U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

LIGANTES BETUMINOSOS E A NORMALIZAÇÃO EUROPEIA

LUÍS RICARDO ROSAS ALVES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

JANEIRO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Ao meu pai

A dúvida é o princípio da Sabedoria

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

A dissertação aqui apresentada foi elaborada no âmbito do curso de Mestrado Integrado 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.

Agradecimentos ao Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro, orientador desta dissertação, pelo acompanhamento e por toda a disponibilidade.

Não posso deixar de agradecer á Eng.ª Daniela Domingues, pela sua disponibilidade e informações transmitidas.

RESUMO

A presente dissertação tem como objectivo a análise dos ligantes betuminosos e o desenvolvimento da normalização europeia, focando a análise nos métodos usados, nos requisitos e nas abordagens seguida para a classificação dos ligantes betuminosos, bem como a marcação CE

O trabalho realizado foi dividido, em cinco partes. Na primeira parte, efectuou-se um extenso trabalho de pesquisa bibliográfica e de documentação relacionada com o tema de forma a compreender e entender o actual ponto de situação bem como as questões pertinentes para o sector. Segue-se uma abordagem e apresentação das várias normas existentes, relacionadas com os ligantes betuminosos. É ainda feita uma abordagem às Normas EN 13108 [1], fazendo deste modo uma introdução às normas europeias dos ligantes betuminosos. De seguida o Capitulo das Normas Europeias dos Ligantes Betuminosos apresenta um resumo de cada Norma Europeia, bem como uma abordagem e uma explicação da filosofia inerente a cada Norma, dando particular ênfase aos métodos de ensaios e especificações desenvolvidas. Deste modo, e dentro da filosofia da abordagem seguida para as especificações dos ligantes betuminosos segue-se o quarto capitulo, onde é explicitado o método Superpave, as abordagens seguidas, para então se efectuar uma comparação de métodos e de abordagens seguidas pelas Normas Europeias e pelo Método SUPERPAVE.

PALAVRAS-CHAVE: ligantes betuminosos, normalização europeia, marcação CE, Superpave.

ABSTRACT

This dissertation aims to analyze the bitumen and the development of European standardization, focusing on the methods used, the requirements and approaches followed for the classification of bitumen, as well as the CE

The work was divided into five parts. The first part took place an extensive research literature and documentation related to the subject in order to comprehend and understand the current state of play as well as issues relevant to the sector. It follows an approach and presentation of the various existing standards related to the bitumen. It also made an approach to standards EN 13108, thus making an introduction to European standards of bitumen. Next Chapter of the European Standards of bitumen presents a summary of each European Standard, as well as an approach and an explanation of the philosophy inherent in each Standard, with particular emphasis on test methods and specifications developed. Thus, and within the philosophy of the approach to the specifications of bitumen followed by the fourth chapter, where we explain the Superpave method, the approaches followed, and then make a comparison of methods and approaches taken by the European Standards and Superpave.

KEYWORDS: bituminous binders, standardization European, CE, Superpave

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V
ÍNDICE GERAL VII
ÍNDICE DE TABELAS. IX
ÍNDICE DE FIGURAS. XI
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS XIV
TERMOS E DEFINIÇÕES. XVI

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1
1.1. APRESENTAÇÃO DO TEMA E SEU ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA 4
1.3. ESTRUTURA GERAL 4

2. MISTURAS BETUMINOSAS 7
2.1. NORMAS EUROPEIAS E ESPECIFICAÇÕES 7
2.2. REQUISITOS DA NORMA PORTUGUESA EN13108-1 7
2.3. MARCAÇÃO CE 8
2.4. ABORDAGENS SEGUIDAS EM PORTUGAL 9

3. LIGANTES BETUMINOSOS 13
3.1. INTRODUÇÃO 13
3.2. ENSAIOS DOS LIGANTES BETUMINOSOS 14
3.3. NORMAS EUROPEIAS DE LIGANTES BETUMINOSOS 22
3.3.1. BETUMES DE PAVIMENTAÇÃO 23
3.3.1.1. As Propriedades e os testes relacionados 27
3.3.2. BETUMES DUROS DE PAVIMENTAÇÃO 28
3.3.2.1. Propriedades e ensaios relacionados 30
3.3.3. BETUMES MODIFICADOS COM POLÍMEROS 31
3.3.3.1. As Propriedades e os ensaios relacionados 32
3.3.4. ANALISE DAS NORMAS EUROPEIAS E ENSAIOS 35
3.4. AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE E MARCAÇÃO CE DOS LIGANTES BETUMINOSOS 41
3.5. ENQUADRAMENTO CADERNO DE ENCARGOS TIPO DAS ESTRADAS DE PORTUGAL, ... EPE 47

3.6. CONCLUSÃO – NORMAS EUROPEIAS 54

4. SUPERPAVE 57

4.1. INTRODUÇÃO 57

4.1.1. COMPORTAMENTO 58

4.1.1.1. Comportamento a altas temperaturas. 58

4.1.1.2. Comportamento a temperaturas baixas 59

4.1.1.3. Comportamento a temperaturas intermédias 59

4.1.1.4. Comportamento ao envelhecimento 59

4.1.2. ESPECIFICAÇÕES PRÉ - SUPERPAVE 60

4.2. ENSAIOS DO SUPERPAVE 61

4.2.1. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO 64

4.2.2. ENSAIOS MECÂNICOS 66

4.3. ESPECIFICAÇÕES DO SUPERPAVE E ANOMALIAS NO PAVIMENTO 72

4.3.1. ESPECIFICAÇÕES DOS BETUMINOSOS NO SUPERPAVE 72

4.3.2. AS ANOMALIAS E OS TESTES 75

4.3.2.1. Deformações Permanentes 75

4.3.2.2. Fissuração por Fadiga 77

4.3.2.3. Fissuração por baixas temperaturas 78

4.3.2.4. Outras especificações 79

4.4. CONCLUSÃO – MÉTODO SUPERPAVE 81

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 82

5.1. MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO 82

5.1.1. MÉTODO EUROPEU 82

5.1.2. MÉTODO SUPERPAVE 83

BIBLIOGRAFIA 84

ÍNDICE DE TABELAS.

Tabela 1 - Características e requisitos para as misturas betuminosas (Fonte: Quadro 4 da NP EN 13108-1:2008 [1]) 10

Tabela 2 – Especificações para betumes de pavimentação para as classes de penetração entre 20x0,1mm e 220x0,1mm (Fonte: Quadro 1A da EN 12591:2010 [4]) 25

Tabela 3 – Especificações dos betumes de pavimentação para classes de penetração entre 20x0,1mm e 220x0,1 mm (Fonte: Quadro 1B da EN12591:2010 [4]) 25

Tabela 4 – Especificações de betumes de pavimentação para classes de penetração entre 250x0,1 mm e 900x0,1 mm (Fonte Quadro 2A da NP12591:2010 [4]) 26

Tabela 5 – Especificações de betumes de pavimentação para classes de penetração entre 250x0,1mm e 900x0,1 mm (Fonte: Quadro 2B da EN 12591:2010 [4]) 26

Tabela 6 – Especificações para betumes de pavimentação – Betumes moles, betumes designados e especificados pela sua cinemática a 60º C (Fonte: Quadro 3A da EN 12591:2010 [4]) 26

Tabela 7 – Especificações para betumes de pavimentação – Betumes moles, betumes designados e especificados pela sua viscosidade cinemática a 60ºC (Fonte: Quadro 3B da EN 12591:2010 [4]) 27

Tabela 8 - Especificações para os betumes duros de pavimentação (Fonte: Traduzido do Quadro 1 da EN 13924:2006 [5]) 29

Tabela 9 – Propriedades Informativas (Fonte: Traduzido do Quadro 1B do Anexo B da EN13924:2006. [5]) 31

Tabela 10 – Especificações para betumes modificados com polímeros. (Fonte: Traduzido do Quadro 1A FprEN 14023. [6])....34

Tabela 11 – Especificações para Betumes Modificados com polímeros. (Fonte: Traduzido do Quadro 1B FprEN 14023. [6]) 34

Tabela 12 – Especificações para Betumes Modificados com polímeros. (Fonte: Traduzido do Quadro 1C da FprEN 14023. [6]) 34

Tabela 13 – Resumo de requisitos versus métodos de ensaio para as Normas Europeias 35

Tabela 14 – Sistema de Avaliação da Conformidade para a marcação CE (Fonte: site do LNEC [38])....42

Tabela 15 - Quadro ZA.1.1 – Cláusulas relevantes para betumes de pavimentação dos Quadros 1A, 1B, 2A e 2B (Fonte NP12591:2010 [4]) 44

Tabela 16 - Quadro ZA.1.2 – Cláusulas relevantes para betumes de pavimentação dos Quadros 3A e 3B (Fonte NP12591:2010 [4]) 45

Tabela 17 - Quadro ZA.3 – Atribuição de tarefas para a verificação da conformidade (Fonte NP12591:2010 [4]) 46

Tabela 18 – Requisitos das Propriedades dos Betumes de Pavimentação: (Fonte Caderno de Encargos Tipo Obra – Estradas de Portugal, EPE (Fev.2009) [13])....49

Tabela 19 - Requisitos das Propriedades dos Betumes Duros de Pavimentação: (Fonte Caderno de Encargos Tipo Obra – Estradas de Portugal, EPE (Fev.2009) [13])....50

Tabela 20 - Requisitos das Propriedades dos Betumes Modificados com Polímeros: (Fonte Caderno de Encargos Tipo Obra – Estradas de Portugal, EPE (Fev.2009) [13]) 51

Tabela 21 – Quadro 14.00.3.3 - Ensaios em Ligantes Betuminosos (Fonte: Caderno de Encargos Tipo Obra – Capitulo 14.00 [40]) 52

Tabela 22 – Quadro 14.00.4.03.0-2-Ligantes Betuminosos (Fonte: Fonte: Caderno de Encargos Tipo Obra – Capitulo 14.00 [40]) 54

Tabela 23 – Propriedades baseadas no desempenho (Fonte: Traduzido do Quadro do CEN/TR 15352:2006 [44]) 56

Tabela 24 – Condições de envelhecimento dos betumes para os ensaios do SUPERPAVE (Fonte*: Asphalt Institute (1997)* [47]) 62

Tabela 25 – Ensaios de Envelhecimento sobre Betumes preconizados no Superpave 63

Tabela 26 - Ensaios de Mecânicos sobre Betumes preconizados no Superpave 64

Tabela 27 – Especificação dos Ligantes Betuminosos segundo o SUPERPAVE (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]) 80

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1 – Datas de entrada em vigor da marcação obrigatória CE (Fonte: Fórum de Inovação e Desenvolvimento [3]) 2

Figura 2 - Datas temporais de entrada em vigor da marcação obrigatória CE (Fonte: Fórum de Inovação e Desenvolvimento [3]) 3

Figura 3 – Ensaio de Penetração de betumes (Fonte: "Conceitos, constituição, propriedades e classificação." Acção de formação da GALP) [16] 15

Figura 4 – Exemplo de um Penetrometro (Fonte: Traduzido de http://www.northstonematerials.com/about-us/education/coating-process-and-coated-products [17]) 15

Figura 5 - Ensaio de Temperatura de Amolecimento (EN 1427) (Fonte: Isabel Eusébio (2007) [20]) 16

Figura 6 - Ensaio de resistência ao endurecimento sob efeito do calor e do ar (EN 12607-1) (Fonte: Isabel Eusébio (2007) [20]) 17

Figura 7 – Ensaio da Determinação do ponto de Fragilidade de Fraass (Fonte: "The Shell Bitumen Handbook. [24]) 18

Figura 8 - Representação esquemática de um viscosímetro rotativo utilizado na determinação da viscosidade dinâmica (Fonte: Pedro Silva – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Química [26]) 19

Figura 9 – Viscosímetros habitualmente utilizados na determinação da viscosidade cinemática de betumes (Fonte: Pedro Silva – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Química [26]) 20

Figura 10 – Exemplo de Ensaio da Temperatura de Inflamação, pelo vaso aberto de Cleveland (Fonte: "Pavimentação Asfáltico - Formação Básica para Engenheiros" [29]) 21

Figura 11 – Ensaio de Solubilidade (Fonte: http://www.humboldtmfg.com/c-5-p-395-id-5.html [31]) 21

Figura 12 – Ligantes Betuminosos 22

Figura 13 – Consistência versus Temperatura (Fonte: Les enrobés bitumineux: formulation, fabrication, mise em place. [37]) 36

Figura 14 – Gráfico da relação entre o logaritmo da penetração e temperatura 37

Figura 15 – Gráfico do ligante betuminoso 30/45 39

Figura 16 – Exemplo do gráfico BTDC (Fonte: *Shell Bitumen Handbook* [23]) 40

Figura 17 – Exemplo da informação e valores da marcação CE (Fonte: EN12591:2010 [4]) 47

Figura 18 – Alguns exemplos de danos em pavimentos 57

Figura 19 – Propriedades visco elásticas do Ligante Betuminoso. (Fonte: Tradução de *Superpave Fundamentals* [45]) 58

Figura 20 - Representação gráfica da pressão laminar entre duas placas. 59

Figura 21 – Relação entre a temperatura e a consistência de três betumes diferentes. (Fonte: Traduzido de *Asphalt Institute (1997)* [47]) 61

Figura 22 – Fases de vida de um Betume (Fonte: Traduzido de *The Shell Bitumen Handbook*.[24]) 62

Figura 23 – Fases de envelhecimento – SUPERPAVE (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 63

Figura 24 – Ensaio de RTFOT (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48]) 65

Figura 25 – Exemplo de equipamento usado no ensaio PAV (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48]) 65

Figura 26 – Ensaio RV - Rotational Viscometer (Fonte: http://training.ce.washington.edu /WSDOT/Modules/03_materials/03-3_body.htm#dynamic_viscosity [49]) 66

Figura 27 – Exemplo de equipamento usado no Ensaio DSR (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48]) 67

Figura 28 – Movimento produzido no Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [44]*)* 67

Figura 29 – Material Elástico / Viscoso - Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 68

Figura 30 - Material Visco elástico - Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 69

Figura 31 – Deformações temporária \ permanente, Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 69

Figura 32 – Exemplo do equipamento usado no Ensaio BBR (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48]) 70

Figura 33 – Aspectos do desenvolvimento do Ensaio de tracção directa (DTT) (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48]) 71

Figura 34 – Exemplo - Temperatura versus especificações do SUPERPAVE – (Fonte: *Superpave Fundamentals* [45]*)* 73

Figura 35 – Visão geral das especificações e métodos usados no SUPERPAVE (Fonte: *Workshop: Federal Highway Adminstration* [49]*)* 74

Figura 36 – Gráfico de confiança – 7 dias da temperatura máxima (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 75

Figura 37 – Especificações dos requisitos do Superpave para o controlo das deformações permanentes do pavimento (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 76

Figura 38 – Exemplo de cálculo do coeficiente de Rigidez para temperaturas altas (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 76

Figura 39 – Especificações dos requisitos do Superpave para controlo da fissuração por fadiga (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 77

Figura 40 – Exemplo de cálculo do coeficiente de Rigidez para temperaturas intermédias (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 78

Figura 41 – Especificações dos requisitos do Superpave para controlo das temperaturas baixas *(*Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45]*)* 78

Figura 42 – Resumo das Especificações e Ensaios do Método Superpave (Fonte: Traduzido de *Workshop: Federal Highway Adminstration* [49]*)* 81

Figura 43 – Exemplo da classificação do ligante betuminoso no Método Superpave.....83

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - Parâmetro

b - Parâmetro

G* - Módulo complexo

I_p - Índice de penetração

K - Parâmetro

P – Penetração

v - Velocidade

v_o – Velocidade

δ - Ângulo de fase

γ – Velocidade de deformação

η - Viscosidade dinâmica

$\eta_{60ºC}$ - Viscosidade dinâmica a temperatura a 60ºC

ν - Viscosidade cinemática

ρ - Densidade

τ – Tensão de corte ou binário

ACVTL - *Asphalt concrete for very thin layers*

AENOR - *Asociación Española de Normalization Y Certificación*

BBR - *Bending Beam Rheometer*

BiTVal - *Bitumen Test Validation*

BTCD - *Bitumen Test Data Chart*

CE - Conformidade Europeia

CEN - Comité Europeu de Normalização

CPF ou FPC – Controlo de Produção em Fábrica

CT – Comissões Técnicas Portuguesas de Normalização

DAV - *Date of Availability*

DOW - *Date of Withdrawal*

DPC - Directiva dos Produtos de Construção

DSR - *Dynamic Shear Rheometer*

DTT - *Direct Tension Test*

EAPA - *European Asphalt Pavement Association*

E.F.T.A. - *European Free Trade Association*

EN - Norma Europeia

EP – Estradas de Portugal

EU – *European Union*

EUA - Estados Unidos da América

FEHRL - *Forum of European National Highway Research Laboratories*

INIR - Instituto Infra – Estruturas Rodoviárias

IPQ - Instituto Português da Qualidade

ITT - Ensaio Inicial de Tipo

NP - Norma Portuguesa

NPD - *No Performance Determined*

NP EN - Normas Harmonizadas

NR - *No Requirement*

ONN - Organismo Nacional de Normalização

ONS - Organismo de Normalização Sectorial

PAV - *Pressure Aging Vessel*

PEN – Penetração no betume

Pen $_{25ºC}$ - Penetração no betume á temperatura de 25ºC

PG - *Performance grades*

RTFOT - *Rolling thin film oven test*

RV - *Rotational Viscometer*

SHRP - *Strategic Highway Research Program*

T_{ab} - Temperatura anel e bola

TBR - *To Be Reported*

TFOT - *Thin Film Oven Test*

TG - *Task Groups*

WG - Working Groups

TERMOS E DEFINIÇÕES.

Betão betuminoso: Mistura betuminosa de composição granulométrica contínua ou descontínua formando uma estrutura perfeitamente imbricada.

Betume: Material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto, ou presente no asfalto, que é completamente ou quase todo solúvel em tolueno e muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente.

Betume de pavimentação: Ligante utilizado para envolver o agregado mineral, para o fabrico de misturas betuminosas tradicionais, a usar principalmente na construção, na conservação de pavimentos e em trabalhos hidráulicos.

Betume duro de pavimentação: Ligantes utilizados no fabrico de misturas betuminosas de alto módulo a usar principalmente na construção e na conservação de pavimentos.

Betume modificado: Ligante betuminoso cujas propriedades reológicas foram modificadas durante o fabrico ou através da utilização de um ou mais agentes químicos.

Betume modificado com polímeros: Ligante modificado em que o modificador utilizado é um ou mais polímeros orgânicos

Betuminoso: Adjectivo aplicado a ligantes e misturas de ligantes e agregados contendo betume.

Ligante betuminoso: Material adesivo contendo betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado, oxidado, fluidificado, fluxado ou emulsionado.

Líquido Newtoniano: Líquido cuja viscosidade é independente da taxa de corte.

Misturas betuminosas: Misturas compostas por uma mistura de partículas de agregados, cujos tamanhos variam entre 0 e D (mm) e um ligante betuminoso. Podem ser utilizados aditivos para aumentar o desempenho. A mistura final após compactação e arrefecida apresenta determinadas características volumétricas, mecânicas, funcionais e de desempenho, consoante as aplicações visadas.

Norma: Uma especificação técnica aprovada por um organismo de normalização reconhecido para aplicação repetida ou continuada, cuja observância não é obrigatória e que se enquadra no âmbito de uma das seguintes categorias, de Norma Internacional, Norma europeia ou Norma nacional.

Pavimento: Estrutura composta por uma ou mais camadas destinadas a permitir a circulação de tráfego sobre o terreno. As várias camadas constituintes dos pavimentos podem ser estruturais, de desgaste, de ligação, de regularização e camada base. As várias camadas são aplicadas numa única operação.

Penetração: Consistência expressa pela profundidade, em décimas de milímetro, a que uma agulha normalizada penetra verticalmente num provete do material em condições específicas de temperatura, carga e duração de aplicação da carga.

Solubilidade: Porção de material que é solúvel num solvente especifico.

Temperatura de amolecimento: Temperatura à qual o material nas condições de referência do ensaio atinge uma consistência específica.

Viscosidade cinemática: Razão entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica de um líquido, à temperatura de determinação da viscosidade.

Viscosidade dinâmica: Razão entre a tensão de corte aplicada e o gradiente de velocidade de deformação

.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. APRESENTAÇÃO DO TEMA E SEU ENQUADRAMENTO

A comunidade europeia adoptou a Directiva n.º 89/106/CEE do Concelho de 21 de Dezembro de 1988, com a alteração efectuada pela directiva 93/68/CEE, em 22 de Junho de 2003, que tem como objectivo o desenvolvimento de normas harmonizadas de produtos que permitam a atribuição da marcação CE de conformidade, com vista à supressão das barreiras técnicas. A transposição destas Directivas para o direito nacional foi realizada através do Decreto-Lei n.º 113/93, de 10 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 ao fogo;
- Higiene, saúde e ambiente;
- Segurança na utilização;
- Protecção contra o ruído;
- 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.

Conforme é referido pelas Notas Técnicas Informativas do INIR [2] (Instituto Infra – Estruturas Rodoviárias) - "O ponto inicial do processo de normalização é a necessidade de uma compreensão mútua entre os fabricantes do produto e os seus clientes no que diz respeito aos aspectos técnicos dos produtos que é necessário incluir nas transacções comerciais".

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.

No âmbito de implementação da Marcação CE em ligantes betuminosos, foi criada uma comissão técnica no CEN (Comité Europeu de Normalização – CEN/TC 336), que tem como objectivos:

- Desenvolver padrões para eliminar as barreiras do comércio entre os países europeus, a pedido dos usuários / aplicadores, produtores e autoridades;
- Desenvolver normas europeias necessárias para referência;
- Desenvolver padrões de desempenho relacionados, para ligantes betuminosos;

- Desenvolver normas harmonizadas em conformidade com os requisitos Directiva Produtos de Construção.

As datas de entrada em vigor da obrigatoriedade da marcação CE dos ligantes betuminosos são apresentadas na figura 1.

CEN/TC 336 Programa de Trabalhos

CE Marcação obrigatória

EN Especificações de produtos		DAV	Data de aplicação	DOW
EN 13808	*Emulsões betuminosas catiónicas*	05 – 2005	01-01-2010	01-01-2011
EN 14023	*Betumes modificados com polímeros*	10 – 2005	Não planeada	Não planeada
EN 13924	*Betumes duros para pavimentação*	05 – 2006	01-01-2010	01-01-2011
EN 12591rev	*Betumes para pavimentação*	03 - 2007	01-01-2010	01-01-2011
prEN 15322*	*Betumes fluxados e fluidificados*	Not planned *	01-06-2010	01-01-2011

DAV – Date of Availability
DoAP – Date of Aplication
DOW – Date of Withdrawal

Figura 1 – Datas de entrada em vigor da marcação obrigatória CE (Fonte: Fórum de Inovação e Desenvolvimento [3])

No âmbito da harmonização, foram definidas datas para a entrada em vigor das Normas Europeias harmonizadas:

- DAV (*Date of Availability*) – Data em que o texto definitivo, nas línguas oficiais, de um publicação CEN/CENELEC aprovada, é distribuído pelo Secretariado Central do CEN
- DOA (*Data Of latest Announcement*) – Última data em que uma EN é anunciada a nível de um país EU (ONN)
- DOP (*Data Of latest Publication*) – Última data em que uma EN é implementada a nível nacional, numa língua oficial do CEN ou na língua do país
- DOW (*Data Of Withdrawal*) – Data em que são retiradas do acervo normativo dos países EU (ONN) todas as normas nacionais que conflituam com a EN.

No caso específico de uma Norma Europeia harmonizada, as datas para a entrada em vigor da obrigatoriedade da marcação CE são conforme figura 2.

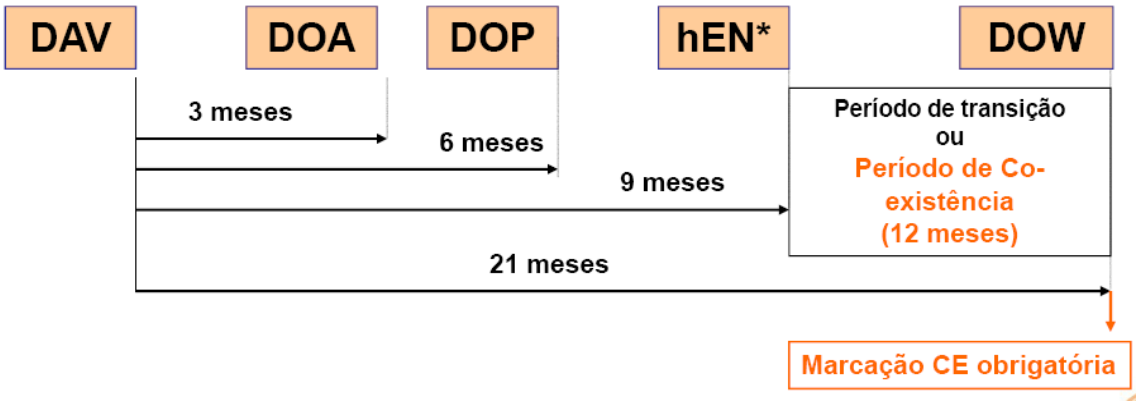


Figura 2 - Datas temporais de entrada em vigor da marcação obrigatória CE (Fonte: Fórum de Inovação e Desenvolvimento [3])

A estrutura da comissão técnica integra 5 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 e WG3), Betumes modificados (WG4) e betumes industriais (WG5).

Dentro de cada WG são criados novos grupos (*TG-Task Groups*) que se dedicam aos diferentes aspectos para desenvolver as normas com base no desempenho. No caso do WG1 – ligantes betuminosos para a pavimentação, existem cinco TG, sendo os TG1, TG2 e TG3 respeitantes aos métodos de ensaios (nomeadamente deformação, fendilhamento e durabilidade), o TG4 diz respeito à qualidade e o TG5 às especificações.

O mandato para a Directiva dos Produtos de Construção (Mandato M/124) exige que as normas devem ser expressas tanto quanto possível em termos de desempenho. A maior parte das normas existentes são baseadas em métodos empíricos, portanto não cumprem com o especificado no Mandato, por isso o CEN/TC336 está em processo de transição de modo a que todas as normas harmonizadas se baseiem em métodos de desempenho.

As especificações baseadas no desempenho demorarão o seu tempo a ser totalmente implementadas em todos os estados membros da Europeus, contudo o processo de normalização está garantido faltando apenas a experiência necessária para se caminhar para o processo baseado no desempenho.

Em Portugal o processo é representado e está a ser trabalhado pela Comissão Técnica Portuguesa (CT153) que foi criada em 11 de Fevereiro de 2002, pelo IPQ – Instituto Português da Qualidade (ONN – Organismo Nacional de Normalização) a pedido do então Instituto das Estradas de Portugal (ONS – Organismo de Normalização Sectorial/ONS-EP), agora EP – Estradas de Portugal, E.P.E. (ONS-EP) As CT são órgãos técnicos que visam a elaboração de normas portuguesas e a emissão de pareceres normativos em determinados domínios e nas quais participam, em regime de voluntariado, entidades interessadas nas matérias em causa, traduzindo, tanto quanto possível, uma representação equilibrada dos interesses socioeconómicos abrangidos.

Dentro da CT153, foram criados dois grupos de trabalho, designados por SC1 - Especificações e SC2 – Métodos de Ensaio, cujos seus objectivos são analisar e aprovar as especificações das Normas Europeias, redigir Anexos Nacionais informativos sobre as classes de produtos comercializados em Portugal e a forma de ter as especificações. O grupo de trabalho SC1 têm como objectivo analisar as especificações e elaborar as Normas Portuguesas enquanto SC2 analisa e aprova os métodos de ensaio

das Normas Europeias, redige documentos informativos sobre as condições e procedimentos de ensaio e elabora as Normas Portuguesas.

1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA

O presente trabalho pretende contribuir para uma agregação, análise e aprofundamento da informação disponível sobre a actual normalização dos ligantes betuminosos, legislação e desenvolvimentos ao longo dos últimos anos

A análise efectuada assentou em dois vectores principais:

- a evolução das Normas Europeias relativamente à definição das especificações e/ou requisitos bem como os métodos de ensaio associados, ferramentas essenciais para a interpretação das características e propriedades dos ligantes betuminosos;

- a harmonização e a uniformização das Normas Europeias, nomeadamente no que se refere ao caminho adoptado no passado, presente e a adoptar no futuro, bem como dos objectivos pretendidos para a necessidade de uniformizar métodos de ensaio que permitam uma escolha mais correcta dos ligantes betuminosos, constituintes das misturas betuminosos, criando assim estradas mais seguras, mais duradouras e mais económicas.

Este trabalho inicia-se com uma análise sintetizada das misturas betuminosas e a sua normalização, para deste modo permitir estudar os ligantes betuminosos, concretamente os betumes de pavimentação, os betumes de pavimentação duros e os betumes de pavimentação modificados, normalizados, respectivamente, pelas Normas Europeias EN 12591 [4], EN 13924 [5] e EN 14023 [6].

Assim sendo, é realizada uma análise às referidas Normas Europeias e aos respectivos ensaios. Como se verá, apesar do processo de normalização estar praticamente concluído, ainda falta algum histórico e experiência que permitam melhor especificar os betumes em ensaios baseados no desempenho dos ligantes betuminosos, prevendo-se e desejando-se que tal venha a concretizar-se num futuro próximo.

