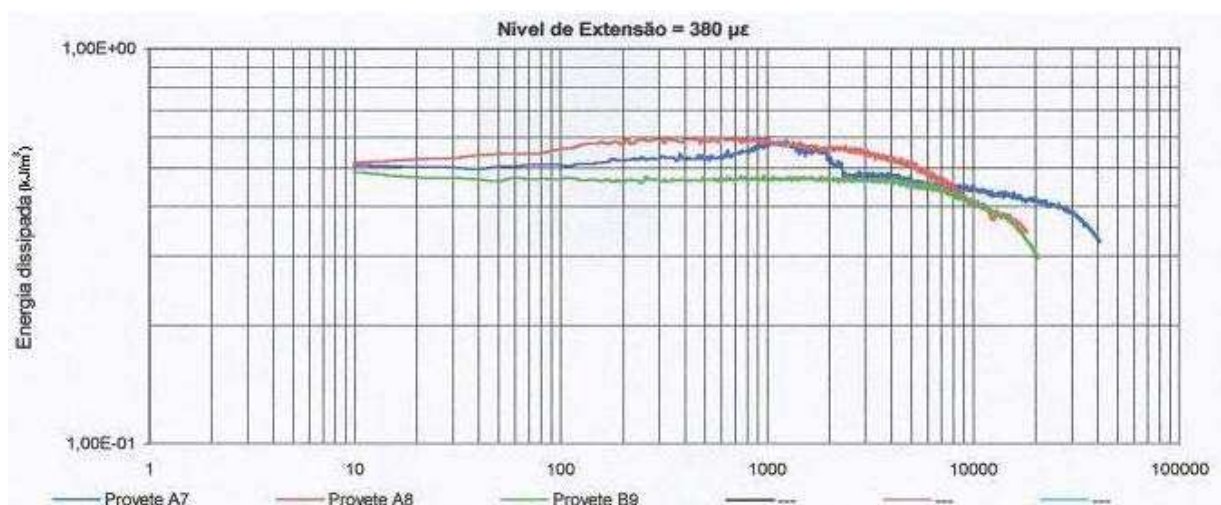


Figura 4.58 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 380 µε (TR=30%; Pbtot=4,3%)



Figura 4.59 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 290  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)

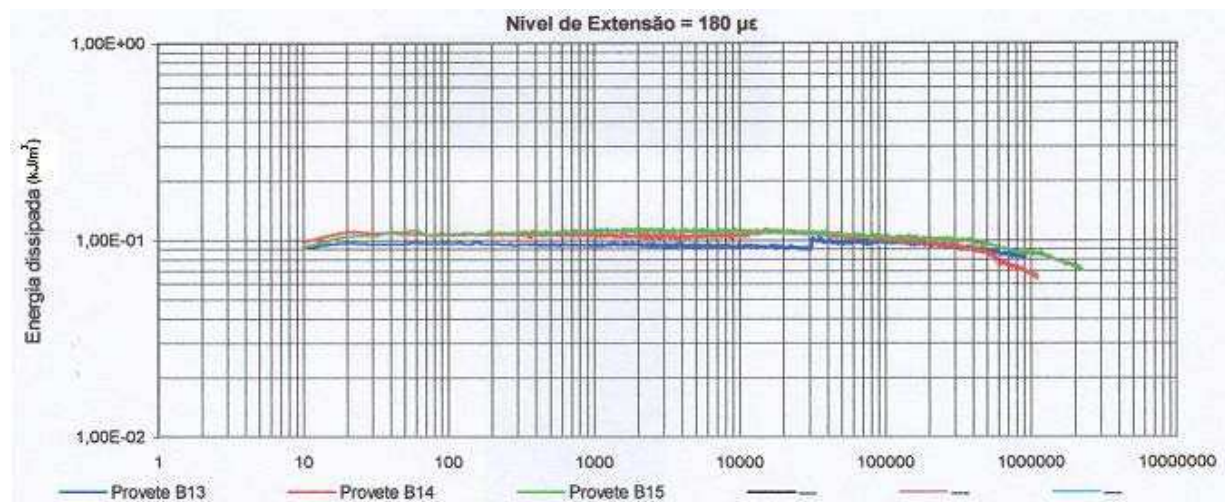


Figura 4.60 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 180  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=4,3%)

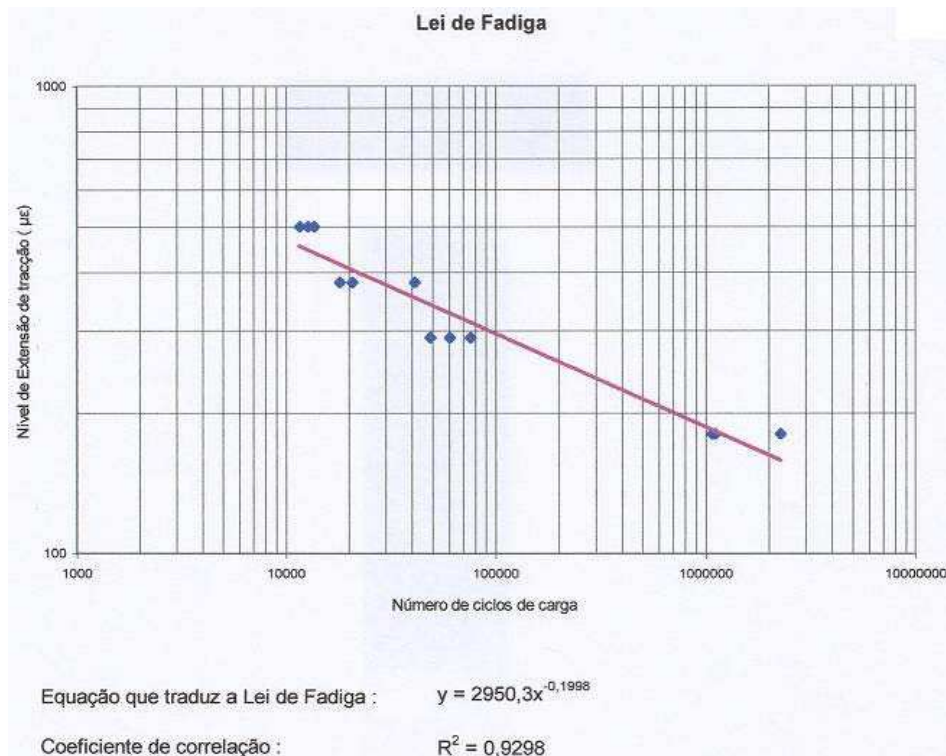


Figura 4.61 – Lei de fadiga (TR=30%; Pbtot=4,3%)

Quadro 4.42 – Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 5,1%

| Mistura betuminosa densa |                       |             |         | TR = 30% |          |                 | Pb total = 5,1%          |                        |                             |
|--------------------------|-----------------------|-------------|---------|----------|----------|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Patamares de ensaio      | Referência do provete | Comprimento | Largura | Altura   | Baridade | Rigidez inicial | Nº de ciclos até à ruína | Ângulo de fase inicial | Energia dissipada acumulada |
| (µε)                     |                       | (mm)        | (mm)    | (mm)     | (g/cm³)  | (MPa)           |                          | (graus)                | (MJ/m³)                     |
| 500                      | A1                    | 400         | 62,69   | 50,91    | 2,37     | 9201            | 31720                    | 38,5                   | 20,380                      |
|                          | A2                    | 400         | 63,01   | 50,81    | 2,35     | 8350            | 24790                    | 36,5                   | 14,831                      |
|                          | A3                    | 400         | 63,19   | 51,05    | 2,34     | 7729            | 24180                    | 34,7                   | 13,754                      |
| 380                      | A4                    | 400         | 61,92   | 51,03    | 2,33     | 8875            | 71990                    | 28,8                   | 25,072                      |
|                          | A5                    | 400         | 63,54   | 51,21    | 2,34     | 8269            | 93950                    | 30,3                   | 32,171                      |
|                          | A6                    | 400         | 62,82   | 51,30    | 2,35     | 8024            | 89800                    | 28,6                   | 30,108                      |
| 280                      | A7                    | 400         | 63,21   | 50,84    | 2,36     | 8896            | 420000                   | 24,6                   | 55,108                      |
|                          | A8                    | 400         | 62,20   | 51,18    | 2,37     | 8852            | 438000                   | 28,3                   | 67,813                      |
|                          | B13                   | 400         | 62,20   | 50,59    | 2,35     | 8193            | 268860                   | 28,3                   | 49,439                      |
| 210                      | B10                   | 400         | 62,46   | 50,88    | 2,35     | 8730            | 1752780                  | 29,4                   | 178,150                     |
|                          | B11                   | 400         | 62,55   | 50,93    | 2,34     | 8476            | 1560000                  | 28,0                   | 130,703                     |
|                          | B12                   | 400         | 62,60   | 50,86    | 2,35     | 8401            | 2174540                  | 24,8                   | 162,258                     |

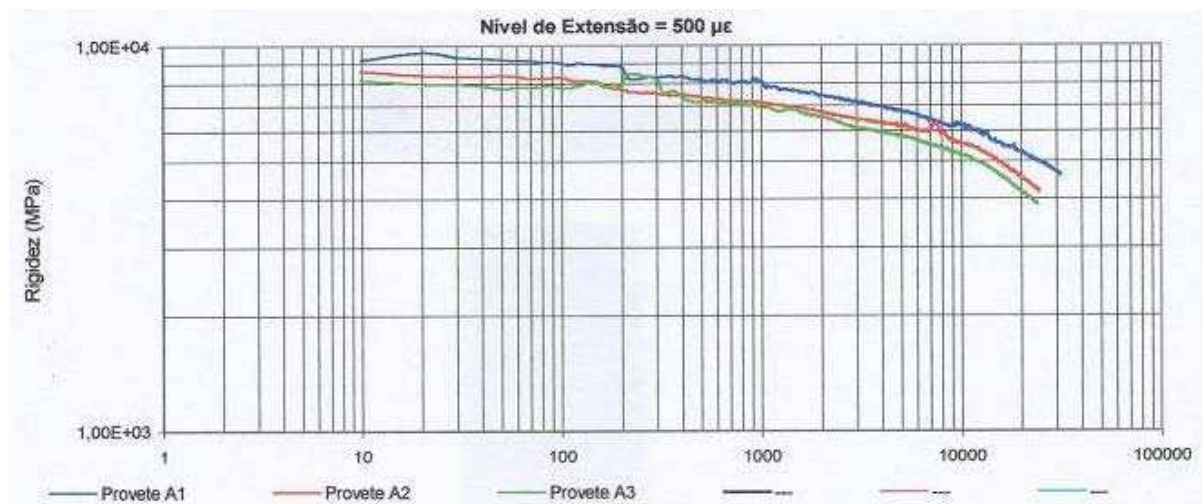


Figura 4.62 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)

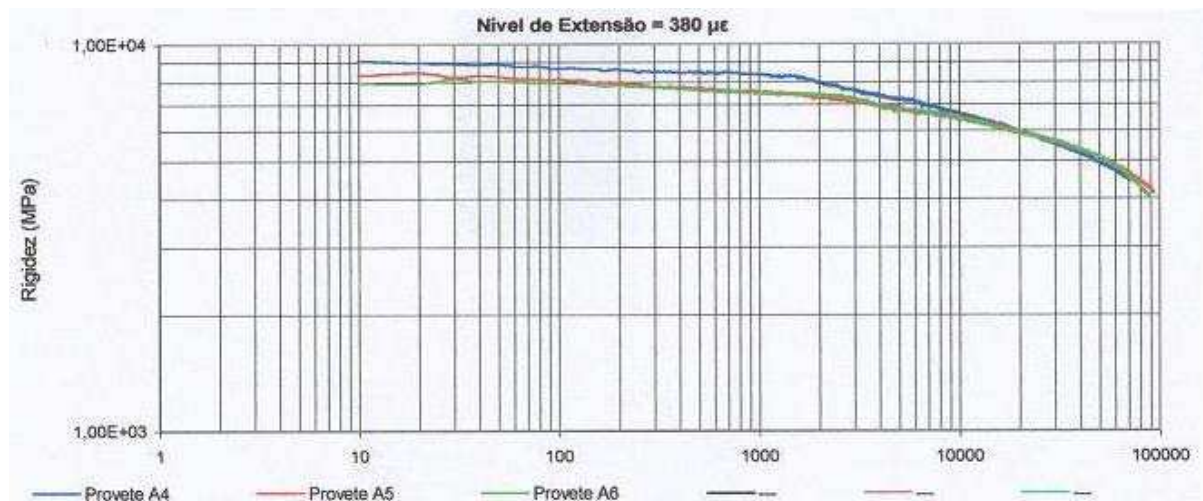


Figura 4.63 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)

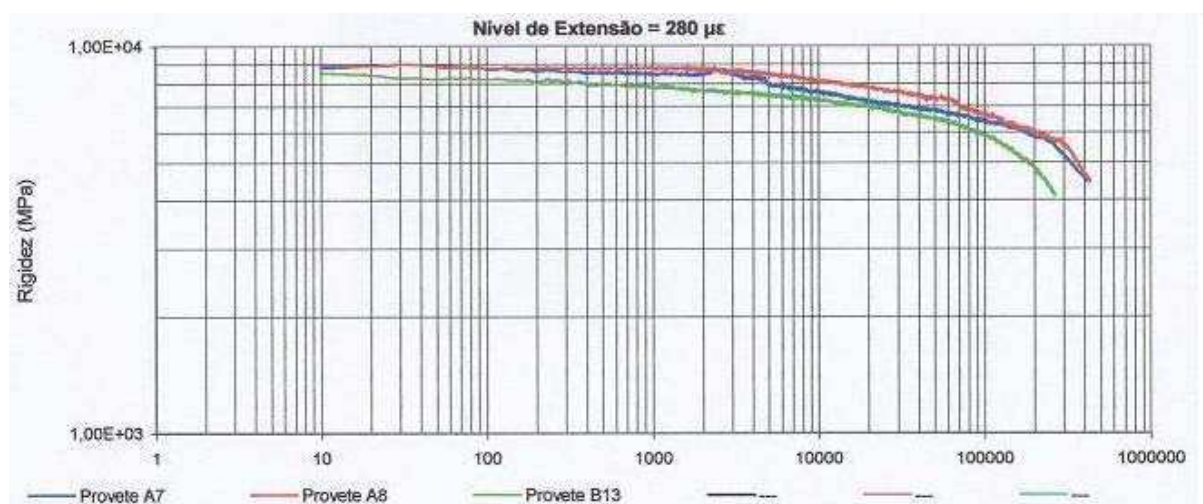


Figura 4.64 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 280  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)



Figura 4.65 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de  $210 \mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)

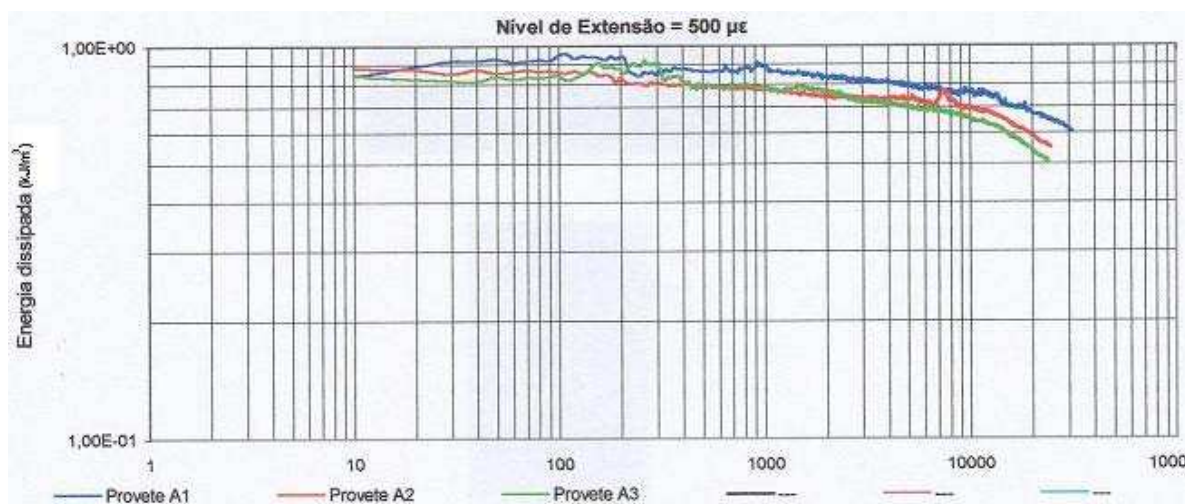


Figura 4.66 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de  $500 \mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)



Figura 4.67 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de  $380 \mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)

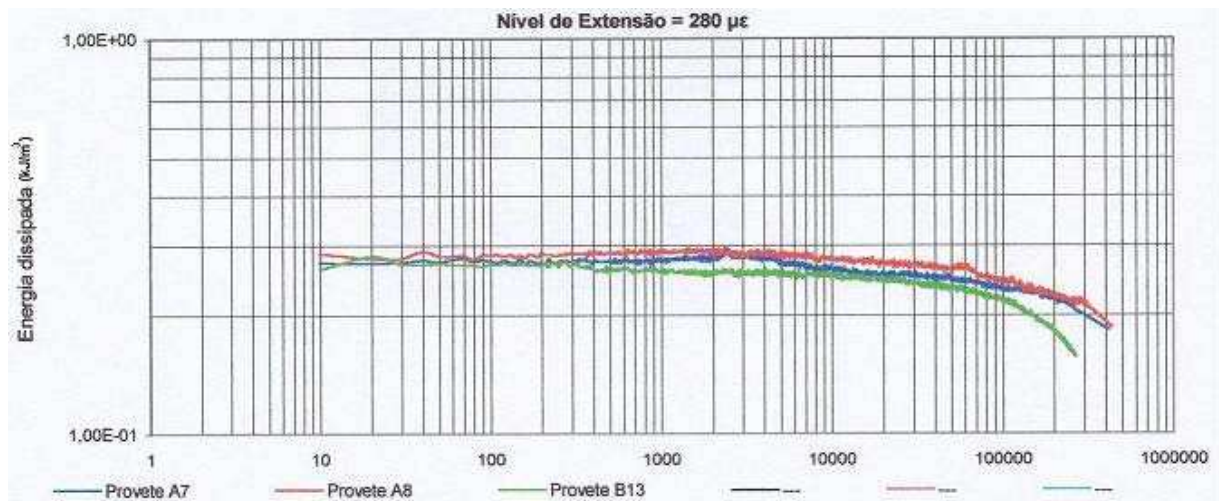


Figura 4.68 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 280  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)

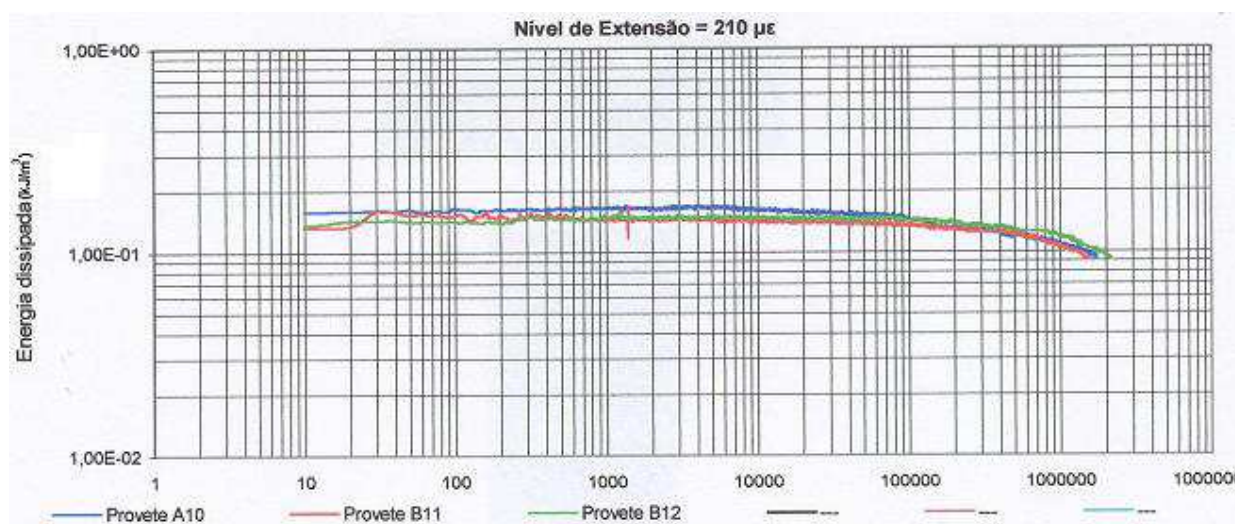


Figura 4.69 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 210  $\mu\epsilon$  (TR=30%; Pbtot=5,1%)

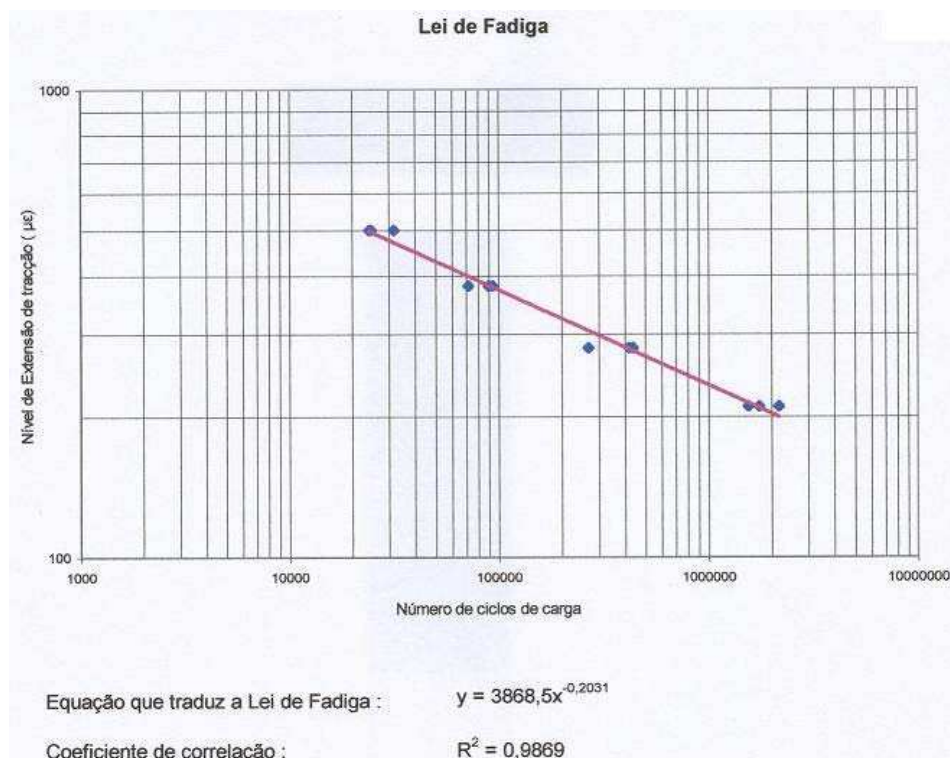


Figura 4.70 – Lei de fadiga (TR=30%; Pbtot=5,1%)

No ponto 4.2.4.6 constam as considerações mais relevantes sobre os resultados obtidos nos ensaios de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga.

#### 4.2.4.5. Avaliação da resistência às deformações permanentes

A avaliação da resistência às deformações permanentes foi realizada com o equipamento *Wheel Tracking* no ensaio de pista. Os ensaios foram conduzidos de acordo com as condições indicadas no quadro 4.43.

