



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ricardo Filipe Martins Miranda

Estudo da Modificação de Betumes  
com Polímeros Recicladados





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ricardo Filipe Martins Miranda

Estudo da Modificação de Betumes  
com Polímeros Reciclados

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer aos meus pais Geraldino e Ana e às minhas irmãs Catarina e Isabel por todo o apoio que deram ao longo desta etapa da minha vida, sem o qual não teria sido possível.

Ao meu orientador Professor Doutor Hugo Silva pela disponibilidade, pelo acompanhamento, apoio, confiança e transmissão de conhecimentos que permitiram a realização deste trabalho.

À Liliana Costa o meu agradecimento por toda a ajuda, paciência e esclarecimento de dúvidas durante a realização deste trabalho.

Ao Eng. Carlos Palha e ao Hélder Torres, do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela sua disponibilidade e cooperação na realização deste trabalho.

À Universidade do Minho por disponibilizar os meios necessários para a realização do trabalho.

Aos meus colegas e amigos Hugo Campos, Pedro Alves, Pedro Cruz e Pedro Pina, que me acompanharam nesta etapa da minha vida, sem os quais não teria o mesmo significado.

A todos os colegas com quem interagi na realização dos diversos trabalhos ao longo do curso, em especial à Romana Afonso pela ajuda, amizade e motivação que transmitiu-me ao longo destes últimos anos.

A todos eles, e a quem por lapso aqui não mencionei, os meus sinceros agradecimentos.

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PLASTIROADS (PTDC/ECM/119179/2010) e do projeto estratégico UI 4047 – 2011-2012 do Centro do Território Ambiente e Construção.



---

## Estudo da Modificação de Betumes com Polímeros Reciclados

### RESUMO

A diminuição das reservas de combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a redução do consumo de energia e de emissões de carbono tem conduzido ao desenvolvimento de novas tecnologias, nomeadamente no âmbito das vias de comunicação. Deste modo surgiram novos tipos de misturas betuminosas com o intuito de se tornarem mais vantajosas a nível ambiental, mas também mais económicas do que as que se vinham produzindo.

Assim, o presente trabalho têm como objetivo de estudo a modificação de betumes utilizando polímeros reciclados e avaliar as propriedades elementares e reológicas do mesmo. Os polímeros utilizados para alterar o betume foram o polietileno de alta densidade (PEAD) e o etileno e acetato de vinilo (EVA). No trabalho efetuado realizou-se modificações apenas com um polímero isolado e também um sistema misto com os dois polímeros

Numa primeira fase estudou-se quais as percentagens ótimas de polímero a introduzir no betume de forma a obter o melhor comportamento elementar e reológico do betume. Seguidamente, após a caracterização do ligante partiu-se para a formulação das misturas betuminosas, incluindo o estudo da composição granulométrica e das condições de produção da mistura. Por fim realizou-se a caracterização das misturas betuminosas efetuadas através dos ensaios de sensibilidade à água, deformação permanente, módulo de rigidez e resistência à fadiga.

Verificou-se que globalmente a mistura que utilizou ligante modificado com EVA obteve um desempenho muito superior em comparação com a mistura convencional e um desempenho muito idêntico, ou por vezes superior, em relação à mistura com o betume modificado comercial Elaster<sup>®</sup>. A mistura com betume modificado com o polímero PEAD também tem um bom desempenho a temperaturas elevadas. O sistema misto não apresentou vantagens claras em relação à utilização de polímeros isolados para modificação do betume.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos plásticos; Polietileno de alta densidade (PEAD); Etileno e acetato de vinilo (EVA); Betumes modificados com polímeros; Misturas com polímeros reciclados.



## Study of Bitumen Modification with Recycled Polymers

### ABSTRACT

The decrease of fossil fuel reserves and the growing concern about energy consumption and carbon emissions reduction has led to the development of new technologies, namely in the scope of highways studies. Thus, new types of asphalt mixtures have been emerging in order to be more environmental friendly, but also cheaper than the current ones.