1.3. ESTRUTURA GERAL

Para uma melhor compreensão e análise do tema desenvolvido nesta tese de dissertação, o trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo o capítulo inicial onde se pretende apresentar os objectivos do trabalho e fazer um breve enquadramento do tema desenvolvido.

Apesar de o tema ser relacionado com ligantes betuminosos, no capítulo 2 é feita uma breve referência ao ponto de situação das Normas Europeias relativas às misturas betuminosas, para deste modo ser feita a introdução para os ligantes betuminosos usados, parte integrante dessas mesmas misturas, e que deverão estar de acordo com as respectivas Normas, concretamente as Normas Europeias, EN 12591 [4], EN 13924 [5] e EN 14023 [6], respectivamente para betumes de pavimentação, betume duro e betumes modificados.

No capítulo 3 é feita uma análise às Normas Europeias dos ligantes betuminosos, uma introdução historial ao desenvolvimento das Normas Europeias, com o objectivo da normalização conforme definido pelo Comité Europeu de Normalização, é destacado o facto da transição das Normas com o intuito de definir novas especificações mais baseadas no desempenho, conforme as exigências da Directiva dos Produtos de Construção. São abordados e especificados os vários ensaios dos ligantes betuminosos, são explicadas e resumidas as Normas Europeias e enquadradas nas directrizes do Comité Europeu de Normalização, bem como da avaliação de conformidade dos betumes de

pavimentação, betumes duros de pavimentação e betumes modificados dos requisitos definidos nas respectivas Normas Europeias, demonstradas através dos ensaios do tipo inicial e controlo de produção em fábrica, bem como as condições para a marcação CE do produto.

Neste capítulo será ainda desenvolvida uma análise dos quadros presentes nas Normas Europeias relativos às especificações dos betumes, em particular as relações existentes entre, a penetração, a temperatura e a viscosidade dos betumes, como se interligam e influenciam as características dos ligantes betuminosos

No capítulo 4 são analisados os ensaios e características desenvolvidas pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), nos EUA, por se tratar de um método baseado em requisitos relacionados essencialmente com o desempenho, com base numa variedade de climas e temperaturas do pavimento, para deste modo efectuar uma comparação com as directrizes seguidas pela normativa europeia. Neste enquadramento é analisado o método Superpave com o objectivo de analisar a convergência ou divergência das especificações e métodos de ensaio, relativamente àqueles definidos e especificados nas Normas Europeias Harmonizadas.

As propriedades físicas requeridas para os ligantes betuminosos são as mesmas para todas as classes de ligantes, mas a temperatura a que essas propriedades devem ser alcançadas são determinadas pelas condições climáticas no local da pavimentação. Estas e outras características do método são analisadas neste capítulo. Por curiosidade importa referir que a origem do nome deste método é um acrónimo da frase em inglês, "***SU**perior **PER**forming Asphalt **PAVE**ments*".

Finalmente, no capítulo 5, é realizada uma comparação de metodologia e de conceito do método seguido pela Europa, concretamente pelas Normas Europeias e o método Superpave.

2. MISTURAS BETUMINOSAS

2.1. NORMAS EUROPEIAS E ESPECIFICAÇÕES

No âmbito da marcação CE foram desenvolvidas normas Europeias para as misturas betuminosas, nomeadamente a Norma Europeia EN13108. Neste capítulo vamos fazer o ponto de situação breve, e analisar a situação das misturas betuminosas em Portugal relativamente às Normas Europeias existentes e uma resumida explicação das mesmas, para então no capítulo seguinte abordarmos os ligantes betuminosos.

A norma EN13108 (*Bituminous mixtures – Material specifications*) é composta por diversas partes e integra as especificações para os 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 EN13108 é composta por requisitos gerais, requisitos empíricos e requisitos fundamentais. Esses requisitos que correspondem às propriedades da mistura betuminosa são divididos em classes de acordo com os valores das propriedades em causa [1].

A maior parte das misturas betuminosas aplicadas em Portugal encontram-se enquadradas pela Norma Europeia NP EN 13108-1:2008 Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Betão betuminoso [1], EN 13108-2:2006 *Bituminous Mistures – Material Specification Part 2 – Asphalt concrete for very thin layers (ACVTL)* [7], EN 13108-6:2006 *Bituminous Mistures – Material Specification Part 6 – Mastic asphalt* [8], EN 13108-7:2006 *Bituminous Mistures – Material Specification Part 7 – Porous asphalt* [9] e EN 13108-8:2005 *Bituminous Mistures – Material Specification Part 8 – Reclaimed asphalt* [10].

As EN 13108-20 [11] e EN13108-21 [12], definem os critérios a exigir aos materiais empregues e o seu sistema de produção (Ensaios Tipo Inicial e Controlo de Produção em Fabrica).

As Normas Portuguesas NP EN 13108-20:2008 Misturas betuminosas – Especificações dos materiais - Parte 20: Ensaios de Tipo [11] e NP EN 13108-21:2008 Misturas betuminosas – Especificações dos materiais - Parte 21: Controlo da Produção em Fábrica [12], são parte integrante do sistema de avaliação da conformidade das misturas betuminosas.

2.2. REQUISITOS DA NORMA PORTUGUESA EN13108-1

Iremos apenas abordar a NP EN 13108-1:2008 [1], por ser a mais representativa dos materiais empregues em Portugal.

Os requisitos que definem as misturas betuminosas, têm assim duas hipóteses de actuação, ou são definidas por requisitos empíricos, em que a fórmula da mistura betuminosa deve satisfazer os requisitos gerais e os requisitos empíricos, ou da mesma forma são definidos pelos requisitos fundamentais, em que a fórmula da mistura betuminosa deve satisfazer os requisitos gerais e os requisitos fundamentais.

Os requisitos gerais são:

- Granulometria e composição

- Porosidade
- Revestimento e homogeneidade
- Sensibilidade á água
- Resistência à abrasão provocada por pneus pitonados
- Resistência à deformação permanente
- Reacção ao fogo
- Resistência aos combustíveis para aplicação em aeroportos
- Resistência aos fluidos descongelantes para aplicação em aeroportos
- Temperatura de mistura
- Durabilidade

Os requisitos empíricos são:

- Composição, granulometria, percentagem de ligante e aditivos
- Valores Marshall para aplicação em aeroportos
- Vazios preenchidos com betume
- Vazios na mistura d agregados
- Porosidade após 10 giros

Os requisitos fundamentais são:

- Granulometria
- Percentagem de ligante
- Rigidez
- Resistência à deformação permanente num ensaio de compressão triaxial
- Resistência a fadiga

2.3. MARCAÇÃO CE

A marcação CE é uma marca de qualidade que indica que os produtos estão em conformidade com as normas harmonizadas.

No Anexo ZA da norma europeia EN 13108:2008 Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Betão betuminoso [1], encontram-se definidas as cláusulas para a avaliação da conformidade, incluindo o Controlo de Produção em fábrica e as normas em que se baseiam e o Guia para a marcação CE, assim como os Ensaios do Tipo Inicial.

O Controlo de Produção em Fabrica é um sistema de qualidade que obriga o fabricante a estabelecer um Plano de Qualidade concreto com uma periodicidade que depende, entre outros factores, do número de conformidades obtidas [1]

Enquanto o Ensaio do Tipo Inicial, define e inclui um mínimo de ensaios de comprovação da mistura, assim como os seus componentes.

O sistema de conformidade empregado no caso da Directiva da Construção (89/106/CE) é o sistema 2+, em que as tarefas dos fabricantes são:

- Ensaio inicial do produto
- Controlo de Produção da Fábrica
- Ensaios de amostras, recolhidas em fábrica de acordo com um plano determinado de ensaios

As tarefas do Organismo notificado são:

- Inspecção inicial do FPC
- Fiscalização contínua do FPC

Documentos que devem incluir a marcação CE:

- Declaração de conformidade do fabricante acompanhado do Certificado de controlo de produção em Planta

O Anexo A da EN 13108-20:2008 [11] faz o resumo das propriedades e dos Métodos de Ensaio, para os materiais constituintes, em que os dados a ensaiar são fornecidos para demonstrar a conformidade com os requisitos especificados.

2.4. ABORDAGENS SEGUIDAS EM PORTUGAL

Segundo o descrito na Norma Europeia EN 13108-1:2008 Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Betão betuminoso [1], o seu objectivo é especificar o betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais baseadas no desempenho. No entanto, devido à grande diferença de experiência e conhecimento com as especificações fundamentais para este tipo de mistura na Europa, torna-se difícil escolher apenas uma abordagem.

Assim, na EN 13108-1, são definidas duas abordagens para definir o betão betuminoso: a primeira abordagem, a empírica, define o betão betuminoso em termos de "receitas" de composição e requisitos para matérias constituintes, em associação com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho; a segunda abordagem, a fundamental, define o betão betuminoso em termos de requisitos baseados no desempenho, em associação com reduzida prescrição da composição e dos materiais constituintes [1].

A abordagem seguida em Portugal é a empírica, conforme definida no Anexo Nacional da NP EN 13108-1 e segundo os requisitos da mesma, recomenda, devido ao actual estado da arte em Portugal, a especificação de betão betuminoso na abordagem empírica, prevendo-se que Portugal adquira brevemente experiência na abordagem fundamental.

Conforme já referido, a abordagem empírica define o betão betuminoso em termos de parâmetros de composição e requisitos para os materiais constituintes, combinados com os requisitos baseados em ensaios relacionados com o desempenho (Tabela 1).

As propriedades fundamentais do betão betuminoso dependem de um conjunto de factores, uns ligados às solicitações e outros associados à composição das misturas. O desempenho das misturas é condicionado pela acção do tráfego e da temperatura. Assim, os resultados a que se chega em laboratório, para um determinado tipo de ensaio dependem das condições de ensaio adoptadas, nomeadamente temperatura, frequência, tipo de carregamento e estado de tensão

O ligante para as misturas especificadas pela abordagem empírica e pela fundamental deve ser betume de pavimentação, betume modificado ou betume duro de pavimentação, os quais estão deverão estar em conformidade com as Normas Europeias respectivas. O betume de pavimentação com a EN 12591, o betume modificado com a EN 14023 e o betume duro com a EN 13924, das quais serão objecto de análise neste documento.

Houve também que definir os requisitos físicos e químicos para os agregados e para a própria mistura betuminosa de acordo com as novas normas de ensaio e de produto. Esta definição foi efectuada não só com base em resultados de ensaios efectuados, mas sobretudo com base na experiência adquirida com a execução de misturas betuminosas. Opção pela abordagem empírica e manutenção do ensaio

Marshall dado não haver ainda experiência necessária para a abordagem fundamental para recurso a ensaios de desempenho.

Tabela 1 - Características e requisitos para as misturas betuminosas (Fonte: Quadro 4 da NP EN 13108-1:2008 [1])

NP EN 13108-1		Características dos materiais constituintes			Requisitos gerais							Requisitos empíricos	
Capítulo da Norma		4.2	4.4	4.5	5.2.1			5.2.2	5.2.4	5.2.6	5.2.10	5.2.1.2 e 5.3.1.2	5.3.1.3
Designação anterior	Designação actual	Ligante	Mistura betuminosa recuperada	Aditivos	Composição, granulometria e percentagem de ligante	Série de peneiros	D (mm)	Porosidade, Vmin a Vmáx. (%) **(Compactador Impacto 75 pancadas)**[a]	Sensibilidade à água (ITSR) **(Compactador Impacto 75 Pancadas)**[b]	Resistência à deformação permanente (Wheel Tracking) **(60ºC equipamento pequeno, Método B, ao ar, compactador de rolos)**	Temperatura de fabrico da mistura betuminosa	Granulometria (Intervalo % por massa Fuso)	Percentagem em betume, B_{min} (%)
Macadame Betuminoso 0/37,5	AC 32 base ligante (MB)	Tipo e classe a declarar	A declarar	A declarar	A declarar	Série Base + Série 2	31,5	NR	NR	A categoria deve ser declarada	Consoante ligante	Ver Quadro 2 deste Anexo	A declarar (ver secção 5.2 deste Anexo)
Macadame Betuminoso 0/25	AC 20 base ligante (MB)						20	3,0-6,0	A categoria deve ser declarada				
	AC 20 base ligante (MB) AC 20 bin ligante (MB)						20	3,0-6,0					
Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD) AC 20 bin ligante (MBD)						20	3,0-6,0					
Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)						20	2,0-6,0					
	AC 16 reg ligante (MBAM) AC 16 bin ligante (MBAM)						16	2,0-5,0					
Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 reg ligante (BBsb) AC 14 bin. ligante (BBsb)						14	3,0-5,0					
Betão betuminoso C.Desgaste	AC 14 reg. ligante (BB)						14	3,0-5,0					
	AC 14 surf ligante (BB)												
Betão betuminoso Rugoso	AC14 surf ligante (BBr)						14	3,0-6,0					
(micro)Betão betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (BBr)						10	3,0-6,0		NR			

NR - Não requerido.

[a] No caso do AC 10 surf ligante (BBr), para a determinação da porosidade, os provetes serão moldados com recurso ao compactador de impacto e à aplicação de 50 pancadas.

[b] No caso do AC 10 surf ligante (BBr), para efectuar o ensaio da sensibilidade à água, aplicam-se apenas 50 pancadas.

O Caderno de Encargos Tipo Obra (Capítulo 14.03) – Pavimentação – Métodos Construtivos, das Estradas de Portugal, SA [13] abrange um conjunto de misturas betuminosas, em que os requisitos se baseiam na abordagem empírica definida na EN 13108-1, em termos de receitas de composição e de

requisitos para os materiais constituintes, em associação com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho. O conjunto das misturas betuminosas está descriminado na tabela 1, que inclui a nova designação para as mesmas, designação essa que pode conduzir à mesma designação para misturas betuminosas distintas. Por este motivo, foram adicionadas siglas correspondentes ao tipo de mistura em causa, nomeadamente: MB – Macadame Betuminoso; MBAM – Macadame Betuminoso de Alto Módulo; MBD – Mistura Betuminosa Densa; BB – Betão Betuminoso; AB – Argamassa Betuminosa com Betume Modificado; BBr – Betão Betuminoso rugoso; mBBr – (micro) Betão Betuminoso rugoso.

3. LIGANTES BETUMINOSOS

3.1. INTRODUÇÃO

O Comité Europeu de Normalização (CEN) foi formado no início dos anos sessenta e foi incumbido de preparar as regras e normas comuns para serem utilizadas em todos os países membros para garantir a não existência de barreiras ao comércio. Como parte desse programa, foram desenvolvidas novas especificações europeias harmonizadas para os betumes de pavimentação, betumes duros de pavimentação e betumes modificados com polímeros. Esses desenvolvimentos foram realizados em duas fases:

- A primeira Geração (CEN TC19/SC1, desde 1990) - Os grupos de trabalho foram criados para produzir as especificações e métodos de ensaio para os betumes de pavimentação, para uso em toda a Europa. Estas especificações foram baseadas em normas nacionais existentes. As normas de primeira geração incluem, EN 12591 para betumes de pavimentação, EN 13924 para betumes duros e EN 14023 betumes modificados com polímeros, em que as respectivas especificações são baseadas em métodos empíricos.
- A segunda Geração (CEN TC336, desde 2000) – Tem como objectivo satisfazer as exigências da Directiva Produtos de Construção e, produzir especificações harmonizadas, baseadas no desempenho. As novas normas reflectem a contribuição do ligante betuminoso para o desempenho do pavimento de betão betuminoso, com a inclusão de requisitos novos ou já existentes e métodos de ensaio, conforme o caso. As especificações do betume mantêm-se relativamente inalteradas ao longo dos últimos quarenta anos e as especificações agora a ser desenvolvidas representam um avanço muito significativo para todos os envolvidos em toda a Europa. O objectivo é a boa qualidade das estradas de betão betuminoso com um bom desempenho durante todo o período de vida útil. As especificações e normas devem atender as necessidades técnicas e comerciais da indústria de betão betuminoso e seus clientes, e é importante que essas necessidades sejam devidamente identificadas e compreendidas. O objectivo global do sistema de especificação será o de garantir que os ligantes podem ser avaliados numa base justa e comparável, que o ligante apropriado pode ser facilmente seleccionado para uma aplicação particular e que o ligante pode ser usado com confiança na sua qualidade. Idealmente, o sistema deve ser adequado em toda a Europa, para todos os tipos de clima e condições de tráfego, para uma grande variedade de aplicações de pavimentação, e aplicável a todas as categorias de betumes.

As normas europeias EN 12591, 13924 e EN 14023 são baseadas em diversas normas nacionais que existiam quando o processo de harmonização começou, ou seja, em 1990. Estas normas são adoptadas nos chamados cadernos de encargos "empírico" e são, por consentimento comum, razoavelmente bem sucedidas e adequadas para uso na Europa para a maioria dos betumes de pavimentação. O relacionamento de muitos dos métodos de ensaio para o desempenho é bem compreendido, mas não pode ser dito que são directamente relacionados com o desempenho.
Assim, actualmente o processo de normalização europeia em curso está a avançar para o desenvolvimento de novas especificações que estão mais directamente relacionadas com o desempenho e, consequentemente o desenvolvimento de Normas Europeias Normalizadas que

permitem a atribuição da marcação CE de conformidade. Exigirá acordo sobre as propriedades a serem especificadas e os métodos de ensaio para as medir. Também exigirá acordo sobre a melhor forma de diferenciar as especificações para permitir diferentes condições de clima e de tráfego.

As especificações da primeira geração deram origem a três normas europeias:

- Betumes de pavimentação – EN 12591
- Betumes duros – EN 13924
- Betumes Modificados – EN 14023

Os testes existentes são essencialmente empíricos, mas respondem aos requisitos do CEN que são:

- Consistência na temperatura de serviço elevada (ponto de amolecimento e viscosidade dinâmica a 60ºC)
- Consistência na temperatura de serviço intermédio (penetração)
- Durabilidade (envelhecimento a curto prazo)

Propriedades adicionais, tais como viscosidade a altas temperaturas (135º) relacionadas com o manuseamento e aplicação, ponto de ruptura Fraass (fendilhamento a baixas temperaturas) e segurança no manuseamento (ponto de inflamação), mostram a ligação para o desempenho.

As especificações da segunda geração, que estão em fase de desenvolvimento, são mais relacionadas com o desempenho. São igualmente mais complexas de definição, uma vez que existem muitos factores que influenciam a relação dos requisitos para uma estrada segura, confortável e de superfície durável com as propriedades dos ligantes betuminosos medidas em laboratório. Esses factores incluem a construção, propriedades da mistura betuminosa, estrutura do pavimento e características da superfície.

Segundo o Eurobitume (Associação Europeia de Betumes) e, especificamente o trabalho apresentado na 8ª Conferência dos Pavimentos Asfálticos na África do Sul, o caminho a seguir para a definição das especificações baseadas no desempenho, deve basear-se nos seguintes requisitos [14]:

- Definir as principais características de desempenho para o pavimento e mistura betuminosa
- Identificar as propriedades dos ligantes relacionados com essas características
- Identificar os métodos de ensaio dos ligantes para medir essas características.

3.2. ENSAIOS DOS LIGANTES BETUMINOSOS

Os ensaios usados para caracterizar os ligantes betuminosos são baseadas em métodos de ensaio tradicionais e não em métodos baseados no desempenho conforme referido no ponto anterior, mas que devido a sua simplicidade, são largamente usados:

- Determinação da penetração com agulha (EN 1426) [15]:

  Este ensaio permite determinar a consistência dos betumes e dos ligantes betuminosos por meio de uma agulha de referência que penetra verticalmente numa amostra de ligante, segundo condições perfeitamente definidas. (ver Figura 3 e Figura 4)

  As condições operatórias são definidas da forma seguinte:

  - Penetração inferior ou igual a 330x0,1 mm:
    - Temperatura de ensaio, 25 ºC
    - Carga aplicada, 100g
    - Duração da carga, 5s

- Penetração superior a 330x0,1 mm:
  - Temperatura do ensaio, 15 ºC
  - Carga aplicada e duração da aplicação idênticas ao anterior.

O resultado da medição é a média de três penetrações realizadas sucessivamente na mesma amostra de ensaio. As três determinações são consideradas como aceitáveis se o desvio entre as determinações não exceder um valor limite dado pela norma. O valor de penetração é a média das três medições, expressa em décimas de milímetro e arredondado ao número inteiro mais próximo. Um exemplo deste ensaio é apresentado na (Figura 3).

Este ensaio permite classificar os betumes quanto à sua consistência. Quanto menor for a penetração, mais duro é o betume e consequentemente mais rígido e mais frágil.

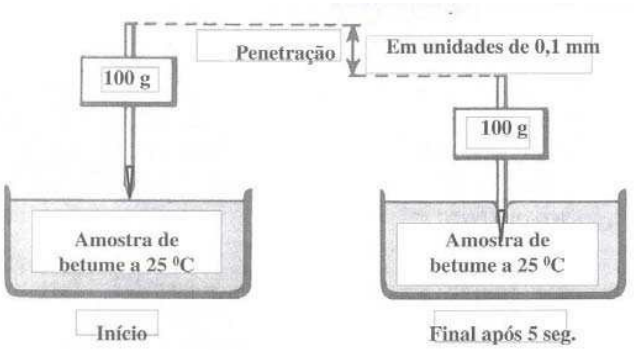


Figura 3 – Ensaio de Penetração de betumes (Fonte: "Conceitos, constituição, propriedades e classificação." Acção de formação da GALP) [16]

A penetração é representativa da consistência do betume às temperaturas normais de serviço.

O teste de penetração com agulha é só por si só, um teste de classificação, não está directamente relacionado com a qualidade do ligante betuminoso. No entanto, a classificação dos betumes através da penetração está indissoluvelmente ligado à composição e à utilização dos materiais betuminosos. Por exemplo, classes elevadas de penetração são preferidas para serem usadas em climas frios, enquanto classes baixas de penetração são usadas em climas quentes.

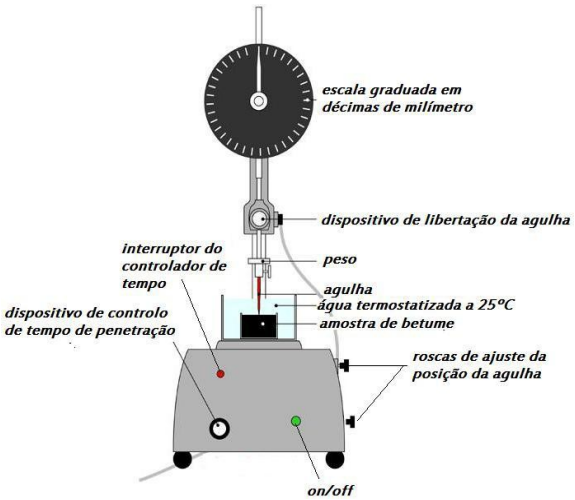


Figura 4 – Exemplo de um Penetrometro (Fonte: Traduzido de http://www.northstonematerials.com/about-us/education/coating-process-and-coated-products [17])

Apesar de a penetração ser um conceito abstracto, apresenta correlações com propriedades intrínsecas do betume, nomeadamente com a viscosidade. Segundo Saal e Koens [18], a relação entre as duas propriedades sob condições *standard* de temperatura e de carga (5s e 100g) é dada pela equação (1):

$$\eta = A\,P^{-b} \qquad (1)$$

onde η e P designam respectivamente a viscosidade dinâmica (em Pa·s) e a penetração (em dmm). Duriez e Arrambide [18] propuseram para o coeficiente A o valor de $8x10^6$ para betumes moles (classe de 180/220) e 10^7 para betumes duros (classe de 40/50). O valor de b é 1,93 para todos os tipos de betume.

- Determinação da temperatura de amolecimento pelo método Anel e Bola (EN 1427) [19]:

  Consiste em determinar a temperatura à qual o betume atinge uma certa consistência nas condições de referência do ensaio. O princípio do ensaio é relativamente simples: dois discos horizontais de betume, moldados em dois anéis, são aquecidos num banho líquido com uma taxa de elevação de temperatura controlada (5 ºC/min), suportando cada um, uma bola de aço. A temperatura de amolecimento corresponderá, portanto, à média das temperaturas às quais os dois discos amolecem suficientemente para permitir que cada bola, envolvida de ligante betuminoso, desça de uma altura de 25,0 mm ± 0,4mm. O líquido de banho é a água, para as temperaturas de amolecimento compreendidas entre 30 ºC e 80 ºC; e a glicerina para os pontos de amolecimento superiores a 80 ºC e até 150 ºC.

  O resultado é dado arredondando a 0,2 ºC próximo da média das duas temperaturas registadas, para as temperaturas de amolecimento inferiores ou iguais a 80 ºC; e arredondando a 0,5 ºC para as temperaturas de amolecimento superiores a 80 ºC.

  Um exemplo deste ensaio é apresentado na Figura 5

  O ponto de amolecimento é representativo da capacidade de um betume para resistir a deformações permanentes a temperaturas de serviço elevadas

  Os betumes de pavimentação mais duros, com menor penetração, têm temperaturas de amolecimento maiores.

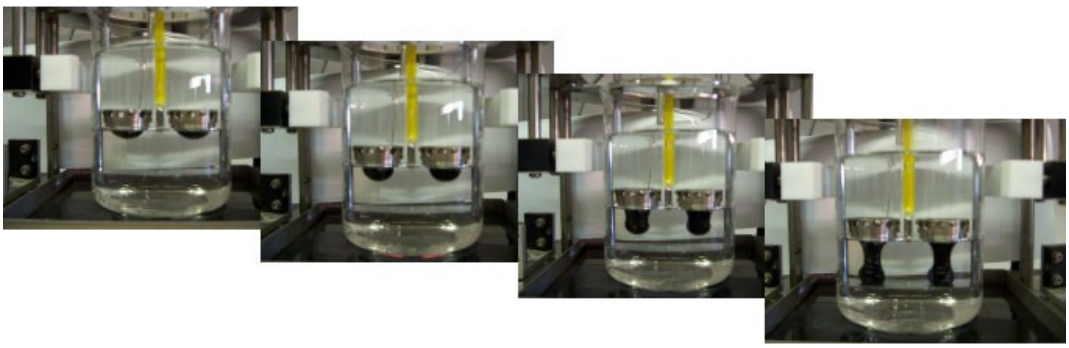


Figura 5 - Ensaio de Temperatura de Amolecimento (EN 1427) (Fonte: Isabel Eusébio (2007) [20])

Os ligantes betuminosos nunca devem atingir a sua temperatura de amolecimento (temperatura de anel e bola), em uso. Os ligantes betuminosos têm uma penetração de 800 x 0,1 mm, na sua temperatura de amolecimento. Segundo Pfeiffer e Van Doormael [21], a relação entre o logaritmo da penetração (dmm) e a temperatura (ºC) é uma recta linear, e pode ser representada pela expressão (2):

$$\log P = AT + K \qquad (2)$$

- Determinação da resistência ao endurecimento sob efeito do calor e do ar – Método RTFOT ou Rolling Thin Film Oven Test (EN 12607-1) [22].

  Este ensaio permite medir os efeitos combinados do calor e do ar sobre uma fina lâmina de betume ou de ligante betuminoso em renovação permanente. Ele simula em laboratório o endurecimento do betume provocado pela oxidação sofrida aquando da mistura na Central de fabrico de misturas betuminosas. Na prática, uma lâmina betuminosa é aquecida num forno, durante um determinado tempo (75 minutos), submetendo-a a um jacto de ar quente (163 ºC) todos os quatro segundos.

  Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir da variação da massa da amostra e da evolução das características do ligante betuminoso, como a penetração e o ponto de amolecimento. A evolução de outras características pode ser igualmente medida. Este ensaio é apresentado na Figura 6.

  O RTFTO ensaio de envelhecimento artificial permite apreciar a resistência ao endurecimento de um betume.

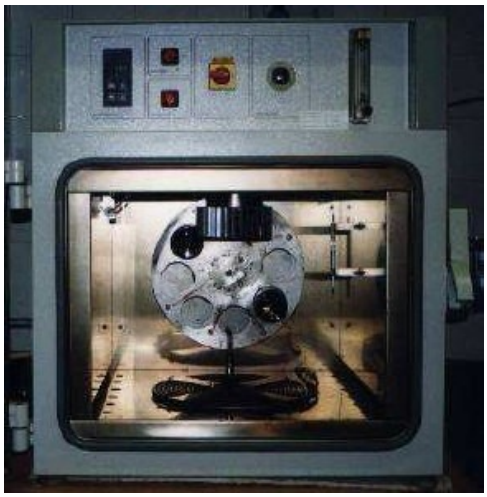


Figura 6 - Ensaio de resistência ao endurecimento sob efeito do calor e do ar (EN 12607-1) (Fonte: Isabel Eusébio (2007) [20])

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.

A perda de massa do betume é resultado do processo de volatilização dos óleos leves. Em algumas situações a massa pode aumentar, causado pelo processo de oxidação. Estes fenómenos serão abordados no capítulo 4

O ensaio RTFOT também é preconizado na metodologia do SUPERPAVE, conforme iremos analisar no capítulo 4.

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 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.

- Determinação do ponto de fragilidade de Fraass (EN 12593) [23]:

O ponto de fragilidade de Fraass representa a temperatura à qual um lâmina de ligante betuminoso de uma determinada espessura e uniforme se fissura de acordo com condições de carga definidas e repetidas, enquanto se dá o arrefecimento da amostra (Figura 7). Este teste permite uma medição da fragilidade dos betumes e dos ligantes betuminosos a baixa temperatura. O ponto de fragilidade Fraass é a temperatura à qual a primeira fissuração aparece. Ela é expressa em graus Célsius e representa a média de duas determinações para as quais o intervalo de temperatura é inferior ou igual a 2 ºC. O resultado é um número inteiro.