Quadro 4.43 – Condições de ensaio para avaliação da resistência às deformações permanentes

|                       |           |               |
|-----------------------|-----------|---------------|
| Norma de ensaio       |           | prEN 12697-22 |
| Duração do ensaio     | (minutos) | 45            |
| Temperatura do ensaio | (°C)      | 60 ± 0,5      |
| Amplitude             | (mm)      | 230           |
| Frequência            | (Hz)      | 0,35          |
| L-Força               | (N)       | 700           |
| w-Largura do pneu     | (mm)      | 50            |

Os resultados dos ensaios das diferentes misturas e para os diversos provetes ensaiados constam dos quadros resumo e gráficos que se seguem:

- TR = 0 %; Pbtot= 5,1 % - Resumo dos resultados – Quadro 4.44
- Evolução da deformação com o tempo de ensaio – Figuras 4.71 a 4.75

- TR = 15 %; Pbttotal= 4,3 % - Resumo dos resultados – Quadro 4.45  
- Evolução da deformação com o tempo de ensaio – Figuras 4.76 a 4.81
- TR = 15 %; Pbttotal= 5,1 % - Resumo dos resultados – Quadro 4.46  
- Evolução da deformação com o tempo de ensaio – Figuras 4.82 a 4.87
- TR = 30 %; Pbttotal= 4,3 % - Resumo dos resultados – Quadro 4.47  
- Evolução da deformação com o tempo de ensaio – Figuras 4.88 a 4.93
- TR = 30 %; Pbttotal= 5,1 % - Resumo dos resultados – Quadro 4.48  
- Evolução da deformação com o tempo de ensaio – Figuras 4.94 a 4.99

Quadro 4.44 – Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa tradicional (com taxa de reciclagem de 0%) e com percentagem de betume total de 5,1%

| Mistura betuminosa densa                                |             | TR                   | 0%    | Pbttotal |       | 5,1%  |       |
|---------------------------------------------------------|-------------|----------------------|-------|----------|-------|-------|-------|
| Referência do provete                                   |             |                      | A2    | B1       | B2    | C1    | C2    |
| Dimensões do provete                                    | Comprimento | (mm)                 | 303,7 | 299,3    | 300,9 | 303,5 | 300,1 |
|                                                         | Largura     | (mm)                 | 263,7 | 262,2    | 262,6 | 261,5 | 264,7 |
|                                                         | Espessura   | (mm)                 | 77,9  | 77,6     | 77,6  | 77,6  | 77,3  |
| Baridade do provete                                     |             | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,36  | 2,37     | 2,37  | 2,37  | 2,37  |
| Profundidade de rodeira ao fim de 45 minutos            |             | (mm)                 | 7,89  | 6,40     | 7,63  | 9,48  | 9,74  |
| Profundidade média de rodeira ao fim de 45 minutos      |             | (mm)                 | 8,23  |          |       |       |       |
| Índice de aumento da profundidade de rodeira, TR        |             | (mm/h)               | 4,89  | 3,83     | 4,55  | 5,58  | 5,98  |
| Índice médio de aumento da profundidade de rodeira, TRm |             | (mm/h)               | 4,97  |          |       |       |       |
| Índice de deformação, WTR<br>WTR=14,08 TRm w/L          |             | (mm/h)               | 5,00  |          |       |       |       |

Nota: O índice de aumento da profundidade da rodeira (TR) consiste na velocidade de deformação entre os 30 e os 45 minutos onde gráfico que relaciona a deformação com o tempo é linear correspondendo à inclinação da recta que define o comportamento da mistura nesse intervalo.

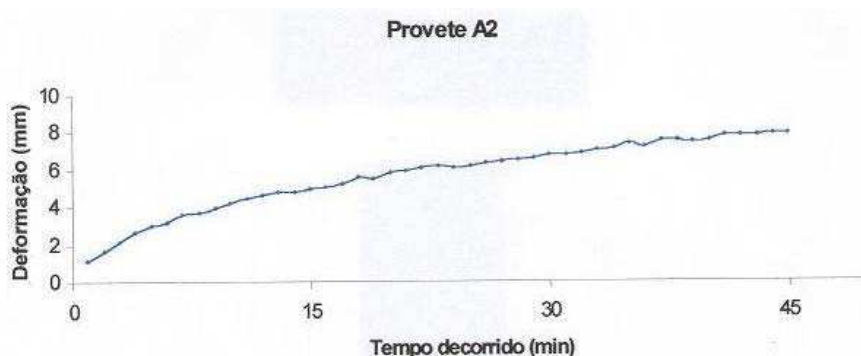


Figura 4.71 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2.  
(TR=0%; Pbttotal=5,1%)

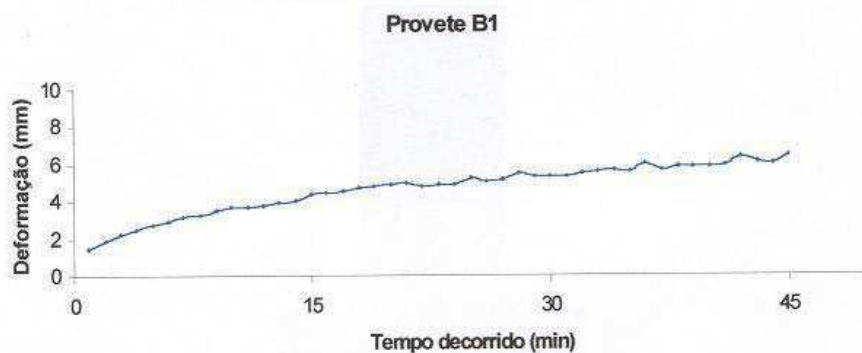


Figura 4.72 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1.  
(TR=0%; Pbtot=5,1%)

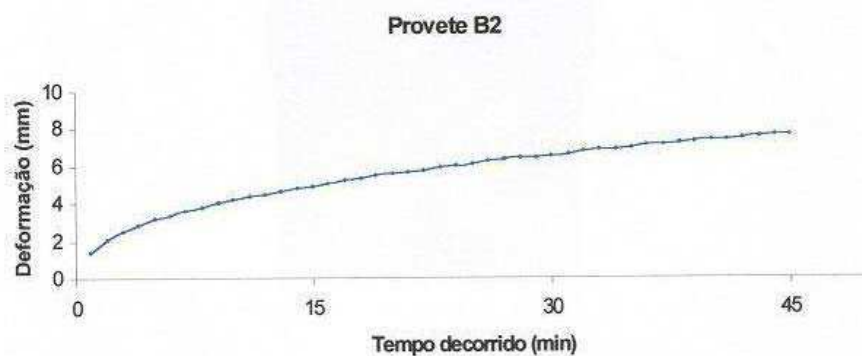


Figura 4.73 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2.  
(TR=0%; Pbtot=5,1%)

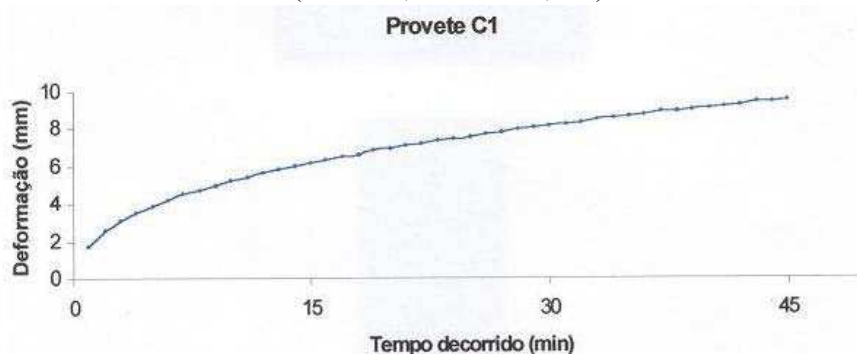


Figura 4.74 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1.  
(TR=0%; Pbtot=5,1%)

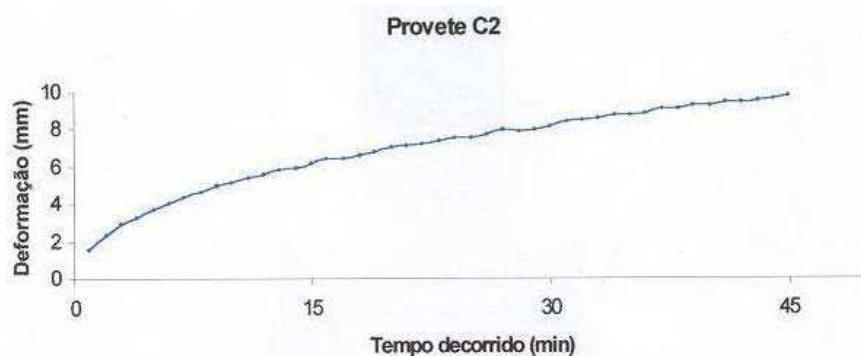


Figura 4.75 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2.  
(TR=0%; Pbtot=5,1%)

Quadro 4.45 – Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 4,3%

| Mistura betuminosa densa                                |             |      | TR                   | 15%   | Pbtotal | 4,3%  |       |       |
|---------------------------------------------------------|-------------|------|----------------------|-------|---------|-------|-------|-------|
| Referência do provete                                   |             |      | A1                   | A2    | B1      | B2    | C1    | C2    |
| Dimensões do provete                                    | Comprimento | (mm) | 302,8                | 302,5 | 304,0   | 301,4 | 304,3 | 299,3 |
|                                                         | Largura     | (mm) | 263,4                | 264,3 | 263,7   | 262,2 | 264,7 | 263,9 |
|                                                         | Espessura   | (mm) | 80,0                 | 79,6  | 79,9    | 79,1  | 77,2  | 77,1  |
| Baridade do provete                                     |             |      | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,31  | 2,33    | 2,34  | 2,33  | 2,35  |
| Profundidade de rodeira ao fim de 45 minutos            |             |      | (mm)                 | 2,79  | 2,42    | 2,45  | 2,69  | 2,41  |
| Profundidade média de rodeira ao fim de 45 minutos      |             |      | (mm)                 | 2,57  |         |       |       |       |
| Índice de aumento da profundidade de rodeira, TR        |             |      | (mm/h)               | 0,99  | 1,06    | 0,75  | 0,93  | 1,27  |
| Índice médio de aumento da profundidade de rodeira, TRm |             |      | (mm/h)               | 1,09  |         |       |       |       |
| Índice de deformação, WTR<br>WTR=14,08 TRm w/L          |             |      | (mm/h)               | 1,10  |         |       |       |       |

Nota: O índice de aumento da profundidade da rodeira (TR) consiste na velocidade de deformação entre os 30 e os 45 minutos onde gráfico que relaciona a deformação com o tempo é linear correspondendo à inclinação da recta que define o comportamento da mistura nesse intervalo.

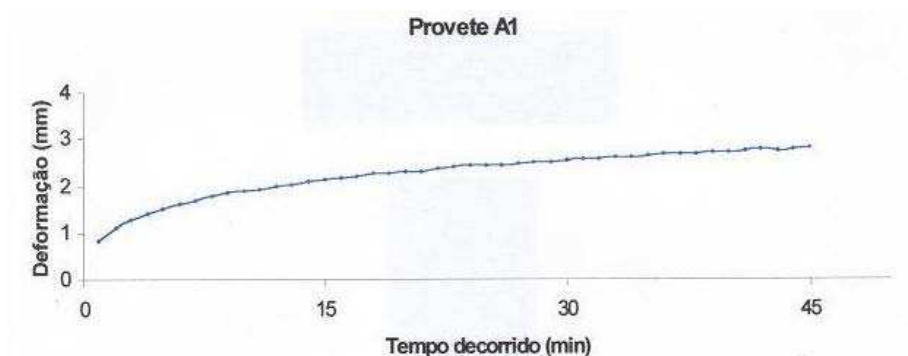


Figura 4.76 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1.  
(TR=15%; Pbtotal=4,3%)

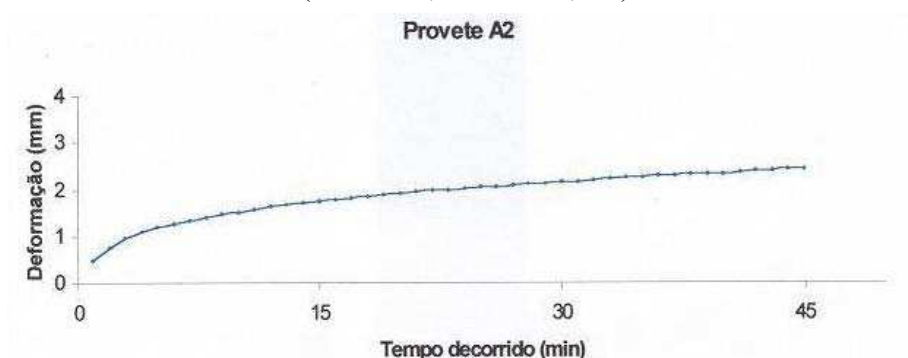


Figura 4.77 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2.  
(TR=15%; Pbtotal=4,3%)

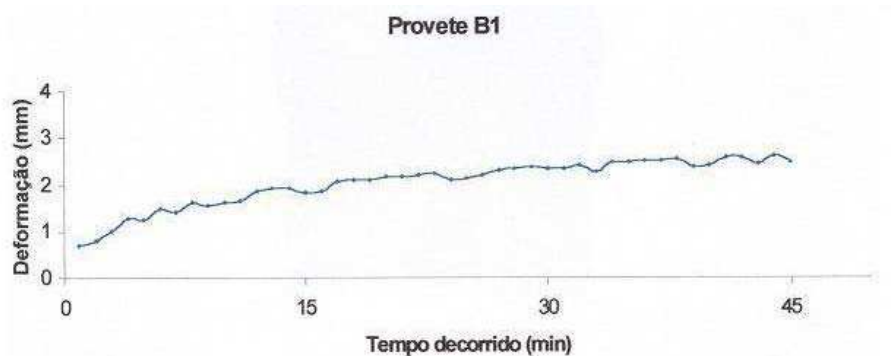


Figura 4.78 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1.  
(TR=15%; Pbtot=4,3%)



Figura 4.79 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2.  
(TR=15%; Pbtot=4,3%)

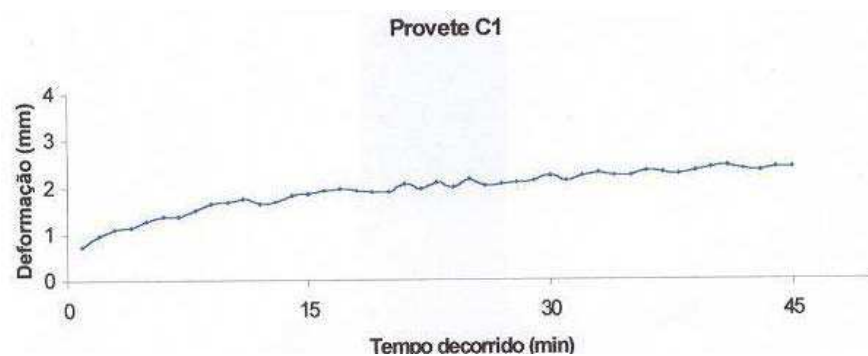


Figura 4.80 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1.  
(TR=15%; Pbtot=4,3%).

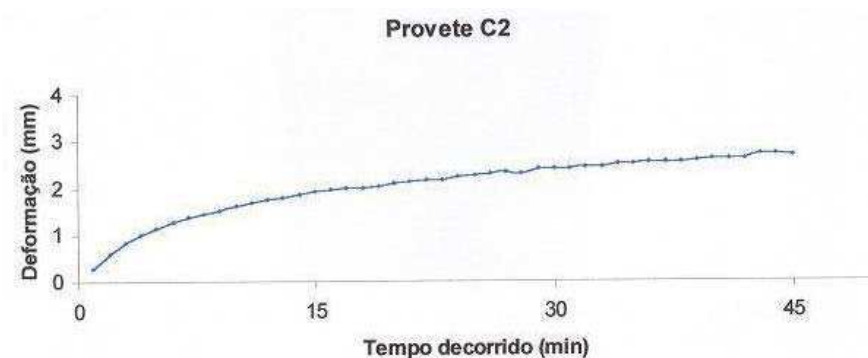


Figura 4.81 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2.  
(TR=15%; Pbtot=4,3%).

Quadro 4.46 – Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 15% e com percentagem de betume total de 5,1%

| Mistura betuminosa densa                                |             |         | TR    | 15%   | Pbtotal | 5,1%  |       |       |    |
|---------------------------------------------------------|-------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|----|
| Referência do provete                                   |             |         |       | A1    | A2      | B1    | B2    | C1    | C2 |
| Dimensões do provete                                    | Comprimento | (mm)    | 302,9 | 303,0 | 302,2   | 303,2 | 301,3 | 300,7 |    |
|                                                         | Largura     | (mm)    | 262,6 | 261,4 | 262,0   | 261,2 | 260,4 | 261,9 |    |
|                                                         | Espessura   | (mm)    | 80,5  | 80,3  | 77,6    | 77,7  | 77,8  | 77,5  |    |
| Baridade do provete                                     |             | (g/cm3) | 2,32  | 2,32  | 2,35    | 2,34  | 2,34  | 2,34  |    |
| Profundidade de rodeira ao fim de 45 minutos            |             | (mm)    | 2,64  | 2,22  | 2,41    | 2,50  | 4,27  | 3,07  |    |
| Profundidade média de rodeira ao fim de 45 minutos      |             | (mm)    | 2,85  |       |         |       |       |       |    |
| Índice de aumento da profundidade de rodeira, TR        |             | (mm/h)  | 1,26  | 1,27  | 1,00    | 1,13  | 2,12  | 0,98  |    |
| Índice médio de aumento da profundidade de rodeira, TRm |             | (mm/h)  | 1,29  |       |         |       |       |       |    |
| Índice de deformação, WTR<br>WTR=14,08 TRm w/L          |             | (mm/h)  | 1,30  |       |         |       |       |       |    |

Nota: O índice de aumento da profundidade da rodeira (TR) consiste na velocidade de deformação entre os 30 e os 45 minutos onde gráfico que relaciona a deformação com o tempo é linear correspondendo à inclinação da recta que define o comportamento da mistura nesse intervalo.

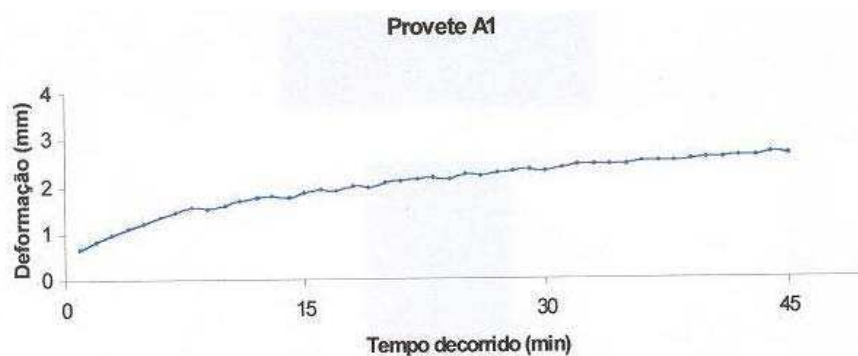


Figura 4.82 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1.  
(TR=15%; Pbtotal=5,1%).

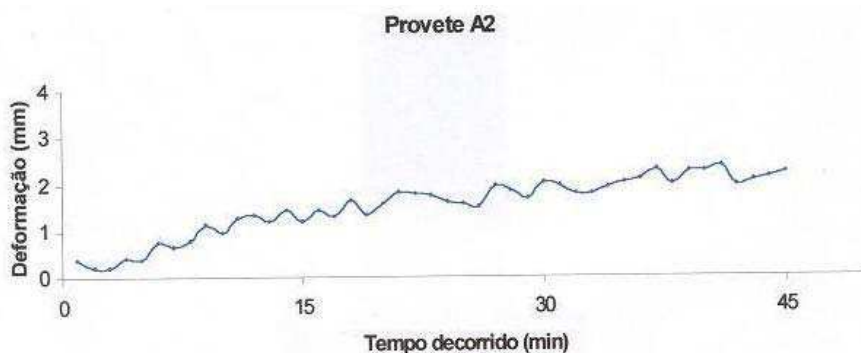


Figura 4.83 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2.  
(TR=15%; Pbtotal=5,1%).

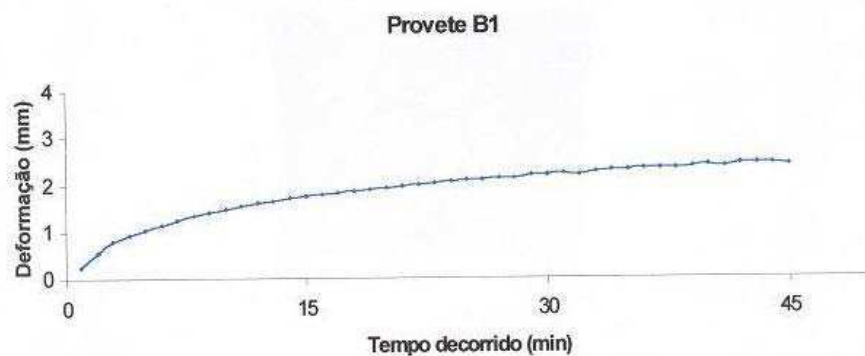


Figura 4.84 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1.  
(TR=15%; Pbtot=5,1%).



Figura 4.85 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2.  
(TR=15%; Pbtot=5,1%).

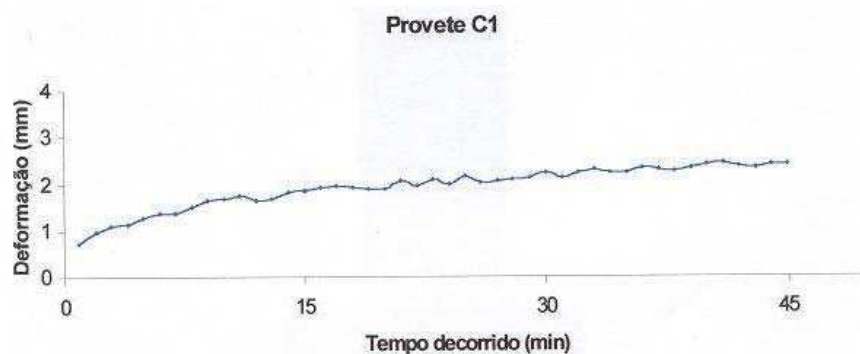


Figura 4.86 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1.  
(TR=15%; Pbtot=5,1%).

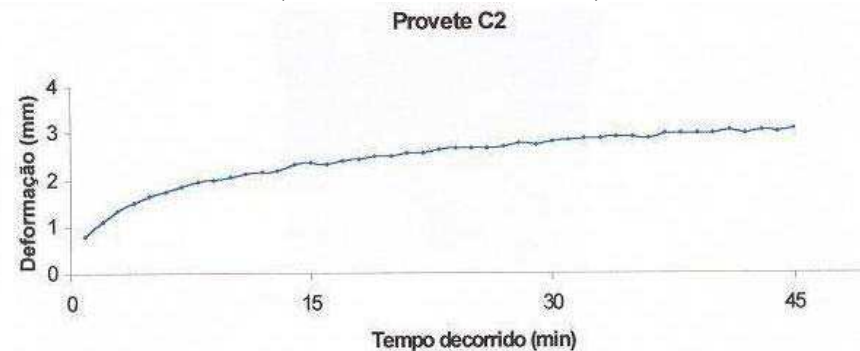


Figura 4.87 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2.  
(TR=15%; Pbtot=5,1%).

Quadro 4.47 – Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 4,3%

| Mistura betuminosa densa                                |             |      | TR                   | 30%   | Pbtotal | 4,3%  |       |       |
|---------------------------------------------------------|-------------|------|----------------------|-------|---------|-------|-------|-------|
| Referência do provete                                   |             |      | A1                   | A2    | B1      | B2    | C1    | C2    |
| Dimensões do provete                                    | Comprimento | (mm) | 301,6                | 300,7 | 301,6   | 302,5 | 300,4 | 300,8 |
|                                                         | Largura     | (mm) | 260,8                | 262,0 | 260,8   | 259,9 | 262,4 | 261,7 |
|                                                         | Espessura   | (mm) | 80,1                 | 79,2  | 78,5    | 78,3  | 78,5  | 78,6  |
| Baridade do provete                                     |             |      | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,33  | 2,32    | 2,34  | 2,34  | 2,32  |
| Profundidade de rodeira ao fim de 45 minutos            |             |      | (mm)                 | 2,84  | 2,23    | 1,32  | 1,86  | 1,80  |
| Profundidade média de rodeira ao fim de 45 minutos      |             |      | (mm)                 | 2,07  |         |       |       |       |
| Índice de aumento da profundidade de rodeira, TR        |             |      | (mm/h)               | 1,10  | 0,77    | 0,86  | 0,92  | 0,80  |
| Índice médio de aumento da profundidade de rodeira, TRm |             |      | (mm/h)               | 0,90  |         |       |       |       |
| Índice de deformação, WTR<br>WTR=14,08 TRm w/L          |             |      | (mm/h)               | 0,91  |         |       |       |       |

Nota: O índice de aumento da profundidade da rodeira (TR) consiste na velocidade de deformação entre os 30 e os 45 minutos onde gráfico que relaciona a deformação com o tempo é linear correspondendo à inclinação da recta que define o comportamento da mistura nesse intervalo.