Thus, the aim of this work is to study the bitumen modification with recycled polymers and to evaluate their basic and rheological properties. The polymers used to modify the binders of the asphalt mixtures were the high-density polyethylene (HDPE) and the ethylene vinyl acetate (EVA). In this work, experiments were made with single polymers, but also with combined systems of both polymers.

In a first stage, this study assessed the optimum percentages of polymer that should be incorporated in the bitumen in order to maximize the basic and rheological performance of the bitumen. Afterwards, the binder characterization was followed by the mix design of the asphalt mixtures, including the study of the particle size distribution and the mixing production assessment. Finally, the characterization of the asphalt mixtures was carried out using water sensitivity, permanent deformation, stiffness moduli and fatigue resistance tests.

Mainly, it was found that the mixture with EVA modified bitumen presented a performance by far superior in comparison with the conventional asphalt mixture. Its performance was even similar, or sometimes higher than that of a mixture produced with the commercial modified bitumen Elaster<sup>®</sup>. The asphalt mixture with HDPE polymer has also shown a good performance at high temperatures. The blend of both polymers for bitumen modification did not presented clear advantages in comparison with the use of single polymers.

**KEYWORDS:** Waste plastic; High density polyethylene (HDPE); Ethylene vinyl acetate (EVA); Polymer modified bitumen; Mixtures with recycled polymers.





---

**ÍNDICE**

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento Temático.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Conteúdo da Tese .....	3
<b>2. ESTADO DA ARTE SOBRE INCORPORAÇÃO DE POLÍMEROS RECICLADOS EM MISTURAS BETUMINOSAS.....</b>	<b>5</b>
2.1. Introdução.....	5
2.2. Polímeros.....	5
2.2.1. Classificação dos Polímeros .....	6
2.2.2. Consumo e Aplicações dos Polímeros .....	7
2.3. Resíduos Plásticos .....	9
2.4. Reciclagem de polímeros .....	10
2.4.1. Reciclagem Primária.....	11
2.4.2. Reciclagem Secundária.....	11
2.4.3. Reciclagem Terciária.....	13
2.4.4. Reciclagem Energética .....	13
2.5. Pavimentos Rodoviários.....	14
2.6. Benefício da Modificação do Betume com Polímeros.....	16
2.6.1. Polímeros Utilizados na Modificação de Betumes.....	18
2.6.2. Modificação de Betumes com EVA .....	20
2.6.3. Modificação de Betumes com PEAD .....	22
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO UTILIZADOS NO ESTUDO.....</b>	<b>23</b>
3.1. Introdução.....	23
3.2. Polímeros Utilizados nas Misturas Betuminosas .....	23
3.2.1. Polímero EVA Reciclado .....	24
3.2.2. Resíduos Plásticos de PEAD .....	25
3.3. Caracterização dos Ligantes Betuminosos .....	27
3.3.1. Descrição Inicial do Estudo.....	27
3.3.2. Produção de Betumes Modificados .....	27

3.3.3. Propriedades Básicas dos Ligantes .....	28
3.3.4. Caracterização Reológica dos Ligantes .....	32
3.4. Caracterização dos Agregados .....	34
3.4.1. Granulometria das Frações de Agregados .....	34
3.4.2. Características dos Agregados .....	36
3.5. Composição Granulométrica das Misturas em Estudo .....	37
3.6. Estudo das Condições de Produção das Misturas .....	39
3.6.1. Formulação Marshall das Misturas em Estudo .....	39
3.6.2. Temperaturas de Produção das Misturas Betuminosas .....	45
3.7. Caracterização Laboratorial das Misturas Betuminosas .....	46
3.7.1. Análise Volumétrica .....	46
3.7.2. Sensibilidade à Água .....	46
3.7.3. Resistência à Deformação Permanente .....	48
3.7.4. Módulo de Rigidez das Misturas Betuminosas .....	50
3.7.5. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga .....	52
<b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
4.1. Introdução .....	55
4.2. Resultados de Caracterização dos Ligantes Betuminosos .....	55
4.2.1. Ensaio de penetração .....	56
4.2.2. Ponto de Amolecimento dos Ligantes .....	56
4.2.3. Ensaio de Resiliência .....	57
4.2.4. Viscosidade dos Ligantes Estudados .....	58
4.2.5. Estabilidade ao armazenamento .....	60
4.2.6. Seleção do Sistema Misto a Utilizar na Produção de Misturas Betuminosas .....	62
4.2.7. Caracterização Reológica dos Ligantes .....	63
4.3. Resultados caracterização misturas betuminosas .....	67
4.3.1. Sensibilidade à água .....	68
4.3.2. Resistência à deformação permanente .....	69
4.3.3. Módulo de Rigidez .....	73
4.3.4. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga .....	77