Se a penetração e a temperatura de amolecimento de um betume são conhecidas, o ponto de fragilidade de Fraass pode ser previsto, uma vez que será equivalente à temperatura em que o betume tem uma penetração de 1,25 x 0,1 mm

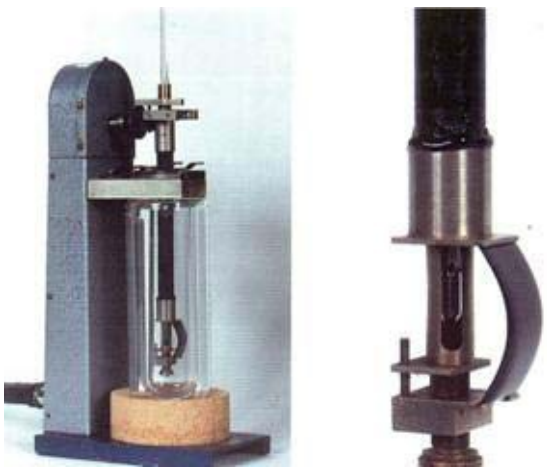


Figura 7 – Ensaio da Determinação do ponto de Fragilidade de Fraass (Fonte: “The Shell Bitumen Handbook. [24])

- Viscosidade Dinâmica (EN 12596) [25]

  Este ensaio é realizado num aparelho denominado viscosímetro rotacional, no qual um dispositivo de rotação (rotor ou fuso) é mergulhado numa amostra de betume liquefeita contida num recipiente metálico termostatizado e com uma geometria cilíndrica (Figura 8). Para que o rotor gire sobre si mesmo com uma velocidade angular fixa, o aparelho tem de aplicar um binário. O binário aplicado pelo viscosímetro rotacional é convertido em viscosidade a partir da seguinte expressão (3):

$$\tau = \eta \gamma \qquad (3)$$

  onde τ e η designam respectivamente, o binário ou tensão de corte (expresso em Pa, no SI) e η a viscosidade dinâmica (expresso em Pa·s, no SI). A velocidade de deformação em corte γ (expressa em s-1 no SI) corresponde ao gradiente de velocidades do fluido estabelecido entre as proximidades do rotor e as proximidades da parede do recipiente, e é dependente da velocidade de rotação, da geometria do rotor e das dimensões do recipiente metálico que contém a amostra

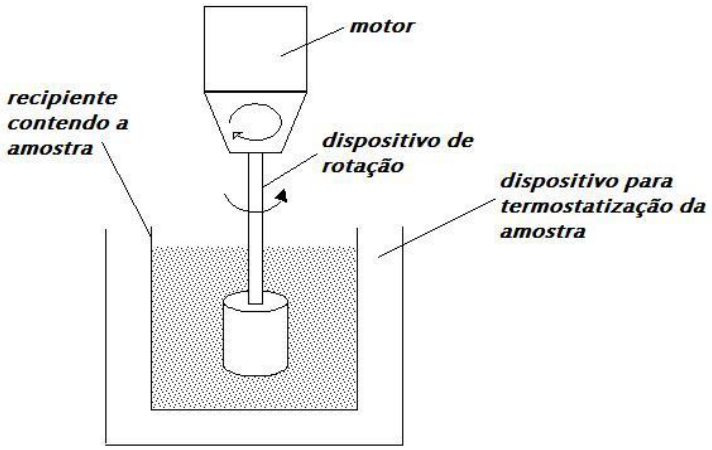


Figura 8 - Representação esquemática de um viscosímetro rotativo utilizado na determinação da viscosidade dinâmica (Fonte: Pedro Silva – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Química [26])

- Viscosidade cinemática (EN 12595) [27]

  Enquanto a viscosidade dinâmica corresponde à resistência que um fluido oferece quando é sujeito a uma tensão de corte, a viscosidade cinemática define-se como a resistência desse mesmo fluído à força gravítica. Nas mesmas condições de temperatura, as duas propriedades relacionam-se através da equação (4).

$$\nu = \eta/\rho \qquad (4)$$

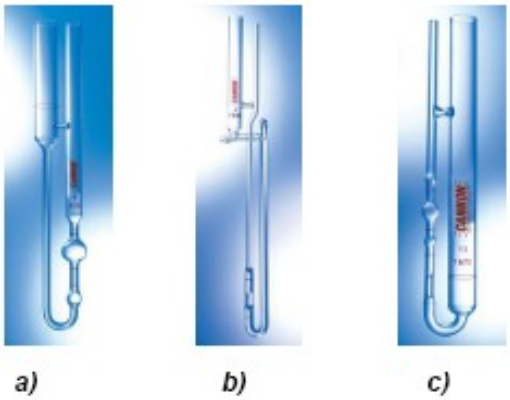
  onde η designa o coeficiente de viscosidade dinâmica (expresso em Pa·s, no SI), ν o coeficiente de viscosidade cinemática (expresso em m2/s, no SI) e ρ a densidade (expressa em

Kg/m3, no SI). O ensaio de determinação da viscosidade cinemática envolve a utilização de um viscosímetro capilar de vidro (Figura 9).

Neste ensaio, é determinado o tempo que uma quantidade de amostra flui sob a acção da gravidade, através do viscosímetro, a uma temperatura controlada. A viscosidade cinemática obtém-se multiplicando o tempo de escoamento (t, medido em segundos) da amostra pela constante do viscosímetro utilizado (equação 5)

$$\nu = C \times t \qquad (5)$$

Este ensaio pretende avaliar a viscosidade dum betume à temperatura de aplicação que é considerada neste ensaio de 135º C.



Legenda:

a) Viscosímetro BS/IP/RF Tubo-U;

b) Viscosímetro Zeitfuchs braço transverso;

c) Viscosímetro Cannon-Fenske.

Figura 9 – Viscosímetros habitualmente utilizados na determinação da viscosidade cinemática de betumes (Fonte: Pedro Silva – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Química [26])

- Temperatura de inflamação (EN ISO 2592) [28]:
  O ponto de inflamação de um betume (COC, Cleveland Open Cup) é a temperatura mínima à qual é necessário submeter o betume para que os vapores emitidos se inflamem momentaneamente na presença de uma chama, operado nas condições normalizadas (Ver Figura 10)

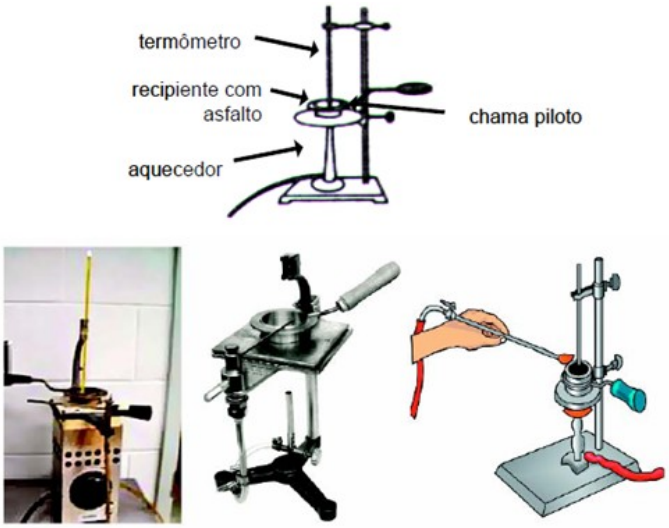


Figura 10 – Exemplo de Ensaio da Temperatura de Inflamação, pelo vaso aberto de Cleveland (Fonte: "Pavimentação Asfáltico - Formação Básica para Engenheiros" [29])

- Solubilidade (EN 12592) [30]:

  A solubilidade de um betume é definida como sendo a percentagem de matéria solúvel em certos solventes (sulfureto de carbono, tricloroetileno, tetracloreto de carbono, tetracloroetileno) (figura 11). Em caso de contestação, o solvente de referência é o sulfureto de carbono.

Figura 11 – Ensaio de Solubilidade (Fonte: http://www.humboldtmfg.com/c-5-p-395-id-5.html [31])

3.3. Normas Europeias de Ligantes Betuminosos

Conforme referido atrás, o ligante para as misturas especificadas pelas diversas abordagens deve ser betume de pavimentação, betume duro ou betume modificado de pavimentação, os quais deverão estar em conformidade com as Normas Europeias respectivas.

Assim, as especificações técnicas dos ligantes betuminosos, no caso dos betumes, betumes duros de pavimentação e betume modificado com polímeros são definidas respectivamente pelas normas europeias EN 12591, EN 13924 e EN 14023, que são parte de uma família de normas europeias para betumes conforme Figura 12.

Nesta tese iremos apenas abordar as Normas Europeias EN 12591 [4], EN 13924 [5] e EN 14023 [6].

Em 2004, o CEN (Comité Europeu de Normalização), iniciou um processo de revisão das normas europeias, uma vez que as normas publicadas não correspondiam estritamente às regras do CEN, conforme referidas no Capítulo 1.

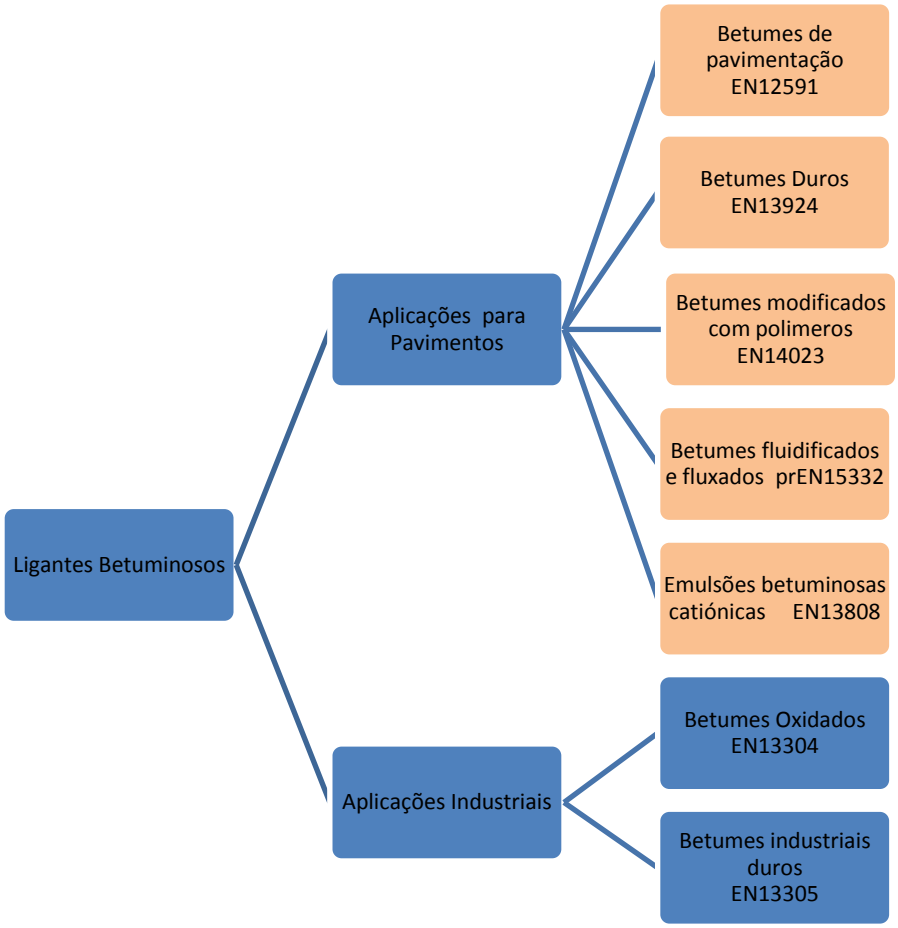


Figura 12 – Ligantes Betuminosos

As autoridades da normalização, por sua vez, exigiam que essa revisão se acompanhasse de um alinhamento necessário de modo a transformá-las em normas harmonizadas, para então se proceder à aplicação da marca "CE".

Uma Norma Europeia harmonizada é uma Norma Europeia preparada pelo CEN, sob mandato da Comissão Europeia, com vista ao cumprimento das exigências essenciais de uma Directiva da Nova Abordagem, tal como a Directiva dos Produtos da Construção (DPC). [2]

Nas normas europeias, os ligantes betuminosos são reportados por classes, definidas relativamente às exigências do Mandato Europeu M/124, sobre os produtos de construção civil.

As três exigências definidas no Mandato são: a consistência às temperaturas intermédias e às temperaturas elevadas de serviço, bem como a durabilidade das duas características precedentes. A conformidade destas exigências, como estipulado nas normas europeias, deve ser demonstrada pelo produtor pelos "ensaios de tipo inicial" e pelo "controlo de produção em fábrica", sujeito ao sistema de atestação da conformidade 2+, permitindo a aposição da marcação CE. [32].

O sistema de atestado de conformidade será desenvolvido mais a frente no subcapítulo 3.4 - Avaliação de Conformidade e Marcação CE dos Ligantes Betuminosos.

As actuais especificações das Normas Europeias baseiam-se em métodos de ensaio tradicionais, designados por especificações empíricas, embora o processo de desenvolvimento de métodos baseados no desempenho esteja a ser desenvolvido há algum tempo entre os vários países da União Europeia.

3.3.1. BETUMES DE PAVIMENTAÇÃO

Os betumes de pavimentação são empregues essencialmente, em misturas betuminosas fabricadas a quente, para aplicação da camada de base, de ligação, de regularização e de desgaste. São também usados no fabrico dos mástiques betuminosos, em revestimentos de superfícies e no envolvimento de gravilhas duras para a incrustação no final do acabamento da camada de desgaste. Servem, ainda, como material de base para o fabrico dos restantes ligantes betuminosos [32].

Os betumes de pavimentação devem cumprir os requisitos da Norma Europeia EN 12591:2009 *Bitumes and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*, [4] que especifica as propriedades e os respectivos métodos de ensaio adequados para a sua caracterização, para o uso na construção e manutenção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas.

As propriedades indicadas na EN 12591:2009 caracterizam a consistência dos betumes de pavimentação a temperaturas de serviço intermédias e a temperaturas de serviço elevadas, bem como a durabilidade das duas características anteriores.

Assim sendo, esta norma descreve as características requeridas para um número de propriedades relativas ao betume e a ligantes betuminosos, em que essas propriedades são detalhadas em diversos quadros. Algumas dessas características estão definidas em pelo menos um dos países pertencentes á E.U. (European Union) ou E.F.T.A. (*European Free Trade Association*), e algumas dessas características estão incluídas apenas no interesse da Indústria.

É de notar que esta norma ainda define as especificações baseadas em métodos de ensaio tradicionais e não em métodos baseados no desempenho. Mas prevê-se que num futuro próximo esta norma venha a ser alterada, uma vez que estão a decorrer programas de trabalho para avaliar as propriedades e os métodos de ensaio alterados de forma a desenvolver novas especificações que estejam mais directamente relacionadas com o desempenho.

A NP 12591:2009 apresenta seis quadros, que são lidos em coluna (ver tabelas 2 a 7) [4]. Os quadros 1A, 1B, 2A e 2B dizem respeito aos tipos de betume classificados com base na penetração. Os quadros 3A e 3B dizem respeito aos betumes classificados com base na viscosidade cinemática a 60º C.

As propriedades dos Quadros 1A, 2A e 3A são especificadas para todo o tipo de betumes de pavimentação, indicam as propriedades mandatórias e estão ainda associadas às exigências regulamentares ou de Higiene, Segurança e Ambiente. As propriedades dos Quadros 1B, 2B e 3B, são necessárias para satisfazer as condições regionais e estão igualmente associadas a exigências regulamentares

No caso de Portugal, os Quadros 1A e 1B, são melhores aplicáveis aos tipos de betume utilizados em Portugal. No caso dos betumes empregues em Portugal, a consistência dos betumes de pavimentação a temperaturas de serviço intermédias é indicada pela penetração, a consistência a temperaturas de serviço elevadas é dada pela temperatura de amolecimento e a durabilidade da consistência é indicada pela resistência ao endurecimento após os ensaios no RTOFT, ou seja, segundo a Norma Europeia EN 12591, as propriedades constantes no Quadro 1A são de selecção obrigatória:

- Penetração a 25ºC;
- Temperatura de amolecimento;
- Resistência ao endurecimento;
- Ponto de inflamação;
- Solubilidade.

Sendo de selecção facultativa, de modo a satisfazer as condições nacionais, as propriedades constantes do Quadro 1B, são:

- Índice de penetração;
- Viscosidade dinâmica a 60ºC
- Ponto de fragilidade de Frass;
- Viscosidade cinemática a 135ºC

O índice de penetração que indica a susceptibilidade térmica do ligante betuminoso será desenvolvido no subcapítulo 3.3.4.

Tabela 2 – Especificações para betumes de pavimentação para as classes de penetração entre 20x0,1mm e 220x0,1mm (Fonte: Quadro 1A da EN 12591:2010 [4])

Propriedade	**Método de ensaio**	**Unidade**	**20/30**	**30/45**	**35/50**	**40/60**	**50/70**	**70/100**	**100/150**	**160/220**
Penetração a 25 ºC	EN 1426	0,1 mm	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
Temperatura de amolecimento	EN 1427	ºC	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43
Resistência ao envelhecimento a 163 ºC	EN 12607-1									
Penetração retida		%	≥55	≥53	≥53	≥50	≥50	≥46	≥43	≥37
Aumento da temperatura de amolecimento, - Severidade 1 ou Aumento da temperatura de amolecimento, - Severidade 2 (a)		ºC ºC	≤8 ou ≤10	≤8 ou ≤11	≤8 ou ≤11	≤9 ou ≤11	≤9 ou ≤11	≤9 ou ≤11	≤10 ou ≤12	≤11 ou ≤12
Variação de massa (b) (valor absoluto)		%	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,8	≤0,8	≤1,0
Ponto de inflamação	EN ISO 2592	ºC	≥240	≥240	≥240	≥230	≥230	≥230	≥230	≥220
Solubilidade	EN 12592	%	≥99,0	≥99,0	≥99,0	≥99,0	≥99,0	≥99,0	≥99,0	≥99,0

(a) Quando o grau de severidade 2 é escolhido deve estar associado ao exigido para o Ponto Fraass e/ou índice de penetração, medidos sobre o ligante não envelhecido (ver Quadro 1B)

(b) A variação de massa tanto pode ser positiva como negativa

Tabela 3 – Especificações dos betumes de pavimentação para classes de penetração entre 20x0,1mm e 220x0,1 mm (Fonte: Quadro 1B da EN12591:2010 [4])

Propriedade	**Método de ensaio**	**Unidade**	**20/30**	**30/45**	**35/50**	**40/60**	**50/70**	**70/100**	**100/150**	**160/220**
Índice de penetração [a]	Anexo A [b]	-	-1,5 a +0,7 ou NR[c]	-1,5 a +0,7 ou NR[c]	-1,5 a +0,7 ou NR[c]	-1,5 a +0,7 ou NR[c]	-1,5 a +0,7 ou NR[c]	-1,5 a +0,7 ou NR[c]	-1,5 a +0,7 ou NR[c]	-1,5 a +0,7 ou NR[c]
Viscosidade dinâmica a 60 ºC	EN 12596	Pa.s	≥440 ou NR[c]	≥260 ou NR[c]	≥225 ou NR[c]	≥175 ou NR[c]	≥145 ou NR[c]	≥90 ou NR[c]	≥55 ou NR[c]	≥30 ou NR[c]
Ponto de Fragilidade Fraass [a]	EN 12593	ºC	NR[c]	≤-5 ou NR[c]	≤-5 ou NR[c]	≤-7 ou NR[c]	≤-8 ou NR[c]	≤-10 ou NR[c]	≤-12 ou NR[c]	≤-15 ou NR[c]
Viscosidade cinemática a 135 ºC	EN 12595	mm^2/s	≥530 ou NR[c]	≥400 ou NR[c]	≥370 ou NR[c]	≥325 ou NR[c]	≥295 ou NR[c]	≥230 ou NR[c]	≥175 ou NR[c]	≥135 ou NR[c]

[a] Quando o grau de severidade 2 é escolhido deve ser associado ao Ponto de fragilidade Fraass e/ou Índice de penetração medidos sobre o ligante não envelhecido

[b] A referência ao Anexo A, normativo, neste documento destina-se ao cálculo do índice de penetração

[c] NR. (Não requerido): Esta abreviatura pode ser utilizada para uma propriedade não regulamentada ou não sujeita a exigências nacionais no território de aplicação

Tabela 4 – Especificações de betumes de pavimentação para classes de penetração entre 250x0,1 mm e 900x0,1 mm (Fonte Quadro 2A da NP12591:2010 [4])

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	250/330	330/430	500/650	650/900
Penetração a 25 ºC ou	EN 1426	0,1 mm	250-330	-	-	-
Penetração a 15 ºC	EN 1426	0,1 mm	70-130	90-170	140-260	180-360
Viscosidade dinâmica a 60 ºC ou	EN 12596	Pa.s	≥18	≥12	≥7,0	≥4,5
Temperatura de amolecimento	EN 1427	ºC	30-38	-	-	-
Resistência ao envelhecimento a 163 ºC	EN 12607-1					
Razão da viscosidade a 60 ºC ou		-	≤4,0	≤4,0	≤4,0	≤4,0
Aumento da temperatura de amolecimento		ºC	≤11	-	-	-
Variação de massa[a] (valor absoluto)		%	≤1,0	≤1,0	≤1,5	≤1,5
Temperatura de inflamação	EN ISO 2719	ºC	≥180	≥180	≥180	≥180
Solubilidade	EN 12592	%	≥99,0	≥99,0	≥99,0	≥99,0

Tabela 5 – Especificações de betumes de pavimentação para classes de penetração entre 250x0,1mm e 900x0,1 mm (Fonte: Quadro 2B da EN 12591:2010 [4])

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	250/330	330/430	500/650	650/900
Ponto de fragilidade Fraass	EN 12593	ºC	≤-16 ou NR[a]	≤-18 ou NR[a]	≤-20 ou NR[a]	≤-16 ou NR[a]
Viscosidade cinemática a 135 ºC	EN 12595	mm^2/s	≤100 ou NR[a]	≤85 ou NR[a]	≤65 ou NR[a]	≤50 ou NR[a]
[a] NR. (Não requerido): Esta abreviatura pode ser utilizada para uma propriedade não regulamentada ou não sujeita a exigências nacionais no território de aplicação						

Tabela 6 – Especificações para betumes de pavimentação – Betumes moles, betumes designados e especificados pela sua cinemática a 60º C (Fonte: Quadro 3A da EN 12591:2010 [4])

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	V1500	V3000	V6000	V12000
Viscosidade cinemática a 60 ºC	EN 12595	mm^2/s	1000-2000	2000-4000	4000-8000	8000-16000
Resistência ao envelhecimento a 120 ºC	EN 12607-2					
Variação de massa[a] (Valor absoluto)		%	≤2,0	≤1,7	≤1,4	≤1,0
Temperatura de inflamação	EN ISO 2719	ºC	≥160	≥160	≥180	≥180
Solubilidade	EN 12592	%	≥99,0	≥99,0	≥99,0	≥99,0
[a] A variação de massa tanto pode ser positiva como negativa						

Tabela 7 – Especificações para betumes de pavimentação – Betumes moles, betumes designados e especificados pela sua viscosidade cinemática a 60ºC (Fonte: Quadro 3B da EN 12591:2010 [4])

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	V1500	V3000	V6000	V12000
Resistência ao envelhecimento a 120ºC TFOT	EN 12607-2					
Razão de viscosidade a 60ºC		-	≤3,0 ou NR[a]	≤3,0 ou NR[a]	≤2,5 ou NR[a]	≤2,0 ou NR[a]
[a] NR. (Não requerido): Esta abreviatura pode ser utilizada para uma propriedade não regulamentada ou não sujeita a exigências nacionais no território de aplicação						

3.3.1.1. As Propriedades e os testes relacionados

As propriedades dos betumes de pavimentação e respectivos ensaios deverão estar de acordo com os diversos Quadros (1A, 2A, 3A, 1B, 2B 3B) [4] da EN 12591.

Os betumes de pavimentação são designados por Classes, classificados segundo a penetração nominal ou gamas de viscosidades.

Assim, a Norma Europeia NP 12591 define que, para considerar as propriedades de coesão dos betumes, as características da consistência às diversas temperaturas e a durabilidade dessa mesma consistência, estas devem estar conforme os seguintes requisitos:

- A consistência a temperaturas de serviço intermédias deve estar conforme os requisitos para o valor de penetração que consta no Quadro 1A (Tabela 2) e Quadro 2B (Tabela 3)
- A consistência a temperaturas de serviço elevadas deve estar conforme os requisitos para o ponto de amolecimento indicado no Quadro 1A (classes de penetração), do ponto de amolecimento ou viscosidade dinâmica indicados no Quadro 2A (classes de penetração), ou viscosidade cinemática indicada no Quadro 3A (classes de viscosidade cinemática).
- A fragilidade a temperaturas de serviço baixas pode ser exigida a fim de satisfazer as condições nacionais nos países em que ocorram temperaturas extremamente baixas. No caso do mesmo ser exigido, os betumes de pavimentação devem estar conformes os requisitos para o ponto de fragilidade FRAASS que consta no Quadro 1B ou Quadro 2B.
- A dependência da consistência em função da temperatura pode ser exigida a fim de satisfazer as condições nacionais. Quando isto acontece, os betumes de pavimentação devem estar de acordo com as exigências relativas à viscosidade dinâmica e/ou índice de penetração (Ip) como indicado no Quadro 1B.
- A durabilidade é demonstrada pela conformidade com as características exigidas para a "Resistência ao envelhecimento"definidas no Quadro 1A, Quadro 2A ou Quadro 3B. A resistência ao envelhecimento deve ser avaliada recorrendo ao ensaio RTFOT de acordo com a EN 12607-1 para os ligantes dos Quadros 1A e 2A. A resistência ao envelhecimento deve ser avaliada pelo ensaio RTFOT de acordo com a EN 12607-2 para os ligantes do Quadro 3A.

3.3.2. BETUMES DUROS DE PAVIMENTAÇÃO

Os betumes duros são empregues em misturas betuminosas de alto módulo fabricadas a quente, para aplicação em camada base, de ligação e de regularização.

As características do betume duro devem estar de acordo com a Norma Europeia EN 13924:2006 *Bitumes and bituminous binders – Specifications for hard paving grade bitumens* [5] que prescreve um quadro de especificações das características e dos apropriados ou relevantes métodos de ensaios, destinados à construção e manutenção de pavimentos de estradas, de aeroportos e de outras áreas pavimentadas e que surge na sequência do programa de harmonização das normas europeias.

A EN 13924:2006 está estreitamente relacionada com a EN 12591. O princípio usado no desenvolvimento da EN 12591 consistiu em fornecer uma gama de classes de conveniência adaptáveis ao fabrico de materiais usados na construção e manutenção de estradas e às condições climáticas e de tráfego existentes em todos os estados membros. Este documento estende a gama de classes, especificadas na EN 12591, seguindo a utilização de materiais para a construção e manutenção de estradas, com valores de módulos muito elevados. [5]

Os betumes duros de pavimentação são designados pela gama de penetração a 25ºC, por exemplo 10/20 ou 15/25 (ver Tabela 8).

Na EN 13924 são especificadas três características essenciais de acordo com o Mandato M/124, que são:

- Consistência à temperatura de serviço intermédia;
- Consistência à temperatura de serviço elevada;
- Durabilidade das propriedades acima referidas;

que fornecem a indicação que as características intrínsecas de coesão são adequadas à sua normal utilização.

Na norma europeia os betumes duros de pavimentação são reportados por classes, definidas relativamente às exigências essenciais do Mandato Europeu M/124, sobre produtos de construção rodoviária. Especificamente na EN 13924, são introduzidas classes de conveniência (quadro 1 na norma), que permitem seleccionar a especificação mais adequada para o betume, tendo em conta as condições climáticas locais onde vai ser realizado o pavimento.

No início do processo este documento foi elaborado a partir de diferentes normas nacionais em vigor. Trata-se de uma primeira etapa para a harmonização das especificações denominadas "empíricas" e destinam a avaliar as características e métodos de ensaio alternativos, a fim de desenvolver novas especificações que estejam directamente relacionadas com o desempenho. Com esta finalidade, estão a ser elaborados programas de trabalho e os resultados serão tidos em conta numa futura revisão deste documento. Os resultados serão considerados em revisões futuras da presente Norma Europeia (Quadro 1B na EN 13924:2006 (Tabela 9) [5]).

Tabela 8 - Especificações para os betumes duros de pavimentação (Fonte: Traduzido do Quadro 1 da EN 13924:2006 [5])

Requisitos essenciais	Características	Métodos de ensaio	Unidade	Classes				
				0	1	2	3	4
Consistência a Temperaturas de Serviço Intermédias	Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	NPD	TBR	15 a 25[f]	10 a 20	
Consistência a Temperaturas de Serviço Elevadas	Temperatura de amolecimento[d]	EN 1427	°C	NPD	TBR	55 a 71[d-f]	58 a 78[d]	60 a 76[d]
	Viscosidade dinâmica a 60 °C	EN 12596	Pa.s	NR	TBR	≥550[f]	≥700	
Temperaturas Intermédias	Variação de massa	EN 12607-1	%	NPD	TRB	≤0,5		
	Penetração retida	EN 1426	%	NPD	TBR	≥55		
Durabilidade (Resistência ao envelhecimento a 163 °C EN 12607-1)[b]	Temperatura de amolecimento após envelhecimento	EN 1427	°C	NPD	TBR	≥Orig Min + 2[g]		
	Aumento da temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	NPD	TBR	≤ 8	≤ 10	
Temperaturas Elevadas	Aumento da temperatura de amolecimento & Índice de Penetração antes do ensaio (i.e. no betume original)	EN 1427 Cálculo Ip (ver Anexo A)	°C	NR	TBR	≤10 De -1,5 a +0,7	≤10 ≤-1,5	
Outras Propriedades[c]	Viscosidade cinemática a 135 °C	EN 12595	mm^2/s	NR	TBR	≥600[f]	≥700	
	Ponto de fragilidade de Fraass	EN 12593	°C	NR	TBR	≤0[f]	≤3	
	Ponto de inflamação[e]	EN ISO 2592	°C			≥235	≥245	
	Solubilidade	EN 12592	% fracção de massa	NR	TBR	≥99,0		

NPD – No Performance Determined – Sem valores de referência, isto é, não existe regulamentação no território ou utilização prevista.