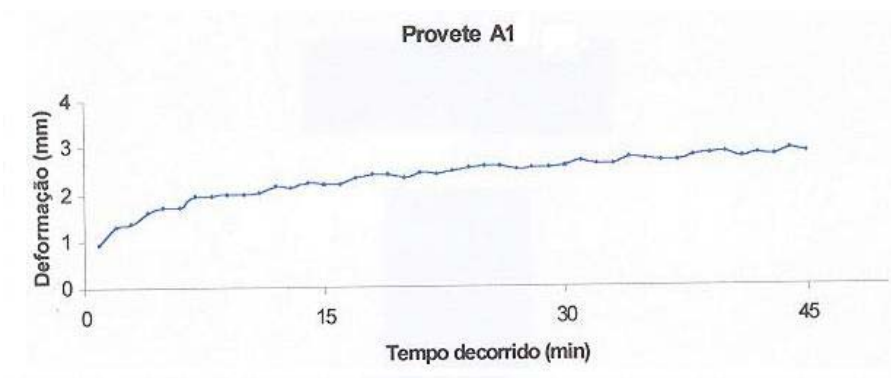


Figura 4.88 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1. (TR=30%; Pbtotal=4,3%).

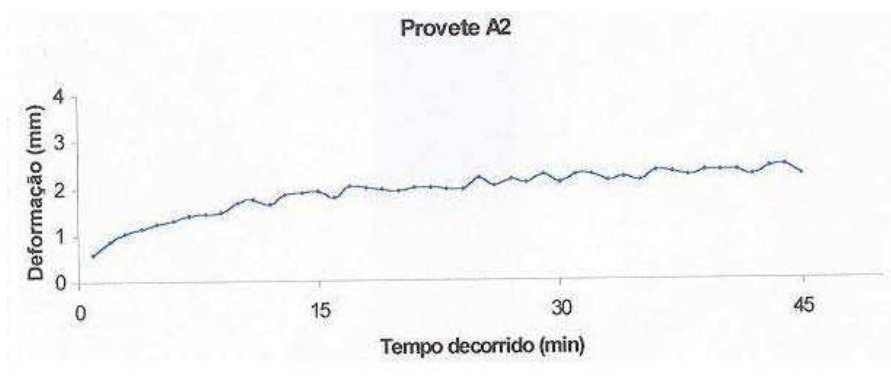


Figura 4.89 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2. (TR=30%; Pbtotal=4,3%).

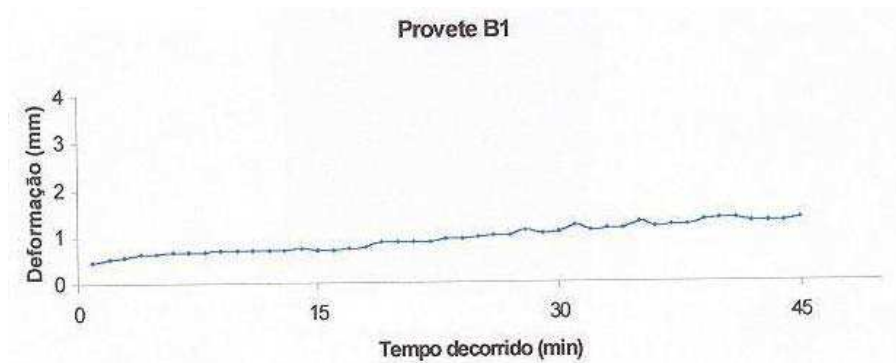


Figura 4.90 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1. (TR=30%; Pbtot=4,3%).



Figura 4.91 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2. (TR=30%; Pbtot=4,3%).

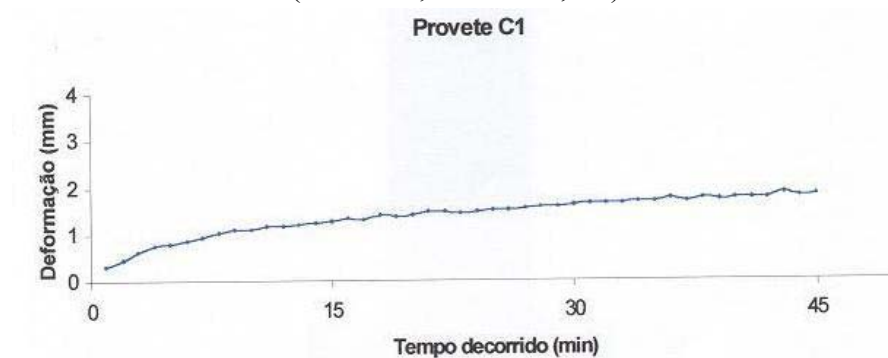


Figura 4.92 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1. (TR=30%; Pbtot=4,3%).

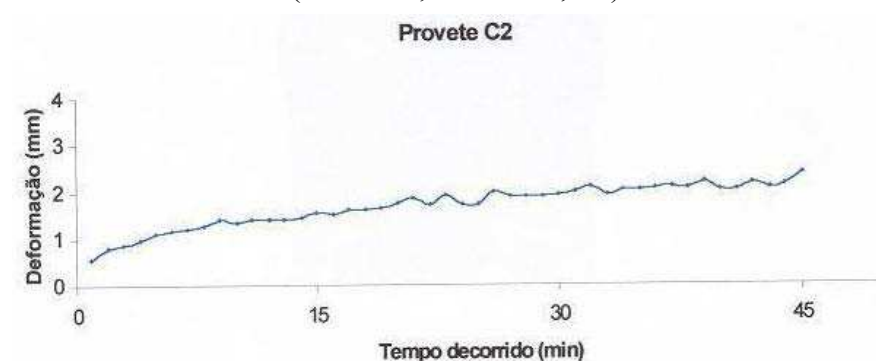


Figura 4.93 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2. (TR=30%; Pbtot=4,3%).

Quadro 4.48 – Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa com taxa de reciclagem de 30% e com percentagem de betume total de 5,1%

| Mistura betuminosa densa                                |             |      | TR                   | 30%   | Pbtotal | 5,1%  |       |       |
|---------------------------------------------------------|-------------|------|----------------------|-------|---------|-------|-------|-------|
| Referência do provete                                   |             |      | A1                   | A2    | B1      | B2    | C1    | C2    |
| Dimensões do provete                                    | Comprimento | (mm) | 303,4                | 302,5 | 303,6   | 303,9 | 300,3 | 303,1 |
|                                                         | Largura     | (mm) | 263,4                | 261,2 | 261,0   | 260,2 | 260,6 | 261,9 |
|                                                         | Espessura   | (mm) | 78,2                 | 78,0  | 79,0    | 79,1  | 79,5  | 79,4  |
| Baridade do provete                                     |             |      | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,36  | 2,36    | 2,36  | 2,37  | 2,37  |
| Profundidade de rodeira ao fim de 45 minutos            |             |      | (mm)                 | 3,31  | 3,92    | 2,90  | 2,88  | 3,24  |
| Profundidade média de rodeira ao fim de 45 minutos      |             |      | (mm)                 | 3,32  |         |       |       |       |
| Índice de aumento da profundidade de rodeira, TR        |             |      | (mm/h)               | 1,43  | 1,34    | 1,38  | 1,27  | 1,61  |
| Índice médio de aumento da profundidade de rodeira, TRm |             |      | (mm/h)               | 1,48  |         |       |       |       |
| Índice de deformação, WTR<br>WTR=14,08 TRm w/L          |             |      | (mm/h)               | 1,49  |         |       |       |       |

Nota: O índice de aumento da profundidade da rodeira (TR) consiste na velocidade de deformação entre os 30 e os 45 minutos onde gráfico que relaciona a deformação com o tempo é linear correspondendo à inclinação da recta que define o comportamento da mistura nesse intervalo.

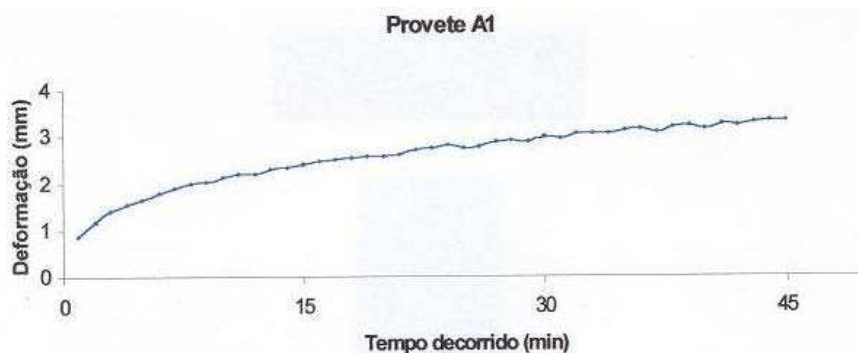


Figura 4.94 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A1.  
(TR=30%; Pbtotal=5,1%).

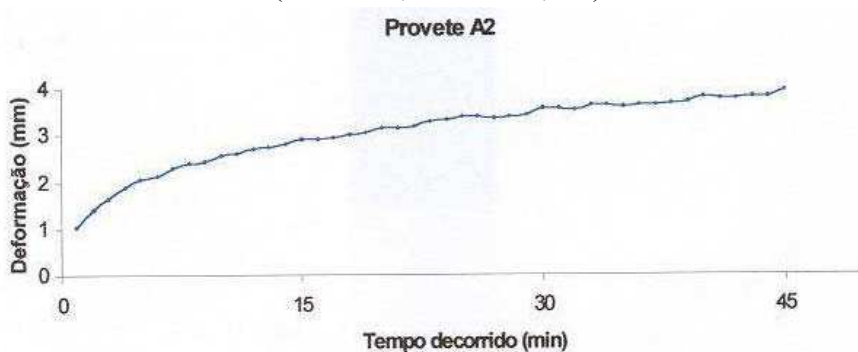


Figura 4.95 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete A2.  
(TR=30%; Pbtotal=5,1%)

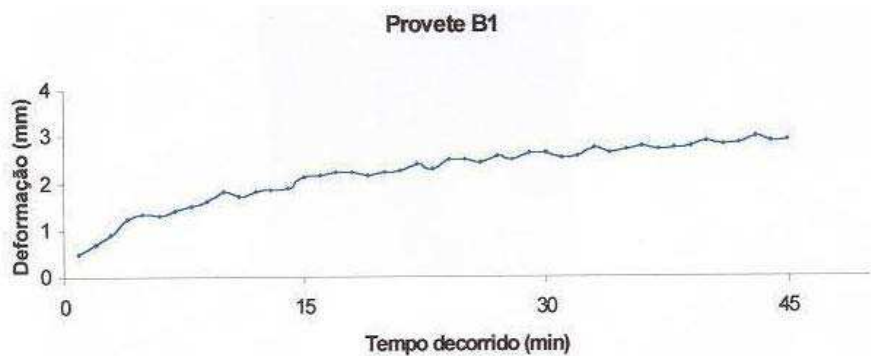


Figura 4.96 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B1.  
(TR=30%; Pbtot=5,1%)



Figura 4.97 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete B2.  
(TR=30%; Pbtot=5,1%)

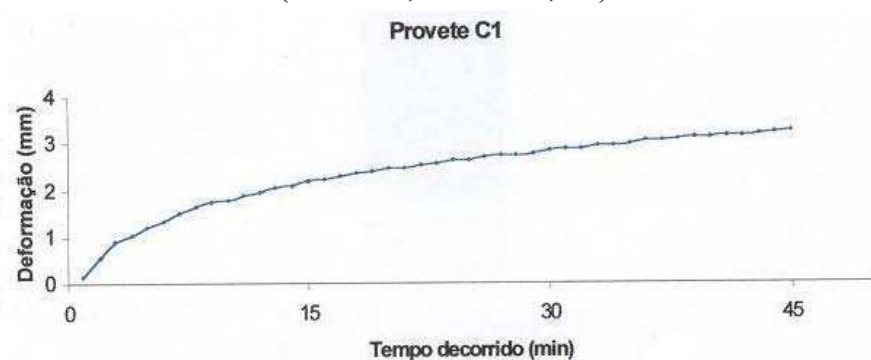


Figura 4.98 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C1.  
(TR=30%; Pbtot=5,1%)

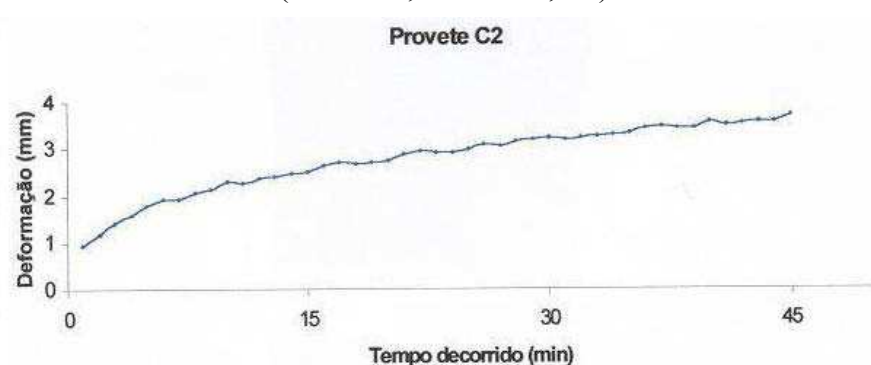


Figura 4.99 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete C2.  
(TR=30%; Pbtot=5,1%)

No ponto 4.2.4.6 constam as considerações mais relevantes sobre os resultados obtidos nos ensaios de avaliação da resistência às deformações permanentes.

#### 4.2.4.6. Discussão dos resultados

Analisando os gráficos que mostram a evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos de carga, conclui-se que o comportamento da generalidade dos provetes de todas as misturas betuminosas é bastante típico, isto é, a rigidez é praticamente constante ao longo do ensaio decrescendo abruptamente ao aproximar-se da ruína.

Por análise do quadro 4.49 e da figura 4.100 pode verificar-se que o módulo de rigidez, na generalidade das misturas betuminosas, aumenta à medida que o ensaio é realizado a menores extensões. As misturas com percentagens de betume de 5,1% e taxas de reciclagem de 0% e 15% assumem os valores mais baixos.

Quadro 4.49 – Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

| Nível de extensão<br>$\mu\epsilon$ | Rigidez inicial (MPa) |              |              |              |              |
|------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                    | Misturas betuminosas  |              |              |              |              |
|                                    | TR=0%                 | TR=15%       |              | TR=30%       |              |
|                                    | Pbtotal=5,1%          | Pbtotal=4,3% | Pbtotal=5,1% | Pbtotal=4,3% | Pbtotal=5,1% |
| 800                                |                       |              | 3768         |              |              |
| 650                                | 5063                  | 6614         | 4528         |              |              |
| 500                                | 5543                  | 6713         | 5135         | 7706         | 8427         |
| 380                                |                       | 7788         | 5690         | 8624         | 8389         |
| 350                                | 5860                  |              |              |              |              |
| 300                                |                       | 8104         |              |              |              |
| 290                                |                       |              |              | 8433         |              |
| 280                                |                       |              |              |              | 8647         |
| 210                                |                       |              |              |              | 8536         |
| 200                                | 6578                  |              |              |              |              |
| 180                                |                       |              |              | 8804         |              |

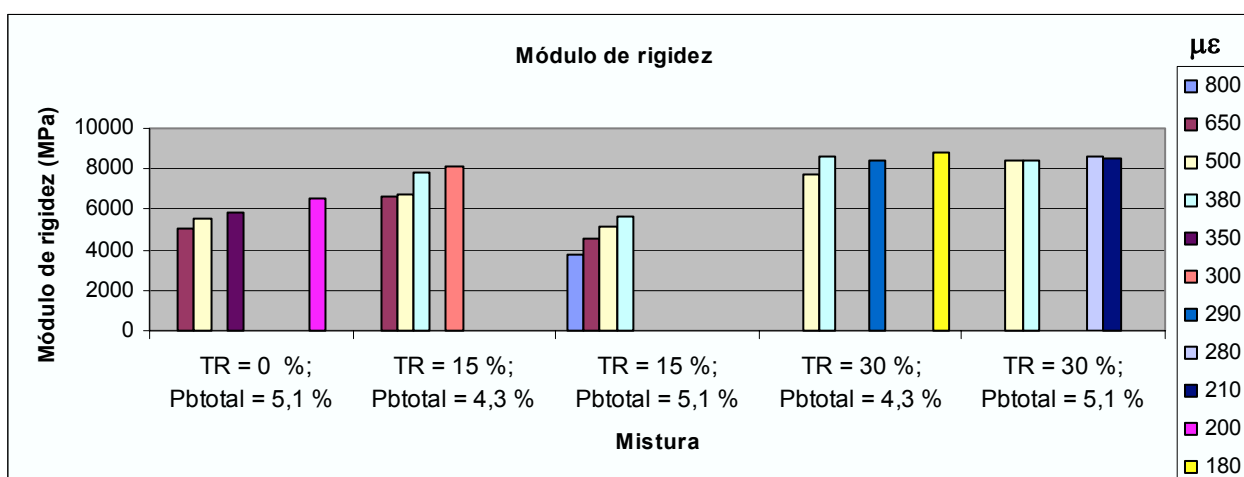


Figura 4.100 – Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

Para o mesmo nível de extensão e para cada taxa de reciclagem seria expectável que o módulo de rigidez diminuísse com o aumento da percentagem de betume. Tal apenas não se verificou para as misturas com TR de 30 % para o nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$ .

Pode ainda verificar-se que para as mesmas percentagens de betume os valores do módulo de rigidez aumentam com a taxa de reciclagem. Tal apenas não se verifica nas misturas com percentagem de betume total de 5,1 % para as taxas de reciclagem de 0 % e 15 % assumindo no entanto valores da mesma ordem de grandeza. O aumento do módulo de rigidez com a taxa de reciclagem para a mesma percentagem de betume total era expectável devido à maior proporção do betume das misturas fresadas em relação ao betume total (isto é, à maior taxa de reciclagem do betume TRb).

Analisando o quadro 4.50 e a figura 4.101 verifica-se que os ângulos de fase decrescem com o nível de extensão ensaiada.

Quadro 4.50 – Ângulo de fase inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

| Nível de extensão<br>$\mu\epsilon$ | Ângulo de fase inicial (graus) |            |            |            |            |
|------------------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                                    | Misturas betuminosas           |            |            |            |            |
|                                    | TR=0%                          | TR=15%     |            | TR=30%     |            |
|                                    | Pbtot=5,1%                     | Pbtot=4,3% | Pbtot=5,1% | Pbtot=4,3% | Pbtot=5,1% |
| 800                                |                                |            | 40,2       |            |            |
| 650                                | 39,8                           | 37,6       | 36,9       |            |            |
| 500                                | 36,6                           | 34,0       | 34,4       | 31,8       | 36,6       |
| 380                                |                                | 31,2       | 32,9       | 29,9       | 29,2       |
| 350                                | 33,1                           |            |            |            |            |
| 300                                |                                | 31,3       |            |            |            |
| 290                                |                                |            |            | 27,8       |            |
| 280                                |                                |            |            |            | 27,1       |
| 210                                |                                |            |            |            | 27,4       |
| 200                                | 30,1                           |            |            |            |            |
| 180                                |                                |            |            | 23,8       |            |

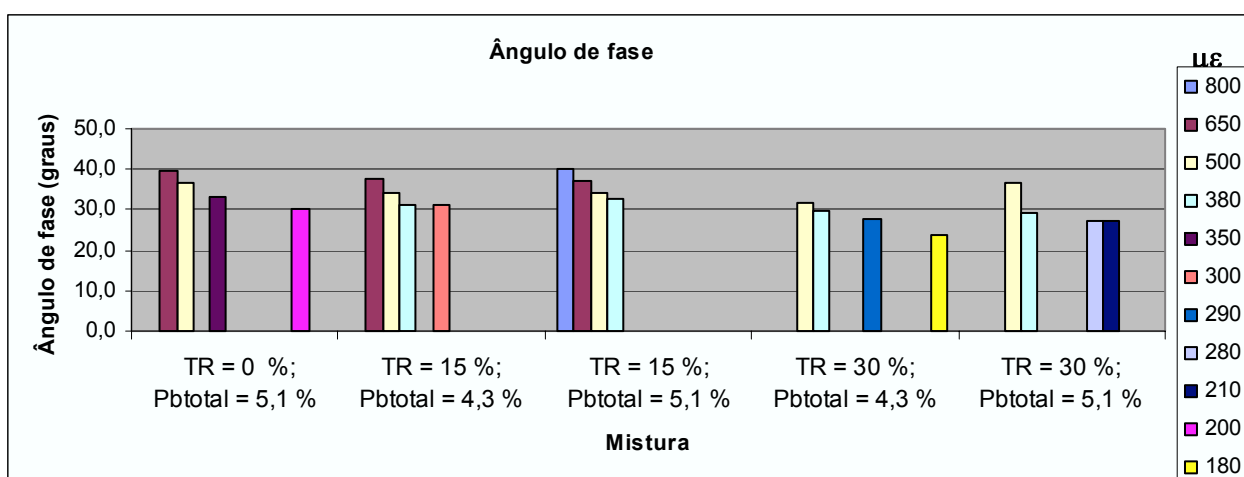


Figura 4.101 – Ângulo de fase. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

Um maior ângulo de fase corresponde a uma maior componente viscosa do módulo de rigidez, pelo que, seria expectável que o ângulo de fase para uma mesma taxa de reciclagem aumentasse para maiores percentagens de betume total (maior presença de betume novo) e para as mesmas percentagens de betume total diminuísse para maiores taxas de reciclagem (maior presença de betume das misturas betuminosas fresadas). Analisando o quadro 4.50 e a figura 4.101 verifica-se que nem sempre tal se verifica.

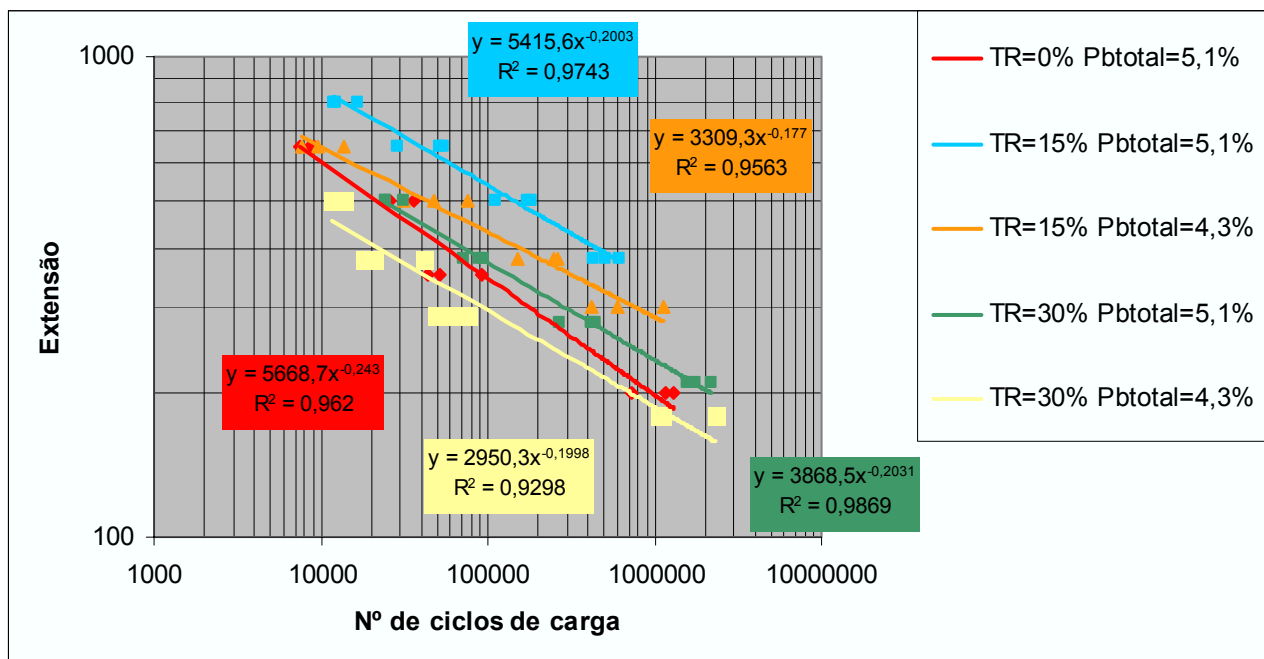


Figura 4.102 – Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas

Analisando as leis de fadiga (figura 4.102) das misturas betuminosas estudadas verifica-se que as misturas com reciclagem apresentam na sua generalidade um melhor comportamento à fadiga que se traduz por suportarem um maior número de ciclos de carga para cada nível de extensão estudado (exceptuando a mistura com TR=30% e Pbtot =4,3%). Para além disso, este melhor comportamento à fadiga, é também traduzido por uma menor inclinação das rectas que traduzem a lei de fadiga em relação à horizontal o que permite concluir que para níveis de extensão mais baixos (que são os que ocorrem em serviço) esse melhor comportamento será ainda mais evidente.