<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
5.1. Conclusões.....	81
5.2. Trabalhos Futuros.....	82
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Consumo de plástico na Europa Ocidental (BASF, 2007) .....	7
Figura 2.2: Consumo de plásticos por setor na Europa em 2011 (Europe, 2011).....	8
Figura 2.3: Atividades produtoras de resíduos na Europa (Eurostat, 2012).....	9
Figura 2.4: Caracterização resíduos plásticos na Europa (Europe, 1995).....	10
Figura 2.5: Esquema mecânico de separação de polímeros por diferenças de densidade.....	12
Figura 3.1: Polímero EVA utilizado no estudo .....	24
Figura 3.2: Curva de DSC para o polímero EVA.....	25
Figura 3.3: Resíduos de PEAD.....	26
Figura 3.4: Curva de DSC para o polímero PEAD .....	26
Figura 3.5: Equipamento utilizado no ensaio de penetração a 25 °C .....	28
Figura 3.6: Equipamento utilizado para determinar o ponto de amolecimento dos ligantes .....	29
Figura 3.7: Equipamento utilizado para o ensaio de resiliência .....	30
Figura 3.8: Equipamento utilizado no ensaio de viscosidade.....	31
Figura 3.9: Reómetro AGR2 TA (rotativo).....	33
Figura 3.10: Equipamento utilizado no ensaio <i>Multi Stress Creep Recovery</i> .....	33
Figura 3.11: Curva granulométrica dos agregados utilizados na produção de misturas .....	35
Figura 3.12: Agregados utilizados na produção das misturas betuminosas .....	37
Figura 3.13: Curva adotada e fusos granulométricos para a mistura AC14 Surf .....	38
Figura 3.14: Equipamento utilizado na produção de misturas .....	40
Figura 3.15: Compactador de impacto para os provetes de Marshall .....	41
Figura 3.16: Linhas equi-viscosidade dos ligantes em estudo .....	45
Figura 3.17: Tipo de rotura dos provetes de sensibilidade à água.....	48
Figura 3.18: Temperatura de compactação de uma laje para avaliar a resistência à deformação permanente .....	49
Figura 3.19: Equipamento utilizado no ensaio de pista.....	50
Figura 4.1: Propriedades dos ligantes no ensaio de penetração .....	56

Figura 4.2: Ponto de amolecimento dos vários ligantes estudados.....	57
Figura 4.3: Resultados dos ligantes no ensaio de resiliência .....	57
Figura 4.4: Resultados dos ligantes no ensaio de viscosidade a 150°C .....	58
Figura 4.5: Resultados dos ligantes base e sistemas isolados no ensaio de viscosidade .....	59
Figura 4.6: Resultados dos ligantes modificados com sistema misto no ensaio de viscosidade.....	59
Figura 4.7: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de penetração .....	60
Figura 4.8: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de anel e bola .....	60
Figura 4.9: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de viscosidade .....	61
Figura 4.10: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de resiliência .....	61
Figura 4.11: Resultados de penetração, ponto de amolecimento e resiliência dos sistemas mistos .....	62
Figura 4.12: Resultados do ensaio de viscosidade a 150 °C dos sistemas mistos.....	63
Figura 4.13: Módulo complexo dos ligantes em estudo .....	64
Figura 4.14: Ângulo de fase dos ligantes em estudo.....	65
Figura 4.15: Resultados do ensaio MSCR aos ligantes estudados.....	65
Figura 4.16: Microscopia de fluorescência do betume com 5% de polímero EVA.....	66
Figura 4.17: Microscopia de fluorescência do betume com 5% de polímero PEAD .....	67
Figura 4.18: Microscopia de fluorescência do betume com 4% de EVA e 2% de PEAD.....	67
Figura 4.19: Índice de tração indireta das misturas em estudo .....	68
Figura 4.20: Resistência à tração indireta e deformação dos provetes secos.....	69
Figura 4.21: Evolução da deformação das lajes durante o ensaio de pista .....	70
Figura 4.22: Rodeira em das misturas betuminosas estudadas .....	71
Figura 4.23: PRDair das misturas estudadas.....	71
Figura 4.24: WTSair das misturas estudadas .....	72
Figura 4.25: Rodeira da laje produzida com a mistura P5 (5% de PEAD).....	73
Figura 4.26: Rodeira da laje produzida com a mistura convencional .....	73
Figura 4.27: Módulo de rigidez das misturas estudadas .....	74
Figura 4.28: Ângulo de fase das misturas betuminosas estudadas .....	75