NR – No Requirement – não requerido

TBR – To Be Reported – Valor ou intervalo de valores a serem reportados pelo fornecedor, isto é, valores declarados, esta classe não deve ser usada para fins de marcação regulamentar.

A classe *NPD* foi incluída para abranger os países nos quais as características para uma determinada utilização não estão sujeitas a qualquer requisito. A classe *NR* foi incluída para as características que não são mencionadas nos objectivos e características relevantes para os betumes duros de pavimentação. A classe TBR foi incluída com vista a facilitar a selecção nos países que simplesmente desejam registar um valor declarado do fornecedor ou intervalo de valores para um requisito particular. Não deverá ser considerado como uma "Classe" para fins de marcação regulamentar. Estes valores podem ser usados como base para o desenvolvimento de futuras especificações técnicas.

O quadro B.1 (Tabela 9) lista as características informativas em que os produtores de betumes duros de pavimentação são incentivados a fornecer como "TBR". É expectável que os dados assim obtidos possam servir de base ao desenvolvimento de futuras especificações relacionadas com o desempenho. Estas futuras especificações, como veremos no Capitulo 4, são alguns dos ensaios já especificados no método Superpave.

3.3.2.1. Propriedades e ensaios relacionados

As propriedades dos betumes duros de pavimentação e os ensaios relacionados, devem ser seleccionados das classes apresentadas nos Quadro 1, e quando testados pelos ensaios descritos no Quadro 1, as várias classes deverão apresentar valores dentro dos limites especificados nos mesmos.

Assim, a Norma Europeia NP 13924, define que para considerar as propriedades de coesão dos betumes, as características da consistência às diversas temperaturas e a durabilidade dessa mesma consistência, estas devem estar conforme os seguintes requisitos

- A consistência a temperaturas de serviço intermédias para os betumes duros de pavimentação deve cumprir com os requisitos da penetração a 25 ºC do Quadro 1
- A consistência a temperaturas de serviço elevadas para os betumes duros de pavimentação deve cumprir com os requisitos para a temperatura de amolecimento Anel e Bola e, caso se pretenda, com a viscosidade conforme indicado no Quadro 1
- A durabilidade deve ser demonstrada pelo cumprimento dos requisitos indicados no Quadro 1. A resistência ao envelhecimento deverá ser ensaiada de acordo com o RTFOT (EN 12607-1).

Outras propriedades "propriedades informativas", conforme apresentadas do Quadro 1B (Tabela 9), são ainda definidas na Norma em causa, baseadas em novos métodos que ainda estão em avaliação, em que os produtores dos betumes modificados com polímeros, são convidados a fornecer elementos sobre as medições efectuadas, voluntariamente, tendo-se esperança que com o acumular de experiência se desenvolvam os ensaios baseados no desempenho, para especificações futuras

Tabela 9 – Propriedades Informativas (Fonte: Traduzido do Quadro 1B do Anexo B da EN13924:2006. [5])

Propriedade	Unidade	Método de Ensaio	Dados
TS=300 MPa, medida pelo BBR[a]	**ºC**	**EN 14771**	**TBR**
Tm=0,3, medida pelo BBR[a]	**ºC**	**EN 14771**	**TBR**
G* a 15ºC e 10 Hz medida pelo DSR[b]	**MPa**	**EN 14770**	**TBR**
T G*/sen δ=1kPa a 1,6 Hz medido pelo DSR[b]	**ºC**	**EN 14770**	**TBR**

[a] BBR: Reómetro de flexão de viga

[b] DSR: Reómetro de Corte Dinâmico ou outro qualquer reómetro capaz de medir um módulo complexo.

O relatório pode incluir outros parâmetros tais como uma representação gráfica de G* a 0,4 Hz com o valor referente a 25 ºC e também *T* G* = 2 kPa a 0,4 Hz. As condições do ensaio e os parâmetros reportados podem ser seleccionados de acordo com o tráfego, com as condições climatéricas ou com o tipo de betume a aplicar.

As "propriedades informativas" definidas no Quadro 1B, da EN 13924:2006, como se vai poder ver no capítulo 4, são idênticas aos ensaios previstos e definidos no método Superpave.

Nesta EN 13924:2006, são ainda definidas propriedades adicionais, são propriedades não mandatárias, como:

- Ponto de inflamação
- Ponto de fragilidade de Frass
- Viscosidade Cinemática a 135ºC
- Solubilidade

3.3.3. Betumes Modificados com Polímeros

Os betumes modificados com polímeros, são empregues em Portugal, em especial no fabrico de *porous asphalt*, e ACTVL (*Asphalt Concrete for Very Thin Layers*).

As características dos betumes modificados com polímeros devem estar de acordo com a Norma Europeia NP 14023 *Bitumes and bituminous binders – Framework Specifications for polymer modified bitumens* [6] que prescreve um quadro de especificações das características e dos apropriados métodos de ensaio, destinados à construção e manutenção de pavimentos de estradas, de aeroportos e de outras áreas pavimentadas.

O desenvolvimento deste capítulo será efectuado com base na Norma Europeia FprEn 14023 de Novembro de 2009, que surge de acordo com pedido da AENOR (*Asociación Española de Normalization Y Certificación*) e que o CEN decidiu incluir as propriedades de "Ponto de fragilidade de Fraass" e a "Recuperação Elástica", na parte harmonizada da EN14023.

Na FprEN 14023 [6] são indicadas as seguintes propriedades para os betumes modificados:

- Consistência a temperaturas intermédias de serviço,
- Consistência a temperaturas elevadas de serviço,
- Coesão,

- Durabilidade (envelhecimento),
- Fragilidade a baixa temperaturas;
- Recuperação elástica.

O betume modificado com polímeros é um betume cujas propriedades reológicas foram modificadas durante o fabrico pela utilização de um ou mais agentes químicos.

Os betumes modificados com polímeros, podem ser utilizados directamente ou sob a forma de fluidificantes ou emulsionados, ou misturados, por exemplo, com asfalto natural.

O princípio da EN 14023 está estreitamente ligado ao da norma EN 12591, dado que o betume base é um betume de pavimentação. Na EN 14023 são introduzidas as classes de conveniência, permitindo seleccionar a especificação mais adequada em função das condições climáticas locais onde o betume modificado com polímeros vai ser usado.

As propriedades indicadas na EN 141023 indicam a consistência dos betumes modificados com polímeros a temperaturas de serviço intermédias, a temperaturas de serviço elevadas, a coesão e a durabilidade da consistência, fragilidade a baixas temperaturas e a recuperação elástica. A propriedade coesão é a que distingue os betumes modificados com polímeros dos restantes ligantes betuminosos.

A norma europeia EN 14023 apresenta três quadros e os requisitos para um determinado tipo de betume devem ser seleccionados pelas classes apresentadas. O quadro 1A (Tabela 10) indica as propriedades mandatários associadas aos requisitos regulamentares dos estados membros da EU e da saúde, segurança e ambiente, o quadro 1B (Tabela 11) inclui as propriedades para determinadas condições regionais. O quadro 1C (Tabela 12) inclui outras características que interessam ao sector, não mandatários, mas que se tornam úteis em determinados países para descrever os betumes modificados com polímeros.

3.3.3.1. As Propriedades e os ensaios relacionados

As propriedades dos betumes modificados com polímeros e os ensaios relacionados devem ser seleccionados das classes apresentadas nos Quadros 1A e 1B, e quando testados pelos ensaios descritos nos Quadros, as várias classes deverão apresentar valores dentro dos limites especificados nos mesmos.

Assim, a Norma Europeia NP 14023, define que para considerar as propriedades de coesão, fragilidade a baixas temperaturas, recuperação elástica dos betumes modificados com polímeros, as características da consistência às diversas temperaturas e a durabilidade dessa mesma consistência, estas devem estar conforme os seguintes requisitos:

- A consistência a temperaturas de serviço intermédias para betumes modificados com polímeros deve estar conforme os requisitos para o valor de penetração a 25º que consta no Quadro 1A;
- A consistência a temperaturas de serviço elevadas para os betumes modificados com polímeros, deve estar conforme os requisitos para o ponto de amolecimento indicado no Quadro 1A;
- A fragilidade a temperaturas de serviço baixas pode ser exigida a fim de satisfazer as condições nacionais nos países em que ocorram temperaturas extremamente baixas. No caso do mesmo ser exigido, os betumes modificados com polímeros devem estar conformes os requisitos para o ponto de fragilidade FRAASS que consta no Quadro 1B.

Para alguns betumes altamente modificados com polímeros, o método do ponto de fragilidade de Fraass, não é adequado para baixas temperaturas, nesses casos o ensaio da recuperação elástica a 10º deverá ser usado.

- A propriedade de coesão é incluída com o significado de diferenciar os betumes modificados com polímeros dos betumes de pavimentos. Três diferentes testes são considerados no Quadro 1A, ensaio de ductilidade, ensaio de tensão directa, ensaio de pêndulo de Vialit. Cada um destes ensaios reflecte as diferentes características que podem ocorrer com os betumes modificados com polímeros e não são considerados equivalentes. Este ensaio é da responsabilidade do fabricante, devendo o mesmo definir o ensaio usado.
- A durabilidade é demonstrada pela conformidade com as características exigidas para a "Resistência ao envelhecimento"definidas no Quadro 1A. A resistência ao envelhecimento deve ser avaliada recorrendo ao ensaio RTFOT de acordo com a EN 12607-1 para os ligantes dos Quadros 1A.
- A recuperação elástica pode ser requerida para condições específicas nacionais. Quando requerida o betume modificado com polímeros deverá estar de acordo com os requisitos para a recuperação elástica a 25º ou 10º conforme Quadro 1B

Outras "propriedades informativas" são ainda definidas na Norma em causa, baseadas em novos métodos que ainda estão em avaliação, em que os produtores dos betumes modificados com polímeros, são convidados a fornecer elementos sobre as medições efectuadas, voluntariamente, tendo-se esperança que com o acumular de experiência se desenvolvam os ensaios baseados no desempenho, para especificações futuras. Entre os diversos ensaios podemos referir, por exemplo, o ensaio "*Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer (BBR)"* baseado na EN 14771 *Bitumen and bituminous binders - Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer* (BBR) [33], o ensaio "*Dynamic Shear Rheometer*", baseado na EN 14770 *Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle – Dynamic Shear Rheometer* (DSR) [34] e a energia de deformação pelo força de ductibilidade baseados nas EN 13589 *Bitumen and bituminous binders - Determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method e* [35] EN 13703 *Bitumen and bituminous binders - Determination of deformation energy*, [36] conforme as condições dos testes.

É de salientar que estes novos métodos ainda em avaliação, já se encontram largamente desenvolvidos e implementados (conforme iremos falar no Capitulo 4 – Superpave), no continente Americano, abrangidos pelo método Superpave.

Nesta EN 14023, são ainda definidas propriedades adicionais que são úteis em determinados Países para descrever os betumes modificados com polímeros, são propriedades não mandatórias, como:

- Ponto de inflamação
- Estabilidade de Armazenamento
- Intervalo de plasticidade
- Recuperação elástica
- Determinação do ponto de amolecimento

Tabela 10 – Especificações para betumes modificados com polímeros. (Fonte: Traduzido do Quadro 1A FprEN 14023. [6])

Propriedades		Método de ensaio	Unidade	Classes dos Betumes modificados com polímeros									
				2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Penetração a 25ºC		EN 1426	0,1 mm	10-40	25-55	45-80	40-100	65-165	75-130	90-150	120-200	200-300	
Temperatura de amolecimento		EN1427	ºC	≥ 80	≥ 75	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 55	≥ 50	≥ 45	≥ 40	
Coesão [a]	Ensaio de ductilidade [a] (50 mm/min tracção) ou	EN 13589 seguido por EN 13703	J/cm²	≥3 a 5 ºC	≥2 a 5 ºC	≥1 a 5 ºC	≥2 a 10 ºC	≥2 a 10 ºC	≥3 a 10 ºC	≥0,5 a 15 ºC	≥2 a 15 ºC	≥0,5 a 20 ºC	≥ 0,5 a 25 ºC
	Ensaio de tensão directa [a] (100 mm/min tracção) ou	EN 13587 seguido por EN 13703	J/cm²	≥ 3 a 5 ºC	≥ 2 a 5 ºC	≥ 1 a 5 ºC	≥ 3 a 10 ºC	≥ 3 a 10 ºC					
	Ensaio do pêndulo de Vialit [a] (Teste de Impacto)	EN 13586	J/cm²	≥ 0,7									
Resistência ao endurecimento [b]	Penetração retida	EN 12607-1	%	≥ 35	≥ 40	≥ 45	≥ 50	≥ 55	≥ 60				
	Aumento de temperatura de amolecimento		ºC	≤ 8	≤ 10	≤ 12							
	Variação de massa [c] (Valor absoluto)		%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1,0						
Ponto de inflamação		EN ISO 2592	ºC	≥ 250	≥ 235	≥ 229							

[a] O Ensaio de coesão deverá ser escolhido em função do objectivo de uso do Betume. O ensaio do pêndulo de Vialit só deverá ser usado quando o betume se destina a revestimentos superficiais

[b] O ensaio principal é o RTFOT a 163ºC. Para Betumes modificados com polímeros, com elevada viscosidade, impossibilitando a execução do ensaio a temperaturas de 163ºC, nestes casos a temperatura de ensaio deverá ser a 180ºC, de acordo com a EN 12607-1

[c] A variação de massa tanto pode ser positiva como negativa

Tabela 11 – Especificações para Betumes Modificados com polímeros. (Fonte: Traduzido do Quadro 1B FprEN 14023. [6])

Propriedades		Método de ensaio	Unidade	Classes dos Betumes modificados com polímeros para as condições regionais										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de fragilidade de Fraass		EN 12593	ºC	NR [a]	TBR [b]	≤ 0	≤ -5	≤ -7	≤ -10	≤ -12	≤ -15	≤ -18	≤ -20	≤ -22
Recuperação elástica	25 ºC	EN 13398	%	NR [a]	TBR [b]	≥ 80	≥ 70	≥ 60	≥ 50					
	10 ºC	EN 13398	%	NR [a]	TBR [b]	≥ 75	≥ 50							

[a] NR (Não requerido). Esta abreviatura pode ser utilizada para um propriedade não regulamentada ou não sujeita a exigências nacionais no território de aplicação

[b] TBR (Para ser reportado). Valor ou intervalo de valores a serem reportados pelo fornecedor, isto é, valores declarados, esta classe não deve ser usada para fins de marcação regulamentar

Tabela 12 – Especificações para Betumes Modificados com polímeros. (Fonte: Traduzido do Quadro 1C da FprEN 14023. [6])

Propriedades	Método de ensaio	Unidade	Classes Betumes modificados com polímeros para as propriedades adicionais							
			0	1	2	3	4	5	6	7
Intervalo de plasticidade	Capítulo 5.2.8.4	ºC	NR [a]	TBR [b]	≥ 85	≥ 80	≥ 75	≥ 70	≥ 65	≥ 60
Diminuição da Temperatura de amolecimento (após EN 12607-1)	EN 1427	ºC	NR [a]	TBR [b]	≤ 2	≤ 5				
Recuperação elástica a 25ºC (após EN 12607-1)	EN 13398	%	NR [a]	TBR [b]	≥ 70	≥ 60	≥ 50			
Recuperação elástica a 10ºC (após EN 12607-1)	EN 13398	%	NR [a]	TBR [b]	≥ 50					
Estabilidade de Armazenamento [c] Diferença na Temperatura de amolecimento	EN 13399 / EN 1427	ºC	NR [a]	TBR [b]	≤ 5					
Estabilidade de Armazenamento [c] Diferença na Penetração	EN 13399 / EN 1426	0,1 mm	NR [a]	TBR [b]	≤ 9	≤ 13	≤ 19	≤ 26		

[a] NR (Não requerido). Esta abreviatura pode ser utilizada para um propriedade não regulamentada ou não sujeita a exigências nacionais no território de aplicação

[b] TBR (Para ser reportado). Valor ou intervalo de valores a serem reportados pelo fornecedor, isto é, valores declarados, esta classe não deve ser usada para fins de marcação regulamentar

[c] As condições de armazenamento dos Betumes modificados com polímeros deverá ser fornecida pelo Fornecedor. Homogeneidade é necessária para os Betumes modificados com polímeros. A tendência de desagregamento dos Betumes modificados com polímeros durante o armazenamento deverá ser analisada através dos Ensaios previsto na EN 13399. Se o produto não preencher os requisitos definidos no Quadro 1C, classes 2 a 5, essa informação deverá ser transmitida pelo Fornecedor, para se rever as condições de armazenamento, evitando a separação dos componentes do Betume e garantir a homogeneidade do produto.

No caso dos betumes modificados com polímeros empregues em Portugal, a consistência dos betumes de pavimentação a temperaturas de serviço intermédias é indicada pela penetração, a consistência a temperaturas de serviço elevadas é dada pela temperatura de amolecimento, a coesão é dada pela força de ductilidade e a durabilidade da consistência é indicada pela resistência ao endurecimento, após os ensaios de RFFOT

3.3.4. Analise das Normas Europeias e Ensaios

Na tabela 13, pode-se ver um resumo, dos requisitos do CEN, relativamente aos vários tipos de betumes, EN 12591, EN 13924 e EN 14023.

Tabela 13 – Resumo de requisitos versus métodos de ensaio para as Normas Europeias

Norma Europeia		Consistência a temperaturas intermédias	Consistência a temperaturas elevadas	Durabilidade da Consistência	Coesão
EN 12591	Pen 20/30 a 160/250	Pen a 25ºC	Temperatura de amolecimento	RTFOT	
	Pen 250/330 a 650/900	Pen a 25ºC Pen a 15ºC	Temperatura de amolecimento ou viscosidade dinâmica a 60ºC	RTFOP	
	V1500 a V12000		Viscosidade cinemática a 135ºC	TOFT	
EN 13924		Pen a 25ºC	Temperatura de amolecimento	RTFOP	
EN 14023		Pen a 25ºC	Temperatura de amolecimento	RTFOP	Ductilidade Tensão lateral Viabit pendular

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 pouco viscoso semelhante a um fluído Newtoniano tal como o ar e a água. Para temperaturas baixas, o betume, comporta-se como um sólido

elástico, frágil e muito fendilhável quando sujeito a cargas. Para temperaturas intermédias, que são as ocorrem na maior parte da vida dos betumes, os betumes apresentam um comportamento visco elástico.

Os líquidos visco elásticos, em condições de calor elevado comportam-se como líquidos viscosos, são caracterizados como líquidos plásticos, ou seja, começando a fluir não tem a capacidade de voltarem a posição inicial. Em condições de frio, têm comportamentos de sólidos plásticos, ou seja, quando carregado deforma-se, quando a carga finaliza voltam a sua posição inicial, mas nestes casos, há que ter em conta que podem partir quando excessivamente carregados. Estas situações serão novamente abordadas no capítulo 4, no âmbito do método Superpave.

Os betumes apresentam uma característica importante que é a sua viscosidade, uma vez que quantifica a consistência do ligante betuminoso a uma dada temperatura, permitindo avaliar qual o intervalo de temperaturas em que é possível, por exemplo manipular um ligante em boas condições permitindo o envolvimento dos agregados, o fabrico e aplicação dos betumes betuminosos. As especificações da viscosidade são medidas a temperatura de 60ºC e 135ºC, 60ºC por ser a temperatura máxima de serviço do betume e a 135ºC por ser a temperatura aproximada de mistura e de trabalho.

A penetração é uma medida da viscosidade do ligante betuminoso, por sua vez a penetração é influenciada pela temperatura, ou seja à medida que a temperatura aumenta, a penetração aumenta e, por sua vez, a viscosidade diminui, aumentando a fluidez do betume. A partir de uma determinada temperatura o betume fluidifica, esse ponto é definido pela temperatura de amolecimento (temperatura de Anel e Bola), dando também uma informação importante quanto à sensibilidade do betume à temperatura.

Por outras palavras, a maior parte das propriedades físicas dos betumes estão associadas à temperatura, e deste modo, os ensaios realizados para caracterizar as propriedades físicas dos ligantes betuminosos têm a temperatura especificada (Figura 13).

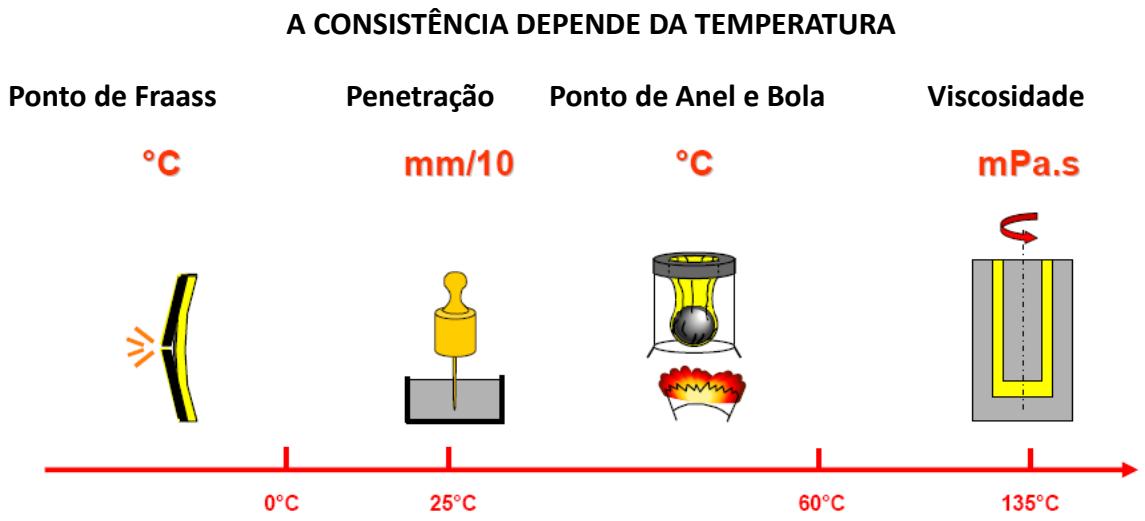


Figura 13 – Consistência versus Temperatura (Fonte: Les enrobés bitumineux: formulation, fabrication, mise em place. [37])

Assim sendo, neste subcapítulo pretende-se desenvolver a relação entre as características, viscosidade, penetração e temperatura, bem como analisar a forma como as suas relações são traduzidas nos quadros (tabela 2, tabela 3, …) das especificações presentes nas Normas Europeias.

No quadro 1A – EN12591 (tabela 2) [4], pode ver-se que à medida que a classe de penetração vai aumentando, a temperatura de amolecimento vai diminuindo.

Verifica-se também, na especificação da penetração, resultado do ensaio da agulha de penetração (EN 1426 – Betumes e Ligantes Betuminoso – Determinação da penetração por agulha [ ]) o ensaio é realizado para temperaturas de 25ºC, a partir de uma determinada classe de penetração, o ligante betuminoso torna-se demasiado mole, para a execução do ensaio, sendo a partir deste valor o ensaio de penetração por agulha realizado à temperatura de 15ºC. Isto deve-se ao facto das amostras do ligante betuminoso para temperaturas próximas da temperatura do ensaio (25ºC), tornar-se bastante viscoso não sendo possível medir a penetração, tornando-se necessário alterar a temperatura do respectivo ensaio para 15ºC, passando então as especificações do betume de pavimentação a serem definidas pelo Quadro 2A (tabela 4) da Norma Europeia EN 12591.

No quadro 2A – EN12591 [4], a classificação é então realizada com apoio ao ensaio da penetração para gamas de penetração de 250/330 e a partir da classe 330/430 é realizado o ensaio de penetração a temperatura de 15º e com a cálculo da resistência do betume ao processo de transformação em fluido, ensaio da Viscosidade Dinâmica a 60º, ensaio que permite determinar a temperatura de serviço máxima. Constata-se que a Viscosidade Dinâmica decresce com o aumento de temperatura.

Uma vez que a penetração depende da temperatura, então pode-se estabelecer a temperatura de susceptibilidade. A consistência do betume pode ser relacionada com a temperatura da através equação (2), referida no Capitulo 3.2, pág. 15.

Esta expressão traduz a relação linear entre o logaritmo da penetração e temperatura, definida por Pfeiffer e Van Doormael, [ ] em que, P representa a penetração a uma determinada temperatura (T), *A* representa a temperatura de susceptibilidade e K, representa uma constante (Figura 14).

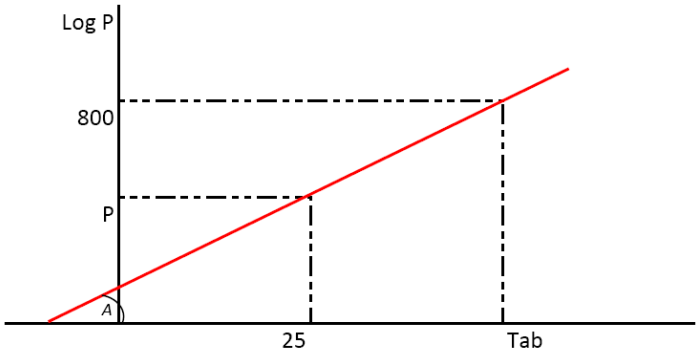


Figura 14 – Gráfico da relação entre o logaritmo da penetração e temperatura

Uma das situações mais usadas para determinar e exprimir a relação da consistência / temperatura nos betumes, é o Índice de Penetração. No Anexo A das Normas Europeias EN 12591 e EN 13924, é

definido o seu modo de cálculo, quando exigido pela especificação da resistência ao envelhecimento, respectivamente na EN 12591, Quadro 1A (Tabela 2) e na EN 13924, Quadro 1 (Tabela 8).

Segundo Pfeiffer e Van Doormael, [4, 5 e 21] a temperatura de susceptibilidade é definida pela seguinte fórmula (6):

$$A = \frac{20 - Ip}{10 + Ip} \times \frac{1}{50} \qquad (6)$$

em que Ip, representa o índice de penetração que indica a susceptibilidade térmica de um ligante betuminoso. O índice de penetração (I_p) calcula-se a partir do valor da penetração a 25ºC, 100g, 5s, determinada de acordo com a EN 1426 [21], e do valor da temperatura de amolecimento determinada de acordo com a EN 1427 [22].

Baseando-se nas seguintes hipóteses de Pfeiffer e Van Doormael [4 e 5]:

- À temperatura de amolecimento, a penetração de um betume é 800 x 0,1 mm
- Quando o logaritmo (decimal) da penetração é representado em função da temperatura, obtém-se uma linha recta cujo declive A é definido pela equação definida em (2)
- Atribui-se o valor zero ao índice de penetração, a um betume com penetração de 200x0,1 mm a 25ºC e uma temperatura de amolecimento Anel e Bola de 40ºC.

O índice de penetração é então calculado através da seguinte equação (7):

$$Ip = \frac{(20 \times Tab) + (500 \times logP) - 1952}{Tab - (50 \times logP) + 120} \qquad (7)$$

Em que, Tab é a temperatura de amolecimento, e logP é o logaritmo (na base 10) da penetração a 25ºC em 0,1 mm.

Para $I_p < -1.5$, significa que o ligante betuminoso é muito susceptível às temperaturas elevadas.