Por outro lado, verifica-se que as misturas betuminosas recicladas com TR=15% apresentam um melhor comportamento à fadiga que as misturas com TR=30%, pelo que se poderá deduzir que, a partir de certa taxa de reciclagem, o comportamento à fadiga deixa de ficar beneficiado pela introdução de misturas betuminosas fresadas. Outro aspecto que pode ser analisado no gráfico é que, tal como esperado, para cada taxa de reciclagem o comportamento à fadiga é melhor para a percentagem de betume total mais elevada.

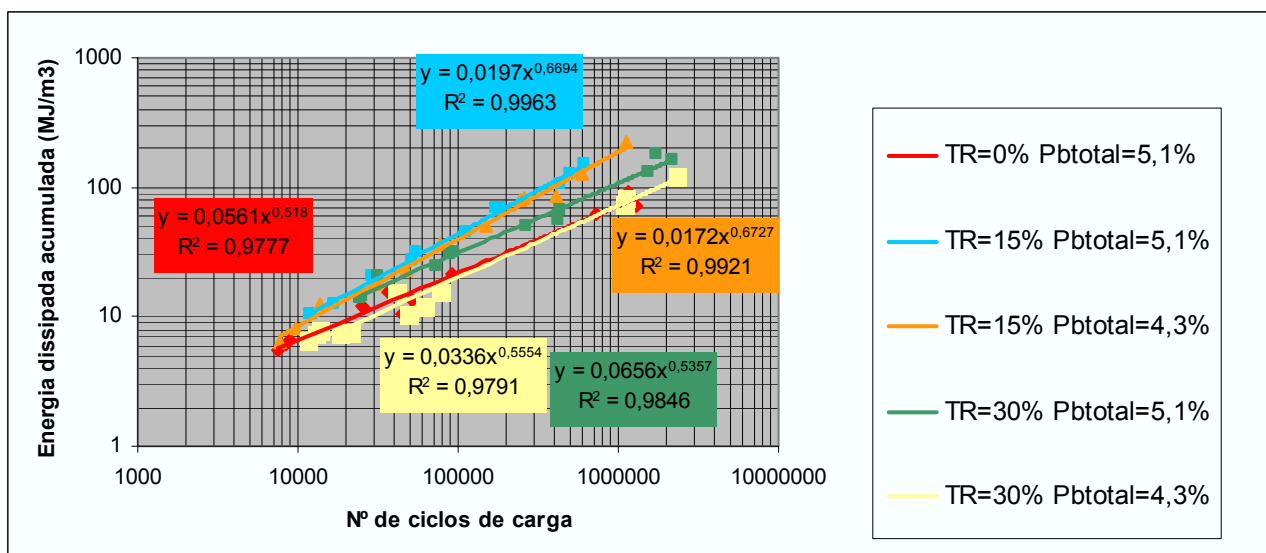


Figura 4.103 – Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas através da energia da dissipada acumulada

No gráfico 4.103 consta a abordagem da avaliação da resistência à fadiga através da energia dissipada acumulada. Analisando o gráfico pode constatar-se que a posição relativa das leis de fadiga praticamente não se altera em relação ao gráfico da figura 4.102, mas a lei de fadiga da mistura TR=15% e Pbtot=4,3% aproxima-se muito da lei de fadiga da mistura TR=15% e Pbtot=5,1% sendo ainda de assinalar os melhores coeficientes de correlação desta abordagem.

Os resultados dos ensaios de resistência às deformações permanentes (quadro 4.50 e figura 4.104) permitem concluir que as misturas com reciclagem possuem um melhor comportamento que a mistura betuminosa tradicional. Analisando os gráficos que relacionam o tempo de ensaio decorrido com a deformação, verifica-se na generalidade dos provetes de cada mistura, que há um crescimento inicial significativo até cerca de 15 minutos de ensaio após os quais o crescimento da deformação é mais suave e relativamente constante.

Quadro 4.51 – Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*

| Mistura            |                             | Profundidade média da rodeira ao fim de 45 min | Índice médio de aumento da profundidade da rodeira, TRm | Índice de deformação, WTR |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------|
| Taxa de reciclagem | Percentagem de betume total | mm                                             | mm/h                                                    | mm/h                      |
| 0 %                | 5,1 %                       | 8,23                                           | 4,97                                                    | 5,00                      |
| 15%                | 4,3 %                       | 2,57                                           | 1,09                                                    | 1,10                      |
|                    | 5,1 %                       | 2,85                                           | 1,29                                                    | 1,30                      |
| 30%                | 4,3 %                       | 2,07                                           | 0,90                                                    | 0,91                      |
|                    | 5,1 %                       | 3,32                                           | 1,48                                                    | 1,49                      |

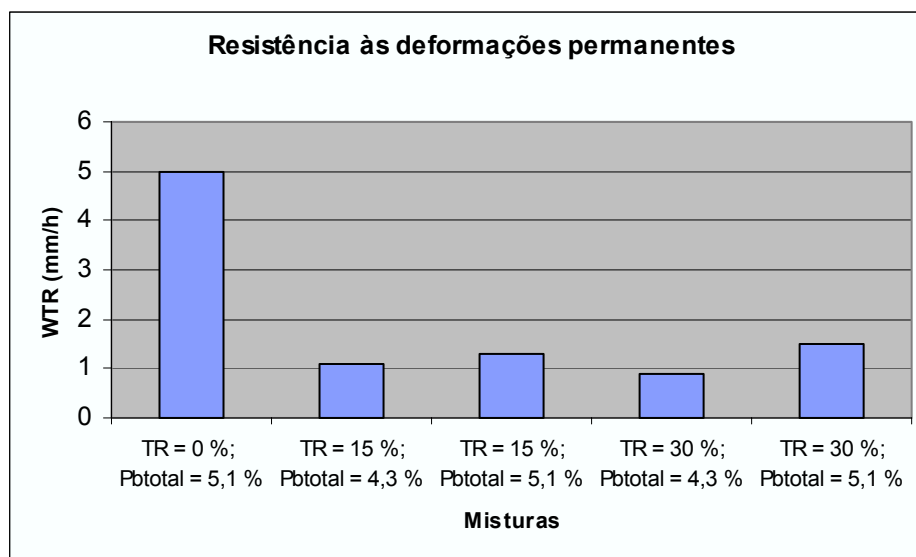


Figura 4.104 - Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*

A profundidade média da rodeira da mistura betuminosa com TR=0% (isto é, sem reciclagem) é mais de duas vezes superior à de qualquer outra mistura betuminosa com reciclagem. Tal poderá ficar a dever-se à presença de um betume mais duro dos materiais fresados que compõem a mistura betuminosa reciclada.

A comparação do comportamento às deformações permanentes das misturas betuminosas recicladas com TR=15% e com TR=30% é neste caso menos linear do que na lei de fadiga. Assim verifica-se que para uma percentagem de betume total de 4,3% (Pbtot=4,3%) a mistura com TR=30% apresenta um melhor comportamento verificando-se a situação inversa para Pbtot=5,1%, isto é, a mistura com TR = 15 % apresenta um melhor comportamento.

Tomando como referência a ordem de grandeza que assumem os valores das propriedades que traduzem o comportamento às deformações permanentes, em particular os valores da mistura sem reciclagem, pode concluir-se que o comportamento às deformações permanentes para TR=15% e para TR=30% são semelhantes. Por outro lado para cada taxa de reciclagem, tal como seria expectável, o comportamento às deformações permanentes piora com o aumento da percentagem de betume. De qualquer forma esse pior comportamento, em particular para TR=15%, não é significativo.

### 4.3. Obra

#### 4.3.1. Fabrico e aplicação da mistura betuminosa reciclada

A central de fabrico da mistura betuminosa utilizada na obra é uma central contínua (INTRAME DM 632 (70/250)). Trata-se de um central contínua de fluxos paralelos (sistema eco-corrente) em que a introdução do material fresado é feita no anel central do tambor-secador-misturador. A figura 4.105 esquematiza o processo que ocorre no tambor-secador-misturador.

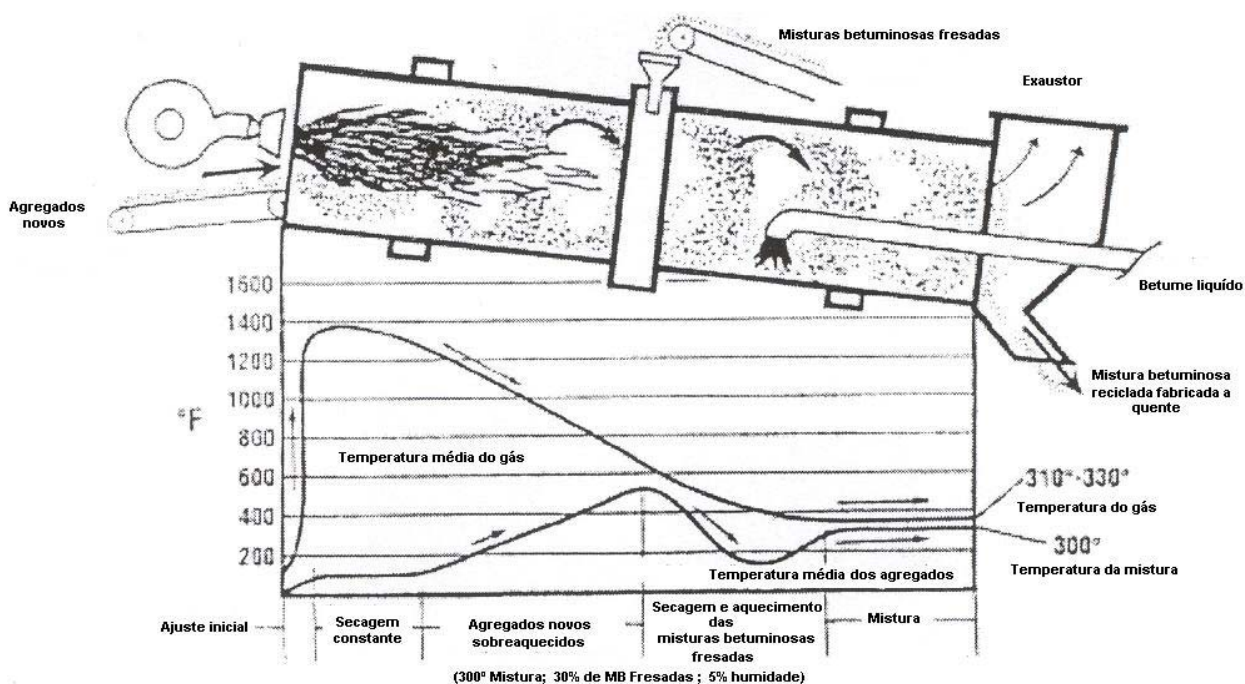


Figura 4.105 – Tambor secador misturador de fluxo paralelo

De acordo com o esquema pode verificar-se que as misturas fresadas são aquecidas quer pelo contacto com os agregados novos quentes quer através do contacto com os gases quentes que circulam no tambor.



Figura 4.106 – Introdução no anel central das misturas betuminosas fresadas

Na figura 4.106 pode ver-se o processo de entrada no tambor das misturas betuminosas fresadas. As misturas fresadas que estão na torva caem num crivo para limitar a tamanho das partículas e são conduzidas ao anel central do tambor-secador-misturador.

Uma vez que a central já possuía o anel central para introdução das misturas betuminosas fresadas foi necessário equipar a central com os seguintes componentes adicionais:

- Torva pré-doseadora com fluímetro e tapete extractor;
- Um crivo para selecção do material abaixo dos 25 mm;
- Um tapete elevador pesador;
- Mesa de comando de funcionamento automático.

Este sistema permite realizar automaticamente após parametrização do equipamento uma dosificação volumétrica na descarga das misturas fresadas seleccionando o material que será introduzido no tambor e dosificando-o posteriormente no tapete elevador munido de balança.

Numa central contínua o betume novo é introduzido num meio a altas temperaturas. As partículas voláteis do betume são aspiradas para o filtro de mangas originando os “fumos azuis” constituídos por hidrocarbonetos nocivos ao meio ambiente. O agravamento deste problema deve-se à necessidade de aquecer as misturas fresadas introduzidas no tambor ou por aumento da intensidade da chama que aquece os agregados novos ou por aumento da temperatura de injeção do betume novo. O aquecimento do betume das misturas fresadas provoca a redução da vida útil das mangas filtrantes devido à destilação das suas fracções ligeiras. Estes problemas são agravados para taxas de reciclagem superiores a 30 % e para valores do teor de humidade superiores a 5 %. Por esta razão em Brisa (2003) e em Azevedo *et al.* (2003) para este tipo de centrais é indicado o valor máximo para a taxa de reciclagem de 30 % para o macadame betuminoso e de 25 % para a mistura betuminosa densa. Dado que as misturas fresadas contêm betumes modificados o limite é ainda restringido à taxa de reciclagem de 15 % ( se não se recorrer a metodologias fundamentais nos estudos de formulação da mistura betuminosa reciclada).

Neste tipo de centrais existem ainda alguns problemas relacionados com a qualidade do produto final e também com a definição das temperaturas de aquecimento dos agregados novos e de injeção do betume. Uma das atenuantes para este problema será a execução de um *stock* tão homogéneo quanto possível e com uma protecção adequada às temperaturas e à humidade.

Face às condicionantes do *stock* disponível e da central betuminosa a utilizar e tendo o objectivo de um melhor controlo das temperaturas e da granulometria da mistura reciclada aplicada em obra e considerando os resultados obtidos em laboratório optou-se pela taxa de reciclagem de 15%. A mistura betuminosa aplicada foi a mistura com taxa de reciclagem de 15% e com uma percentagem de betume total de 4,7% (entre 4,3 e 5,1 %). Com esta mistura pretendeu-se reunir um bom compromisso nas propriedades fundamentais em análise (módulo de rigidez, resistência à fadiga e resistência às deformações permanentes).

A mistura betuminosa densa reciclada foi aplicada num pavimento com a estrutura que se encontra no quadro 4.52.

Quadro 4.52 – Estrutura do pavimento no trecho experimental

| Camada de pavimento                           | Espessura (cm) |
|-----------------------------------------------|----------------|
| Betão betuminoso subjacente à camada drenante | 5              |
| Mistura betuminosa densa reciclada            | 7              |
| Macadame betuminoso                           | 8              |
| Agregado britado de granulometria extensa     | 30             |

Este pavimento irá permanecer com esta estrutura até que o lote seguinte desta obra, que aqui se inicia, seja construído. Nessa altura será executada a camada drenante que completará a estrutura do pavimento.



Figura 4.107 – Rega de colagem



Figura 4.108 – Aplicação do geotextil

As figuras 4.107 e 4.108 mostram a aplicação da rega de colagem e a colocação do geotextil de forma a ser possível posteriormente extrair as placas para ensaiar em laboratório a mistura betuminosa aplicada definindo as suas propriedades fundamentais. A rega de colagem foi interrompida numa extensão de alguns metros que se assinalou na berma (figura 4.107). Foi colocada uma banda de geotextil (figura 4.108) numa extensão ligeiramente superior a essa extensão e foi aplicada novamente a rega de colagem nas extremidades de forma a fixar o geotextil evitando que este se mexesse durante a passagem do camião e da espalhadora (figura 4.109).



Figura 4.109 – Aplicação da mistura com reciclagem a quente

Na figura 4.109 pode ver-se a descarga da mistura na espalhadora e os cilindros a realizarem as operações de compactação. O controlo da qualidade da mistura aplicada deu origem aos valores apresentados nos quadros 4.53 e 4.54.

Quadro 4.53 – Análise granulométrica dos agregados da mistura betuminosa reciclada aplicada em obra com taxa de reciclagem de 15%

| Peneiros ASTM |            | Percentagem acumulada do material que passa                                                     |     |                                                  |
|---------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------|
| Abertura (mm) | Designação | Fuso do caderno de encargos da Brisa para a mistura betuminosa densa em camada de regularização |     | Análise granulométrica (média de cinco amostras) |
| 25,0          | 1"         | 100                                                                                             | 100 | 100,0                                            |
| 19,0          | 3/4"       | 90                                                                                              | 100 | 96,7                                             |
| 12,5          | 1/2"       | 73                                                                                              | 87  | 82,4                                             |
| 4,75          | nº 4       | 45                                                                                              | 60  | 52,9                                             |
| 2,00          | nº 10      | 32                                                                                              | 46  | 32,4                                             |
| 0,425         | nº 40      | 16                                                                                              | 23  | 15,0                                             |
| 0,180         | nº 80      | 9                                                                                               | 18  | 9,9                                              |
| 0,075         | nº 200     | 5                                                                                               | 10  | 6,9                                              |

Quadro 4.54 – Propriedades da mistura betuminosa reciclada aplicada em obra (provetes moldados com a mistura betuminosa aplicada na obra)

| Propriedade                                   | Mistura betuminosa densa           |               |
|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------|
|                                               | Taxa de reciclagem=15%             |               |
| Propriedade                                   | Valor obtido (média de 5 amostras) | Especificação |
| Baridade <i>Marshall</i> (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,386                              | -             |
| Estabilidade (kgf)                            | 1739                               | > 1000        |
| Deformação (mm)                               | 1,6                                | 3 a 5         |
| Módulo de rigidez <i>Marshall</i> (kgf/mm)    | 1087                               | > 250 e < 815 |
| Porosidade (%)                                | 3,7                                | 3 a 5         |
| GSB (%)                                       | 66,9                               | 75 a 85       |
| VMA (%)                                       | 11,2                               | ≥ 14          |
| Resistência conservada (%)                    | 93                                 | > 80          |
| Percentagem de betume (%)                     | 4,6                                | ≥ 5,1         |

Do controlo de qualidade habitualmente efectuado sobre as misturas betuminosas verifica-se o seguinte:

- A curva granulométrica da mistura betuminosa encontra-se dentro do fuso granulométrico preconizado para este tipo de misturas betuminosas exceptuando no caso do peneiro ASTM nº40 em que ocorre um desvio de 1% em relação ao limite inferior do fuso;
- A porosidade cumpre a especificação;
- A mistura possui uma deformação na rotura baixa originando também um módulo de rigidez de *Marshall* elevado;
- A percentagem de betume que resultou do controlo de qualidade foi 4,6%. Este valor possui um desvio de 0,1% em relação ao previsto;
- Tal como acontecia em laboratório a mistura possui valores do VMA e do grau de saturação em betume inferiores aos especificados;
- O grau de compactação será verificado nas placas retiradas do pavimento nos provetes a ensaiar para determinação das propriedades fundamentais. O Caderno de Encargos da Brisa impõe o grau de compactação de 97 % relativamente à baridade de *Marshall*. Considerando o valor de 2,386 g/cm<sup>3</sup> (quadro 4.54) o

valor mínimo da baridade dos provetes será de  $2,314 \text{ g/cm}^3$ , para o grau de compactação ser, pelo menos, 97 %.

Tal como aconteceu em laboratório as propriedades fundamentais foram avaliadas no ponto 4.3.2.

#### 4.3.2. Avaliação das propriedades fundamentais da mistura betuminosa

##### 4.3.2.1. Corte das placas e preparação dos provetes

Na figura 4.110 pode ver-se o pavimento durante as operações de corte de placas. As operações de rega e colocação de geotextil, executadas de forma a poderem ser extraídas as placas, revelaram-se bem sucedidas.



Figura 4.110 – Corte das placas da camada executada com misturas com reciclagem

Das placas extraídas do pavimento cortaram-se provetes para ensaio de acordo com o esquema da figura 4.24 (provetes para ensaio à fadiga) e 4.25 (provetes para ensaio às deformações permanentes). As figuras 4.111 e 4.112 mostram os provetes ensaiados.



Figura 4.111 - Provete para ensaio à fadiga



Figura 4.112 - Provete para ensaio às deformações permanentes

Foram recuperadas amostras de betume das placas cortadas do pavimento e foram efectuados ensaios de penetração e de temperatura de amolecimento. Os resultados encontram-se no quadro 4.55.

Quadro 4.55 – Características do betume das placas do pavimento

| Ensaio                                       | Procedimento | Valor obtido |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|
| Penetração de ligantes betuminosos (1/10 mm) | EN 1426      | 26           |
| Temperatura de amolecimento (°C)             | EN 1427      | 60,9         |

Conforme se referiu anteriormente em projecto considera-se que durante as operações de fabrico e aplicação um betume perde cerca de 35% da sua penetração inicial. Assim, dado que se supõe a utilização de um betume 35/50, a penetração deste betume, após as referidas etapas do seu envelhecimento, deverá ser no mínimo 35 % de 35 décimas de milímetros, isto é, 23 décimas de milímetro. Assim conclui-se que a utilização do betume novo 35/50 foi, deste ponto de vista, ajustada.

#### 4.3.2.2. Avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga

A avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga foi realizada com a mesma metodologia e no mesmo laboratório das misturas fabricadas em laboratório.

As condições de ensaio foram iguais às dos ensaios realizados sobre as misturas fabricadas em laboratório e são apresentadas no quadro 4.56.

Quadro 4.56 – Condições do ensaio de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| Normas de ensaio              | AASHTO TP 8 - 94 |
| Temperatura do ensaio (°C)    | 20,0             |
| Frequência (Hz)               | 10,0             |
| Número de patamares de ensaio | 4                |

Os resultados dos ensaios constam do quadro 4.57 e das figuras 4.113 a 4.121.