---

Figura 4.29: Módulo viscoso das misturas em estudo.....	76
Figura 4.30: Módulo elástico das misturas em estudo.....	76
Figura 4.31: Módulos de rigidez das misturas à temperatura de 20 °C e frequência de 8 Hz .....	77
Figura 4.32: Leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas.....	78





**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 2.1: Plásticos constituintes do grupo dos termoplásticos, dos termoendurecíveis e elastómeros .....	6
Tabela 2.2: Famílias e tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999) .....	16
Tabela 2.3: Grupos de polímeros usados na modificação de betume (Becker <i>et al.</i> , 2001).....	19
Tabela 2.4: Vantagens e desvantagens de polímeros utilizados na modificação de betumes.....	21
Tabela 3.1: Granulometria dos diversos agregados.....	35
Tabela 3.2: Características dos agregados utilizados neste trabalho .....	36
Tabela 3.3: Percentagem de cada fração para a mistura betuminosa AC 14 Surf.....	38
Tabela 3.4: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura convencional .....	43
Tabela 3.5: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura Elaster®.....	43
Tabela 3.6: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura E5 .....	44
Tabela 3.7: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura P5.....	44
Tabela 3.8: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura E4P2 .....	44
Tabela 3.9: Características volumétricas das lajes realizadas .....	46
Tabela 3.10: Características volumétricas das lajetas usadas no ensaio de pista .....	49
Tabela 4.1: Resultados de sensibilidade à água das misturas em estudo .....	69
Tabela 4.2: Parâmetros de avaliação das misturas estudadas à fadiga .....	79



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento Temático

A rede rodoviária constitui uma infraestrutura de transportes importante para o desenvolvimento de qualquer país. Essa rede pode desenvolver-se por vias de importância progressivamente menor de forma a cobrir todo o território.

Em Portugal, ao longo dos últimos vinte anos, houve um forte investimento na construção rodoviária. Estando concluído grande parte da rede rodoviária nacional planeada, tem-se vindo a observar um natural abrandamento de novas estradas e um aumento de despesas de conservação e reabilitação das estradas em serviço.

Com os recursos financeiros para a construção e manutenção de pavimentos cada vez mais limitados, é desejável que as obras novas ou de reabilitação sejam executadas de forma eficaz, mas mais económica.

Essa solução pode passar pela melhoria do desempenho do ligante, através da modificação dos betumes com recurso a polímeros reciclados. Já que estes são mais baratos que os polímeros virgens, acumulam, para além do melhor desempenho do ligante e consequente melhoria de comportamento da mistura betuminosa, a vantagem de ser uma solução económica e ecológica.

Os betumes modificados surgiram em Portugal durante os anos 90 do século XX com o objetivo de aumentar as características estruturais e funcionais dos pavimentos. Neste trabalho será efetuado o estudo das características estruturais de um pavimento, relacionadas com a capacidade de suportar as cargas de veículos sem sofrer alterações. Com a modificação de betumes com polímeros procura-se aumentar a resistência às deformações permanentes, aumentar a resistência à fadiga e diminuir a suscetibilidade térmica.