Para $I_p > + 0.7$, significa que o ligante é pouco sensível ás temperaturas elevadas e frágil ás temperaturas baixas

Segundo Duriez e Arrambique [18], é possível relacionar a especificação da temperatura com a viscosidade dinâmica, através da fórmula (1), referido no subcapítulo 3.2, no ensaio da penetração pela agulha:

$$\eta = A\,P^{-b} \qquad (1)$$

Vamos efectuar um exemplo de aplicação das fórmulas atrás referidas, para um betume de pavimentação da classe 30/45, que segundo o Quadro 1A e Quadro 2A, da EN 12591:2009, apresenta as seguintes características:

Pen $_{25ºC}$.....30-45 (x 0.1 mm)

T_{ab}.....52-60 (ºC)

$\eta_{60ºC}$.....> 440 (Pa.s)

Sabemos que para a T_{ab}=60ºC o ligante betuminoso tem uma penetração de 800 (para a temperatura de 60ºC), então, conseguimos determinar a viscosidade dinâmica, usando a equação (1), ou seja:

$\eta = 10^7 \times 800^{-2}$

Implicando então uma $\eta_{60ºC}$ = 15,625 Kpo = 1562,5 Pa.s, que é> 400 Pa.s √

O índice de penetração I_p, usando a equação (7), é igual a, Ip = 0,77 (significa que ligante é pouco sensível ás temperaturas elevadas e frágil ás temperaturas baixas)

Usando a equação (6), determina-se o *A* que é igual a 0,03573, podemos representar o gráfico da Figura 15.

$$\log P = AT + K$$

Pen	1000	800	200	100	45	25	1
T (ºC)	62.73	60,00	43,15	34,71	25,00	17,85	-21.30

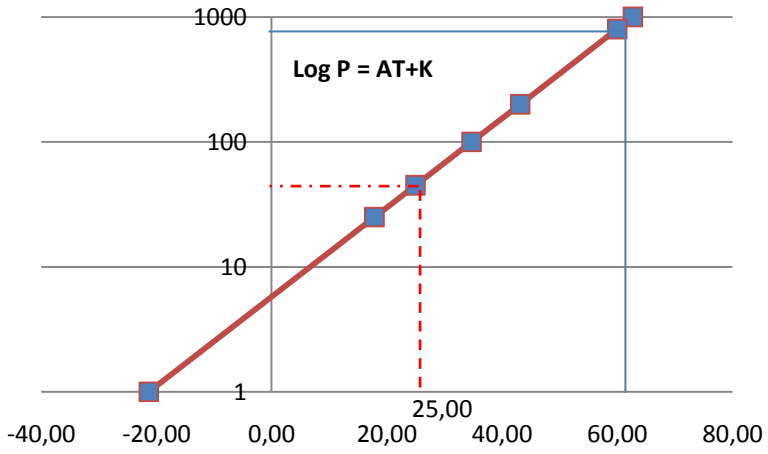


Figura 15 – Gráfico do ligante betuminoso 30/45

Outra forma de avaliar as mudanças físicas dos ligantes com a temperatura é através de um sistema desenvolvido por W. Heuklom, [24] conhecido pelo "*Bitumen Test Data Chart*" (BTCD), que relaciona a penetração, o ponto de amolecimento e o ponto de fragilidade de Fraass. O gráfico consiste numa escala horizontal de temperatura e duas escalas verticais para a penetração e viscosidade. A escala de temperatura é linear e escala de penetração é em logaritmos.

Uma das vantagens deste gráfico é leitura completa que se pode tirar do mesmo, de forma a permitir caracterizar de uma forma abrangente as características do ligante betuminoso.

O gráfico BTCD, permite apenas com o conhecimento dos valores de penetração e temperatura do ponto de amolecimento de um ligante betuminoso, ou dois valores de penetração, traçar uma recta, sendo possível prever uma serie de características desse betume (Figura 16).

Usando o exemplo de aplicação do betume de pavimento 30/45, e traçando a recta a vermelho no BTCD, com os dois valores conhecidos da Temperatura e Penetração.

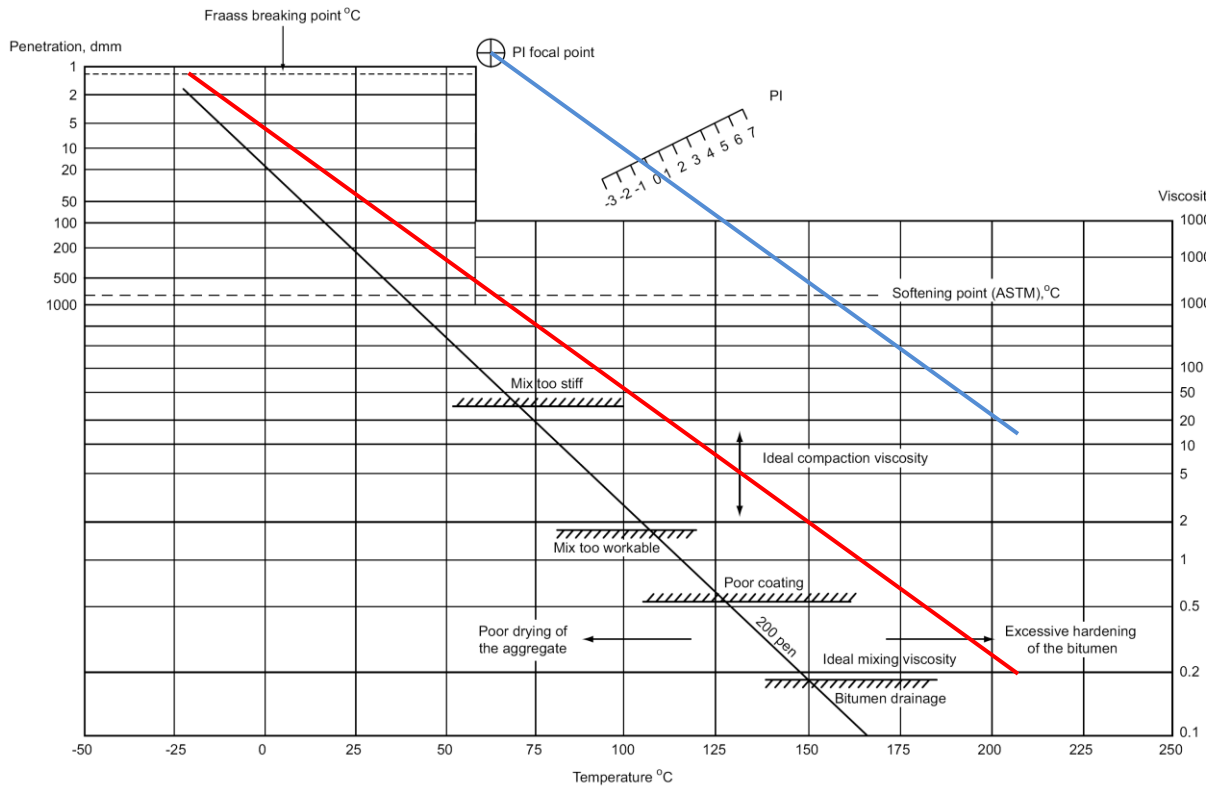


Figura 16 – Exemplo do gráfico BTDC (Fonte: *Shell Bitumen Handbook* [23])

O índice de penetração (I_P) pode ser determinado no gráfico BTDC, através do "*focal point*", ou seja tendo dois valores de penetração conhecidos para duas temperaturas diferentes, determinamos uma recta. Do "*focal point*" é traçada uma paralela (recta azul na Figura 16) á recta definida pelas penetrações versus temperatura. A intersecção dessa paralela com a linha PI define o Índice de Penetração.

3.4. AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE E MARCAÇÃO CE DOS LIGANTES BETUMINOSOS

A avaliação da conformidade implica o cumprimento, por parte dos betumes de pavimentação, betumes duros de pavimentação e betumes modificados com polímeros, dos requisitos definidos nas respectivas Normas Europeias, e deve ser demonstrado através de Ensaios do tipo inicial e Controlo de produção em fábrica.

Os Ensaios de tipo inicial são realizados com vista à demonstração da conformidade relativamente às respectivas Normas

Relativamente ao Controlo de produção em fábrica, o produtor deve estabelecê-lo, documentá-lo e mantê-lo, para assegurar que os produtos que disponibiliza para o mercado sejam conformes as características definidas.

Nas Normas Europeias harmonizadas é ainda definido o Anexo ZA, cujo objectivo é estabelecer as condições para a marcação CE do produto para o uso pretendido e onde se resume a lista de requisitos e cláusulas reguladas. Para concretizar a marcação CE, o fabricante deve cumprir as condições impostas na norma harmonizada, fundamentalmente o que está descrito no Anexo ZA.

No entanto, os Estados Membros podem optar por não exigir todas as características declaradas no referido anexo. Este acontecimento denomina-se de "*No Performance Determined*" (NPD) e permite ao fabricante realizar os ensaios e controlo de produção de acordo com as condições locais.

A avaliação da conformidade dos produtos da construção com as especificações técnicas necessárias para a marcação CE (Normas Europeias harmonizadas) utiliza um conjunto de métodos de avaliação da conformidade definido na DPC que, devidamente escolhidos e combinados entre si, originam seis sistemas de avaliação da conformidade distintos: 1+, 1, 2+, 2, 3 e 4 caracterizados no quadro seguinte:

Tabela 14 – Sistema de Avaliação da Conformidade para a marcação CE (Fonte: site do LNEC [38])

Sistema	Tarefas do Fabricante	Tarefas do Organismo Notificado	Base para a Marcação CE
1	Controlo interno da produção Ensaio de amostras segundo programa prescrito	Certificação do produto com base em: Ensaios de tipo iniciais Inspecção inicial do controlo interno da produção Acompanhamento permanente do controlo interno da produção Ensaio aleatório de amostras	Declaração de conformidade pelo fabricante com base num certificado de conformidade do produto
1	Controlo interno da produção Ensaio de amostras segundo programa prescrito	Certificação do produto com base em: Ensaios de tipo iniciais Inspecção inicial do controlo interno da produção Acompanhamento permanente do controlo interno da produção	
2+	Ensaios de tipo iniciais Controlo interno da produção (Ensaio de amostras segundo programa prescrito)	Certificação do controlo interno da produção com base numa inspecção inicial e no acompanhamento permanente desse controlo	Declaração de conformidade pelo fabricante com base num certificado de conformidade do controlo interno da produção
2	Ensaios de tipo iniciais Controlo interno da produção (Ensaio de amostras segundo programa prescrito)	Certificação do controlo interno da produção com base numa inspecção inicial	
3	Controlo interno da produção	Ensaios de tipo iniciais	Declaração de conformidade pelo fabricante
4	Ensaios de tipo iniciais Controlo interno da produção		

O sistema de verificação da conformidade dos betumes definido nas Normas Europeias é o 2+

Uma premissa inerente a todos os sistemas de avaliação da conformidade é a existência de um controlo interno da produção, de carácter permanente, da responsabilidade do fabricante. Todos os sistemas integram também ensaios de tipo iniciais, a cargo do fabricante ou de um Organismo Notificado, consoante os sistemas.

Além disso, em todos os sistemas, os procedimentos incluem uma declaração de conformidade emitida pelo fabricante, a qual tem por base um certificado de conformidade do produto emitido por um organismo notificado em dois dos sistemas (sistemas 1+ e 1) e, um certificado de conformidade do

controlo interno da produção emitido também por um organismo notificado em outros dois sistemas (sistemas 2+ e 2).

Para cada família de produtos o sistema de avaliação da conformidade é decidido pela Comissão Europeia, ponderados vários factores ligados designadamente à relevância desses produtos para a satisfação das exigências essenciais das obras, à sua natureza, à variabilidade das suas características e à sua susceptibilidade em relação a defeitos de fabrico, e tendo presente que, entre várias opções que se colocam, a escolha deverá recair sobre o sistema menos oneroso. As Decisões em causa são publicadas no Jornal Oficial da União Europeia (JOUE) após os respectivos projectos terem sido submetidos à audição do Comité Permanente da Construção, cujo parecer é, nestes casos, vinculativo.

Em todos os sistemas de avaliação da conformidade, o fabricante deve realizar um controlo interno da produção. De acordo com o Decreto-Lei nº 113/93, republicado pelo Anexo V do Decreto-Lei nº 4/2007, de 8 de Janeiro, tal controlo permanente deve basear-se no seguinte [39]:

"Todos os elementos, requisitos e disposições adoptados pelo fabricante serão sistematicamente documentados sob a forma de normas e procedimentos escritos. Essa documentação do sistema de controlo da produção deve assegurar uma compreensão comum das garantias de qualidade e permitir verificar a obtenção das características exigidas do produto e a funcionalidade efectiva do sistema de controlo da produção."

As tarefas a desempenhar pelo fabricante relativamente aos diversos Ligantes Betuminosos, estão referidas sucintamente nos Anexos ZA das Normas Europeias harmonizadas correspondentes.

Os Anexos ZA definem as cláusulas de cada Norma Europeia relativas às disposições da Directiva de Produtos da Construção (DPC) que satisfazem os requisitos do mandato conferido ao abrigo Directiva UE dos Produtos da Construção (89/106/EEC).

O cumprimento destas cláusulas proporciona um meio para assegurar a conformidade com os requisitos essenciais específicos da referida Directiva.

Assim os Anexos ZA estabelecem as condições da marcação CE e dividem-se em:

- Domínio de aplicação e características relevantes
- Procedimentos de verificação da conformidade para betumes
- Certificados de CE e Declarações de conformidade

No caso dos betumes de pavimentação, as cláusulas definidas no Anexo ZA da respectiva Norma Europeia EN12591 são as apresentadas nas tabelas seguintes (Tabela 15 e Tabela 16) [4]

Tabela 15 - Quadro ZA.1.1 – Cláusulas relevantes para betumes de pavimentação dos Quadros 1A, 1B, 2A e 2B (Fonte NP12591:2010 [4])

Produto (s) da Construção: betumes de pavimentação

Uso (s) previsto (s): Para construção e manutenção de estradas, pistas de aeroportos e outras áreas pavimentadas (identificadas pela classe de penetração)

Requisitos/ Características do Mandato	**Cláusula (s) de requisitos nesta ou outra (s) norma(s)**	**Nível (eis) e/ou classe (s) mandatados**	**Notas**
Consistência a temperaturas de serviço intermédias [a]	5.2.2	Nenhum	Classe: gama declarada
Consistência a temperaturas de serviço elevadas	5.2.3	Nenhum	Gama declarada
Fragilidade a temperaturas de serviço baixas	5.2.4	Nenhum	Valor máximo declarado NPD pode ser utilizado
Dependência da consistência em função da temperatura	5.2.5	Nenhum	Gama declarada NPD pode ser utilizado
Durabilidade da consistência a temperaturas de serviço intermédias e elevadas	5.2.6	Nenhuma	Valor mínimo declarado para penetração retida e Aumento máximo declarado para a temperatura de amolecimento
Substâncias perigosas declaradas	5.3	Nenhuma	Ver ZA.1, NOTA 2

[a] Não apropriado para betumes moles (ver Quadro ZA.1.2 e Quadro 3A)

Tabela 16 - Quadro ZA.1.2 – Cláusulas relevantes para betumes de pavimentação dos Quadros 3A e 3B (Fonte NP12591:2010 [4])

Produto (s) da Construção: betumes de pavimentação – betumes moles Uso (s) previsto (s): Para construção e manutenção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas (classificados pela classe de penetração)			
Requisitos/ Características do Mandato	**Cláusula (s) de requisitos nesta ou outra (s) norma (s)**	**Nível (eis) e/ou classe (s) mandatados**	**Notas**
Consistência a temperaturas de serviço elevadas	5.2.3	Nenhuma	Classe: Gama declarada
Durabilidade da consistência a temperaturas de serviço elevadas	5.2.6	Nenhuma	Valor máximo declarado para a razão da viscosidade NPD pode ser utilizado
Substâncias perigosas regulamentadas	5.3	Nenhuma	Ver ZA.1, NOTA 2

As tarefas para a verificação de conformidade são definidas na Quadro Z.A.3 (Tabela 17).

Tabela 17 - Quadro ZA.3 – Atribuição de tarefas para a verificação da conformidade (Fonte NP12591:2010 [4])

Tarefas			**Conteúdo da tarefa**	**Cláusulas e pontos aplicáveis para a avaliação da conformidade**
Tarefas sob a responsabilidade do produtor	Controlo de Produção em Fábrica (FPC)		Parâmetros relativos a todas as características do Quadro ZA.1.1 e ZA 1.2.	6.3
	Ensaio do Tipo Inicial (ITT)		Todas as características do Quadro ZA.1.1 e ZA 1.2.	6.2.1
	Certificação de controlo de produção em fábrica pelo organismo notificado com base em:	Inspecção inicial em fábrica e do FPC, pelo organismo notificado (NB)	Parâmetros relativos a todas as características do Quadro ZA.1.1 ou ZA.1.2., i.e. -*Consistência a temperaturas de serviço intermédias* -*Consistência a temperaturas de serviço elevadas* -*Fragilidade a temperaturas de serviço baixas* - *Dependência da consistência em função da temperatura* - *Durabilidade da consistência a temperaturas de serviço intermédias e/ou elevadas*	6.3
		Vigilância contínua, avaliação e aprovação do controlo do FPC	Parâmetros relativos a todas as características do Quadro ZA.1.1 ou ZA.1.2 i.e: -*Consistência a temperaturas de serviço intermédias* - *Consistência a temperaturas de serviço elevadas* -*Fragilidade a temperaturas de serviço baixas* - *Dependência da consistência em função da temperatura* - *Durabilidade da consistência a temperaturas de serviço intermédias e/ou elevadas*	6.3

Após o cumprimento das condições definidas no Anexo ZA e após o organismo notificado ter emitido o certificado, o produtor deve preparar e manter a declaração de conformidade, que o habilita a afixar a marcação CE (Figura 17)

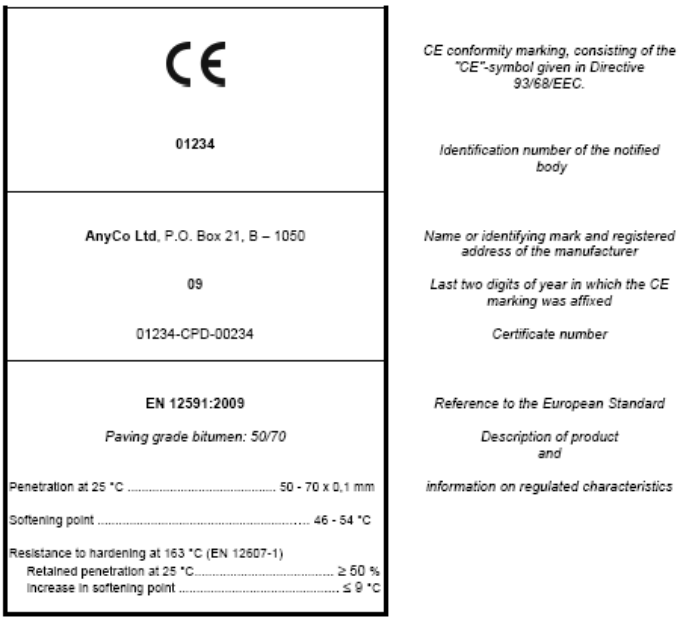


Figura 17 – Exemplo da informação e valores da marcação CE (Fonte: EN12591:2010 [4])

Relativamente as Normas Europeias EN 13924 e EN14023 os processos são idênticos, conforme estipulado nos Anexos ZA das respectivas Normas.

3.5. ENQUADRAMENTO CADERNO DE ENCARGOS TIPO DAS ESTRADAS DE PORTUGAL, EPE

Fazendo o enquadramento normativo dos ligantes betuminosos usados em Portugal, e atento o exemplo do Caderno de Encargos Tipo Obra (Capitulo 14.03 – Pavimentos), versão Fev.2009, das Estradas de Portugal, EPE [13], vemos que relativamente aos diversos tipos de ligantes betuminosos são definidas uma serie de exigências. Neste item, faz-se uma análise do que na prática é exigido aos ligantes betuminosos versus as Normas correspondentes.

No que diz respeito aos ligantes betuminosos usados em betumes de pavimento o Caderno de Encargos Tipo Obra refere que o Projecto de Execução deve definir o betume em função da mistura betuminosa a utilizar no pavimento, enquadrados na EN 12591. Destaca ainda que os betumes de pavimentação mais utilizados em Portugal e aplicáveis a todas as misturas betuminosas são os da classe 35/50 e 50/70, definindo os requisitos e as propriedades que devem cumprir, através da Tabela 18 [13]. Definindo a Classe 35/50 (Tabela 18) como aplicável a todas as misturas betuminosas, preferencialmente na rede principal e a classe 50/70, aplicável a todas as misturas principais.

De igual forma, o Caderno de Encargos Tipo Obra define que as características dos betumes duros de pavimentação devem estar de acordo com Norma Europeia EN 13924, e as respectivas especificações devem respeitar o quadro 14.03.0-4c [13] (Tabela 19). Com a introdução das classes de conveniência é

permitido seleccionar a especificação mais adequada ao betume. A classe mais usada em Portugal é a 10/20, sendo definida na Tabela 19, como sendo a mais aplicável às misturas betuminosas de alto módulo.

Quanto aos ligantes usados nos betumes modificados com polímeros o Caderno de Encargos Tipo Obra define que os mesmos deverão estar de acordo com a Norma Europeia EN 14023, e as especificações devem respeitar as constantes no quadro 14.03.0-4b [13] (Tabela 20). Define ainda que os betumes modificados a usar nas estradas portuguesas deverão ser os PMB 10/40, PMB 25/55 PMB 45/80 e PMB 65/105, pelo menos, em misturas betuminosas drenantes e em misturas rugosas, devendo o projecto indicar o tipo de betume a utilizar.

O Caderno de Encargos Tipo Obra (capítulo 14.00 – Controlo de Qualidade) versão de Fevereiro de 2009 das Estradas de Portugal EPE [40], define os requisitos para aceitação dos materiais cuja marcação CE é obrigatória.

São ainda definidas as propriedades a avaliar e os métodos de ensaio a usar, no Cap. 14.00.3, no âmbito do controlo de qualidade dos trabalhos a realizar, através do quadro 14.00.3.3 [40] (Tabela 21), e como se poderá verificar, nem todas as propriedades incluídas nas normas europeias são requeridas no âmbito na presente versão do Caderno de Encargos, contudo foram consideradas todas as propriedades de determinação obrigatória. Igualmente no que respeita em particular às Normas Europeias Harmonizadas, são requeridas algumas propriedades não constantes no Anexo ZA, ou seja, propriedades que não são alvo de marcação CE obrigatória, mas cuja avaliação se considera relevante para a utilização prevista, segundo as Estradas de Portugal, EPE

No Capitulo 15.03 – Pavimentações – Métodos Construtivos [41] são definidas vários critérios que os ligantes betuminosos têm de obedecer nomeadamente as disposições gerais para o estudo, produção, transporte, espalhamento e compactação em que neste âmbito é definido pelo EP a entrega pelo adjudicatário de boletins relativos aos ensaio a executar para comprovar a utilização prevista. Em que no âmbito da composição, deverá constar nesse boletim: a ficha do produto com a apresentação da caracterização do betume a empregar na mistura, incluindo a determinação do valor da viscosidade e as temperaturas para as quais aquele valor varia entre 170 ± 20 cSt (gama de temperatura de fabrico das misturas) e entre 280 ± 30 cSt (gama de temperatura de compactação); A determinação da massa volúmica do betume; os ensaios constantes de 14.00.4.03.0-2- Ligantes betuminosos [40] (Tabela 22); A indicação da percentagem de betume admitida em projecto, calculada a partir da percentagem volumétrica de betume adoptada em termos de dimensionamento do pavimento.

Tabela 18 – Requisitos das Propriedades dos Betumes de Pavimentação: (Fonte Caderno de Encargos Tipo Obra – Estradas de Portugal, EPE (Fev.2009) [13])

Quadro 14.03.0-4a - Requisitos/Propriedades dos betumes de pavimentação					
Requisitos	**Propriedades**	**Referência normativa**	**Unidade**	**35/50**	**50/70**
				Aplicável a todas as misturas betuminosas, preferencialmente na rede principal	**Aplicável a todas as misturas betuminosas**
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 ºC	EN 1426	0,1 mm	35 - 50	50 - 70
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento	EN 1427	ºC	50 - 58	46 - 54
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 ºC (RTFOT):	Variação de massa, máxima	EN 12607-1	%	≤ 0,5	
	ou Penetração retida, 25ºC	EN 12607-1 Anexo A	%	≥ 53	
	ou Aumento da Temp. de amolecimento	EN 12607-1	ºC	≤ 8	≤ 9
Outros Requisitos	Ponto de inflamação	EN ISO 2592	ºC	≥ 240	≥ 230
	Ponto de fragilidade de Fraass	EN 12593	ºC	≤ -5	≤ -8
	Viscosidade Cinemática (135º)	EN 12595	mm^2/s	≥ 370	≥ 295
	Teor em parafinas	EN 12591	% (m/m)	≤ 2,2	
	Solubilidade	EN 12592	%	≥ 99,0	

Tabela 19 - Requisitos das Propriedades dos Betumes Duros de Pavimentação: (Fonte Caderno de Encargos Tipo Obra – Estradas de Portugal, EPE (Fev.2009) [13])

Quadro 14.03.0-4c – Requisitos/Propriedades dos betumes duros

Requisitos/Propriedades		Referência normativa	Unidade	Classe	10/20 Aplicável às misturas betuminosas de alto módulo
Consistência à temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 ºC [(a)]	EN 1426	0,1 mm	3	10 a 20
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento [(b)]	EN 1427	ºC	4	60 a 76 [(b)]
	Viscosidade dinâmica a 60º	EN 12596	Pa.s	0	NR
Durabilidade (Resistência ao envelhecimento a 163 º C, EN 12607-1) [(c)]	Variação de massa	EN 12607-1 ou 3	%	2	≤ 0,5
	Penetração retida	EN 1426	%		≥ 55
	Aumento da Temperatura de amolecimento	EN 1427	ºC		≤ 10
	Índice de penetração antes do ensaio (*i.e.* no betume original)	Cálculo de I_P (ver Anexo A da Norma)	-		de -1,5 a +0,7
Outras Propriedades [(d)]	Viscosidade cinemática a 135 ºC	EN 12595	mm^2/s	3	≥ 700
	Ponto de fragilidade de Fraass	EN 12593	ºC	1	TBR
	Ponto de inflamação	EN ISO 2592	ºC	3	≥ 245
	Solubilidade	EN 12592	%	2	≥ 99,0

NR - Sem Requisitos.

TBR - Nível ou intervalo A Reportar pelo fornecedor, esta classe não deverá ser utilizada para efeitos de marcação regulamentar.

(a) - Os graus são designados pelo intervalo de penetração nominal a 25 ºC.

(b) - Uma gama de temperaturas de amolecimento reduzida, de ± 5 ºC, em torno de um valor intermédio, deverá ser declarada pelo fornecedor; a gama total deverá situar-se dentro da gama indicada nas tabelas.

(c) - Apenas se utilizará o RTFOT para efeitos de arbitragem.

(d) - Estas propriedades adicionais não são parte das características essenciais mandatadas mas têm sido consideradas úteis na especificação de betumes para pavimentação de grau duro em alguns casos.

Tabela 20 - Requisitos das Propriedades dos Betumes Modificados com Polímeros: (Fonte Caderno de Encargos Tipo Obra – Estradas de Portugal, EPE (Fev.2009) [13])

Quadro 14.03.0-4b - Requisitos/Propriedades dos betumes modificados

Requisitos	Propriedades	Referência normativa	Unid.	PMB 10/40	PMB 25/55	PMB 45/80	PMB 65/105
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 ºC	EN 1426	0,1 mm	Classe 2 (10 - 40)	Classe 3 (25 - 55)	Classe 4 (45 - 80)	Classe 6 (65 -105)
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento	EN 1427	ºC	Classe 5 (≥ 65)		Classe 7 (≥ 55)	Classe 2 (≥ 80)
Coesão	Força de ductilidade (tracção baixa velocidade)	EN 13589 EN 13703	J/cm^2	-	Classe 3 (≥ 2) (5ºC)	Classe 2 (≥ 3) (5ºC) Classe 6 (≥ 2) (10ºC)	-
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 ºC (RTFOT):	Variação de massa, máxima	EN 12607-1 EN 12607-3	%	Classe 2 (≤ 0,3)			
	Penetração, 25ºC, 1/10 mm	EN 1426	0,1 mm	Classe 7 (≥ 60)			
	Aumento da Temp. de amolecimento	EN 1427	ºC	Classe 2 (≤ 8)			
Outros Requisitos	Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	ºC	Classe 3 (≥ 235)			
	Ponto de fragilidade de Fraass	EN 12593	ºC	Classe 3 (≤ -5)	Classe 5 (≤ -10)		
	Recuperação elástica a 25ºC	EN 13398	%	Classe 3 (≥ 70)			
	Estabilidade ao armazenamento, (diferença de temp. de amolecimento)	EN 13399 / EN 1427	ºC	Classe 2 (≤ 5)			
	Estabilidade ao armazenamento, (diferença na penetração)	EN 13399 / EN 1426	0,1 mm	Classe 2 (≤ 9)			

Tabela 21 – Quadro 14.00.3.3 - Ensaios em Ligantes Betuminosos (Fonte: Caderno de Encargos Tipo Obra – Capitulo 14.00 [40])

Código do ensaio	Designação do ensaio	Norma ou especificação
-	*Sampling bituminous binders*	EN 58
pp	*Characterization of perceptible properties*	EN 1425
P	*Determination of needle penetration*	EN 1426
t_{RAB}	*Determination of the softening point – Ring and Ball method*	EN 1427
R	*Determination of residue on sieving of bitumen emulsion and determination of storage stability by sieving*	EN 1429
PI	*Determination of flash and fire point – Cleveland open cup method*	EN ISO 2592
Ip	*Penetration Index*	EN 12591, Anexo A
X_s	*Determination of solubility*	EN 12592
Fr	*Determination of the Fraass breaking point*	EN 12593
-	*Preparation of test samples*	EN 12594

Continuação da Tabela 21

Código do ensaio	Designação do ensaio	Norma ou especificação
υ	*Determination of kinematic viscosity*	EN 12595
RTFOT	*Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air*	EN 12607-1
s	*Determination of efflux time of bitumen emulsion by the efflux viscometer*	EN 12846
Sc	*Determination of mixing stability with cement of bitumen emulsion*	EN 12848
BV	*Determination of breaking behaviour – Determination of breaking value of cationic bitumen emulsions, mineral filler method*	EN 13075-1
FMT	*Determination of breaking behaviour – Determination of fines mixing time of cationic bitumen emulsions*	EN 13075-2
υ_b	*Determination of viscosity of bitumens using a rotating spindle apparatus*	EN 13302
R_E	*Determination of the elastic recovery of modified bitumen*	EN 13398
-	*Determination of storage stability of modified bitumen*	EN 13399
-	*Determination of the tensile properties of the modified bitumen by the force ductility method*	EN 13589
–	Viscosímetro de Haake	Procedimento no ANEXO I.C

Tabela 22 – Quadro 14.00.4.03.0-2-Ligantes Betuminosos (Fonte: Fonte: Caderno de Encargos Tipo Obra – Capitulo 14.00 [40])

Código do ensaio	Nº de Ensaios	Período ou quantidade correspondente; critérios
P, Penetração com agulha	1	por cada lote
t_{RAB}, Temperatura de amolecimento	1	por cada lote
υ_b, Viscosidade aparente a 175 ºC (viscosímetro de Brookfield (*)(**)	1	por cada lote ou 200 ton (v. Brookfield); 2 por dia de normal funcionamento (v. Haake)

(*) Aplicável apenas a betumes modificados com alta percentagem de borracha

(**) Deve ser apresentada a correlação entre a viscosidade de Brookfield e Haake, caso este último venha a ser utilizado em obra para caracterizar a viscosidade.