Quadro 4.57 – Resultados dos ensaios de fadiga da mistura betuminosa aplicada em obra

| Mistura betuminosa densa |                       |             |         |        | TR = 15% |                 | Obra                     |                        |                             |
|--------------------------|-----------------------|-------------|---------|--------|----------|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Patamares de ensaio      | Referência do provete | Comprimento | Largura | Altura | Baridade | Rigidez inicial | Nº de ciclos até à ruína | Ângulo de fase inicial | Energia dissipada acumulada |
| (με)                     |                       | (mm)        | (mm)    | (mm)   | (g/cm³)  | (MPa)           |                          | (graus)                | (MJ/m³)                     |
| 650                      | 1                     | 399         | 62,42   | 50,28  | 2,34     | 6643            | 12720                    | 34,2                   | 11,310                      |
|                          | 2                     | 399         | 62,07   | 50,49  | 2,33     | 6972            | 13440                    | 31,3                   | 12,328                      |
|                          | 3                     | 399         | 63,04   | 50,18  | 2,33     | 6612            | 6840                     | 32,7                   | 6,691                       |
| 500                      | 5                     | 399         | 62,71   | 50,53  | 2,35     | 7232            | 50130                    | 29,2                   | 28,607                      |
|                          | 6                     | 400         | 62,31   | 49,82  | 2,33     | 6864            | 37990                    | 30,7                   | 20,563                      |
|                          | 7                     | 400         | 62,56   | 50,37  | 2,34     | 7286            | 54800                    | 32,5                   | 30,636                      |
| 380                      | 8                     | 400         | 62,82   | 49,53  | 2,35     | 8066            | 117710                   | 28,4                   | 42,198                      |
|                          | 9                     | 400         | 62,55   | 49,78  | 2,33     | 6528            | 121010                   | 28,6                   | 37,627                      |
|                          | 10                    | 400         | 62,41   | 49,97  | 2,34     | 7574            | 170650                   | 27,0                   | 56,253                      |
| 300                      | 12                    | 400         | 62,27   | 50,09  | 2,34     | 7531            | 1075300                  | 27,3                   | 220,160                     |
|                          | 13                    | 400         | 62,84   | 49,86  | 2,33     | 7809            | 1044330                  | 28,3                   | 204,270                     |
|                          | 15                    | 400         | 63,24   | 49,90  | 2,34     | 7510            | 674900                   | 27,8                   | 135,725                     |

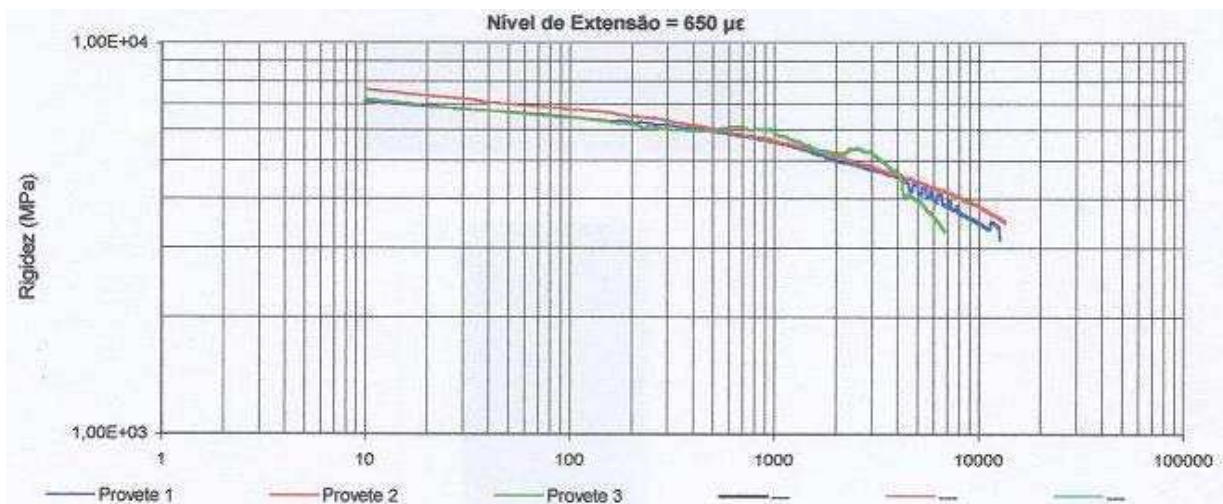


Figura 4.113 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

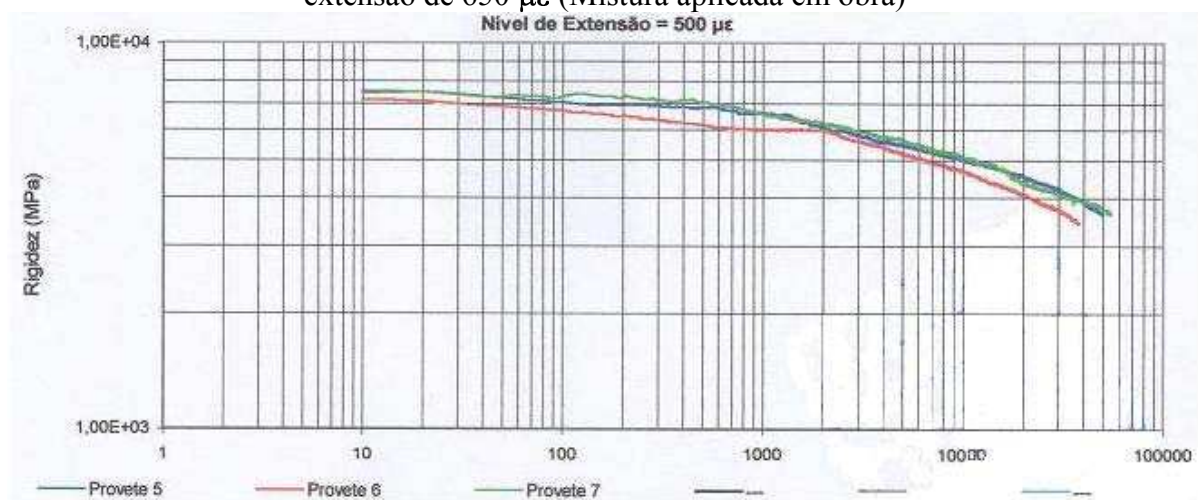


Figura 4.114 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

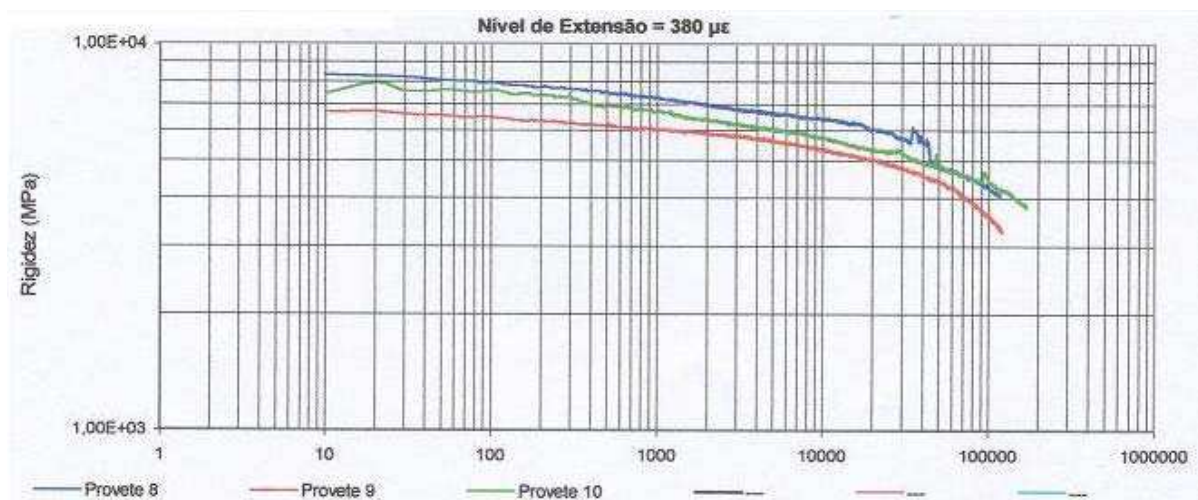


Figura 4.115 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 380  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

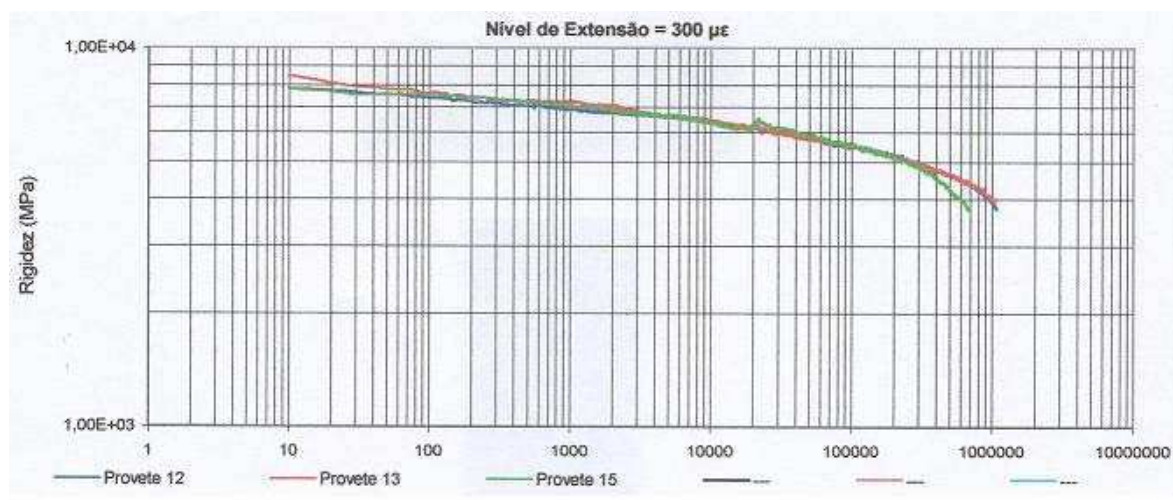


Figura 4.116 – Evolução do módulo de rigidez com o número de ciclos para um nível de extensão de 300  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

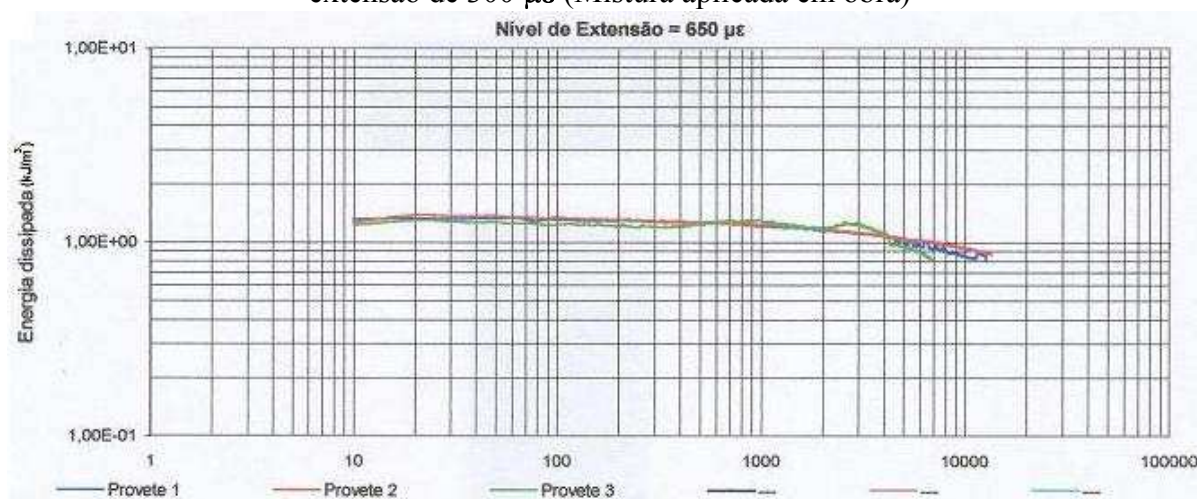


Figura 4.117 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 650  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

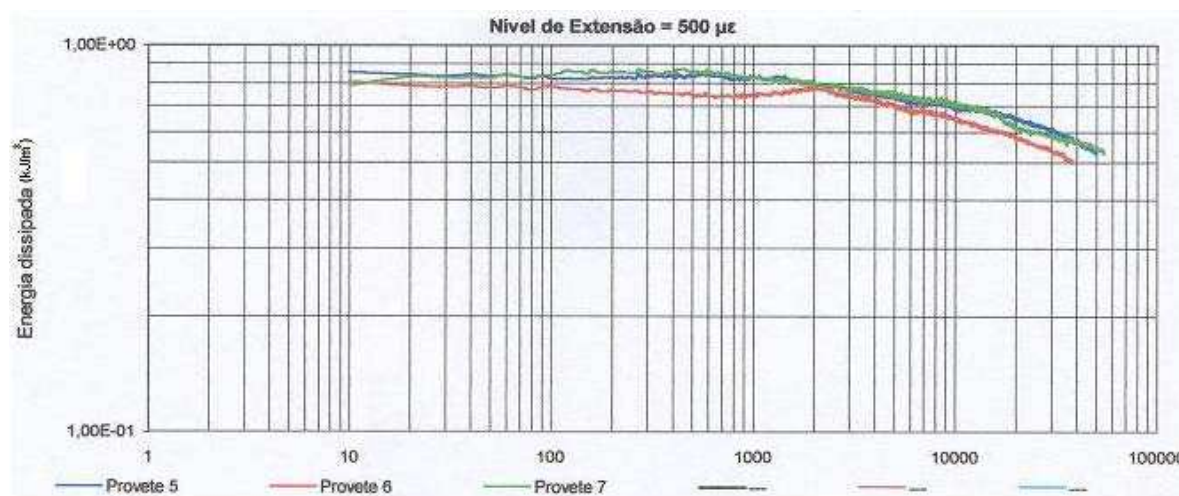


Figura 4.118 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de 500  $\mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

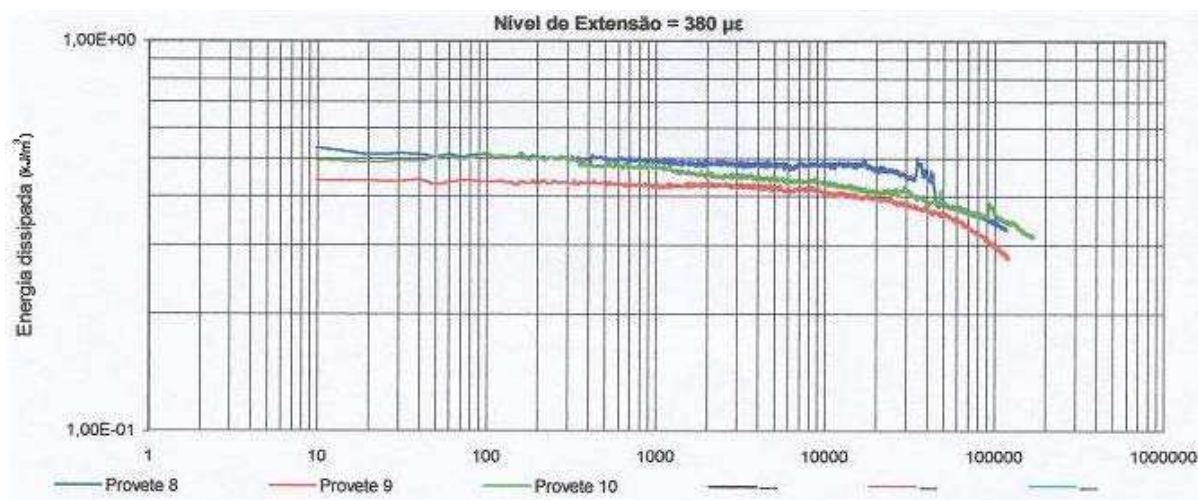


Figura 4.119 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de  $380 \mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

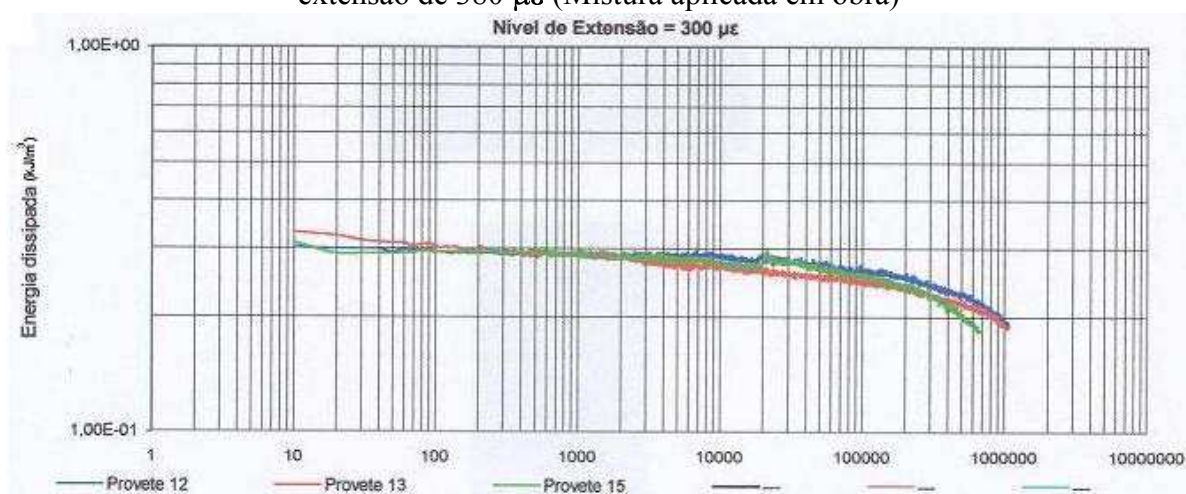


Figura 4.120 – Evolução da energia dissipada com o número de ciclos para um nível de extensão de  $300 \mu\epsilon$  (Mistura aplicada em obra)

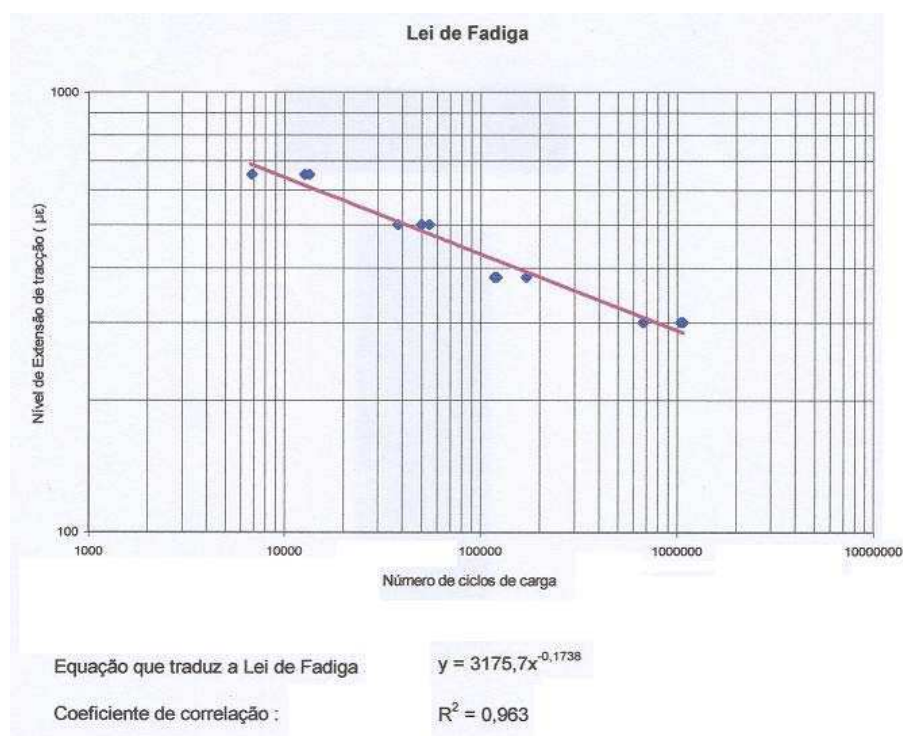


Figura 4.121 – Lei de fadiga (Mistura aplicada em obra)

Analisando o quadro 4.57 verifica-se que todos os provetes possuem uma baridade superior a  $2,314 \text{ g/cm}^3$ . O grau de compactação mínimo de 97 % foi por isso atingido.

#### 4.3.2.3. Avaliação da resistência às deformações permanentes

A avaliação da resistência às deformações permanentes foi realizada com a mesma metodologia e no mesmo laboratório das misturas fabricadas em laboratório.

As condições de ensaio também são as mesmas dos ensaios realizados sobre as misturas fabricadas em laboratório e são apresentadas no quadro 4.58.

Quadro 4.58 – Condições de ensaio para avaliação da resistência às deformações permanentes

|                                              |               |
|----------------------------------------------|---------------|
| Norma de ensaio                              | PrEN 12697-22 |
| Duração do ensaio (minutos)                  | 45            |
| Temperatura do ensaio ( $^{\circ}\text{C}$ ) | $60 \pm 0,5$  |
| Amplitude (mm)                               | 230           |
| Frequência (Hz)                              | 0,35          |
| L-Força (N)                                  | 700           |
| w-Largura do pneu (mm)                       | 50            |

Os resultados dos ensaios constam do quadro 4.59 e nas figuras 4.122 a 4.126.

Quadro 4.59 – Resultados dos ensaios de deformações permanentes para a mistura betuminosa aplicada em obra

| Mistura betuminosa densa                                |             | TR                   | 15%  | Obra |      |      |      |
|---------------------------------------------------------|-------------|----------------------|------|------|------|------|------|
| Referência do provete                                   |             |                      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Dimensões do provete                                    | Comprimento | (mm)                 | 300  | 300  | 300  | 300  | 300  |
|                                                         | Largura     | (mm)                 | 260  | 260  | 260  | 260  | 260  |
|                                                         | Espessura   | (mm)                 | 65   | 65   | 65   | 65   | 65   |
| Baridade do provete                                     |             | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,33 | 2,32 | 2,33 | 2,33 | 2,33 |
| Profundidade de rodeira ao fim de 45 minutos            |             | (mm)                 | 0,89 | 0,82 | 0,95 | 0,55 | 0,91 |
| Profundidade média de rodeira ao fim de 45 minutos      |             | (mm)                 | 0,82 |      |      |      |      |
| Índice de aumento da profundidade de rodeira, TR        |             | (mm/h)               | 0,51 | 0,46 | 0,49 | 0,40 | 0,42 |
| Índice médio de aumento da profundidade de rodeira, TRm |             | (mm/h)               | 0,45 |      |      |      |      |
| Índice de deformação, WTR<br>WTR=14,08 TRm w/L          |             | (mm/h)               | 0,46 |      |      |      |      |

Nota: O índice de aumento da profundidade da rodeira (TR) consiste na velocidade de deformação entre os 30 e os 45 minutos onde gráfico que relaciona a deformação com o tempo é linear correspondendo à inclinação da recta que define o comportamento da mistura nesse intervalo.



Figura 4.122 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P1. (Mistura aplicada em obra)

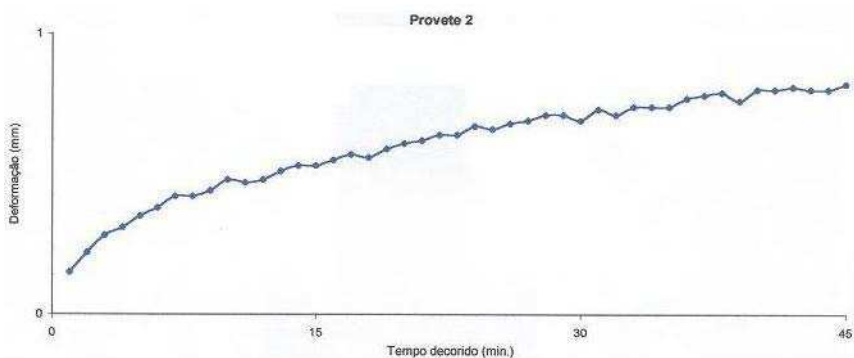


Figura 4.123 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P2. (Mistura aplicada em obra)

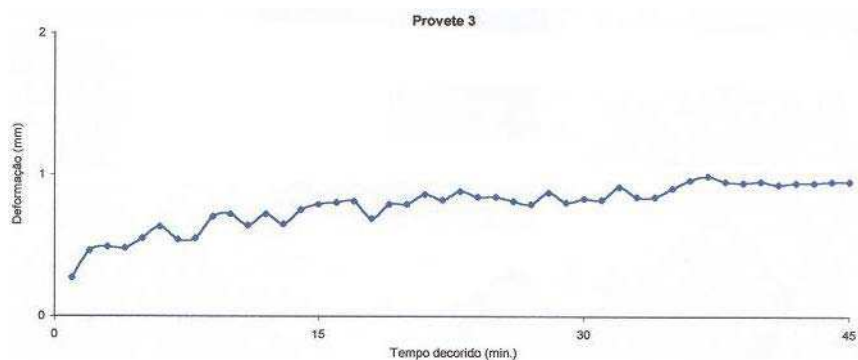


Figura 4.124 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P3.  
(Mistura aplicada em obra)

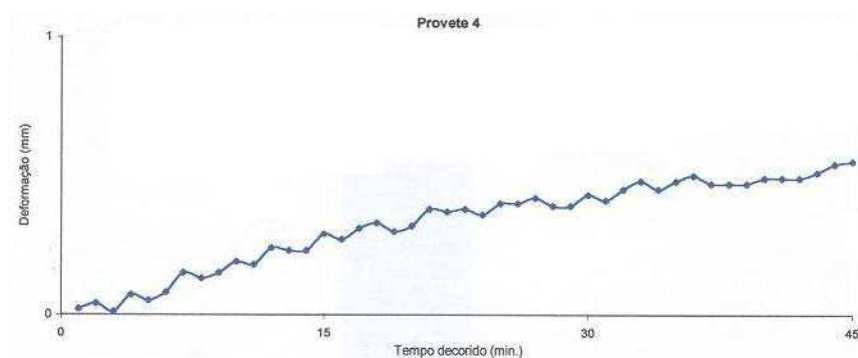


Figura 4.125 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P4.  
(Mistura aplicada em obra)

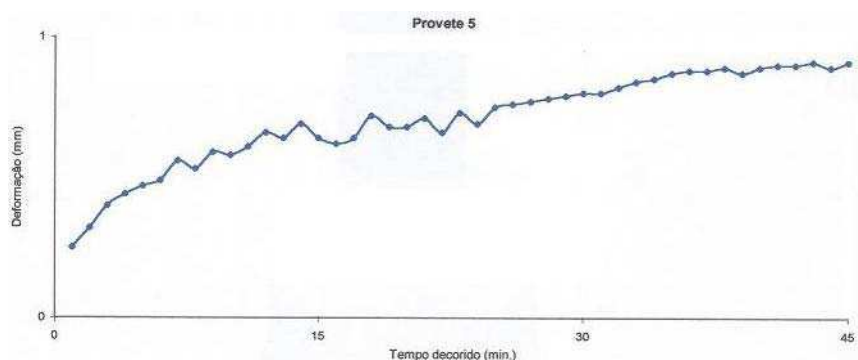


Figura 4.126 – Evolução da deformação com o tempo de ensaio. Provete P5.  
(Mistura aplicada em obra)

Analisando o quadro 4.59 verifica-se que todos os provetes possuem uma baridade superior a  $2,314 \text{ g/cm}^3$ . O grau de compactação mínimo de 97 % é por isso atingido.

#### 4.3.2.4. Discussão dos resultados. Comparação dos resultados obtidos com as misturas betuminosas fabricadas em laboratório.