A modificação dos betumes puros pode ser realizada através da adição de polímeros, borrachas e fibras orgânicas e inorgânicas, entre outros. Os polímeros mais utilizados para a modificação de betumes são os elastómeros e plastómeros. A adição de elastómeros ao

betume melhora as propriedades dos mesmos a baixas e altas temperaturas de serviço, enquanto a adição de plastómeros ao betume melhora as propriedades dos betumes apenas a altas temperaturas de serviço (Branco *et al.*, 2006)

## 1.2. Objetivos

O objetivo deste projeto passa pela modificação de betume com recurso a polímeros reciclados de modo a obter um ligante resultante com desempenho superior ao de um betume convencional. Para a obtenção desse ligante resultante inovador serão reutilizados dois resíduos plásticos na modificação do betume, o resíduo de EVA proveniente do sector da agricultura (plásticos de estufa), e o PEAD proveniente do sector das embalagens.

Para além da modificação do betume com polímeros de forma isolada, o objetivo deste trabalho passa também pelo estudo de sistemas mistos. A utilização de dois polímeros em simultâneo poderá permitir o acumular das benéficas propriedades que cada um dos diferentes polímeros promove isoladamente.

A melhoria da qualidade do ligante será avaliada através da análise comparativa entre as propriedades (relativas ao desempenho do pavimento betuminoso) dos novos ligantes produzidos, dum betume convencional (35/50) e dum betume modificado comercial (Elaster® 13/60), largamente utilizados na pavimentação rodoviária.

Para além do estudo das propriedades dos ligantes, também o estudo das propriedades das misturas betuminosas resultantes deverá ser executado. Para tal, após o estudo dos ligantes, deverá ser formulada a mistura betuminosa, que para este trabalho deverá ser do tipo AC 14 Surf em concordância com as características impostas no caderno de encargos das Estradas de Portugal.

Para a produção das misturas betuminosas é necessário definir os parâmetros para a sua produção, tais como a temperatura de produção e os teores ótimos em betume. Posteriormente será avaliado o desempenho das misturas através dos ensaios de resistência à deformação permanente, sensibilidade à água, módulo de rigidez e resistência ao fendilhamento por fadiga. Espera-se que o desempenho das misturas que utilizam betume modificado com

polímeros reciclados seja superior ao da mistura convencional e próximo da mistura com o betume modificado comercial (Elaster<sup>®</sup> 13/60).

### **1.3. Conteúdo da Tese**

O trabalho desenvolvido encontra-se organizado em cinco capítulos distintos. No Capítulo 1 efetua-se o enquadramento do tema em estudo e apresentam-se e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 será feita uma introdução aos polímeros, como são classificados e as aplicações que têm. Depois é feita uma abordagem aos resíduos plásticos e ao processo de reciclagem de polímeros, identificando as características e metodologias de cada processo. Seguidamente no subcapítulo dos pavimentos rodoviários estão descritas as patologias que se pretende solucionar ao utilizar betumes modificados. Por último será feita uma abordagem aos polímeros já utilizados por outros investigadores na modificação de betumes.

O Capítulo 3 diz respeito à descrição da componente experimental do trabalho. Aqui é feito, em primeiro lugar, a caracterização dos polímeros utilizados (ensaio DSC). Depois são descritos os procedimentos para a caracterização dos ligantes betuminosos modificados com polímeros. Em seguida, após a formulação da mistura e da quantidade de polímero e betume a utilizar, é realizada a caracterização das misturas betuminosas. Na caracterização das misturas betuminosas são descritos os ensaios realizados e os procedimentos respetivos para avaliar o desempenho das misturas.

O Capítulo 4 tem como objetivo apresentar e analisar os resultados dos ensaios efetuados sobre os ligantes e misturas betuminosas desenvolvidos neste trabalho (com polímeros reciclados), e comparar os mesmos com as propriedades do betume convencional 35/50 (um dos mais utilizados no nosso país) e de um betume modificado comercial (Elaster<sup>®</sup> 13/60), bem como das misturas produzidas com estes ligantes.