3.6. CONCLUSÃO – NORMAS EUROPEIAS

Relativamente às Normas Europeias normalizadas, embora já tenha sido dado um passo importante, relativamente à revisão das especificações e aos requisitos de avaliação dos ligantes betuminosos, ainda falta o desenvolvimento e o acordo entre os diversos estados membros europeus e organizações governamentais e particulares, para chegaram a um consenso relativamente à definição das especificações baseadas no desempenho e respectivos ensaios. Diversas causas podem ser referidas para essa falta de "consenso", como por exemplo, desde dos custos elevados na alteração dos métodos de ensaios, associado dos equipamento envolvidos para se proceder aos respectivos ensaios e há existência dentro dos diversos países europeus de condições climatéricas muito diversificadas que, associadas ao tráfego provocam uma dificuldade de uniformização dos testes de ensaio e respectivas características a ensaiar.

No entanto, conforme já referido nas Normas Europeias são mencionadas "propriedades adicionais" e os respectivos ensaios com carácter informativo, de modo a criar experiência e um historial nos resultados dos ensaios para que os dados assim obtidos possam servir de base ao desenvolvimento de futuras especificações relacionadas com o desempenho.

Um aspecto fundamental para avançar é manter a credibilidade no processo, respeitando requisitos nacionais e dos Estados Membros. É necessário ter experiência para garantir que as futuras especificações são utilizáveis para os efeitos dos acordos contratuais. Além disso, um elemento-chave do processo CEN é que este não deve excluir produtos de desempenho comprovado, assim sendo, os dados de medição disponíveis dos ligantes são necessários para estabelecer limites adequados para as especificações. Para a especificação do desenvolvimento racional os seguintes requisitos devem ser atendidos:

- Cada elemento de uma especificação deve medir uma propriedade funcional;
- Cada teste deve ter uma base científica sólida;
- Os testes devem ser simples e práticos;
- As especificações devem ser validadas em campo.

O trabalho das comissões técnicas, referido do Capítulo 1 deste documento, concretamente a WG1 (Ligantes betuminosos para pavimentação), para o desenvolvimento das Normas Europeias normalizadas está completo com a produção das especificações e métodos de ensaio para os betumes de pavimentação (EN 12591), betumes duros de pavimentação (EN13924) e, para os betumes

modificados com polímeros (EN 14023), mas conforme já referido, essas Normas ainda são baseadas em métodos nacionais existentes (empíricos).

O processo da segunda geração envolve a indústria relacionada com a produção dos betumes de modo assegurar que os ligantes betuminosos são testados antes de a especificação ser desenvolvida, sendo a sequência de procedimentos, basicamente a seguinte:

- Identificação das propriedades dos betumes ligados às exigências de desempenho de pavimentos;
- Seleccionar e standardizar métodos (novos) apropriados para medir estas propriedades;
- Colectar dados e assegurar a validação para estabilizar das (novas) especificações dos betumes,
- Rever o sistema de classificação de acordo com a (nova) especificação.

Relativamente à segunda geração foram desenvolvidas e estão em curso algumas tarefas, entre as quais o projecto chamado "BiTVal", controlado pela FEHRL (*Forum of European National Highway Research Laboratories*) [42 e 43], em que a primeira fase do projecto consistiu na revisão da literatura existente sobre a relação das características do betume e o comportamento do pavimento. A FEHRL desenvolve recomendações de métodos de ensaio sobre os métodos perante os grupos de trabalhos do CEN. Outra tarefa é o levantamento de dados e a recolha de elementos relativos aos novos ensaios executados sobre betumes. A ideia é criar uma base de dados e incentivar a troca de elementos entre os vários estados membros e os produtores de betumes, de modo a criar uma base sólida e segura dos novos métodos para, deste modo, progressivamente serem introduzidos nas novas especificações baseadas no desempenho, conforme as prioridades e as necessidades [44].

Assim os diferentes "*Task Groups*" do CEN/TC336, juntamente com o apoio da FEHRL, EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) e outras associações, cada uma com a sua responsabilidade neste processo de segunda geração, desenvolveram e deram origem ao relatório técnico CEN/TR 15352:2006 [43]. Este documento faz uma síntese dos trabalhos desenvolvidos sobre as especificações de "segunda geração" baseada no desempenho, elenca os ensaios candidatos a métodos de caracterização de especificações baseados no desempenho, para altas, médias e baixas temperaturas, bem como no envelhecimento dos ligantes betuminosos, no seu Anexo E (Tabela 23).

Tabela 23 – Propriedades baseadas no desempenho (Fonte: Traduzido do Quadro do CEN/TR 15352:2006 [44])

Indicar o processo de envelhecimento a longo prazo:

PAV em ... ° C (pr EN 14769) ☐ **RCAT (WI 00336066)** ☐

PAV em ... ° C (pr EN 14769) ☐

Características	Método de Ensaio	Unidades	Valor declarado		
			Condição do Ligante		
			Não Usado	STA	LTA
A temperaturas elevadas de serviço					
Modulo complexo (DSR):	prEN14770	kPa / deg			
G* e δ					
Para a intervalos de temperatura 40-80 ° C (em certas freqüências)					
Para a intervalos de freqüência de 0,1-10 Hz (em determinadas					
Baixa viscosidade (DSR):					
Equiviscous EVT1 temperatura LSV = 2,0 kPa.s e 0,1 rad/s	WI 00336067	°C			
Equiviscous EVT2 temperatura LSV = 2,0 kPa.s e 0,001 rad/s	WI00336067	°C			
Zero viscosidade de corte (DSR):					
Zero viscosidade de corte a 60 ° C	WI00336068	kPa.s			
A temperaturas intermédias de serviço					
Modulo complexo (DSR):					
G* e δ	prEN14770	kPa / deg			
Para a intervalos de temperatura 10-40 ° C (em certas freqüências)					
Para a intervalos de freqüência de 0,1-10 Hz (em determinadas					
A temperaturas baixas de serviço					
Rigidez a -16 °C	prEN14771	Mpa			
(BBR), temperatura a 300 Mpa	prEN14772	°C			
Coesão					
Força de ductilidade a 5 / 10 °C + toda da gama de temperaturas	EN 13589 / EN 13703	J/cm^2			
Ensaio de tracção a 5 / 10 °C + toda da gama de temperaturas	EN 13589 / EN 13704	J/cm^2			
Pêndulo de Vialit: máximo mais toda a gama de temperaturas	EN 13588	J/cm^2			

STA - Ligante betuminoso (simulado a curto prazo de envelhecimento)
LTA - Ligante betuminoso (simulado a longo prazo de envelhecimento)

Dentro desta pesquisa é interessante analisar os ensaios e características desenvolvidas pelo EUA, pelo motivo do método usado ser baseado em requisitos relacionados essencialmente com desempenho, bem como interpretar o método desenvolvido pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), o SUPERPAVE.

4. SUPERPAVE

4.1. INTRODUÇÃO

O programa SHRP teve origem na necessidade de definição de novas especificações e ensaios para avaliar as propriedades dos betumes até então deficientemente avaliadas pelos ensaios de penetração, viscosidade e temperatura de amolecimento, dando então origem ao método SUPERPAVE.

O objectivo dos investigadores do SHRP foi desenvolver um sistema que relacionasse as características dos materiais constituintes da mistura betuminosa com as performances do pavimento.

A característica que diferencia o método SUPERPAVE, é que os ensaios preconizados são realizados em temperaturas e condições de envelhecimento que mais realisticamente representam os que se encontram nos pavimentos em serviço. Outra característica, é a definição clara das fases em que o pavimento sofre danos (deformações permanentes, fadiga e fissuração devido á temperatura (Figura 18)) e a que temperaturas esses fases acontecem. As classes dos betumes definidas pelo método SUPERPAVE, designadas por PG (*performance grades*) são definidas para explicitar essas fases, para testar os ligantes betuminosos nas condições climatéricas previstas para o local a pavimentar. Os investigadores desenvolveram novos equipamentos, bem como usaram equipamento e ensaios já usados por outras indústrias, para desenvolver os novos ensaios dos ligantes betuminosos.

Figura 18 – Alguns exemplos de danos em pavimentos

Assim sendo, foram realizadas investigações e determinou-se o sistema Superpave, definindo-se ensaios e especificações dos betumes de destilação directa e betumes modificados que entram em linha de conta com a temperatura no local onde vai ser aplicado o pavimento.

Para melhor compreender como as especificações do SUPERPAVE são usadas para melhorar o desempenho dos pavimentos em betão betuminoso, impõe-se conhecer as características individuais dos materiais que compõem as misturas betuminosas, em particular dos ligantes betuminosos, bem como compreender as razões que levaram ao investimento no programa SHRP. Assim, vamos abordar novamente o comportamento dos ligantes betuminosos, no que diz respeito à temperatura e processo de envelhecimento.

4.1.1. COMPORTAMENTO

Segundo o Superpave, devido à sua visco-elasticidade natural, o comportamento do ligante betuminoso depende da temperatura e da carga a que é sujeito (Figura 19). O efeito da temperatura, em conjunto com o período de ocorrência, é relativo, ou seja, o seu comportamento a altas temperaturas durante períodos curtos de tempo é equivalente ao que ocorre a baixas temperaturas durante períodos longos.

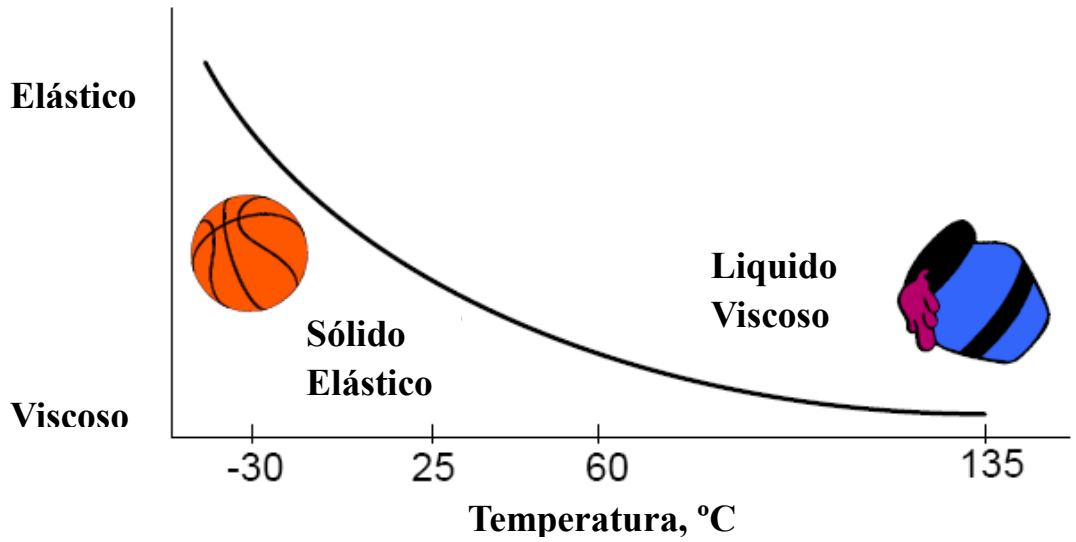


Figura 19 – Propriedades visco elásticas do Ligante Betuminoso. (Fonte: Tradução de *Superpave Fundamentals* [45])

4.1.1.1. Comportamento a altas temperaturas.

Em condições de calor elevado ou em determinadas condições de carga (movimento lento de camiões), o ligante betuminoso comporta-se como um liquido viscoso.

Líquidos viscosos, como o ligante betuminoso quente são muitas vezes caracterizados como líquidos plásticos, porque uma vez que começam a fluir, não têm capacidade para voltar à sua posição inicial. (Viscosidade é a propriedade associada à resistência que o fluido oferece à deformação por tensão de corte (Figura 20)). De outra maneira pode-se dizer que, a viscosidade corresponde ao atrito interno nos fluidos devido basicamente a interacções moleculares, sendo em geral função da temperatura.

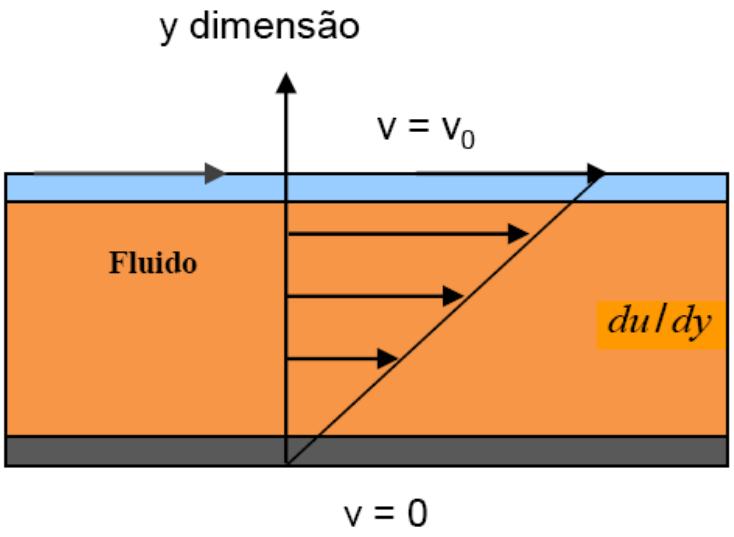


Figura 20 - Representação gráfica da pressão laminar entre duas placas.

4.1.1.2. Comportamento a temperaturas baixas

Em climas frios ou cargas rapidamente aplicadas (ex: movimentos rápidos de camiões) o betão betuminoso comporta-se como um sólido elástico, ou seja quando carregado deforma-se. Quando a carga finaliza, volta à sua posição inicial.

Mas há que ter em conta que se a carga aplicada sucessivamente, for superior à capacidade do material, em sólidos elásticos, estes podem partir.

Apesar de o betão betuminoso ter as características de um sólido elástico a baixas temperaturas, este pode-se tornar frágil e pode partir quando excessivamente carregado.

4.1.1.3. Comportamento a temperaturas intermédias

O normal das condições atmosféricas situa-se entre o calor extremo e o frio rigoroso, por isso os ligantes betuminosos exibem as duas características de líquidos viscosos e sólidos elásticos. Devido a uma série de comportamentos, o betão betuminoso é um excelente material adesivo para ser usado em pavimentos, mas extremamente complicado de ser explicado e compreendido. Quando aquecido, o betão betuminoso comporta-se como um lubrificante, permitindo uma mistura com todos os componentes que constituem o pavimento. Quando arrefecido, comporta-se como uma cola, que aglutina os componentes que constituem o pavimento de uma forma sólida. É neste estado que o comportamento do betão betuminoso é denominado visco elástico. Possui características elásticas e viscosas, dependendo da temperatura a que está sujeito e do tipo de cargas.

4.1.1.4. Comportamento ao envelhecimento

O envelhecimento dos ligantes betuminosos ocorre desde a fase do fabrico até a colocação da mistura betuminosa, prolongando-se durante o tempo de vida útil do pavimento (Figura 22). O envelhecimento

resulta num aumento de consistência do ligante betuminoso e numa maior rigidez da mistura betuminosa.

Estes processos de endurecimento do ligante betuminoso, têm origem em diversos fenómenos físicos ou químicos, destacando-se a volatilização dos óleos leves, oxidação e endurecimento físico.

Como se pode ver no gráfico da Figura 22, a maior parte do envelhecimento acontece durante o processo de fabrico

Uma vez que os betões betuminosos são compostos por moléculas orgânicas, elas reagem com o oxigénio do ambiente. Essa reacção é chamada de oxidação e altera a estrutura e composição molecular do betão betuminoso. A oxidação torna o betão betuminoso mais frágil, dando origem ao fenómeno de endurecimento por envelhecimento. Este fenómeno acontece a um ritmo lento no betão betuminoso em condições normais, mas é acelerado em climas quentes.

Assim betões betuminosos antigos são mais sujeitos à fissuração. Do mesmo modo, betões betuminosos mal compactados apresentam-se mais sujeitos à fissuração, pois aumenta a possibilidade de ocorrência do fenómeno de oxidação devido à existência de bolsas de ar.

Outras formas de endurecimento são a volatilização e o endurecimento físico. A volatilização acontece durante o processo de mistura a quente e na construção, quando os elementos voláteis evaporam do betão betuminoso. O endurecimento físico acontece quando o betão betuminoso é exposto a temperaturas baixas durante grandes períodos de tempo.

Como será irá referir Método Superpave, os ensaios usados para simular o envelhecimento dos ligantes betuminosos, são o RFTOT e PAV (Pressure Aging Vessel) [46]

O ensaio RFTOT [22] simula o envelhecimento que o ligante betuminoso sofre durante a mistura numa instalação de fabrico de misturas betuminosas, resultado da perda ou ganho de massa (volatilização/oxidação).

O ensaio PAV [46] simula o envelhecimento que o ligante betuminoso sofre durante o tempo de vida útil do pavimento (oxidação).

4.1.2. ESPECIFICAÇÕES PRÉ - SUPERPAVE

Os ensaios de penetração, viscosidade e temperatura de amolecimento, apesar de permitirem com elevada grau de certeza definirem o tipo de ligante betuminoso em função das características locais, não deixa de ser baseado em métodos empíricos, e que segundo os investigadores, podem originar indefinições.

Como se pode ver no exemplo ilustrado através da figura 21, as especificações dos ligantes betuminosos, penetração e viscosidade podem classificar ligantes betuminosos diferentes, com a mesma classificação. Quando na verdade esses ligantes (A, B e C) têm performances diferentes nas diferentes temperaturas.

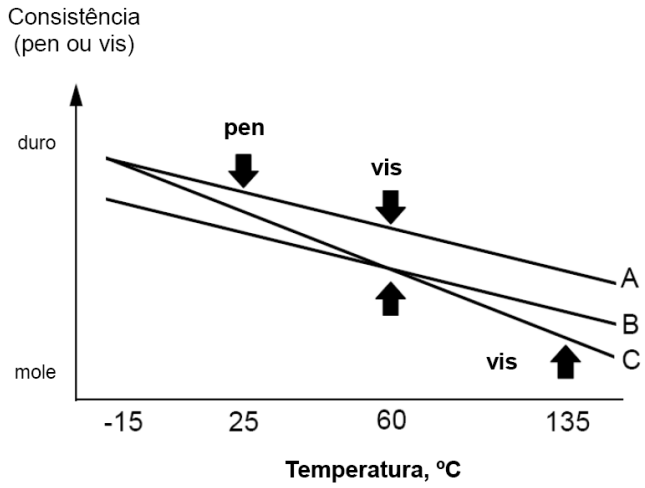


Figura 21 – Relação entre a temperatura e a consistência de três betumes diferentes. (Fonte*:* Traduzido de *Asphalt Institute (1997)* [47])

Os três ligantes betuminosos apresentam a mesma classe de viscosidade, estão dentro dos limites especificados para a viscosidade a 60ºC, apresentam-se com penetração mínima a 25ºC e atingem a viscosidade mínima a 135ºC.

Mas,

- Os ligantes betuminosos A e B, apresentam a mesma dependência à mesma temperatura e têm consistências diferentes a diversas temperaturas.
- Os ligantes betuminosos A e C apresentam a mesma consistência a temperaturas baixas, mas consistências substancialmente diferentes a temperaturas elevadas.
- O ligante betuminoso B tem a mesma consistência a 60º do que o ligante betuminoso C, mas características completamente diferentes.

Como estes ligantes betuminosos se apresentam na mesma classe de especificações, erradamente, será de esperar que possuam as mesmas características durante a construção e que tenham o mesmo desempenho durante o tempo quente e frio.

4.2. ENSAIOS DO SUPERPAVE

Os ensaios definidos no Superpave são idealizados para simular as três fases de vida do betume (Figura 22):

- Transporte, armazenamento e manuseamento
- Fabrico e aplicação
- Serviço no pavimento

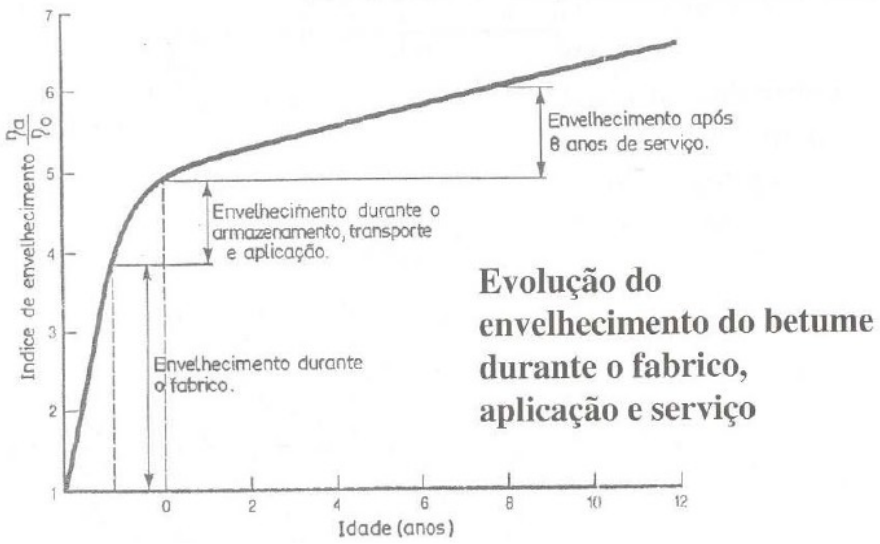


Figura 22 – Fases de vida de um Betume (Fonte: Traduzido de *The Shell Bitumen Handbook*.[24])

Os ensaios realizados nos ligantes betuminosos, que representam a primeira fase (transporte, armazenamento e manuseamento), são realizados em ligantes que nunca foram sujeitos a qualquer processo de envelhecimento.

A simulação do envelhecimento dos ligantes betuminosos é resumida na tabela 24, bem como os ensaios previstos do método SUPERPAVE.

Tabela 24 – Condições de envelhecimento dos betumes para os ensaios do SUPERPAVE (Fonte*: Asphalt Institute (1997)* [47])

Ensaios do SUPERPAVE	**Condições de envelhecimento do betume**
DSR (Reómetro de Corte Dinâmico)	Betume original
	Betume envelhecido no RTFOT
	Betume envelhecido no PAV
RV (Viscosímetro Rotativo)	Betume original
BBR (Ensaio de Flexão em Viga)	Betume envelhecido no PAV
DTT (Ensaio de tracção Directa)	Betume envelhecido no PAV

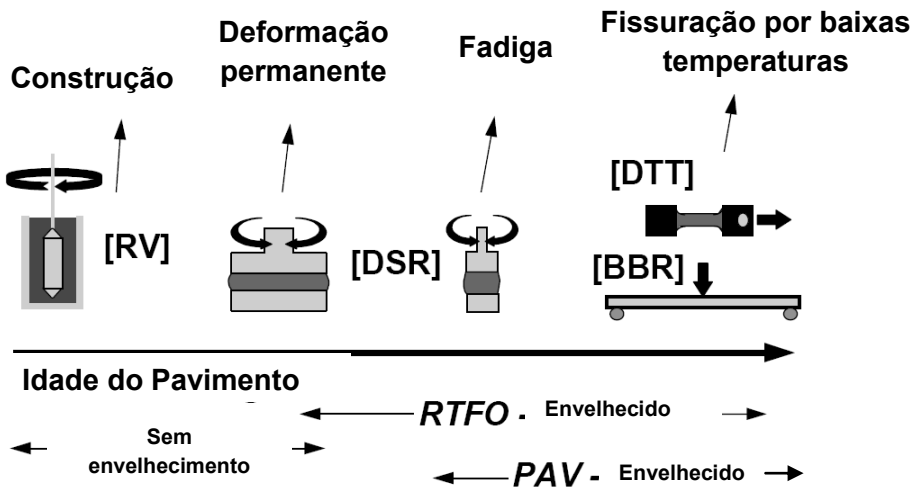


Figura 23 – Fases de envelhecimento – SUPERPAVE (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

O envelhecimento desses ligantes betuminosos realizado através do RTFO, simula a segunda fase (fabrico e aplicação). Este ensaio expõe as películas finas de ligante betuminoso ao calor e ao ar, aproximando deste modo a exposição que o ligante betuminoso sofre durante o processo de fabrico e mistura.

A terceira fase do envelhecimento do ligante betuminoso (serviço no pavimento) é simulada pelo PAV, este ensaio expõe as amostras de ligante betuminoso ao calor e pressão, de forma a simular, num espaço de horas, o envelhecimento que acontece ao ligante durante os longos anos de uso no pavimento.

É importante referir que as amostras de ligantes betuminosos usados no ensaio PAV são as mesmas que foram previamente envelhecidas pelo ensaio RFTO. Consequentemente, após o ensaio PAV, a amostra do ligante betuminoso foi exposta a todas as condições que acontecem com os ligantes betuminosos em serviço.

O quadro abaixo resume os ensaios de simulação de envelhecimento (Tabela 25) e os ensaios mecânicos (Tabela 26) sobre betumes preconizados na metodologia Superpave, que se dividem em ensaios de envelhecimento e ensaios mecânicos.

Tabela 25 – Ensaios de Envelhecimento sobre Betumes preconizados no Superpave

Equipamento	Objectivo
RFFOT - Rolling Thin Film Oven	Simula o envelhecimento que ocorre durante o processo de fabrico
PAV - Pressure Aging Vessel	Simula o envelhecimento do betume em serviço colocado no pavimento

Tabela 26 - Ensaios de Mecânicos sobre Betumes preconizados no Superpave

Equipamento	Objectivo	Propriedade do Ligante Betuminoso
DSR - Dynamic Shear Rheometer	Define as propriedades do betume para as temperaturas de serviço, elevadas e intermédias	Resistência às deformações permanentes e ao fendilhamento por fadiga
RV - Rotational Viscometer	Define as propriedades do betume para as temperaturas elevadas que ocorrem no processo construtivo	Manuseamento e bombagem
BBR - Bending Beam Rhemeter	Define as propriedades do betume para baixas temperaturas de serviço	Resistência ao fendilhamento devido a baixas temperaturas
DTT - Direct Tension Tester	Define as propriedades do betume para baixas temperaturas de serviço	Resistência ao fendilhamento devido a baixas temperaturas

Os ensaios usados no sistema SUPERPAVE são divididos em dois grupos, (conforme tabelas 25 e 26) os ensaios para o envelhecimento dos betumes, e os ensaios mecânicos sobre os betumes.

4.2.1. Ensaios de envelhecimento

Os ensaios realizados nos ligantes betuminosos, para simularem as diferentes fases descritas na Tabela 24 e Figura 23 são:

- Ensaio RTFOT

  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 (Figura 24). O betume é colocado em frascos que são sujeitos a temperaturas elevadas e à injecção 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.

  Conforme já referido anteriormente, o ensaio RTFOT, no método Superpave, tem dois objectivos, um é simular o envelhecimento do ligante betuminoso, de forma a poder usá-lo na execução dos ensaios mecânicos dos preconizados no método SUPERPAVE. O outro é determinar a perda ou ganho de massa que ocorrem durante o processo de envelhecimento. Esta perda ou ganho de massa indica o envelhecimento que pode acontecer durante o processo de fabrico, colocação e compactação.

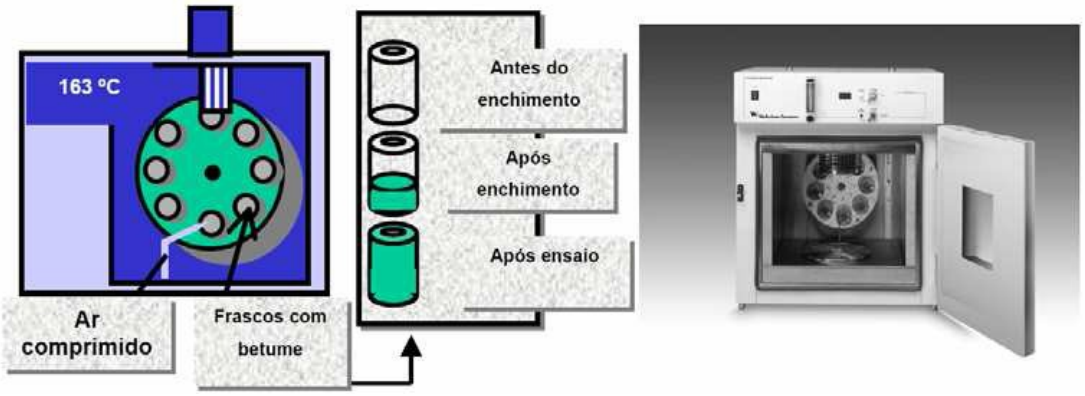


Figura 24 – Ensaio de RTFOT (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48])

- Ensaio PAV

  O ensaio PAV expõe o betume a altas pressões e temperaturas durante 20 horas para simular os efeitos do envelhecimento a longo prazo. 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 ºC (Figura 25). As vantagens associadas a este método são as seguintes:

  - 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.