No quadro 4.60 e na figura 4.127 comparam-se os módulos de rigidez obtidos para as diferentes extensões estudadas.

Quadro 4.60 – Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

| Nível de extensão<br>$\mu\epsilon$ | Rigidez inicial (MPa) |            |            |            |            |            |
|------------------------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                    | Misturas betuminosas  |            |            |            |            |            |
|                                    | Laboratório           |            |            |            |            | Obra       |
|                                    | TR=0%                 | TR=15%     |            | TR=30%     |            | TR=15%     |
|                                    | Pbtot=5,1%            | Pbtot=4,3% | Pbtot=5,1% | Pbtot=4,3% | Pbtot=5,1% | Pbtot=4,6% |
| 800                                |                       |            | 3768       |            |            |            |
| 650                                | 5063                  | 6614       | 4528       |            |            | 6742       |
| 500                                | 5543                  | 6713       | 5135       | 7706       | 8427       | 7127       |
| 380                                |                       | 7788       | 5690       | 8624       | 8389       | 7389       |
| 350                                | 5860                  |            |            |            |            |            |
| 300                                |                       | 8104       |            |            |            | 7617       |
| 290                                |                       |            |            | 8433       |            |            |
| 280                                |                       |            |            |            | 8647       |            |
| 210                                |                       |            |            |            | 8536       |            |
| 200                                | 6578                  |            |            |            |            |            |
| 180                                |                       |            |            | 8804       |            |            |

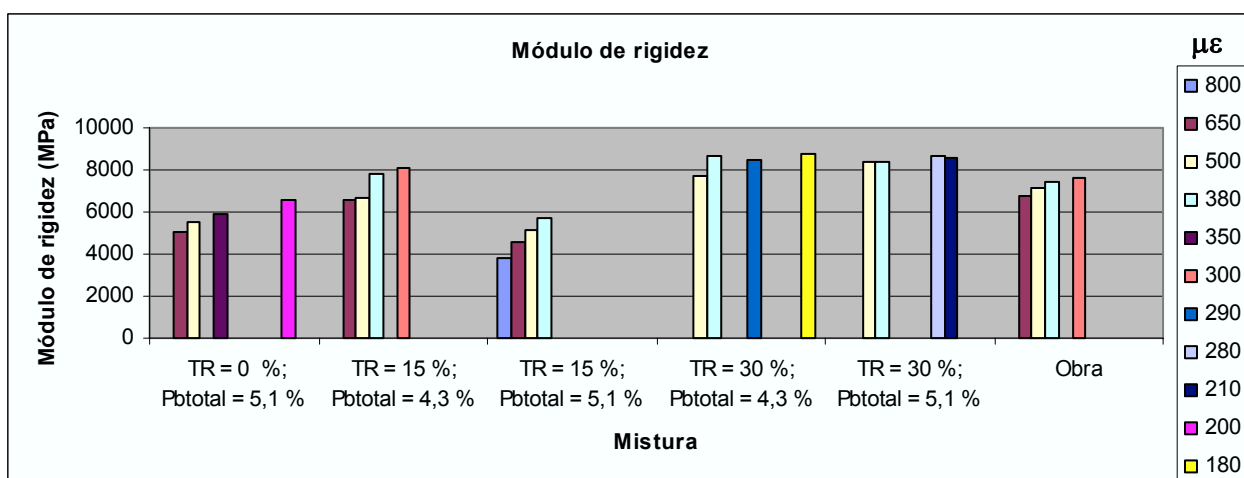


Figura 4.127 – Módulo de rigidez inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

O valor do módulo de rigidez obtido para a mistura fabricada em obra é idêntico ao obtido para a mistura fabricada em laboratório com TR=15% e Pbtot=4,3%. Conforme se pode verificar o valor do módulo de rigidez para a mistura fabricada em obra é superior aos valores obtidos para as misturas com TR=0% e com TR=15% e Pbtot=5,1%.

Quadro 4.61 – Ângulo de fase inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

| Nível de extensão | Ângulo de fase inicial (graus) |               |               |               |               |               |
|-------------------|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                   | Misturas betuminosas           |               |               |               |               |               |
|                   | Laboratório                    |               |               |               |               | Obra          |
|                   | TR=0%                          | TR=15%        |               | TR=30%        |               | TR=15%        |
| $\mu\epsilon$     | Pbttotal=5,1%                  | Pbttotal=4,3% | Pbttotal=5,1% | Pbttotal=4,3% | Pbttotal=5,1% | Pbttotal=4,6% |
| 800               |                                |               | 40,2          |               |               |               |
| 650               | 39,8                           | 37,6          | 36,9          |               |               | 32,7          |
| 500               | 36,6                           | 34,0          | 34,4          | 31,8          | 36,6          | 30,8          |
| 380               |                                | 31,2          | 32,9          | 29,9          | 29,2          | 28,0          |
| 350               | 33,1                           |               |               |               |               |               |
| 300               |                                | 31,3          |               |               |               | 27,8          |
| 290               |                                |               |               | 27,8          |               |               |
| 280               |                                |               |               |               | 27,1          |               |
| 210               |                                |               |               |               | 27,4          |               |
| 200               | 30,1                           |               |               |               |               |               |
| 180               |                                |               |               | 23,8          |               |               |

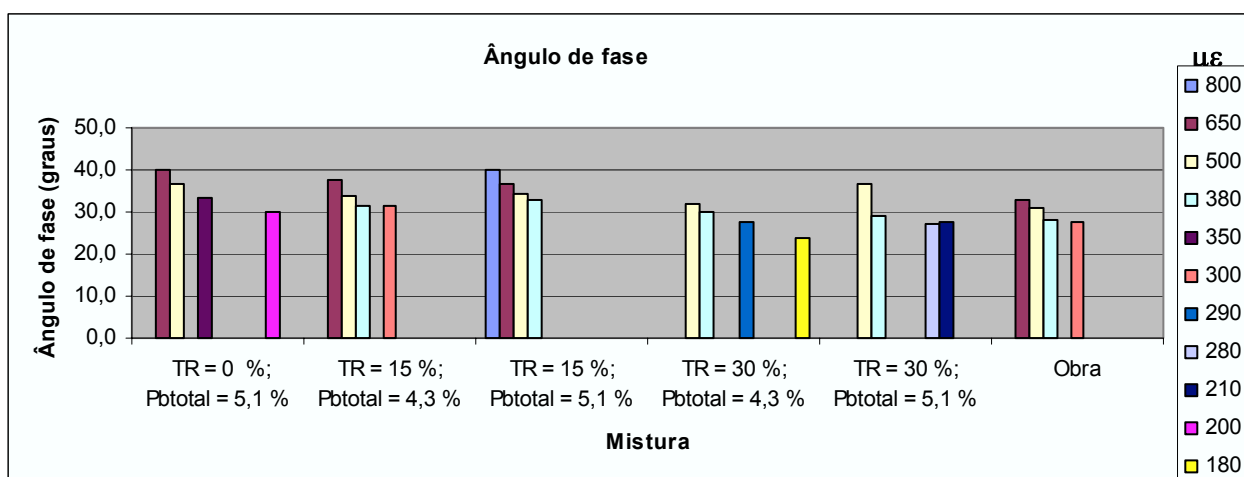


Figura 4.128 – Ângulo de fase inicial. Valor médio dos provetes ensaiados para cada nível de extensão.

Os valores dos ângulos de fase da mistura fabricada em obra apresentados no quadro 4.61 e na figura 4.128 são inferiores aos das misturas fabricadas em laboratório com TR=15 %. Assim, o betume da mistura reciclada fabricada em obra é menos viscoso do que o betume das misturas recicladas fabricadas em laboratório para a mesma taxa de reciclagem (15 %). Tal facto poderá ser consequência do envelhecimento a que fica sujeito o betume (betume novo e betume das misturas betuminosas fresadas) ser mais agressivo em obra do que em laboratório. O ângulo de fase da mistura reciclada fabricada em obra (com TR = 15 %) é idêntico ao das misturas betuminosas recicladas fabricadas em laboratório com TR = 30 %.

No gráfico da figura 4.129 estão representadas as leis de fadiga de todas as misturas estudadas fabricadas em laboratório e em obra.

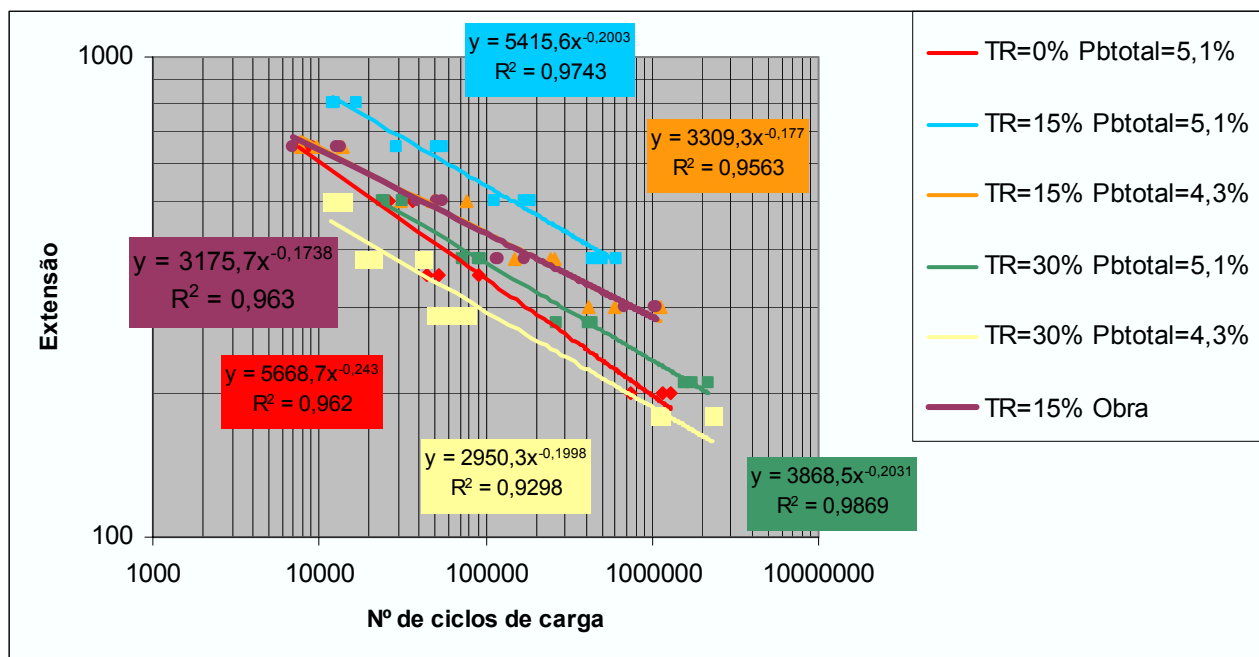


Figura 4.129 – Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas

Analisando o gráfico da figura 4.129 podemos observar que a lei de fadiga da mistura fabricada em obra é idêntica à lei de fadiga da mistura TR=15% e Pbttotal=4,3%. Dado que a mistura fabricada em obra possui uma percentagem total em betume de 4,6% seria de esperar que o seu comportamento fosse intermédio em relação aos comportamentos evidenciados pelas misturas com TR=15% fabricadas em laboratório. O facto de a lei de fadiga se aproximar mais da mistura TR=15% e Pbttotal=4,3% deve-se provavelmente ao efeito de as misturas terem sido fabricadas em condições diferentes, isto é, às diferenças de uma produção industrial para uma produção laboratorial nos diversos aspectos relacionados com o fabrico, aplicação e compactação. No entanto a mistura fabricada em obra possui um comportamento claramente superior ao da mistura tradicional (com TR=0%), fabricada em laboratório, apesar de possuir uma percentagem de betume total inferior.

No gráfico da figura 4.130 consta a avaliação da resistência à fadiga através da abordagem da energia dissipada acumulada. De acordo com o gráfico verifica-se que o comportamento da mistura com TR=15% fabricada em obra se aproxima do comportamento da mistura com TR=15% e com Pbttotal=5,1% fabricada em laboratório. Para além disso verifica-se ainda que os coeficientes de correlação das leis de fadiga melhoram significativamente. Nesta análise o bom comportamento da mistura reciclada aplicada em obra é ainda mais evidente. De qualquer forma, no gráfico da figura 4.130, o comportamento das misturas fica muito próximo.

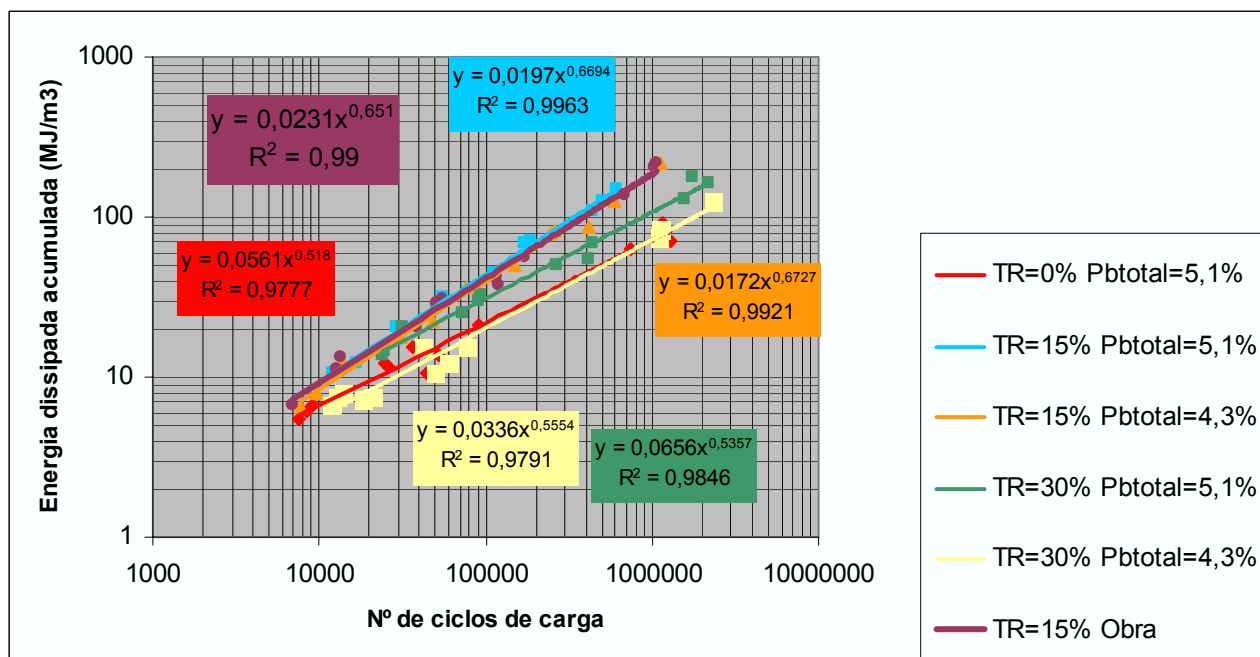


Figura 4.130 – Comparação das leis de fadiga das misturas estudadas através da energia da dissipada acumulada

No quadro 4.62 e na figura 4.131 resumem-se os resultados obtidos para a resistência às deformações permanentes.

Quadro 4.62 – Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*

| Mistura     |                    |                             | Profundidade média da rodeira ao fim de 45 min | Índice médio de aumento da profundidade da rodeira, TRm | Índice de deformação, WTR |
|-------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------|
| Fabrico     | Taxa de reciclagem | Percentagem de betume total | mm                                             | mm/h                                                    | mm/h                      |
| Laboratório | 0 %                | 5,1 %                       | 8,23                                           | 4,97                                                    | 5,00                      |
|             | 15%                | 4,3 %                       | 2,57                                           | 1,09                                                    | 1,10                      |
|             |                    | 5,1 %                       | 2,85                                           | 1,29                                                    | 1,30                      |
|             | 30%                | 4,3 %                       | 2,07                                           | 0,90                                                    | 0,91                      |
|             |                    | 5,1 %                       | 3,32                                           | 1,48                                                    | 1,49                      |
| Obra        | 15%                | 4,6 %                       | 0,82                                           | 0,45                                                    | 0,46                      |

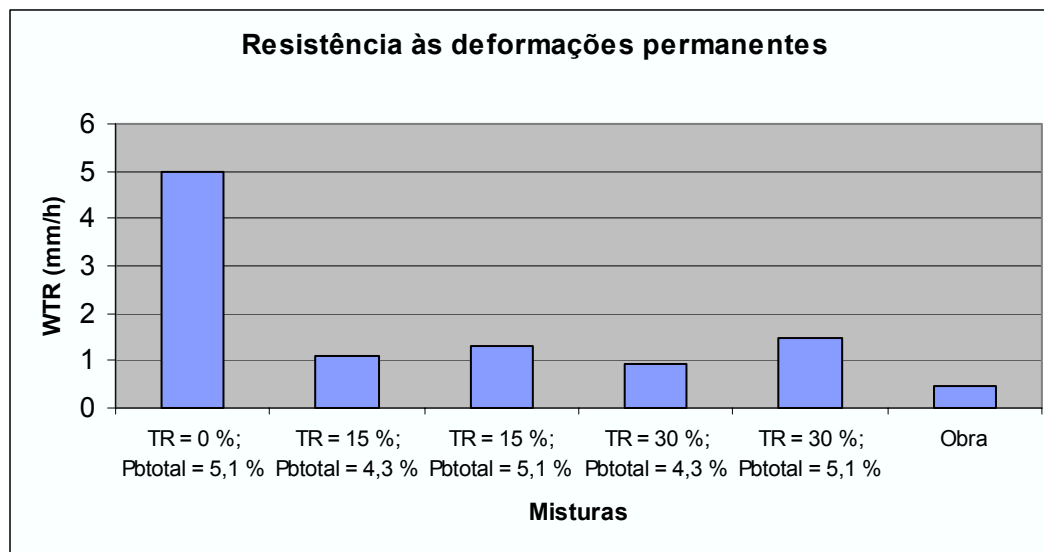


Figura 4.131 – Comparação dos resultados da resistência às deformações permanentes no ensaio *Wheel Tracking*

Analisando os resultados verifica-se que o comportamento às deformações permanentes da mistura fabricada em obra é melhor que o comportamento evidenciado por qualquer das misturas fabricadas em laboratório.

#### 4.3.3. Avaliação do módulo de rigidez *in situ* através de ensaios de carga

Após a construção do pavimento pretendeu-se avaliar a módulo de rigidez efectivamente apresentado pela camada de mistura betuminosa densa reciclada *in situ*. Por razões relacionadas com a obra apenas foi possível efectuar os ensaios sobre a camada de betão betuminoso subjacente à camada drenante. A avaliação da capacidade estrutural pode ser realizada com diversos equipamentos tais como:

- Equipamentos estáticos ou quase estáticos:
  - Ensaio de placa;
  - Viga *Benkelman*;
  - Defletógrafo *Lacroix*;
  - Curviâmetro.
- Equipamentos de cargas repetidas ou dinâmicas:
  - Vibradores;
  - Deflectómetro de impacto.

O deflectómetro de impacto (*FWD-Falling Weight Deflectometer*) é o equipamento mais utilizado na caracterização estrutural de pavimentos, em particular na sua caracterização final após construção. Trata-se de um equipamento que permite efectuar um ensaio não destrutivo, que aplica na superfície do pavimento uma carga de impacto que resulta da queda de uma massa de uma determinada altura de queda sobre um dispositivo amortecedor colocado no pavimento através de uma placa circular e que pretende simular a passagem de um rodado de um camião que se desloca a velocidades entre os 60 e os 80 km/h. Os deslocamentos verticais da superfície do pavimento induzidos por aquela carga são medidos em vários pontos, através de geofones (medidores de velocidades sísmicas) apoiados na referida superfície (Consulstrada, 2004).

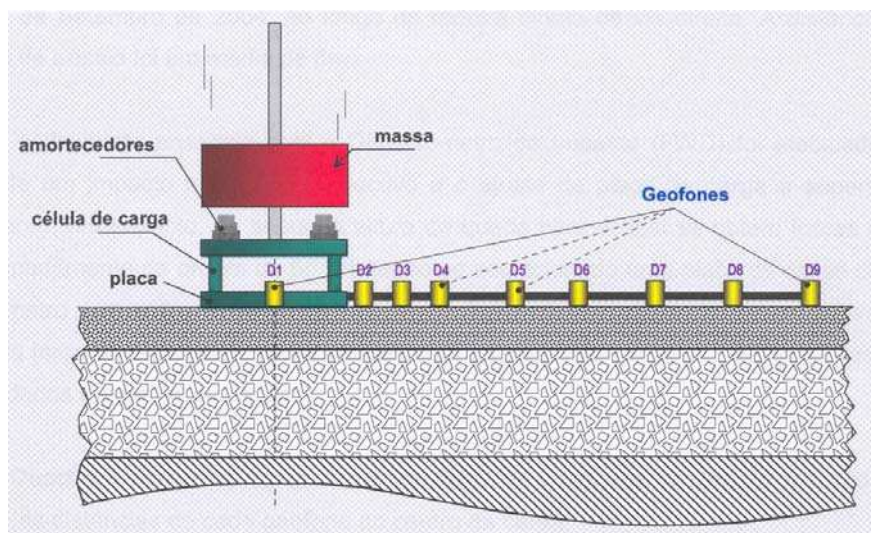


Figura 4.132 – Representação do deflectómetro de impacto (Consulstrada, 2004)

O valor do pico da força é variável consoante a massa, a altura de queda e o número de amortecedores e é medido através de uma célula de carga instalada junto da placa. Na figura 4.133 representa-se as distâncias habituais entre os geofones (neste caso são 7) bem como as camadas que de uma forma genérica contribuem para as leituras a efectuar por cada geofone.

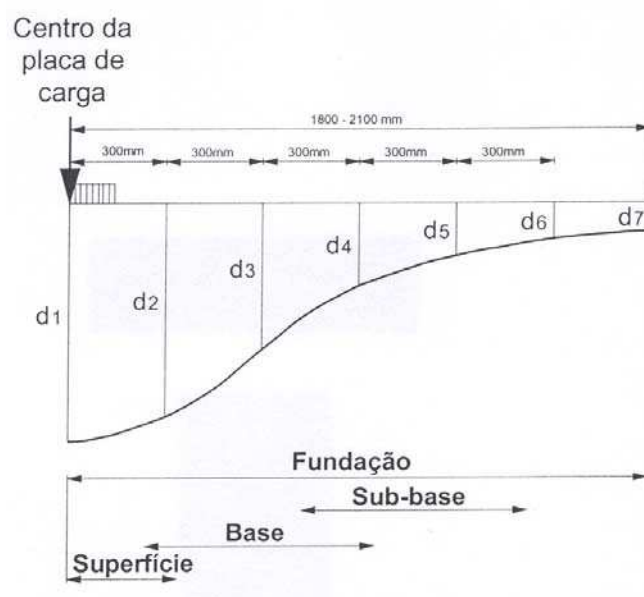


Figura 4.133 – Princípio de funcionamento do deflectómetro de impacto (Jacinto, 2003)

A deflexão central  $d_1$  fornece indicação da qualidade global do pavimento, enquanto que a diferença  $(d_1 - d_4)$  fornece indicação do estado das camadas ligadas do pavimento (Jacinto, 2003). O estado da fundação é usualmente evidenciado pela deflexão  $d_7$ .

O ensaio realizado com o deflectómetro de impacto é efectuado através de dois impactos. O primeiro impacto tem como objectivo o ajuste da placa de carga à superfície do pavimento. O segundo impacto é o que realmente corresponde ao ensaio. Assim para cada ponto ensaiado, o veículo pára no local de ensaio, a placa de carga e os

geofones apoiam-se na superfície do pavimento, aplica-se a carga para ajuste da placa ao pavimento, aplica-se a carga para ensaio e registam-se as leituras e os dados de ensaio. O objectivo do ensaio é obter um deflectograma representativo de um determinado troço homogéneo de forma a que, através de programas de cálculo automático habitualmente utilizados no dimensionamento de pavimentos e simulando-se a solicitação equivalente à do ensaio, se atribua iterativamente módulos de deformabilidade às diversas camadas das quais se conhece a espessura ajustando-se o deflectograma “calculado” ao deflectograma determinado no ensaio e obtendo-se por retro-análise os módulos de deformabilidade das diferentes camadas.

O deflectómetro de impacto apresenta várias vantagens em relação a outros equipamentos tais como a precisão e pequena dispersão nas medições efectuadas, a possibilidade de aplicação de vários níveis de carga num mesmo ponto, a rapidez de execução do ensaio, a medição da distância entre pontos de ensaio e a possibilidade de medição da temperatura do ar e do pavimento que, como se sabe, influenciam muito os resultados finais.