Finalmente, no Capítulo 5 expõe-se as principais conclusões sobre os resultados do trabalho realizado.



## **2. ESTADO DA ARTE SOBRE INCORPORAÇÃO DE POLÍMEROS RECICLADOS EM MISTURAS BETUMINOSAS**

### **2.1. Introdução**

A construção de pavimentos rodoviários com boas prestações está associada a uma série de fatores, entre os quais a seleção dos materiais de construção que assumem um papel fundamental, principalmente o ligante. Este material é caracterizado por um complexo comportamento viscoelástico que tem sido estudado por vários investigadores.

A criação de um novo ligante com polímeros/plásticos reciclados deverá diminuir, para além do impacto económico da construção de um pavimento betuminoso, deverá diminuir o impacto ambiental através da reutilização de resíduos plásticos para a modificação de betume. No entanto, a modificação do betume é um sistema bastante complexo. Ignorando a variabilidade inerente ao próprio betume base, a modificação deste inclui um conjunto de variáveis que deverão ser exploradas no âmbito deste capítulo.

O objetivo deste capítulo de estado da arte passa então por reunir a informação necessária sobre as variáveis envolvidas no processo de modificação de betumes com resíduos plásticos/poliméricos e o processo de produção das misturas betuminosas resultantes. Para tal é importante identificar quais os polímeros e resíduos plásticos que poderão ser mais interessantes para a modificação do betume de acordo com os trabalhos já publicados no âmbito da presente área de estudo.

Após identificar os polímeros mais promissores para o estudo, e avaliar qual o betume base ideal para a modificação com polímeros, é necessário identificar na bibliografia qual a percentagem deste a utilizar para a modificação do betume, que traga melhores propriedades do ligante betuminoso resultante.

### **2.2. Polímeros**

Foi durante o século XX que se deu um enorme passo no desenvolvimento tecnológico assente, entre outros fatores, na evolução da produção industrial dos materiais poliméricos de síntese (a maioria derivados do petróleo).

Os polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular resultantes de reações químicas de polimerização. São macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores. O número de unidades estruturais repetidas numa macromolécula é chamado de grau de polimerização. Em geral, os polímeros contêm os mesmos elementos nas mesmas proporções relativas que os seus monómeros, mas em maior quantidade absoluta (Brandrup e Immergut, 1989).

De uma forma generalista passaram a designar-se por plásticos todos os materiais poliméricos de uso geral, os quais passaram a fazer parte do dia-a-dia das sociedades desenvolvidas em todas as áreas de atividade económica.

### 2.2.1. Classificação dos Polímeros

Os materiais poliméricos dividem-se em diferentes tipos, que podem ser agrupados em três grandes grupos: os termoplásticos, termoendurecíveis e os elastómeros. A Tabela 2.1 apresenta a listagem dos principais polímeros e famílias em que se integram.

Tabela 2.1: Plásticos constituintes do grupo dos termoplásticos, dos termoendurecíveis e elastómeros (Brandrup e Immergut, 1989).

Termoplásticos	Termoendurecíveis	Elastómeros
Politeraflatado de etileno (PET)	Poliuretano (PU)	Borracha Estireno-Butadieno
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	Resinas alquímicas	Neopreno
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	Poliamidas	Etileno-acetato-de vinilo (EVA)
Policloreto de Vinilo (PVC)	Resinas Epoxídicas	Poliamidas
Polipropileno (PP)	Poliésteres	
Poliestireno (PS)	Resinas fenólicas	
Acrilonitrilo-estireno-butadieno (ABS)		
Acrílicos		
Acrilonitrilo/Estireno/Butadieno (ABS)		
Policarbonatos		

Os termoendurecíveis, uma vez transformados (moldados) a uma dada temperatura, provocam uma reação permanente para os quais não podem ser transformados noutra forma. Os



polímeros termoendurecíveis podem ser aquecidos, mas não é possível obter o estado que existia antes de este ser curado. O aquecimento provoca a decomposição do polímero antes de entrar em fusão pelo que torna os polímeros termoendurecíveis impossíveis de reciclar.