Figura 25 – Exemplo de equipamento usado no ensaio PAV (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48])

4.2.2. ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos sobre o betume são:

- Ensaio RV (Rotational Viscometer)

O viscosímetro rotativo foi adoptado pelo SUPERPAVE para determinação da viscosidade do betume a temperaturas elevadas (acima dos 100 ºC). 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.

A viscosidade é determinada medindo o esforço de torção necessário para manter uma velocidade de rotação constante de um fuso quando submerso numa amostra de ligante betuminoso a uma temperatura constante (Figura 26). Normalmente a velocidade de rotação é de 20 rpm e a temperatura de ensaio é de 135 ºC. 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.

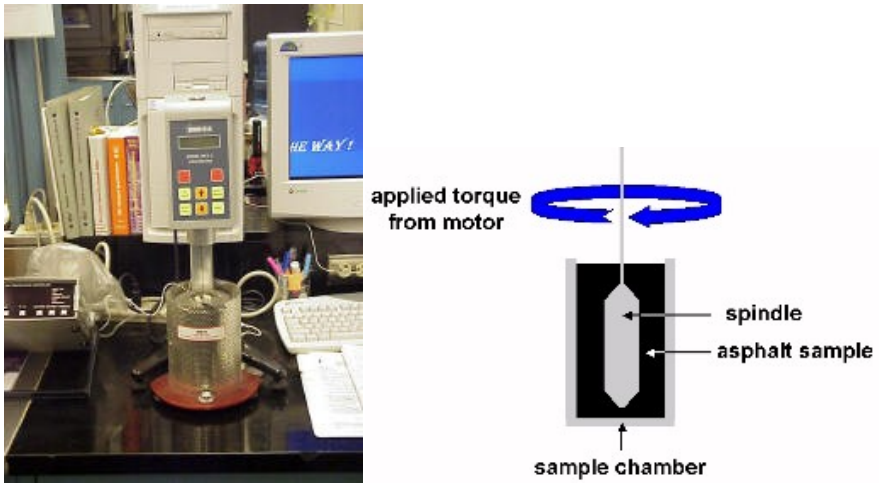


Figura 26 – Ensaio RV - Rotational Viscometer (Fonte: http://training.ce.washington.edu /WSDOT/Modules/03_materials/03-3_body.htm#dynamic_viscosity [49])

- 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.

E conforme referido anteriormente o betume é um material visco-elástico, ou seja, apresenta características elásticas e viscosas. A relação entre estas duas propriedades é usada para medir a capacidade do ligante betuminoso resistir às deformações permanentes e à fadiga. Para resistir à deformação permanente, o ligante betuminoso terá que ser elástico e, para resistir à fadiga o ligante terá que ser elástico e flexível. O equilíbrio entre estas duas necessidades é o ponto crítico.

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 (a) 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.

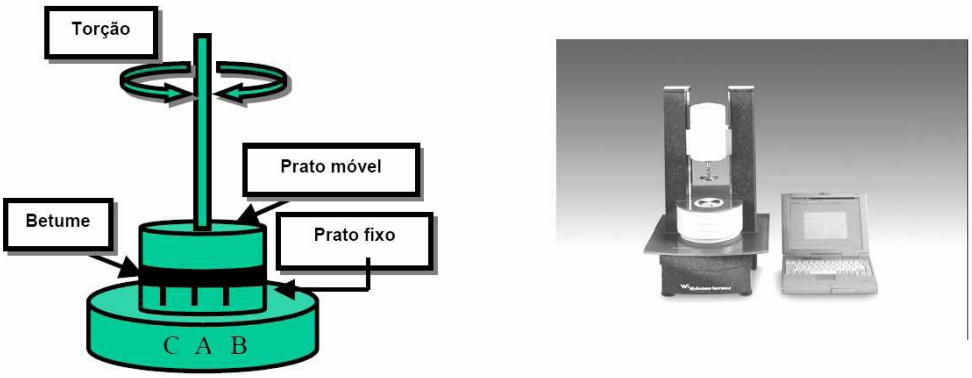


Figura 27 – Exemplo de equipamento usado no Ensaio DSR (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48])

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 (Figura 27). O prato superior, quando submetido a um esforço de torção, desloca-se de A para B, de B para C e de C para A (Figura 28). O ensaio é conduzido a uma frequência de 10 radianos por segundo que corresponde a 1.59 Hz. 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. 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 via útil e em que as suas propriedades são diferentes.

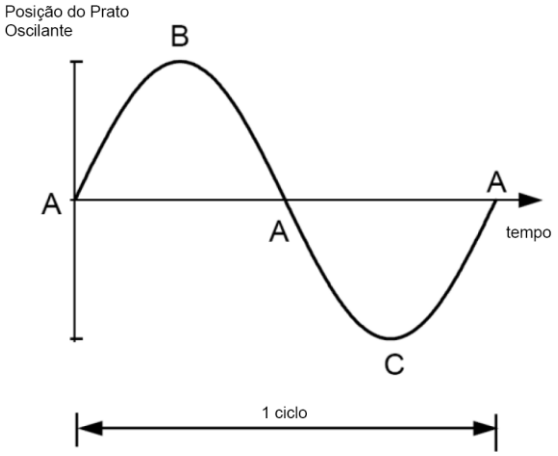


Figura 28 – Movimento produzido no Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [44])

No momento em que a força (tensão de corte τ) é aplicada ao betume betuminoso, através do prato, o DSR mede a resposta (tensão de corte γ), ou seja, a deformação do betume betuminoso à força.

O intervalo de tempo (Δt) representa o atraso na deformação, obtida em relação à tensão aplicada e, é representada pelo ângulo de fase (δ). O ângulo de fase indica-nos a relação entre a deformação recuperável e a não recuperável, bem como, a relação entre as propriedades elásticas e viscosas de um ligante betuminoso.

Para materiais com características elásticas, não existe atraso entre a tensão aplicada e a deformação obtida, então δ=0º (Figura 29). Analogamente para materiais com características viscosas, o δ=90º.

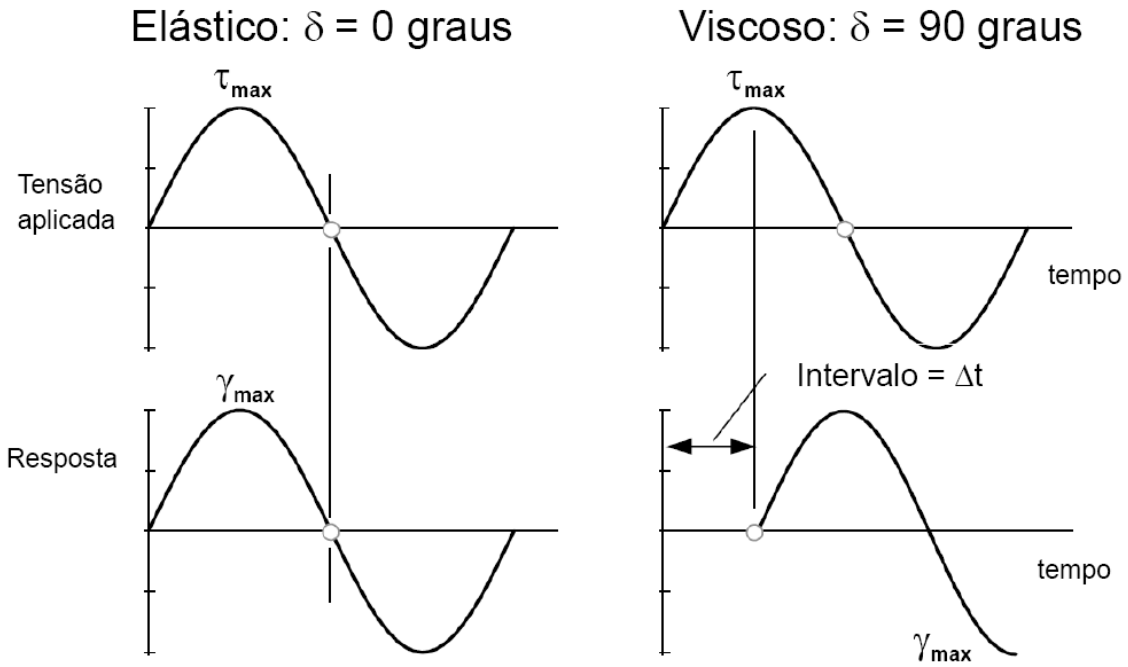


Figura 29 – Material Elástico / Viscoso - Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

A relação entre as tensões aplicadas e as tensões resultantes no DSR, permite-nos quantificar ambos os tipos de comportamentos, sólidos elásticos e líquidos viscosos, permitindo-nos calcular duas importantes propriedades dos betumes betuminosos, o módulo complexo (G*) e o ângulo de fase (δ). (Figura 30)

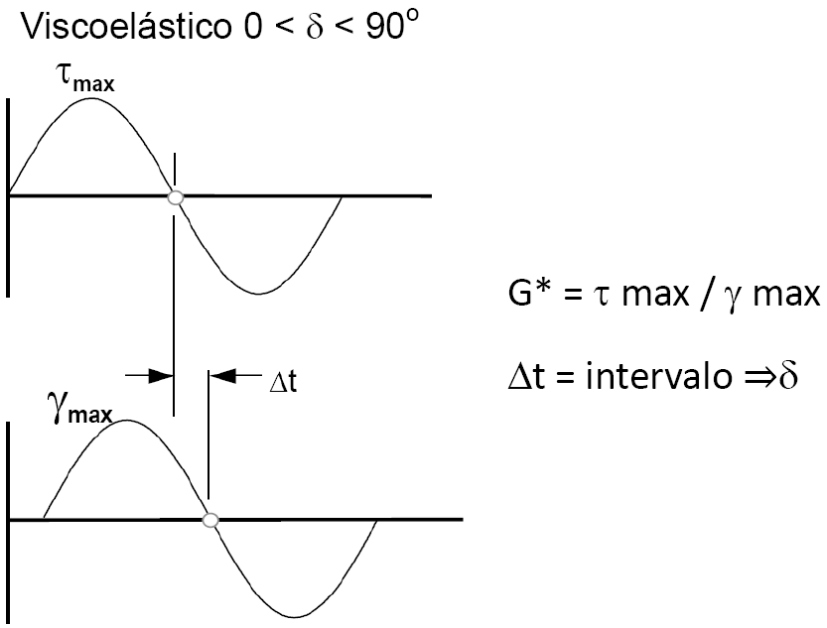


Figura 30 - Material Visco elástico - Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

O módulo complexo (G*), é a resistência do material a deformar-se, quando sujeito a cargas repetidas. Esta resistência é dividida em duas partes, uma elástica, conforme é mostrado na figura 31, e uma parte viscosa. O ângulo (δ) que a recta faz com as coordenadas horizontais, indica a medida da relação entre a componente viscosa e a componente elástica.

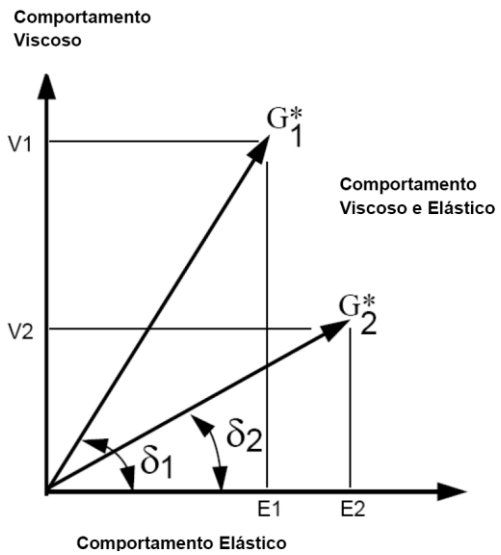


Figura 31 – Deformações temporária \ permanente, Ensaio DSR (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

Conforme iremos analisar no subcapítulo 4.3.2, dividindo o valor G* pelo sen δ, temos o factor de medida da deformação permanente. Multiplicando os valor, G* e sen δ, temos o factor de medida da fadiga.

Assim, G*/senδ é o parâmetro estabelecido pelo programa SHRP, para controlo da deformação permanente. Quanto maior for o valor G*/senδ, melhor será a resistência à deformação permanente.

Da mesma forma, G* X senδ é o parâmetro estabelecido pelo programa SHRP, para controlo da fadiga.

- 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, permite 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 termoestático, constituído por uma mistura de água, etilenoglicol e metanol. O carregamento, tal como se pode ver na figura 32, 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.

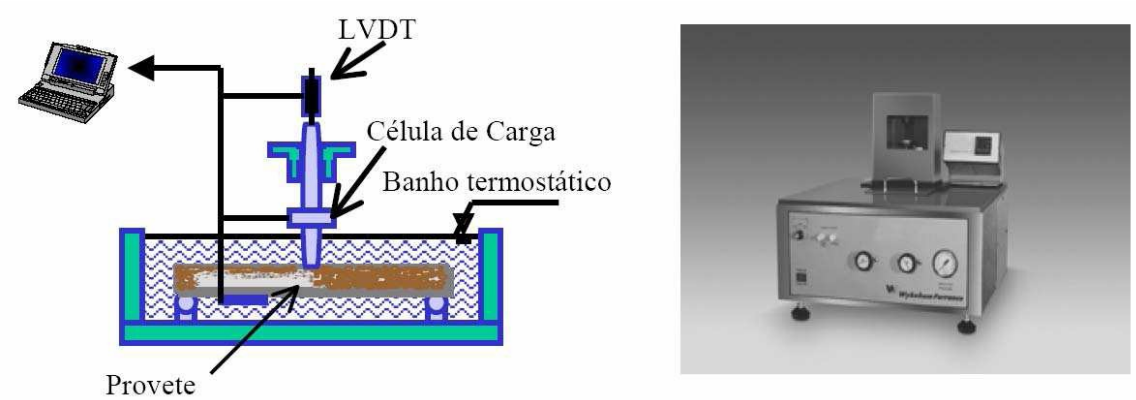


Figura 32 – Exemplo do equipamento usado no Ensaio BBR (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48])

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. Os valores que o equipamento adquire são a força aplicada e a deformação sofrida pela viga a meio vão.

Dois parâmetros são medidos com este ensaio, S (t) e m-value. S (t) está relacionado com as tensões térmicas que se criam no pavimento devido ao seu encolhimento, ou seja, avalia a resistência oferecida pelo pavimento e, o m-value está relacionado com a capacidade que o pavimento tem de aliviar essas tensões.

Este ensaio, na Europa, está normalizado através da Norma Europeia, EN 14771:2005 [33]

- Ensaio DTT (*Direct Tension Test*)

Alguns betumes, como os modificados, podem apresentar uma rigidez a baixas temperaturas maior do que o especificado, sem contudo, apresentar fendilhamento tendo em conta a sua capacidade de se deformarem sem romperem. O ensaio de tracção directa (DTT) avalia a ductilidade dos betumes a baixas temperaturas e consiste em esticar uma amostra de betume previamente envelhecida pelo processo PAV, numa temperatura controlada, até á sua rotura, como se ilustra na figura 33.

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.

A extensão na rotura corresponde à máxima tensão instalada no provete, não sendo necessariamente igual ao valor da tensão no momento da rotura. O ensaio é executado no intervalo de temperaturas às quais o betume exibe geralmente o comportamento frágil.

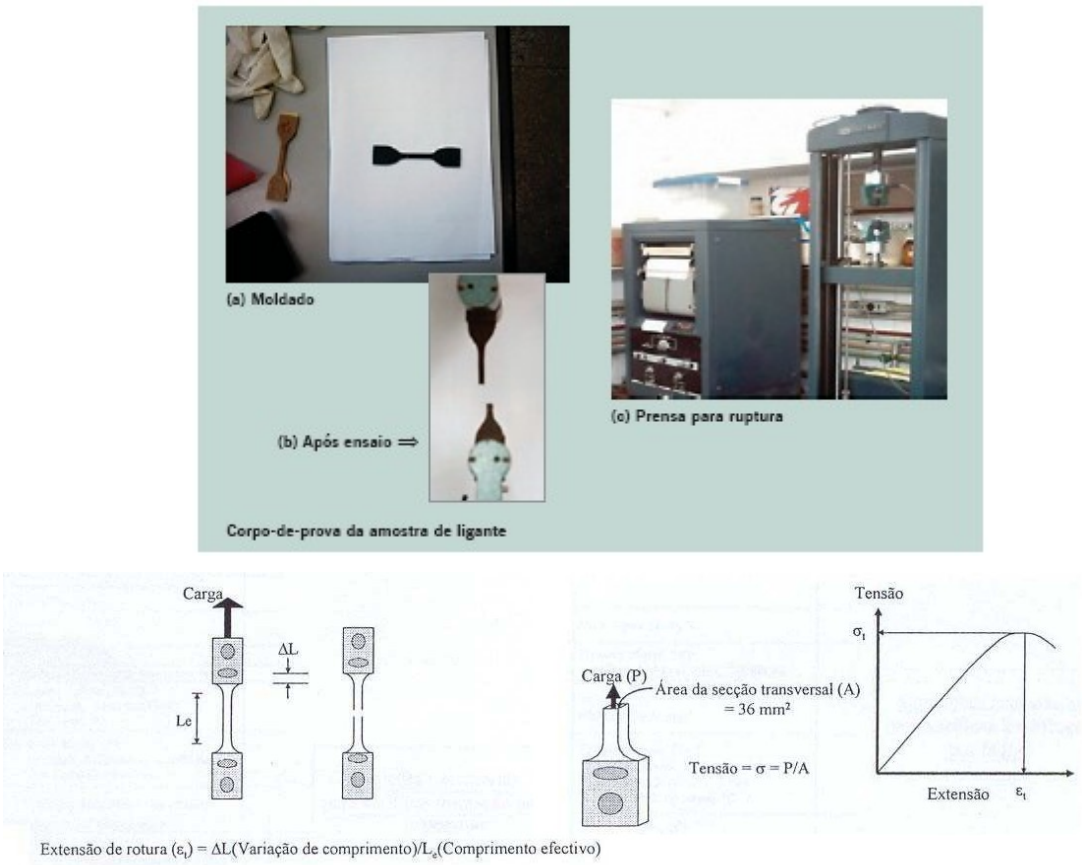


Figura 33 – Aspectos do desenvolvimento do Ensaio de tracção directa (DTT) (Fonte: Teixeira – Tese de Dissertação [48])

4.3. ESPECIFICAÇÕES DO SUPERPAVE E ANOMALIAS NO PAVIMENTO

4.3.1. ESPECIFICAÇÕES DOS BETUMINOSOS NO SUPERPAVE

Os investigadores do SHRP conceberam as especificações dos ligantes betuminosos (Tabela 27) para estabelecer a contribuição do betume em três anomalias/fragilidades encontradas no pavimento de betão betuminoso. Essas três anomalias são as deformações permanentes, fadiga e fissuração devido á temperatura. Os testes foram desenvolvidos ou adaptados para relacionar essas anomalias. A ideia principal foi desenvolvida em torno do relacionamento dessas anomalias com o clima.

Para especificar o desempenho do grau do ligante betuminoso (PG), primeiro é necessário determinar a temperatura extrema sobre a qual o pavimento vai funcionar, o grau é determinado, indicando a temperatura mais alta e mais baixa para cumprir o desempenho.

Assim, as condições climáticas locais, o risco ou a confiança e a temperatura padrão determinarão o grau PG do ligante a escolher.

O projectista pode escolher, alterar a característica condicionante que é a temperatura, introduzindo outras variáveis, tais como o tráfico e a carga sobre o pavimento. Existindo tráfico lento, potencia a existência de deformações permanentes (*Rutting*), elevando um nível o valor máximo da temperatura na classificação do ligante betuminoso. Existindo tráfico parado, potência ainda mais o aparecimento de deformações permanentes, aumentando em dois níveis o valor máximo da temperatura, mantendo nestes dois casos o valor da temperatura mais baixa constante.

O sistema de classificação Superpave considera os resultados obtidos nos ensaios para o envelhecimento do betume e mecânicos sobre o betume.

As exigências em relação às propriedades físicas permanecem constantes para todas as classes de desempenho PG (performance grades). No entanto, as temperaturas às quais estas propriedades devem ser alcançadas variam de acordo com o clima onde o betume vai ser usado (Figura 34). Um betume de classe PG 58-40 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 58 ºC e a temperatura mínima projectada para o pavimento é -40 ºC. 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.

As propriedades que são referidas na especificação são:

- Segurança
- Deformação permanente
- Envelhecimento excessivo
- Bombagem
- Fissuração por fadiga
- Fissuração por baixas temperaturas
- Armazenamento e Durabilidade

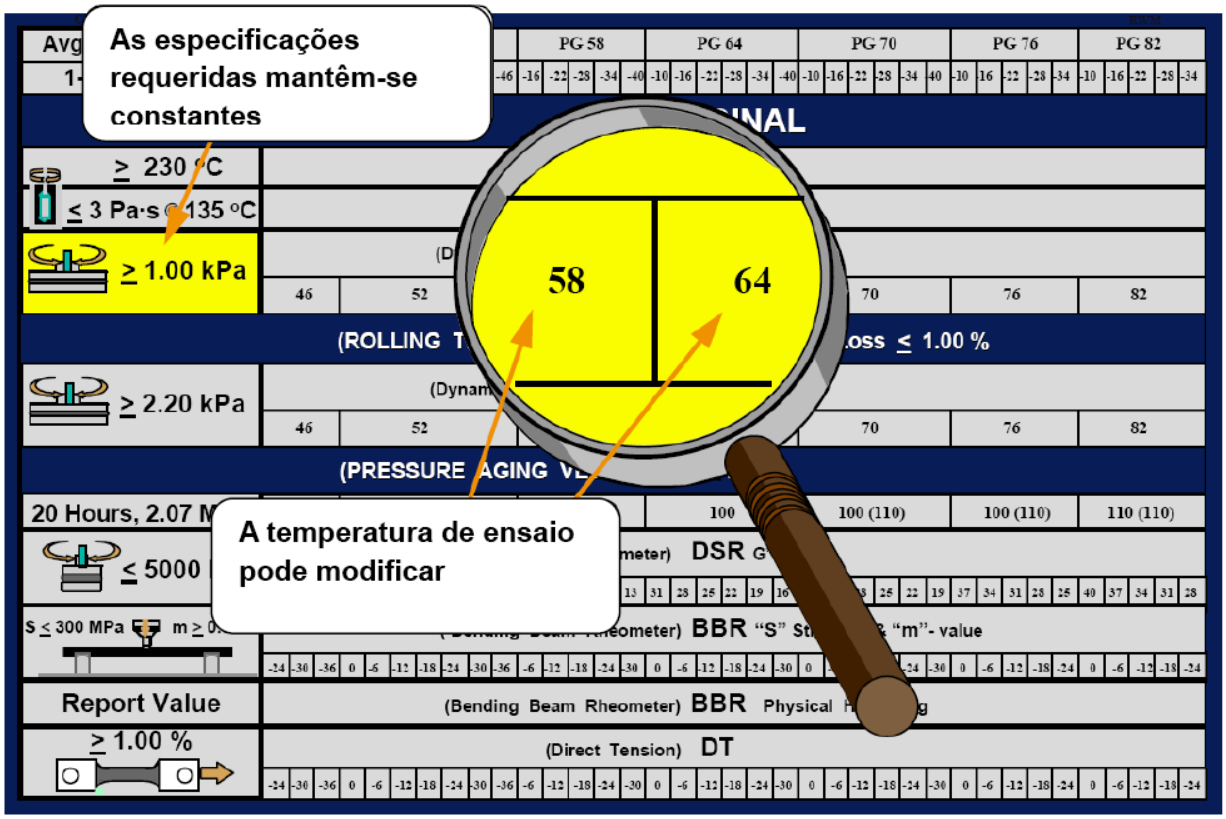


Figura 34 – Exemplo - Temperatura versus especificações do SUPERPAVE – (Fonte: *Superpave Fundamentals* [45])

O sistema de especificação de betume, através do Superpave, designado por PG é único porque reconhece que existem três mecanismos de anomalias que podem afectar as características do pavimento betuminoso e por consequente o seu desempenho, que são: as deformações permanentes (rutting), a fissuração devido às temperaturas e, as fissuras devido à fadiga do pavimento, em que o betume desempenha um papel de resistência a cada um destes mecanismos.

As propriedades do betume que contribuem para a resistência a essas anomalias são distintas em função da temperatura, ou seja:

- a contribuição do betume para a resistência às deformações permanentes é medida na temperatura máxima e é favorável para um ligante betuminoso mais elástico e mais rígido;
- a resistência à fadiga é mais crítica no pavimento à temperatura média e acontece enquanto o ligante betuminoso ainda é elástico e requer um betume mais suave;
- a contribuição do betume para a resistência à fissuração devido a diferenças térmicas é crítica apenas em temperaturas baixas e, é favorecida por um betume menos elástico.

A Figura 35 dá uma visão geral das questões das especificações e métodos de análise utilizados.

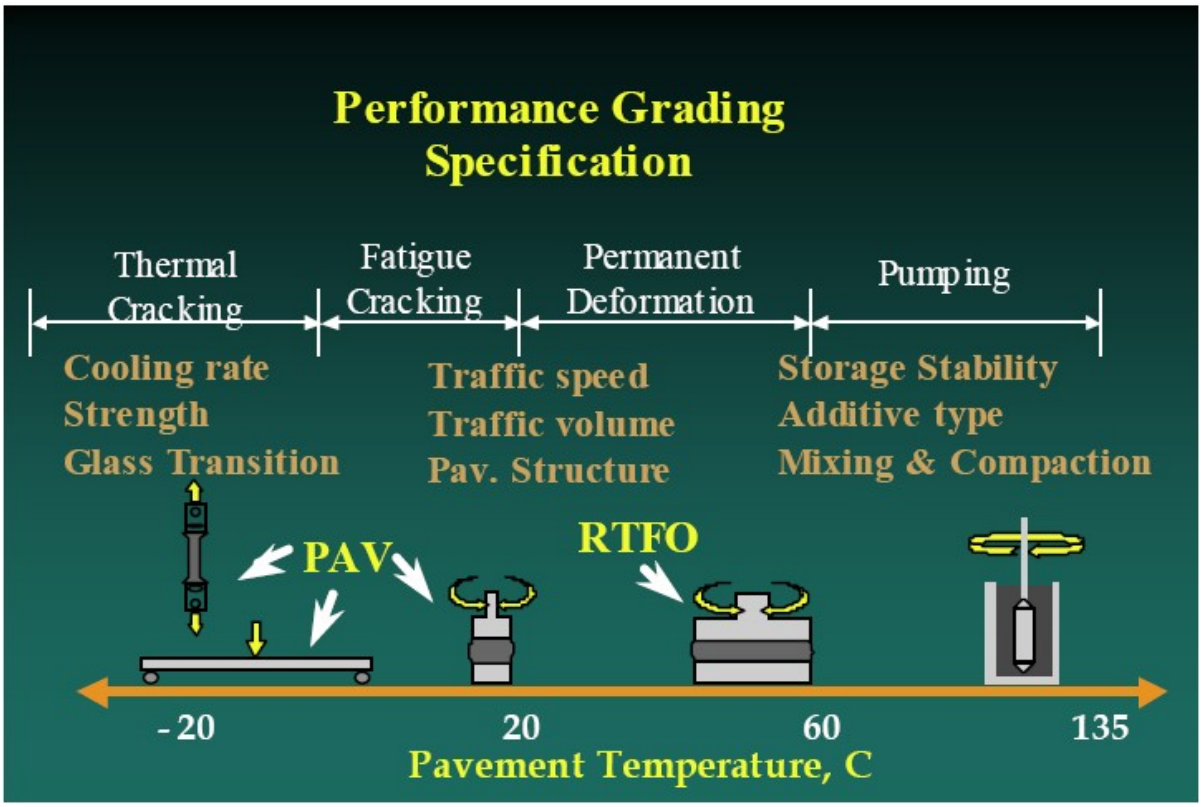


Figura 35 – Visão geral das especificações e métodos usados no SUPERPAVE (Fonte: *Workshop: Federal Highway Adminstration* [49])

O grau de performance (PG) do ligante betuminoso é seleccionado baseado no clima no qual o pavimento vai ser aplicado, e pode ser seleccionado em função da área geográfica, da temperatura do pavimento ou da temperatura do ar.

A temperatura a usar para seleccionar o ligante betuminoso é a temperatura do pavimento. O SUPERPAVE define que a temperatura máxima do pavimento é calculada através da média de sete dias consecutivos de máxima temperatura do ar, transformada em temperatura medida a 20 mm de profundidade da camada superficial, enquanto a temperatura mínima é definida como a menor temperatura do ar na região.