Neste trabalho a altura de queda da massa no ensaio foi tal que permitisse obter forças de pico de aproximadamente 65 kN e utilizou-se uma placa de 30 cm de diâmetro tendo como objectivo simular a passagem dos rodados. As condições atmosféricas foram de tempo seco. A localização dos geofones (o equipamento utilizado estava equipado com nove geofones) encontra-se no quadro 4.63 e refere-se a distâncias ao centro da carga.

Quadro 4.63 – Distâncias dos geofones ao centro da carga

| Df <sub>1</sub> | Df <sub>2</sub> | Df <sub>3</sub> | Df <sub>4</sub> | Df <sub>5</sub> | Df <sub>6</sub> | Df <sub>7</sub> | Df <sub>8</sub> | Df <sub>9</sub> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0               | 300             | 450             | 600             | 900             | 1200            | 1500            | 1800            | 2100            |

A medição da temperatura foi efectuada recorrendo a furos com uma profundidade de 2,0 cm, preenchidos com glicerina e medidas com um par termoelectrico. No quadro 4.64 encontram-se os resultados das medições efectuadas.

Quadro 4.64 – Deflexões medidas pelo deflectómetro de impacto

| P.K.      | Temperatura do pavimento a 2,0 cm (°C) | Força de pico (kN) | Deflexões medidas |                |                |                |                |                |                |                |                |
|-----------|----------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           |                                        |                    | D <sub>1</sub>    | D <sub>2</sub> | D <sub>3</sub> | D <sub>4</sub> | D <sub>5</sub> | D <sub>6</sub> | D <sub>7</sub> | D <sub>8</sub> | D <sub>9</sub> |
|           |                                        |                    | (μm)              | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           |
| 0 + 0 2 5 | 25                                     | 64,65              | 289               | 220            | 181            | 150            | 103            | 73             | 52             | 40             | 33             |
| 0 + 0 3 0 | 25                                     | 65,87              | 271               | 207            | 169            | 140            | 95             | 68             | 51             | 40             | 34             |
| 0 + 0 3 5 | 25                                     | 66,29              | 252               | 188            | 155            | 129            | 89             | 65             | 48             | 38             | 32             |
| 0 + 0 4 0 | 25                                     | 65,92              | 283               | 211            | 172            | 141            | 94             | 65             | 47             | 36             | 31             |
| 0 + 0 4 5 | 25                                     | 66,23              | 266               | 207            | 170            | 141            | 95             | 66             | 47             | 35             | 29             |
| 0 + 0 5 0 | 25                                     | 65,94              | 281               | 217            | 178            | 147            | 99             | 68             | 48             | 36             | 30             |
| 0 + 0 5 5 | 25                                     | 65,49              | 260               | 199            | 164            | 137            | 96             | 69             | 51             | 40             | 33             |
| 0 + 0 6 0 | 25                                     | 65,92              | 303               | 217            | 175            | 144            | 98             | 69             | 50             | 38             | 31             |
| 0 + 0 6 5 | 25                                     | 66,01              | 266               | 204            | 168            | 141            | 97             | 70             | 51             | 39             | 32             |
| 0 + 0 7 0 | 25                                     | 64,81              | 276               | 211            | 173            | 144            | 100            | 72             | 53             | 41             | 33             |
| 0 + 0 7 5 | 25                                     | 65,17              | 292               | 221            | 181            | 152            | 105            | 76             | 56             | 43             | 35             |
| 0 + 0 8 0 | 25                                     | 64,63              | 300               | 227            | 185            | 154            | 106            | 77             | 56             | 43             | 35             |
| 0 + 0 8 5 | 25                                     | 63,88              | 269               | 195            | 154            | 123            | 81             | 58             | 44             | 35             | 30             |
| 0 + 0 9 0 | 25                                     | 64,88              | 279               | 201            | 158            | 126            | 81             | 56             | 41             | 32             | 28             |
| 0 + 0 9 5 | 25                                     | 65,01              | 298               | 207            | 161            | 128            | 82             | 56             | 40             | 31             | 27             |
| 0 + 1 0 0 | 25                                     | 65,20              | 269               | 197            | 157            | 126            | 81             | 56             | 40             | 31             | 26             |
| 0 + 1 0 5 | 25                                     | 65,23              | 260               | 194            | 156            | 127            | 83             | 56             | 40             | 31             | 25             |
| 0 + 1 1 0 | 25                                     | 65,06              | 253               | 193            | 157            | 129            | 85             | 58             | 41             | 31             | 27             |
| 0 + 1 1 5 | 25                                     | 64,49              | 234               | 182            | 149            | 123            | 82             | 56             | 40             | 31             | 26             |
| 0 + 1 2 0 | 25                                     | 64,99              | 218               | 174            | 145            | 122            | 84             | 59             | 42             | 32             | 26             |
| 0 + 1 2 5 | 25                                     | 64,86              | 224               | 177            | 147            | 123            | 84             | 59             | 42             | 32             | 27             |
| 0 + 1 3 0 | 25                                     | 64,99              | 292               | 229            | 190            | 159            | 108            | 75             | 53             | 38             | 31             |
| 0 + 1 3 5 | 25                                     | 64,71              | 281               | 216            | 177            | 148            | 100            | 70             | 50             | 38             | 30             |
| 0 + 1 4 0 | 25                                     | 65,08              | 274               | 207            | 169            | 138            | 91             | 63             | 45             | 34             | 28             |
| 0 + 1 4 5 | 25                                     | 64,10              | 271               | 207            | 169            | 140            | 94             | 67             | 49             | 37             | 29             |
| 0 + 1 5 0 | 25                                     | 65,15              | 268               | 205            | 168            | 140            | 97             | 69             | 50             | 38             | 30             |
| 0 + 1 5 5 | 25                                     | 63,95              | 289               | 220            | 181            | 151            | 104            | 75             | 54             | 41             | 33             |
| 0 + 1 6 0 | 25                                     | 64,64              | 274               | 216            | 181            | 153            | 108            | 78             | 56             | 42             | 33             |
| 0 + 1 6 5 | 25                                     | 64,53              | 272               | 214            | 178            | 151            | 107            | 77             | 56             | 42             | 33             |
| 0 + 1 7 0 | 25                                     | 64,64              | 265               | 212            | 179            | 152            | 108            | 79             | 57             | 44             | 33             |

As forças de pico entre pontos de ensaio apresentam ligeiras variações em torno da força de 65 kN. Como tal as deflexões medidas foram normalizadas para a força de 65 kN através da seguinte expressão:

$$D_{65kN} = \frac{65}{F_{ensaio}} \times D_{ensaio} \quad (4.23)$$

Onde:

- D<sub>65kN</sub> - Deflexão normalizada para 65 kN;
- F<sub>ensaio</sub> - Força de pico registada no ensaio;
- D<sub>ensaio</sub> - Deflexão registada no ensaio.

Os resultados encontram-se no quadro 4.65.

Quadro 4.65 – Deflexões normalizadas para a força de 65 kN

| P.K.          | Deflexões normalizadas para 65 kN |                |                |                |                |                |                |                |                |
|---------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|               | D <sub>1</sub>                    | D <sub>2</sub> | D <sub>3</sub> | D <sub>4</sub> | D <sub>5</sub> | D <sub>6</sub> | D <sub>7</sub> | D <sub>8</sub> | D <sub>9</sub> |
|               | (μm)                              | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           | (μm)           |
| 0 + 0 2 5     | 291                               | 221            | 182            | 151            | 104            | 73             | 52             | 40             | 33             |
| 0 + 0 3 0     | 267                               | 204            | 167            | 138            | 94             | 67             | 50             | 39             | 34             |
| 0 + 0 3 5     | 247                               | 184            | 152            | 126            | 87             | 64             | 47             | 37             | 31             |
| 0 + 0 4 0     | 279                               | 208            | 170            | 139            | 93             | 64             | 46             | 35             | 31             |
| 0 + 0 4 5     | 261                               | 203            | 167            | 138            | 93             | 65             | 46             | 34             | 28             |
| 0 + 0 5 0     | 277                               | 214            | 175            | 145            | 98             | 67             | 47             | 35             | 30             |
| 0 + 0 5 5     | 258                               | 198            | 163            | 136            | 95             | 68             | 51             | 40             | 33             |
| 0 + 0 6 0     | 299                               | 214            | 173            | 142            | 97             | 68             | 49             | 37             | 31             |
| 0 + 0 6 5     | 262                               | 201            | 165            | 139            | 96             | 69             | 50             | 38             | 32             |
| 0 + 0 7 0     | 277                               | 212            | 174            | 144            | 100            | 72             | 53             | 41             | 33             |
| 0 + 0 7 5     | 291                               | 220            | 181            | 152            | 105            | 76             | 56             | 43             | 35             |
| 0 + 0 8 0     | 302                               | 228            | 186            | 155            | 107            | 77             | 56             | 43             | 35             |
| 0 + 0 8 5     | 274                               | 198            | 157            | 125            | 82             | 59             | 45             | 36             | 31             |
| 0 + 0 9 0     | 280                               | 201            | 158            | 126            | 81             | 56             | 41             | 32             | 28             |
| 0 + 0 9 5     | 298                               | 207            | 161            | 128            | 82             | 56             | 40             | 31             | 27             |
| 0 + 1 0 0     | 268                               | 196            | 157            | 126            | 81             | 56             | 40             | 31             | 26             |
| 0 + 1 0 5     | 259                               | 193            | 155            | 127            | 83             | 56             | 40             | 31             | 25             |
| 0 + 1 1 0     | 253                               | 193            | 157            | 129            | 85             | 58             | 41             | 31             | 27             |
| 0 + 1 1 5     | 236                               | 183            | 150            | 124            | 83             | 56             | 40             | 31             | 26             |
| 0 + 1 2 0     | 218                               | 174            | 145            | 122            | 84             | 59             | 42             | 32             | 26             |
| 0 + 1 2 5     | 224                               | 177            | 147            | 123            | 84             | 59             | 42             | 32             | 27             |
| 0 + 1 3 0     | 292                               | 229            | 190            | 159            | 108            | 75             | 53             | 38             | 31             |
| 0 + 1 3 5     | 282                               | 217            | 178            | 149            | 100            | 70             | 50             | 38             | 30             |
| 0 + 1 4 0     | 274                               | 207            | 169            | 138            | 91             | 63             | 45             | 34             | 28             |
| 0 + 1 4 5     | 275                               | 210            | 171            | 142            | 95             | 68             | 50             | 38             | 29             |
| 0 + 1 5 0     | 267                               | 205            | 168            | 140            | 97             | 69             | 50             | 38             | 30             |
| 0 + 1 5 5     | 294                               | 224            | 184            | 153            | 106            | 76             | 55             | 42             | 34             |
| 0 + 1 6 0     | 276                               | 217            | 182            | 154            | 109            | 78             | 56             | 42             | 33             |
| 0 + 1 6 5     | 274                               | 216            | 179            | 152            | 108            | 78             | 56             | 42             | 33             |
| 0 + 1 7 0     | 266                               | 213            | 180            | 153            | 109            | 79             | 57             | 44             | 33             |
| Média         | 271                               | 206            | 168            | 139            | 95             | 67             | 48             | 37             | 30             |
| Desvio padrão | 21                                | 14             | 12             | 11             | 10             | 8              | 6              | 4              | 3              |
| Percentil 85% | 292                               | 220            | 181            | 151            | 105            | 75             | 54             | 41             | 33             |

As deflexões são relativamente homogêneas (aliás trata-se de um pavimento novo). Assim, nesta fase tem de se definir quais os pontos para os quais irá ser realizado o cálculo dos módulos de deformabilidade representativos deste trecho. Os pontos seleccionados são aqueles em que as deflexões medidas (normalizadas) se aproximam do valor  $D^{85}$ , correspondente ao percentil 85% do conjunto das deflexões de todo o trecho considerado homogêneo. Os valores de  $D^{85}$  estão no quadro 4.65 e são obtidos pela expressão:

$$D^{85} = M + 1,036 \times \sigma \quad (4.24)$$

Onde:

$D^{85}$  - Deflexão correspondente ao percentil 85% do conjunto de valores das deflexões;

- M - Deflexão média do conjunto de valores das deflexões;  
 $\sigma$  - Desvio padrão em relação à média do conjunto de valores das deflexões.

Analisando os valores de  $D^{85}$  pode concluir-se que os pontos 0+025, 0+075, 0+155 deram origem a deflexões muito próximas do percentil 85%. Foram adoptados como valores representativos do trecho em análise os valores das deflexões obtidas no ponto de ensaio 0+075.

O programa de cálculo utilizado foi o Bisar 3.0 desenvolvido pela *Shell*. No quadro 4.66 estão as iterações efectuadas e no gráfico da figura 4.134 representam-se os deflectogramas medido e o calculado (última iteração).

Quadro 4.66 – Iterações para ajuste dos deflectogramas calculado com o Bisar e “medido” com o deflectómetro de impacto

| Camada                                    | Espessura<br>(cm) | Módulo de deformabilidade e Coeficiente de Poisson |       |             |       |             |       |                       |       |
|-------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-----------------------|-------|
|                                           |                   | 1ª iteração                                        |       | 2ª iteração |       | 3ª iteração |       | Bisar última iteração |       |
|                                           |                   | E(MPa)                                             | $\nu$ | E(MPa)      | $\nu$ | E(MPa)      | $\nu$ | E(MPa)                | $\nu$ |
| Betão betuminoso subjacente ao drenante   | 5                 | 6800                                               | 0,35  | 7200        | 0,35  | 6800        | 0,35  | 7000                  | 0,35  |
| Mistura betuminosa reciclada              | 7                 | 8000                                               | 0,35  | 8400        | 0,35  | 8800        | 0,35  | 9200                  | 0,35  |
| Macadame betuminoso                       | 8                 | 6000                                               | 0,35  | 6400        | 0,35  | 6400        | 0,35  | 6400                  | 0,35  |
| Agregado britado de granulometria extensa | 30                | 280                                                | 0,40  | 280         | 0,40  | 280         | 0,40  | 280                   | 0,40  |
| Leito de pavimento                        | 150               | 140                                                | 0,45  | 140         | 0,45  | 140         | 0,45  | 140                   | 0,45  |
| Solo de fundação                          | -                 | 280                                                | 0,35  | 280         | 0,35  | 280         | 0,35  | 280                   | 0,35  |

| Geofone | Distância ao centro de placa (m) | Deflexão medida ( $\mu\text{m}$ ) | Bisar 1ª iteração | Bisar 2ª iteração | Bisar 3ª iteração | Bisar última iteração |
|---------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 1       | 0,000                            | 291                               | 297               | 291               | 292               | 290                   |
| 2       | 0,300                            | 220                               | 227               | 224               | 225               | 224                   |
| 3       | 0,450                            | 181                               | 190               | 188               | 189               | 188                   |
| 4       | 0,600                            | 152                               | 158               | 157               | 157               | 157                   |
| 5       | 0,900                            | 105                               | 108               | 108               | 108               | 108                   |
| 6       | 1,200                            | 76                                | 74                | 74                | 74                | 74                    |
| 7       | 1,500                            | 56                                | 53                | 53                | 53                | 53                    |
| 8       | 1,800                            | 43                                | 39                | 39                | 39                | 39                    |
| 9       | 2,100                            | 35                                | 30                | 30                | 30                | 30                    |

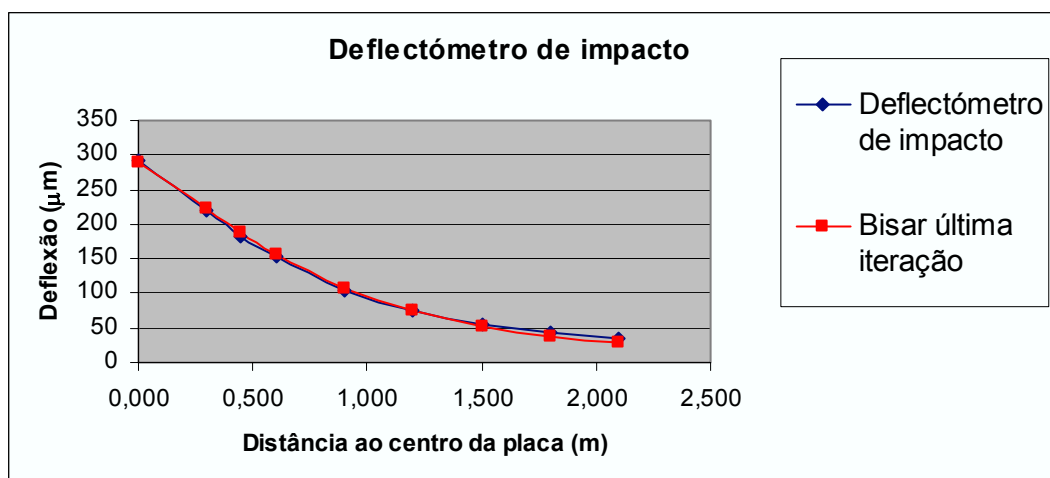


Figura 4.134 – Ajuste dos deflectogramas calculado com o Bisar e “medido” com o deflectómetro de impacto

Para a mistura betuminosa reciclada em estudo obteve-se um módulo de deformabilidade de 9200 MPa para uma temperatura de ensaio de cerca de 24,7 °C. Para comparar este valor com o valor obtido em laboratório sobre os provetes extraídos das placas cortadas do pavimento pode converter-se o módulo para a temperatura de ensaio em laboratório. Para tal recorre-se à expressão de *Ullidtz e Peattie* referida em vários documentos entre os quais Jacinto (2003) e que é a seguinte:

$$\frac{E_T}{E_{15}} = 1 - 1,384 \times \log_{10} \left( \frac{T}{15^\circ C} \right) \quad (4.25)$$

Esta expressão permite obter o módulo de deformabilidade à temperatura de 15°C partindo do seu conhecimento à temperatura T. Para relacionar o módulo de deformabilidade entre duas quaisquer temperaturas esta expressão dá origem à seguinte expressão:

$$E_T = \left( \frac{E_{\text{retro-análise}}}{1 - 1,384 \times \log_{10} \left( \frac{T}{15^\circ C} \right)} \right) \times \left( 1 - 1,384 \times \log_{10} \left( \frac{T}{15^\circ C} \right) \right) \quad (4.26)$$

Onde:

- $E_T$  - Módulo de deformabilidade corrigido para a temperatura T;
- $E_{\text{retro-análise}}$  - Módulo de deformabilidade obtido na retro-análise, para a temperatura existente no pavimento;
- $E_{15}$  - Módulo de deformabilidade à temperatura de 15 °C
- T - Temperatura à qual se pretende obter o módulo;
- $T_{\text{ensaio}}$  - Temperatura do pavimento na altura do ensaio.

A temperatura de ensaio em laboratório foi de 20 °C. Aplicando a expressão anterior, o módulo da mistura betuminosa avaliado com o deflectómetro de impacto dá origem aos valores apresentados no quadro 4.67.

Quadro 4.67 – Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa reciclada

|                            | Módulo de deformabilidade            |         |
|----------------------------|--------------------------------------|---------|
|                            | “In situ” (Deflectómetro de Impacto) |         |
|                            | T (°C)                               | E (MPa) |
| Temperatura “in situ”      | 24.7                                 | 9200    |
| Temperatura em laboratório | 20.0                                 | 10867   |

Conforme se pode verificar no quadro 4.60 (que resume os módulos de rigidez determinados em laboratório sobre as diversas misturas estudadas) o módulo de rigidez depende da extensão imposta a que o ensaio de flexão decorre. As extensões que ocorrem na camada de mistura betuminosa reciclada existente no pavimento no ensaio com o deflectómetro de impacto são diferentes das extensões a que decorreram os ensaios laboratoriais sobre a mesma mistura. Assim de acordo com o programa Bisar 3.0 as extensões de tracção que ocorrem nas camadas betuminosas no ensaio com o deflectómetro de impacto (de acordo com a estrutura do pavimento que se determinou) são as apresentadas no quadro 4.68.

Quadro 4.68 – Extensões de tracção originadas no ensaio de carga com o deflectómetro de impacto

|                                                | Localização do ponto analisado      | Extensão de tracção máxima |
|------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
|                                                |                                     | ( $\mu\epsilon$ )          |
| Base da camada de mistura betuminosa reciclada | No eixo da carga aplicada no ensaio | 45                         |
| Base das camadas de misturas betuminosas       | No eixo da carga aplicada no ensaio | 135                        |

A extensão mínima ensaiada em laboratório para esta mistura betuminosa foi de 300  $\mu\epsilon$ . Assim existe uma diferença assinalável entre as extensões nas quais foram determinados os dois módulos (300  $\mu\epsilon$  e 45  $\mu\epsilon$ ).

Adoptando os valores médios dos módulos de rigidez dos três provetes ensaiados em cada nível de extensão em laboratório pode traçar-se um gráfico que relacione as grandezas módulo de rigidez e extensão obtendo-se o gráfico da figura 4.135. A lei que relaciona as duas grandezas é apresentada em Teixeira (2000) e é do seguinte tipo:

$$E(MPa) = a + \epsilon(\mu\epsilon) \times b \quad (4.27)$$

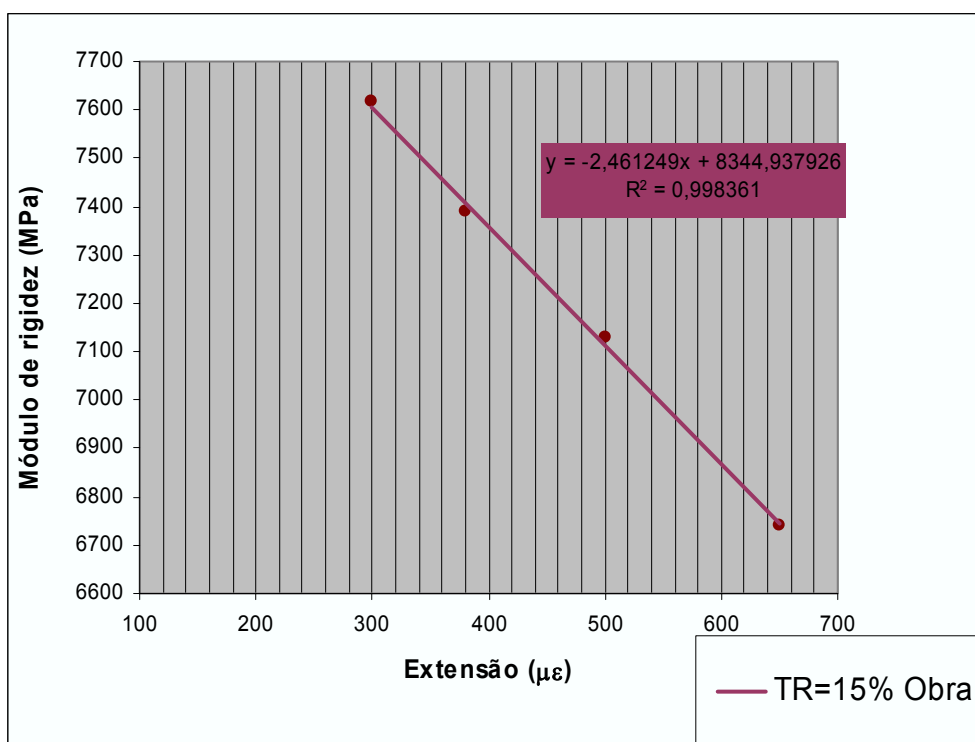


Figura 4.135 – Relação entre módulo de rigidez e extensão no ensaio laboratorial de flexão em quatro pontos com extensão controlada

No gráfico da figura 4.135 traçou-se a linha de tendência que melhor definia a relação entre as duas grandezas. Obteve-se a seguinte equação:

$$E(MPa) = -2,461249 \times \epsilon(\mu\epsilon) + 8344,937926$$

Utilizando a equação obtida e por extrapolação pode obter-se o módulo de rigidez da mistura para a extensão de 45  $\mu\epsilon$ . Note-se que pelo facto de se tratar de uma extrapolação pode estar a cometer-se um erro, dado que o comportamento da equação à esquerda do último ponto determinado laboratorialmente não se conhece. De qualquer forma, admitindo que o comportamento à esquerda do último ponto (300  $\mu\epsilon$ ) é idêntico pelo menos até à extensão de 45  $\mu\epsilon$ , pode determinar-se os valores que constam do quadro 4.69.