A principal diferença entre os polímeros termoplásticos e os termoendurecíveis é que os primeiros podem ser amolecidos pelo calor e endurecidos pelo frio repetidas vezes sem perder as suas propriedades. No entanto, estando sujeito bastantes vezes a altas temperaturas ocorre o envelhecimento dos polímeros, pelo que a suas transformações estão limitadas a um certo número de aplicações.

Os elastómeros são materiais macromoleculares que recuperam rapidamente a sua forma e dimensão inicial, após cessar a aplicação de uma tensão (Harper, 1975). A principal propriedade dos elastómeros é o comportamento elástico após deformação em tração ou compressão. Os elastómeros são normalmente sintetizados com vista a obter as propriedades da borracha natural. Os elastómeros têm um comportamento intermédio entre os termoendurecíveis e os plastómeros (Harper, 1975).

### 2.2.2. Consumo e Aplicações dos Polímeros

Na Europa Ocidental o consumo total de polímeros (Figura 2.1) apresentou um grande crescimento, principalmente a partir de 1990, sendo previsto que no ano 2015 haja um consumo de 53 milhões de toneladas (BASF, 2007).

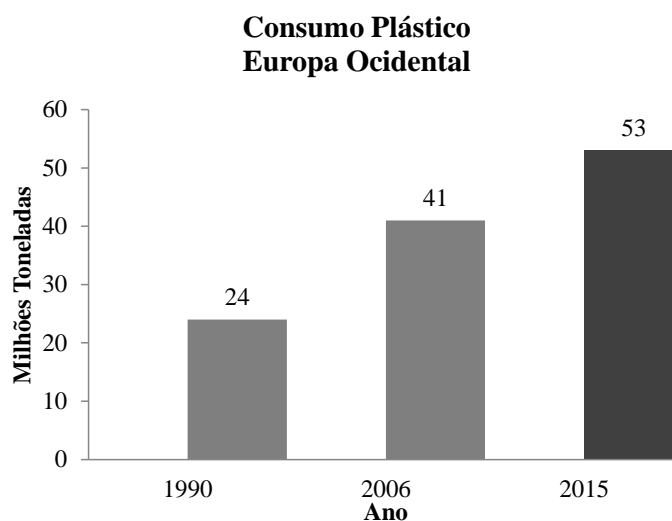


Figura 2.1: Consumo de plástico na Europa Ocidental (BASF, 2007)

Relativamente ao consumo a nível mundial, espera-se que este apresente um crescimento na ordem dos 5% por ano (BASF, 2007).

Os plásticos têm um papel vital em quase todos os aspetos da vida moderna e inegavelmente ajudam de diferentes formas a melhorar a qualidade de vida e o bem-estar, sendo através do seu uso nas embalagens dos nossos alimentos, sendo utilizados nas tubagens de água e esgotos, sendo utilizados em brinquedos para crianças, no vestuário, na medicina ou mesmo em automóveis (plastval, 2012). Na Figura 2.2 estão apresentados os resultados do consumo de plásticos nos principais setores a nível Europeu (Europe, 2011).

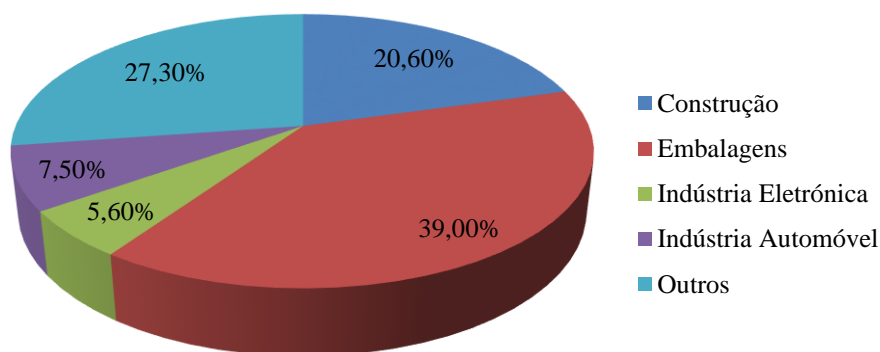


Figura 2.2: Consumo de plásticos por setor na Europa em 2011 (Europe, 2011)