O SUPERPAVE, permite que os projectistas usem o grau de confiança para definir a classe de ligante betuminoso, com um risco controlável. Conforme definido no Superpave, o grau de confiança é a probabilidade de, num ano, a temperatura não ultrapassar os limites das temperaturas projectadas (figura 36)

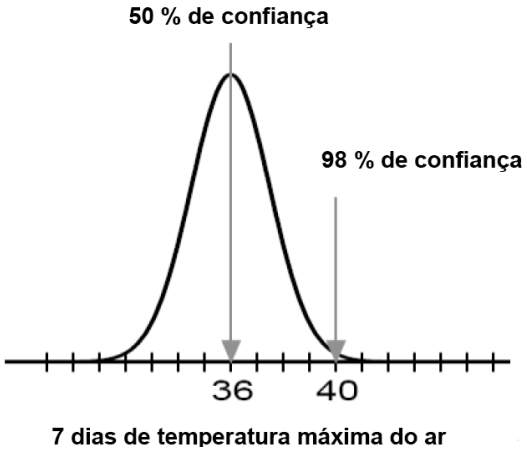


Figura 36 – Gráfico de confiança – 7 dias da temperatura máxima (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

4.3.2. As Anomalias e os Testes

4.3.2.1. Deformações Permanentes

Conforme referido na descrição do ensaio DSR, no subcapítulo 4.2.2, o betume betuminoso, pode apresentar deformações, compostas por uma componente elástica e uma componente viscosa. No ensaio DSR são determinados o módulo complexo e o ângulo de fase. O "módulo complexo a dividir pelo ângulo de fase", G* / sen δ, é o parâmetro estabelecido pelo SHRP para controlo da deformação permanente. Quanto maior for o valor de G* / sen δ, melhor será a resistência à deformação permanente.

As especificações do SUPERPAVE definem que, para minimizar o aparecimento de deformações, o valor de G* / sen δ deverá ser no mínimo igual a 1,00 kPa para o ensaio com ligantes betuminosos novos, e igual a 2,20 kPa para ligantes betuminosos após a simulação do envelhecimento através do ensaio RTFTO (figura 37).

O DSR e o ensaio RTFTO conjugados podem fazer evitar o aparecimento de deformações permanentes, pois sabe-se que o ligante betuminoso envelhece quando colocado no pavimento. Se o ligante betuminoso for duro suficiente para evitar a deformação quando da sua colocação, então será quase garantido que o mesmo não irá acontecer mais tarde.

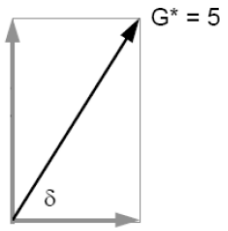
Graus de Desempenho
Média 7 - dias da temperatura máxima Temperatura de projecto
Temperatura de projecto mínima
Temp. Flash Point, T48: mínimo C
Viscosidade, ASTM D 4402: [b] Máximo, 3 Pa-s (3000 cP) Test Temp, C
Corte dinâmico , TP5: [c] **G*/Senδ, Minimo 1,00 kPa** Test Temperatura @ 10 rad/s, C
RFTFO (T240)
Perda de massa. Máximo, %
Corte dinâmico , TP5: **G*/Senδ, Minimo 2,20 kPa** Test Temperatura @ 10 rad/sec, C

Especificações requeridas para controlar as deformações permanentes

Figura 37 – Especificações dos requisitos do Superpave para o controlo das deformações permanentes do pavimento (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

Valores elevados do G* e valores baixos de δ são os atributos desejáveis do ponto de vista da resistência à deformação permanente. Como podemos ver no exemplo representado pela Figura 38, ligantes betuminosos com o mesmo módulo complexo e com valores do ângulo de fase diferentes, em que o sen δ do material A é maior do que o do material B, implica que o material B terá um melhor comportamento à deformação permanente do que o material A.

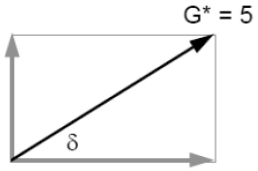
Material A



sen δ = Parte Viscosa / G* = 4/5

G* / sen δ = 5/(4/5) = 6,25

Material B



sen δ = Parte Viscosa / G* = 3/5

G* / sen δ = 5/(3/5) = 8,33

Valores maiores implicam comportamentos como sólidos elásticos

Figura 38 – Exemplo de cálculo do coeficiente de Rigidez para temperaturas altas (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

4.3.2.2. Fissuração por Fadiga

O módulo complexo e o ângulo de fase são também usados pelas especificações do método SUPERPAVE para controlar a fissuração por fadiga nos pavimentos de betão betuminoso. Uma vez que geralmente a fadiga ocorre em temperaturas baixas e intermédias, após o betão betuminoso estar em serviço, após um determinado tempo, a especificação desta propriedade usa a simulação do envelhecimento através do RFTO e PAV.

O ensaio DSR é novamente usado para determinar-se o G* e o δ, mas neste caso os dois parâmetros são multiplicados para originar o factor que se relaciona com a fadiga. A especificação do SUPERPAVE define como valor máximo de 5000 kPa, para o coeficiente de rigidez para a temperatura intermédia (figura 39)

PAV, Temperatura de envelhecimento. ºC [d]
Corte dinâmico, TP5: **G*/Sen δ, Mínimo 5000 kPa** Test Temperatura @ 10 rad/sec, ºC
Endurecimento físico, [e]
Rigidez Superficial, TPI: [f] S. máximo, 300 Mpa m-value, mínimo, 0,300 Test Temp, @ 60 sec. ºC
Tensão directa, TP3: [f] Tensão de corte, mínimo, 1,0% Test Temp, @ 1,0 mm/mm, ºC

Especificações requeridas para controlar as fissuras provocadas pela fadiga

Figura 39 – Especificações dos requisitos do Superpave para controlo da fissuração por fadiga (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

A capacidade de funcionar como um material elástico e de recuperar, após várias cargas, é uma característica desejável para os ligantes betuminosos para resistirem à fissuração por fadiga. Como podemos verificar no exemplo da figura 40, para dois materiais com a mesma rigidez, o material com menor δ, terá um comportamento mais elástico, resultando num melhor comportamento face à fadiga. É possível que a combinação de G* e δ resulte num valor de G* x sen δ, tão elevado que as partes viscosas e elásticas se tornem demasiadamente elevadas originando que o ligante betuminoso não seja capaz de resistir à fissuração por fadiga, sendo por isso que a especificação define um valor máximo, para o G* x sen δ, de 5000 kPa.

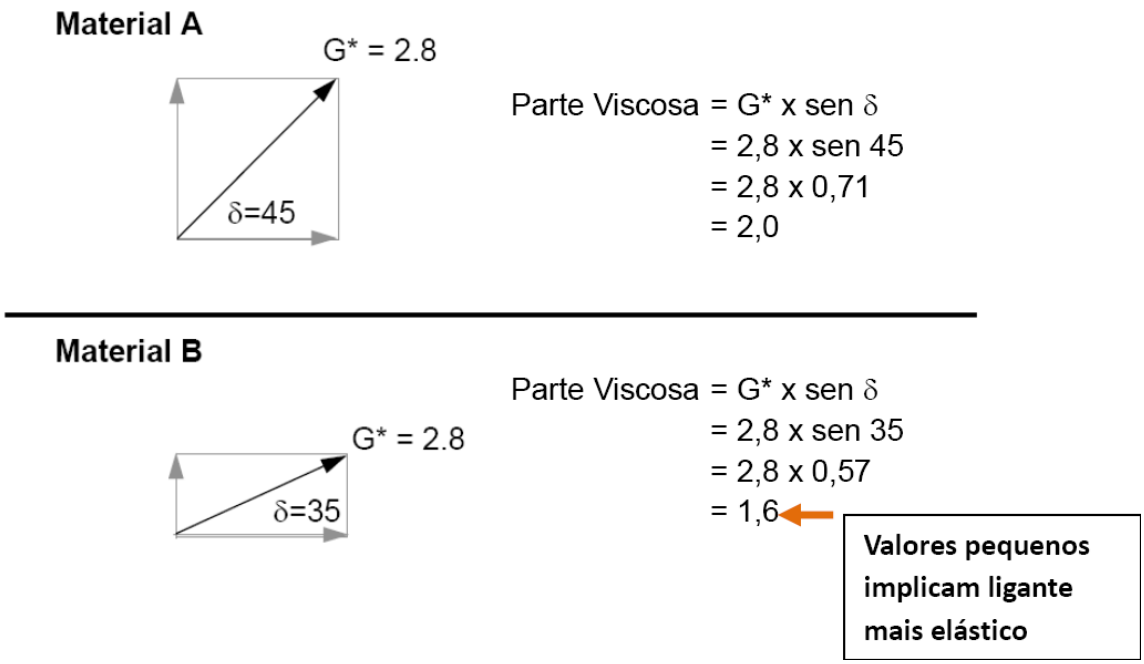


Figura 40 – Exemplo de cálculo do coeficiente de Rigidez para temperaturas intermédias (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

4.3.2.3. Fissuração por baixas temperaturas

Quando a temperatura do pavimento diminui, o betão betuminoso retrai-se. Uma vez que a fricção nas camadas inferiores impede o movimento, á tensão de tracção aumenta no pavimento. Quando essas tensões excedem a resistência do ligante betuminoso, aparecem as fissuras por baixas temperaturas. O BBR é usado para caracterizar o ligante betuminoso e definir a resistência de carga do ligante betuminoso, sendo definido um limite máximo de 300 MPa (figura 41)

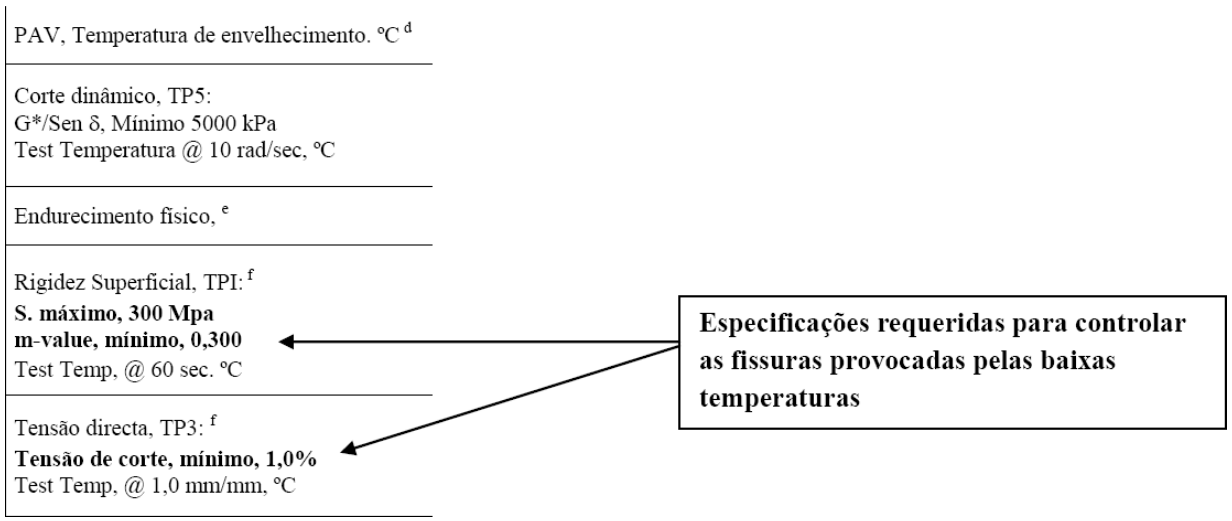


Figura 41 – Especificações dos requisitos do Superpave para controlo das temperaturas baixas (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

A "*Pressure Aging Vessel*" usa o RFTFO para simular o envelhecimento a longo prazo (5 / 8 anos). O "*Dynamic Shear Rheometer*" mede a dureza para indicar a resistência à fadiga do ligante betuminoso e o "*Bending Beam Rheometer*" mede a resistência à "*thermal cracking*".

O ensaio DTT é usado em algumas circunstâncias, para indicar que, embora o ligante betuminoso é por vezes demasiado rígido a baixas temperaturas, é resistente à fissuração à baixa temperatura, se é capaz de resistir à pressão pelo menos 1% em baixas temperaturas.

4.3.2.4. Outras especificações

Outros requisitos são exigidos aos ligantes betuminosos, conforme definido nas Especificações (Tabela 27), nomeadamente: "*Flash point test*" que é usado para propriedades de segurança. O valor mínimo para todos os ligantes betuminosos é de 230ºC e o teste é realizado em ligantes betuminosos novos.

Para garantir que os ligantes betuminosos, especialmente os modificados, consigam ser bombeados e trabalhados nas misturas betuminosas, a especificação define um valor máximo de viscosidade para ligantes novos. O valor definido é de 3 Pa.s para todos as classes de ligantes e deverá ser determinado para uma temperatura de 135ºC

A perda de massa, "*mass loss*", é um requerimento específico para garantir que o ligante betuminoso não envelhece excessivamente através da volatilização, durante a mistura dos materiais e construção. A perda de massa é calculada usando o RFTFO e, não deve exceder o valor de 1%.

Tabela 27 – Especificação dos Ligantes Betuminosos segundo o SUPERPAVE (Fonte: Traduzido de *Superpave Fundamentals* [45])

Especificações dos Ligantes Betuminosos - Graus de desempenho

Grau de Desempenho	**PG 52**							**PG 58**					**PG 64**					**PG 70**			
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28
Média 7 - dias da temperatura máxima Temperatura de projecto. °C [a]	< 52							< 58					< 64					< 70			
Temperatura de projecto mínima, °C [a]	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28
	Ligante original																				
Temp. Flash Point, T48: mínimo °C	230																				
Viscosidade, ASTM D 4402: [b] Máximo, 3 Pa-s (3000 cP) Test Temp, C	135																				
Corte dinâmico , TP5: G*/Sen δ, Mínimo 1,00 kPa Test Temperatura @ 10 rad/s, °C	52							58					64					70			
Perda de Massa, Máximo %	1,00																				
Corte dinâmico , TP5: G*/Sen δ, Mínimo 2,20 kPa Test Temperatura @ 10 rad/sec, °C	52							58					64					70			
	PAV																				
PAV, Temperatura de envelhecimento. °C [d]	90							100					100					100 (110)			
Corte dinâmico , TP5: G*/Sen δ, Mínimo 5000 kPa Test Temperatura @ 10 rad/sec, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	28	25	22	19	16	34	31	28	25
Endurecimeno físico, [e]	Registo																				
Rigidez Superficial, TPI: [f] S. máximo, 300 Mpa m-value, mínimo, 0,300 Test Temp, @ 60 sec. °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18
Tensão directa, TP3: [f] Tensão de corte, mínimo, 1,0% Test Temp, @ 1,0 mm/mm, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18

Notas

a – A temperatura no pavimento pode ser estimada, através da temperatura do ar, usando o algoritmo definido no programa SUPERPAVE, ou fornecido por a agência especifica, ou por um dos procedimentos definidos em PPX

b – Este requisito pode ser dispensado da descrisão da especificação do fornecedor, se o fornecedor fornecer garantias que o ligante betuminoso pode ser bombeado e misturado respeitando todas as regras de segurança definidas.

c – Para o controlo de qualidade da produção do betão betuminoso, a medida da viscosidade no betão betuminoso original deve ser susbtituida pela medida do corte dinâmico, G*/Send nas temperaturas em que o ligante betuminoso comporte-se como um liquido newtoniano.

d – O método de envelhecimento PAV é baseado na simulação das condições atmosféricas, numa das três temperaturas, 90 °C, 100 °C ou 110 °C. O método PAV usa a temperatura de 100 °C para PG58 e classes inferiores, com excepção de situações de deserto, em que a temperatura usada é de 110 °C

e - O ensaio da determinação da A rigidez superficial - TP1 é definida conforme a Secção 13.1, com execpção se o tempo de condicionamento for alargado para 24 hrs + 10 minutos a 10°C acima da temperatura de desempenho minima. A rigidez 24-horas e o m-value são reportados apenas para informação.

4.4. CONCLUSÃO – MÉTODO SUPERPAVE

O Método Superpave especifica os ligantes betuminosos a usar no fabrico dos pavimentos com o desempenho mais adequada, ou seja de modo que a manutenção dos pavimentos seja minimizada durante os anos de serviço do pavimento. Desta forma, o método preocupa-se em analisar as características onde o pavimento apresenta fraquezas às deformações permanentes, fadiga e fissuração, criando especificações que os ligantes betuminosos terão que obedecer para possuírem o desempenho necessário para a minimização dessas falhas e anomalias.

Sabendo que os pavimentos betuminosos reagem em função da idade, temperatura e tipo de carga, foram definidos vários ensaios que a caracterizam e relacionam com as anomalias, relacionando-as com os ligantes betuminosos.

A figura 42 resume as especificações definidas no Método Superpave.

Superpave – Especificações dos Ligantes Betuminosos			
Deformações permanentes, Fadiga e Fissuração por baixas temperaturas			
QUANDO	O QUÊ	COMO	ONDE
Construção	Segurança, bombagem Deformações permanentes	Flash Point Viscosimetro G*/ Sen δ	230 min 3 Pa-s max T(altas)
Cedo (*RTFO*)	Deformações permanentes	G*/ Sen δ	T (altas)
Tarde (+ *PAV*)	Fadiga Fissuração por baixas temp.	G*/ Sen δ BBR/DTT	T (inter) T (baixa) + 10

Figura 42 – Resumo das Especificações e Ensaios do Método Superpave (Fonte: Traduzido de *Workshop: Federal Highway Adminstration* [49])

Em suma, no método SUPERPAVE:

- As propriedades físicas medidas pelos ensaios estão directamente relacionadas com as reacções dos betumes;
- As exigências em relação às propriedades físicas permanecem constantes para todas as classes de desempenho. No entanto, as temperaturas às quais estas propriedades devem ser alcançadas variam de acordo com o clima e solicitações onde o betume vai ser utilizado;
- As especificações preconizadas abrangem toda a gama de temperaturas
- O envelhecimento do ligante betuminoso é simulado e medido em várias fases, no estado original, após fabrico e colocação da mistura betuminosa e durante o envelhecimento em serviço
- As classes definidas, *performance grades,* (PG) têm os seus limites bem definidos, havendo poucas sobreposições entre esses mesmos limites.
- Os ensaios e as especificações dos ligantes betuminosos abrangem os ligantes betuminosos modificados e não modificados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO

Durante os últimos anos as especificações do betume foram desenvolvidos, da simplicidade dos testes empíricos para os fundamentais, e testes que caracterizam os danos. Nos anos 90, nos EUA, começou a ser introduzido o método Superpave. Como resultado, as especificações do betume a nível mundial, começaram a ser alteradas de uma forma dramática, segundo dois desenvolvimentos: com a introdução de novos testes reológicos, para a indústria de betumes e a introdução do conceito "classificação performance" (PG) para avaliar pavimento, em que a temperatura e as condições de tráfego são características essenciais. Este método foi implementado com sucesso no EUA.

Enquanto comparado com os EUA, as especificações dos ligantes betuminosos e respectivos testes, na Europa continuam a seguir uma abordagem tradicional, ou seja baseada em métodos empíricos. Contudo a Europa tem e teve a feliz vantagem de poder utilizar e basear-se nas experiências dos vários países e "escolher" entre diversas opções qual a definição das especificações para os betumes e misturas betuminosas, ou seja, por um lado, existe uma rica fonte de excelência e experiência disponível na Europa, graças às amplamentes diferentes especificações de betumes e métodos de ensaio utilizados em diversos países por muitos anos. Por outro lado, existe também a oportunidade de levar em consideração a evolução SHRP.

5.1.1. MÉTODO EUROPEU

Desde 1990, as especificações europeias para os pavimentos betuminosos, têm vindo a ser desenvolvidas. Numa primeira fase, foram produzidas especificações normalizadas e métodos de testes baseados nas normalizações nacionais. Numa segunda fase foram produzidas especificações mais relacionadas com o desempenho, com as propriedades existentes e com os testes mais apropriados.

A metodologia adoptada pela Europa para a classificação dos ligantes betuminosos, após longos tempos de discussão e de análise, escolheu o desenvolvimento de critérios baseados no desempenho dos ligantes betuminosos, como a situação ideal para essa classificação. Esses desenvolvimentos implicaram a criação de novos métodos de ensaios baseados no desempenho e/ou adaptação dos ensaios existentes nos vários países de modo a uniformizá-los, para deste modo se conseguir o objectivo da proposta, que é a normalização europeia dos ligantes betuminosos. Situação esta que além de extremamente burocrática, tornou-se extremamente negociável pois estava em causa o desenvolvimento e a alteração de anos de trabalho de ensaios baseados em critérios empíricos e de metodologias enraizadas nos diferentes organismos e departamentos de ensaios. No entanto, uma situação era premente, a uniformização dos ligantes betuminosos, por imposição da Comunidade Europeia, por questões económicas, de modo a permitir a supressão de barreiras técnicas e garantir a não existência de barreiras ao comércio.

A normalização das normas europeias, encontra-se em período de conclusão, apesar de alguns ensaios usados ainda se basearem em critérios empíricos. Entretanto estão a ser desenvolvidos, e estão previstos nas próprias normas europeias, a recolha de informação através dos produtores de ligantes betuminosos de dados que permitam o desenvolvimento e estudos de novos métodos de ensaio

baseados no desempenho, para deste modo, num futuro relativamente próximo, definir ensaios baseados no desempenho.

A forma de classificação dos ligantes betuminosos, conforme descrito das normas europeias é através de classes, segundo a penetração nominal ou gamas de viscosidade.

Assim aguarda-se que num futuro próximo o processo da Normalização Europeia das Normas para os Ligantes Betuminosos seja concluída com a introdução e definição de novos ensaios baseados no desempenho, para deste modo permitir a medição directa das propriedades mecânicas fundamentais e poderem incorporar procedimentos e inovações tecnológicas aos métodos de ensaio, bem como novos materiais de pavimentação.

5.1.2. MÉTODO SUPERPAVE

O método Superpave é um método baseado no desempenho, a classificação do ligante betuminoso e em função do meio ambiente (clima) e da quantidade de tráfego, a escolha do ligante é realizada primariamente na variável clima. O ligante betuminoso é classificado pela média da temperatura máxima durante um período de sete dias, e pela temperatura mais baixa de uma determinada região.

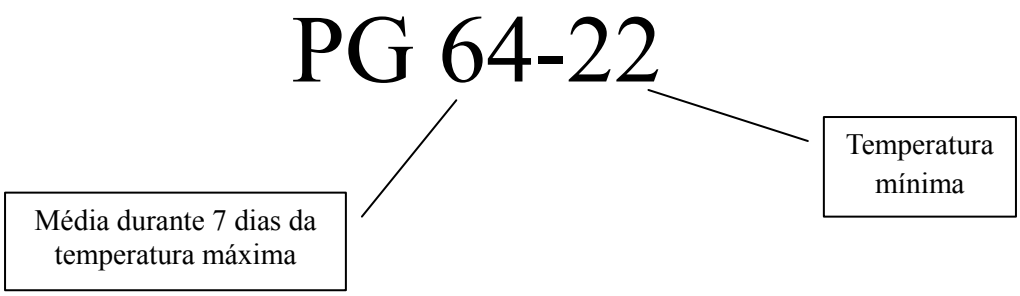


Figura 43 – Exemplo da classificação do ligante betuminoso no Método Superpave

É um método em que os ligantes betuminosos são escolhidos em função da temperatura local, onde vão ser usados.

As exigências em relação às propriedades físicas permanecem constantes para todas as classes de desempenho. No entanto, as temperaturas às quais estas propriedades devem ser alcançadas variam de acordo com o clima onde o betume vai ser usado.

O método Superpave reconhece que existem três mecanismos de anomalia que podem afectar as características do pavimento betuminoso e por consequente o seu desempenho, que são as deformações permanentes, a fissuração devido às temperaturas e as fissuras devido à fadiga do pavimento, a ideia principal foi desenvolvida em torno do relacionamento dessas fraquezas com o clima.

BIBLIOGRAFIA

[1] NP EN 13108-1:2008 Misturas betuminosas – Especificações dos materiais – Parte 1: Betão Betuminoso.

[2] Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP. "Guia para as Administrações Rodoviárias intervenientes no Processo de Normalização". Notas Técnicas Informativas INIR, Outubro de 2007

[3] Maria da Conceição Monteiro Azevedo. "Últimos Desenvolvimentos para a Marcação CE de Ligantes Betuminosos". Fórum de Inovação de Normalização, 2009.

[4] EN 12591:2009 Bitumen and bituminous binders – Specification for paving grade bitumens.

[5] EN 13924:2006 Bitumen and bituminous binders – Specification for hard paving grade bitumens.

[6] Final Draft FprEN 14023:2009 - Bitumen and bituminous binders – Specification for framework for polymer modified bitumens.

[7] EN 13108-2:2006 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 2: Asphalt Concrete for very thin layers.

[8] EN 13108-6:2006 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 6: Mastic Asphalt.

[9] EN 13108-7:2006 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt.

[10] EN 13108-8:2005 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed Asphalt.

[11] NP EN 13108-20:2008 Misturas Betuminosas – Especificações dos materiais – Parte 20: Ensaios de Tipo.

[12] NP EN 13108-21:2008 Misturas Betuminosas – Especificações dos materiais – Parte 21:Controlo da Produção em Fábrica.

[13] Estradas de Portugal, SA "Caderno de Encargos Tipo Obra – Capitulo 14.03 – Pavimentação – Características dos Materiais". Fevereiro/2009

[14] M.F.C van de ven, K.J. Jenkins, H.U. Bahia. "Concepts used for development of bitumen specifications". 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA´04). South Africa 2004.

[15] EN 1426:2007 Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration.

[16] Maria da Conceição Monteiro Azevedo. "Conceitos, constituição, propriedades e classificação." Acção de formação da GALP dedicadas ao tema. Ligantes Betuminosos para Pavimentação e suas aplicações. Lisboa 2003

[17] Ensaio de Penetração com agulha. [Consultado em Dezembro de 2010] URL: <http://www.northstonematerials.com/about-us/education/coating-process-and-coated-products>.

[18] M. Duriez et J. Arrambique "Liants Hydrocarbonés" da editora Dunod. França 1954

[19] EN 1427:2007 Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method.

[20] Isabel Eusébio. "Caracterização de betumes modificados de acordo com EN 14023" Jornadas de Normalização 2007 – EP – Almada. Novembro 2007.

[21] Pfeiffer, J.P., Van Doormael, P.M., 1936. "The Rheological Properties of Asphaltic Bitumen". Journal of the Institute of Petroleum Technologists.

[22] EN 12607-1:2008 Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da resistência ao envelhecimento sob a influência do calor do ar – Parte 1: Método RTFOT.

[23] EN 12593:2007 Bitumen and bituminous binders - Determination of the Fraass breaking point.

[24] Shell Bitumen. The Shell Bitumen Handbook. Londres 1991

[25] EN 12596:2007 Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity by vacuum capillary.

[26] Pedro Miguel Farkas Silva - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Química – "Síntese de Pré-polimeros de Isocianato terminal para modificação de betumes. Caracterização Reológica de Betumes" – Abril 2010.

[27] NP EN 12595:2009 Betumes e ligantes betuminosos - Determinação da viscosidade cinemática.

[28] EN ISO 2592:2000 Determination of flash and fire points -- Cleveland open cup method

[29] Liedi Bariani Bernucci [e outros]. Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

[30] NP EN 12592:2009 Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da Solubilidade.

[31] Humboldt-Construction Materials Testing Equipment. [Consultado em Dezembro de 2010] Disponível na Internet <http://www.humboldtmfg.com/c-5-p-395-id-5.html>.

[32] Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP. "Construção e reabilitação de pavimentos – Ligantes Betuminosos".

[33] EN 14771:2005 Bitumen and bituminous binders - Determination of flexural creep stiffness – Bending Beam Rheometer (BBR).

[34] EN 14770:2005 Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle – Dynamic Shear Rheometer (DSR).

[35] EN 13589:2008 Bitumen and bituminous binders - Determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method.

[36] EN 13703:2003 Bitumen and bituminous binders - Determination of deformation energy.

[37] Les enrobés bitumineux: formulation, fabrication, mise em place – Montreal 2006 – "Constituantes dês enrobes em France". Disponível na Internet: <http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/38c39b5c38381d1_file.pdf>

[38] LNEC - Qualidade de Produtos e Empreendimentos – Marcação CE – Avaliação da Conformidade [Consultado em Dezembro de 2010]. Disponível na Internet <http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/sistemas_avaliacao_conformidade>

[39] Decreto-Lei n.º 4/2007. Diário da República, 1º Serie – N.º5 – 8 de Janeiro de 2007

[40] Estradas de Portugal, SA "Caderno de Encargos Tipo Obra – Capítulo 14.00 - Controlo de Qualidade " Fevereiro/2009

[41] Estradas de Portugal, SA "Caderno de Encargos Tipo Obra – Capítulo 15.03 – Pavimentações - Métodos Construtivos " Fevereiro/2009

[42] BitVal – Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Test – BiTVal Phase 1 Report FEHRL. [Disponível na Internet <http://bitval.fehrl.org/fileadmin/bitval/BitVal_final_report.pdf>.

[43] Mike Southerm. "Development of Bitumen Specifications: The European experience". 9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA´07). Botswana.2007

[44] Final Draft prCEN/TR 15352:2006 – Bitumen and bituminous binders – Development of performance related specifications.

[45] Superpave Fundamentals (Reference Manual) – NHI Course # 131053. U.S. Department Of Transportation – Federal Highway Administration – National Highway Institute. S\ Data

[46] EN 14769:2005 - Bitumen and bituminous binders - Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV).

[47] Superpave – Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing – Superpave Series No.1 (SP1). Asphalt Institute 1997.

[48] Teixeira, A. Caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas em equipamento servo pneumático. Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação, Porto, 2000.

[49] Ensaio RV - Rotational Viscometer [Consultado em Dezembro de 2010] Disponível na Internet <http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/03_materials/03-3_body.htm#dynamic_viscosity>

[50] Thomas Harman (FHWA), John D'Angelo, (FHWA), John Bukowshi, (FHWA), Charles Pauhg (SaLUT). Superpave Binder Specification - Why, When, What, How, and Where?. Wokshop, Federal Highway Administration. S\ Data.