Quadro 4.69 – Comparação entre os valores obtidos em ensaio laboratorial e a linha de tendência que relaciona o módulo de rigidez e a extensão de tracção

| Extensão ( $\mu\epsilon$ ) | Módulo de rigidez (MPa) |                    |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|
|                            | Valor medido            | Linha de tendência |
| 650                        | 6742                    | 6745               |
| 500                        | 7127                    | 7114               |
| 380                        | 7389                    | 7410               |
| 300                        | 7617                    | 7607               |
| 45                         | -                       | 8234               |

Conclui-se que, para a mesma extensão, os valores do módulo de rigidez determinado em laboratório (através da extrapolação da recta que define os resultados do ensaio) e no ensaio de carga com o deflectómetro de impacto são significativamente diferentes (8234 MPa em laboratório e 10867 MPa com o deflectómetro de impacto). Estas diferenças poderão ser explicadas pelas diferenças inerentes aos próprios ensaios que já foram descritos.

De facto, no ensaio com o deflectómetro de impacto as camadas ensaiadas estão totalmente apoiadas nas camadas subjacentes e são de dimensão horizontal, que para interpretação do ensaio, se pode dizer infinita. A solicitação aplicada consiste em deixar cair uma massa de uma determinada altura de queda sendo a carga transmitida ao pavimento por uma placa de carga circular. A interpretação dos resultados do ensaio *in situ* com o deflectómetro de impacto para obtenção dos módulos de deformabilidade utiliza um modelo de camadas horizontais, homogéneas, isotrópicas e cujos materiais apresentam comportamentos elásticos lineares aplicando uma carga estática de valor igual ao pico do ensaio numa área circular. Este modelo consiste numa simplificação da realidade do próprio ensaio e da estrutura a ensaiar. Em laboratório os provetes são de dimensões muito mais reduzidas e o confinamento e a solicitação que lhes são aplicados são muito diferentes. Os provetes estão fixos nas extremidades e a solicitação de natureza sinusoidal é aplicada em dois pontos centrais (ensaio de flexão em 4 pontos em extensão controlada).

#### 4.4. Conclusão

Por análise dos diferentes pontos deste capítulo conclui-se que as misturas betuminosas com reciclagem estudadas possuem uma qualidade e propriedades mecânicas pelo menos não inferiores à da mistura betuminosa convencional estudada.

Os estudos fundamentais efectuados permitiram concluir que apesar de as misturas betuminosas recicladas não cumprirem relativamente a alguns critérios habituais (e até mesmo alguns critérios para misturas com reciclagem a quente como o módulo de rigidez de *Marshall* limitado a 815 kgf/mm), tal facto não se traduziu num deficiente comportamento ao nível dos ensaios que determinaram as propriedades fundamentais.

O módulo de rigidez foi avaliado em laboratório sobre as misturas betuminosas fabricadas em laboratório e sobre a mistura betuminosa fabricada em obra e foi avaliado *in situ* sobre a mistura fabricada em obra.

As misturas betuminosas fabricadas em laboratório permitiram verificar que de forma geral o módulo de rigidez das misturas recicladas é superior ao módulo da mistura tradicional. Para a mesma taxa de reciclagem (15 %), comparando o módulo de rigidez avaliado em laboratório sobre as misturas fabricadas em laboratório e para a mistura fabricada em obra verifica-se que são idênticos. Em relação à comparação dos módulos de rigidez avaliados em laboratório e *in situ* sobre a mistura betuminosa reciclada fabricada na obra verifica-se que a avaliação *in situ* conduziu a um módulo de rigidez superior. Tal facto poderá dever-se às diferenças inerentes aos próprios ensaios. Em todo o caso os módulos de rigidez obtidos são bastante elevados.

As misturas betuminosas recicladas apresentam uma rigidez elevada, mas que não se reflecte numa fragilização que conduza a uma menor resistência à fadiga. Aliás a generalidade das misturas recicladas revelou melhor comportamento à fadiga que a mistura betuminosa tradicional (exceptuando a mistura betuminosa reciclada com TR=30% e Pbtot=4,3%).

Em relação ao comportamento às deformações permanentes as misturas betuminosas recicladas apresentam um comportamento muito idêntico entre si mas claramente melhor que a mistura betuminosa tradicional. A presença de um betume mais duro proveniente das misturas fresadas poderá explicar este facto.

Apesar dos agregados das misturas betuminosas fresadas estarem protegidos pela película de betume envelhecido, a protecção relativamente à humidade e ao calor das pilhas que constituem o *stock* constatou-se ser crucial. Assim, apesar da humidade superficial das pilhas dos *stocks* rapidamente evaporar, à medida que se vai entrando para dentro da pilha a humidade fica aí retida não evaporando devido à acção nociva do material sobrejacente. Para além de se prepararem *stocks* de pequena altura e estruturados de forma a poderem ser individualizados em *stocks* homogêneos, a protecção da humidade e do calor deverá ser acautelada.

Quando o funcionamento da central betuminosa em termos de aquecimento das misturas fresadas consistir, à semelhança da central utilizada neste trabalho, num aquecimento por contacto com os agregados novos e com o betume novo previamente aquecido, a humidade das misturas betuminosas fresadas a introduzir na mistura assume efeitos negativos de particular importância, dado que, para além de poder influenciar a dosificação (dependendo do sistema de dosificação da central) prejudica gravemente a produção da central. Tal acontece porque os materiais quentes para além de aquecerem as misturas fresadas têm de secá-las diminuindo drasticamente a temperatura e/ou a capacidade de produção da central. Acresce ainda que a secagem das misturas fresadas diminui ainda a vida das mangas filtrantes da central.

A mistura betuminosa reciclada a quente fabricada em obra possuiu um comportamento idêntico às misturas fabricadas em laboratório validando assim todo o processo laboratorial que foi efectuado e permitindo que se possa concluir que as misturas com reciclagem a quente são possíveis de produzir industrialmente e não só em laboratório, onde o processo por natureza é mais cuidado e controlado.

## 5. Considerações finais

A reabilitação de pavimentos rodoviários é sempre necessária dado que os pavimentos são sujeitos a acções que conduzem à sua degradação progressiva.

Mesmo que bem dimensionados e construídos o facto de aos pavimentos estar associada uma vida útil torna necessária a sua reabilitação no fim desse período tendo como objectivo conferir ao pavimento características que lhe permitam possuir um novo período de vida útil e elevando o índice de serviço a níveis aceitáveis para os utentes.

A selecção de técnicas reabilitação de pavimentos deve ter em conta entre outros os seguintes factores:

- Adequação da solução à resolução dos problemas existentes;
- Minimização dos custos da obra;
- Minimização dos custos dos utentes;
- Desempenho a longo prazo da solução executada;
- Minimização dos impactes ambientais.

A reciclagem de misturas betuminosas surge na década de 70 devido ao aumento do preço do crude durante a crise petrolífera que então se vivia e devido a razões de conservação de energia. As considerações ecológicas surgiram na década de 80.

As vantagens da escolha da solução da reciclagem são:

- Vantagens de conservação de recursos;
- Vantagens energéticas;
- Vantagens económicas;
- Vantagens técnicas.

A menor necessidade de extracção de materiais granulares origina por um lado vantagens de conservação dos recursos e por outro lado vantagens económicas e energéticas. As vantagens económicas decorrem da utilização dos materiais fresados disponíveis em oposição à aquisição de materiais novos que muitas vezes, com características adequadas, só estão disponíveis a distâncias elevadas. As vantagens energéticas estão relacionadas com o menor consumo de energia quer no transporte de materiais quer nas actividades extractivas.

O preço do betume é um dos custos importantes no fabrico das misturas betuminosas sendo que uma poupança neste material de base se reflecte também numa economia para as obras. Além disso, como é do conhecimento geral, o preço do crude é muito variável em função do contexto político internacional. Assim, um menor consumo deste material reaproveitando-o, torna as obras mais independentes desse contexto.

As vantagens técnicas da reciclagem são as seguintes:

- Uniformizar as características estruturais e de regularidade sem utilizar novos materiais ou minimizando essa utilização;
- Correção do perfil longitudinal ou transversal da estrada;
- Permitir a reabilitação estrutural em faixas individualizadas;
- Permitir a colocação da camada de reforço sobre uma plataforma não deteriorada e sem fendas;

- Eliminar o problema da reflexão de fendas que se coloca no caso do reforço por aplicação de camadas betuminosas novas sobre o pavimento com fendas;
- Permitir as operações construtivas, sem fechar a estrada à circulação de tráfego nas faixas adjacentes;
- Diminuição do transporte de materiais;
- Manutenção da cota da rasante.

Reciclagem de misturas betuminosas é um termo que correntemente se aplica a todos os processos de reutilização de misturas betuminosas. No entanto, de forma rigorosa, a palavra reciclagem deveria estar reservada para a situação em que a reutilização conduz a uma qualidade e valor económico do material reciclado idênticos aos materiais degradados quando novos. A reciclagem a quente de misturas betuminosas em central merece plenamente essa designação.

Neste trabalho procurou-se contribuir para o melhor conhecimento desta técnica, já utilizada noutros países mas ainda pouco utilizada em Portugal.

No capítulo 2 “Reciclagem de misturas betuminosas” foram apresentadas as diversas técnicas de reutilização abordando-se os diferentes aspectos relacionados com o ligante utilizado, com a formulação das misturas e com as propriedades expectáveis para as misturas fabricadas. Foram também abordados alguns casos de estudo na utilização de cada técnica.

Concluiu-se que à luz do conceito escada representado na figura 2.8 é desejável a maior qualidade na reutilização, se possível, a reciclagem. A reciclagem a quente de misturas betuminosas aparece como uma solução técnica para esse objectivo, dado que, as misturas betuminosas recicladas a quente devem possuir características idênticas às das misturas betuminosas tradicionais.

No capítulo 3 “Misturas betuminosas a quente: materiais constituintes e formulação laboratorial” abordaram-se as características dos materiais base (agregados e betume) habitualmente requeridas para o fabrico de misturas betuminosas bem como os diversos métodos de formulação. Para as misturas betuminosas não tradicionais como são as misturas betuminosas recicladas concluiu-se que os métodos de formulação racionais que avaliam as propriedades fundamentais das misturas betuminosas são os mais adequados.

O capítulo 4 “Caso em estudo” consistiu no caso de estudo deste trabalho e é composto por duas fases.

Numa primeira fase foram realizados estudos de formulação e de caracterização mecânica de misturas betuminosas recicladas fabricadas em laboratório. Dado que o comportamento das misturas betuminosas recicladas é ainda pouco conhecido, os estudos desenvolveram-se por comparação com uma mistura betuminosa tradicional do mesmo tipo.

Numa segunda fase foi fabricada e aplicada uma mistura betuminosa reciclada numa obra, que posteriormente foi caracterizada mecanicamente *in situ* e em laboratório. As propriedades da mistura betuminosa fabricada e aplicada em obra foram comparadas com as obtidas para as misturas betuminosas fabricadas em laboratório.

Deste capítulo conclui-se o seguinte:

- Apesar de as misturas betuminosas recicladas estudadas não satisfazerem alguns requisitos em relação às propriedades exigidas no âmbito do estudo de formulação de *Marshall*, tal facto não se traduziu num deficiente comportamento mecânico das misturas betuminosas recicladas avaliado em ensaios fundamentais. Este aspecto revela a importância dos métodos racionais, em particular, na formulação de misturas betuminosas não tradicionais como são as misturas betuminosas recicladas;
- As misturas betuminosas fabricadas em laboratório permitiram verificar que, de forma geral, o módulo de rigidez das misturas recicladas é superior ao módulo da mistura tradicional. Para a mesma taxa de reciclagem, o módulo de rigidez avaliado em laboratório da mistura betuminosa reciclada fabricada em obra é idêntico ao das misturas betuminosas recicladas fabricadas em laboratório. Em relação à comparação dos módulos de rigidez avaliados em laboratório e *in situ* sobre a mistura betuminosa reciclada fabricada em obra, verifica-se que a avaliação *in situ* conduziu a um módulo de rigidez superior;
- Do ponto de vista da resistência à fadiga conclui-se que, de uma forma geral, o comportamento à fadiga das misturas betuminosas recicladas é melhor que o comportamento da mistura betuminosa tradicional. As misturas com taxa de reciclagem de 15 % apresentam um melhor comportamento à fadiga do que as de 30 %. Este aspecto poderá significar que, do ponto de vista da resistência à fadiga, a mistura reciclada deixa de ficar beneficiada pela introdução de fresado a partir de um determinado valor da taxa de reciclagem. Para a mesma taxa de reciclagem, o comportamento à fadiga da mistura betuminosa reciclada fabricada em obra é idêntico ao das misturas betuminosas recicladas fabricadas em laboratório;
- Em relação à resistência às deformações permanentes as misturas betuminosas recicladas estudadas revelaram melhor comportamento que a mistura betuminosa tradicional. As misturas recicladas com taxa de reciclagem de 15 % e de 30 % revelaram comportamentos idênticos não se detectando uma alteração do comportamento pelo aumento da taxa de reciclagem. Do ponto de vista das deformações permanentes o comportamento da mistura betuminosa reciclada fabricada em obra é ainda melhor do obtido com as misturas betuminosas recicladas fabricadas em laboratório;
- O controlo dos *stocks* de misturas betuminosas fresadas é crucial na qualidade a obter para a mistura betuminosa reciclada, bem como, para a produção da central. Esse controlo para além de ter como objectivo a obtenção de *stocks* homogéneos deve garantir que os mesmos se encontram protegidos da humidade e da temperatura. A qualidade dos *stocks* é ainda mais importante se tivermos a trabalhar com centrais contínuas;
- Independentemente das vantagens ou desvantagens que, do ponto de vista técnico, existem na utilização da técnica de reciclagem a quente de misturas betuminosas, outros aspectos tem de ser considerados nomeadamente os aspectos económicos e ambientais. Assim, a decisão de recorrer à técnica de reciclagem a quente e de que taxa de reciclagem utilizar deve ter em conta as vertentes técnica, ambiental e económica.

A reciclagem a quente não sendo uma técnica correntemente utilizada no nosso país precisa de ser activamente promovida através da transmissão de conhecimento, recomendação da utilização da técnica em documentos normativos e legislativos,

elaboração de especificações para este tipo de misturas e elaboração de recomendações tendo em vista o tratamento e armazenamento das misturas fresadas e produção das misturas recicladas. Esta técnica, tal como todas as técnicas inovadoras, sairá beneficiada à medida que se generalizar a especificação de todas as misturas betuminosas com base no desempenho.

Como sugestão para futuros estudos podem ser sugeridos:

- Avaliação do comportamento a longo prazo dos pavimentos que incorporam misturas betuminosas recicladas e que começam agora a ser aplicadas;
- Realização de estudos similares a este de forma a verificar e complementar as conclusões a que se chegou neste trabalho;
- Realização de estudos envolvendo outras técnicas construtivas de reciclagem a quente nomeadamente recorrendo a outro tipo de centrais e a outro tipo de misturas betuminosas;
- Realização de estudos para melhor conhecimento da ligação entre o betume proveniente das misturas betuminosas fresadas e o betume novo.

## **Bibliografia**

AI (1974). "Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types". Manual Series nº 2 (MS-2). The Asphalt Institute. Março 1974.

AI (1981). "Asphalt Hot-Mix Recycling". Manual Series nº 20 (MS-20). The Asphalt Institute. Agosto 1981.

AI (1983). "Principles of construction of hot-mix asphalt pavements". Manual Series nº 22 (MS-22). The Asphalt Institute. Janeiro 1983.

AI (1997a). "Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing". Superpave Asphalt Binder Specification. Superpave Series Nº 1 (SP-1)". The Asphalt Institute.

AI (1997b). "Superpave Mix Design". Superpave Series Nº 2 (SP-2)". The Asphalt Institute.

Antoine, J. P.; Cosson, M. J.; George, L. A. (2004). "Bituminous mixes with a high rate of recycling: Experimentation on a motorway". 3<sup>rd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress. Viena. Maio, 2004.

Antunes, M.L. (1993). "Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos". Dissertação submetida à Universidade Técnica de Lisboa para obtenção do grau de Doutor, LNEC, Lisboa, 1993.

Antunes, M.L.; Freire, A.C. (2003). "Agregados para misturas betuminosas". Seminário sobre agregados, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, LNEC, Março 2003.

Azevedo, M. C. (1993). "Características mecânicas de misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos". Dissertação submetida à Universidade Técnica de Lisboa para obtenção do grau de Doutor, LNEC, Lisboa, 1993.

Azevedo, M. C. (2002). Apontamentos de apoio às aulas de Mestrado em Vias de Comunicação da cadeira de Pavimentos. FEUP. Porto.

Azevedo, M. C., Cardoso, M. (2003). "Reciclagem a quente em central betuminosa" em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Azevedo, M. C. (2003b). "Conceitos, constituição, propriedades e classificação". Acção de formação da GALP dedicadas ao tema "Ligantes Betuminosos para Pavimentação e suas aplicações". Lisboa.

Azevedo, M. C. (2004). Acção de formação da GALP "Misturas Betuminosas: Novas Aplicações Rodoviárias. Estudos de formulação em laboratório". Matosinhos, 2004.

Batista, F.A. ; Antunes, M.L.; Marques, J.A. (2000). "Reutilização de materiais betuminosos fresados na reabilitação de pavimentos". 1º Congresso Rodoviário Português, 28-30 Novembro 2000 - LNEC, vol. II, pp. 689-702.

Bonvallet, J. (2003). “Bituminous products recycling in hot mix plants: some remarks on the possible choices for the contractor” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Brisa (2003). Caderno de Encargos da Obra “Albergaria/Aveiro Sul”.

Campo y Cuevas, J.A.F. (1998). “Estabilización e reciclada con emulsion.”. Reciclado de Firms. IV Congreso Nacional de Firms. Segovia, Espanha, Junho de 1998.

Capitão, S.D. (1994). “Misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade. Contribuição para a caracterização do seu comportamento”. Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre, Coimbra, Abril 1994.

Carvalho, J. (2003). “Panorâmica da exploração de agregados em Portugal”. Seminário sobre agregados, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, LNEC, Março 2003.

Castelo Branco, F. (2003). “Normalização Europeia e marcação CE – novos desafios”. Seminário sobre agregados, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, LNEC, Março 2003.

Castelo Branco, F. (2002). Apontamentos de apoio às aulas de Mestrado em Vias de Comunicação da cadeira de Pavimentos. FEUP. Porto.

Dias da Silva, H. M. (2003). “Formulação de misturas betuminosas. Análise do comportamento baseada na adesividade.” Universidade do Minho. Fevereiro, 2003.

Duriez, M. (1950). “Traité de Matériaux de Construction”. Dunod. Paris. (citado em Azevedo, 1993).

EAPA (1998). “Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas”. Documento traduzido pela APORBET. EAPA, 1998.

EAPA (2003). “Asphalt in figures 2002”.

Gonçalves, A.; Neves, R.D.(2003). “Agregados reciclados”. Seminário sobre agregados, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, LNEC, Março 2003.

Hachiya, Y.; Himeno, K.; Hao, P.; Tsubokawa, Y.(2004). “Application of Recycled Asphalt Concrete in Airport Pavement Surface Courses”. 3<sup>rd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress. Viena. Maio, 2004.

IAE (1995). “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional”.

IAE (1998). Caderno de Encargos.

Jacinto, M. (2003). “Caracterização Estrutural de Pavimentos.” Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação, Porto, 2003.

Jiménez, F.E.P. (2003). “Reciclado in situ con emulsión. Análisis de su comportamiento. Comparación resultados de laboratorio y obra.” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Jofré, C. (2003). “Reciclado de firmes con cemento” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Kandhal, P.; Foo, K.,Y. (1997). “Designing Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures using SUPERPAVE Technology”. National Center for Asphalt Technology (NCAT). NCAT Report nº 96-5., Estados Unidos da América. Janeiro, 1997.

Lima, A.T. (2003). “ Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente”. Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará para obtenção do grau de Mestre, 2003.

Marquardt, A., Fröbel, T. (2003). “Cold processing of road construction materials” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Mcdaniel, R.; Andersson, R.M. (2001). “Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in SUPERPAVE Mix Design Method: Technician’s manual”. NCHRP Report nº452. EUA. (citado em Lima (2003))

Merighi, J. V. (2003). “Reciclagem a frio com ligantes betuminosos – experiência brasileira” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Miranda, V., Fernandes, C., Fonseca, P. (2003). “A utilização de reciclagem “in situ” com cimento na obra de beneficiação do IP4 entre Rossas e Bragança” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

NAPA (2002). “Guide for Hot Mix Asphalt Pavement”. Information Series 131. National Asphalt Pavement Association. 2002.

Nunes, A., Santos, J. (2003). “Cimentos para reciclagem” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Oliveira, E. (2003). “Estado actual da reciclagem de pavimentos e perspectivas futuras” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Pais, J.C. (1999). “ Consideração da reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos”. Dissertação submetida à Universidade do Minho para obtenção do grau de Doutor, 1999.

Pereira, P.; Picado-Santos, L.(2002). “Pavimentos Rodoviários”. Universidade do Minho. Braga, 2002.

PIARC (2001). “Recycling Of Existing Flexible Pavements”. World Road Association, 2001.

- PIARC (2002). “Guideline Hot Mix Asphalt Recycling in Plant”. World Road Association, 2002.
- Picado-Santos, L. (1994). “Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis”. Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor, Coimbra, 1994.
- Picado-Santos, L. (2003). “Reciclagem de pavimentos rodoviários”. Seminário de Engenharia Rodoviária. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Politécnico de Viseu. Maio 2003. pp. 35-48
- Simões, R.; Paúl, I. (2003). “Aplicação da técnica de reciclagem de pavimentos in situ com cimento, na beneficiação da EN383 – Canhestros/Aljustrel” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.
- Pinto, J. (2003). “Caracterização superficial de pavimentos.” Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação, Porto, 2003.
- Quaresma, L.; Antunes, M. L. (2002). “Fíler granítico em misturas betuminosas”. Rel. Proc. 92/01/12647, LNEC, Lisboa.
- Regueiro, M. (2003). “La Produccion de Áridos en Europa”. Seminário sobre agregados, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, LNEC, Março 2003.
- Ribeiro, J. Q. (1995). “Análise do comportamento de camadas de desgaste drenantes com materiais graníticos.” Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Porto, Maio 1995.
- Ribeiro, J. Q. (2002). Apontamentos de apoio às aulas de Mestrado em Vias de Comunicação da cadeira de Pavimentos. FEUP. Porto.
- Ribeiro, J. Q. (2003). “Reciclagem a frio com espuma de betume” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.
- Shell (2003). “The Shell Bitumen Handbook”. Fifth edition. Shell Bitumen.
- SETRA/LCPC (1984). “Mémento des Spécifications Françaises”. Chaussées, SETRA/LCPC, Paris. (citado em Azevedo, 1993).
- Soto Sánchez, J.A.; Garcia Siller, A.; Peña Ruiz, J. (2000). “Reciclagem a quente com betumes reativos modificados com polímeros”. Tradução/Apresentação de Luís S. Vieira. CEPISA Portuguesa Petróleos, S.A.. Divisão de Empreiteiros e Obras Públicas/Acessor técnico de Empreiteiros. 1º Congresso Rodoviário Português, 28-30 Novembro 2000 – LNEC, vol. III, pp. 509-523

Soto, J. A. (2003). “Reciclado “in situ” com emulsión de capas bituminosas” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Teixeira, A.(2000). “Caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas em equipamento servopneumático.” Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação, Porto, 2000.

Teixeira, A.; Rodrigues, R.; Azevedo, M.C. (2003). “Betume espuma – 1ª experiência em Portugal” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Val, M.A.; Rocci, S.(1998). “Guia para el dimensionamiento de firmes reciclados in situ en frio”. PROBISA. Maio, 1998.

Vallerga, B.A. (1953). “Notes on the Design Preparation and Performance of Asphaltic Pavements”. Institute of transportation and traffic Engineering. University of California. Berkeley (citado em Azevedo, 1993).

Vallerga, B.A.; Lovering, W.R. (1985). “Evolution of the Hveem Stabilometer Method of Designing Asphalt Paving Mixtures”. Asphalt Paving Technology: Proceedings, vol.54. Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions. Santo António, Texas (citado em NAPA, 2002).

Vieira, L. (2003). “Reciclagem semi-quente em central” em Reciclagem de pavimentos. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. FEUP. Porto.

Wirtgen (1998). “Wirtgen Cold Recycling Manual”.

Wirtgen (2001). “Foamed Bitumen – The Innovative Technology for Road Construction”. Germany.

Wirtgen (2001b). “Rehabilitation of a heavily trafficked road. Pavement investigation and construction report”. Germany.