A embalagem continua a ser a maior aplicação para os plásticos, representando cerca de 39% do total de consumo, seguindo-se a área da construção (onde se enquadra este trabalho) com 20,6%. Já a indústria automóvel representa cerca de 8% e a indústria eletrónica/elétrica 6%. A utilização em medicina, lazer, agricultura e outras aplicações representam cerca de 27%.

Segundo Soliz (2007) alguns polímeros naturais ou sintéticos podem atuar como estabilizantes de solos, baseando-se na capacidade destes repelirem a água, definida como propriedade hidrófoba, e de gerarem coesão por meio de polimerização. Considerando o carácter iónico dos polímeros, eles podem ser aniónicos (atuando no sentido de promoverem a dispersão dos solos), neutros (caso em que não influenciam nas condições de floculação ou dispersão dos solos) ou catiónicos (atuando no sentido de promoverem a floculação dos solos). Sabe-se também que os materiais orgânicos poliméricos mostram-se, em geral, eficientes quando aplicados na estabilização de solos ácidos. A partir desta constatação, obviamente, a acidez dos solos tropicais poderia consistir em um fator técnico favorável ao

emprego desta solução, mas o seu emprego tem-se mostrado economicamente discutível, mesmo em países de grande desenvolvimento tecnológico.

### 2.3. Resíduos Plásticos

O plástico constitui uma fração cada vez mais importante dos resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo a sua eliminação ou reutilização um dos assuntos mais debatidos e com necessidade de ser bem gerida.

Em 2010 a produção total de resíduos provenientes de atividades económicas e de resíduos domésticos na União Europeia atingiu 2 570 milhões de toneladas, o que corresponde a valores ligeiramente superiores aos registados em 2008, mas inferiores a 2004 e 2006. Estes valores relativamente baixos em 2008 e 2010 podem explicar-se, pelo menos em parte, pelo abrandamento da atividade económica que resultou da crise financeira e económica. Já Portugal anualmente produz aproximadamente 4 milhões de toneladas de resíduos (Eurostat, 2012). Os principais setores de atividades produtores de resíduos podem ser verificados na Figura 2.3.

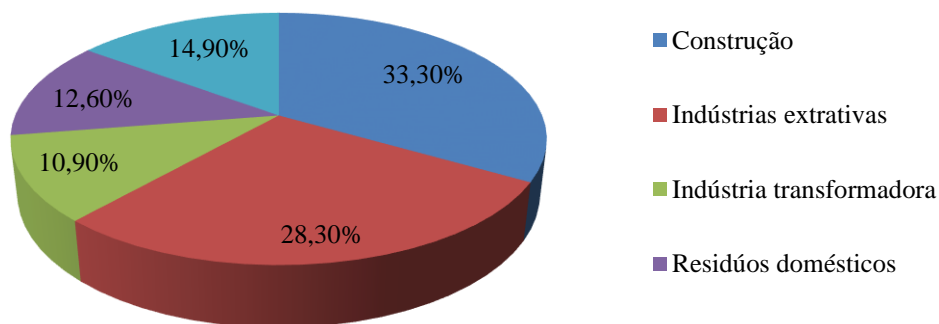


Figura 2.3: Atividades produtoras de resíduos na Europa (Eurostat, 2012)

A partir destes dados seria importante saber qual a percentagem de resíduos plásticos, e que tipos de materiais poliméricos os constituem, para que as suas propriedades possam ser previstas com algum rigor. A associação dos produtores de plástico na Europa (Europe, 1995) estimou que cerca de 7% dos resíduos sólidos urbanos são constituídos por materiais plásticos, e o tipo de plásticos presentes nesses resíduos podem ser vistos na Figura 2.4.

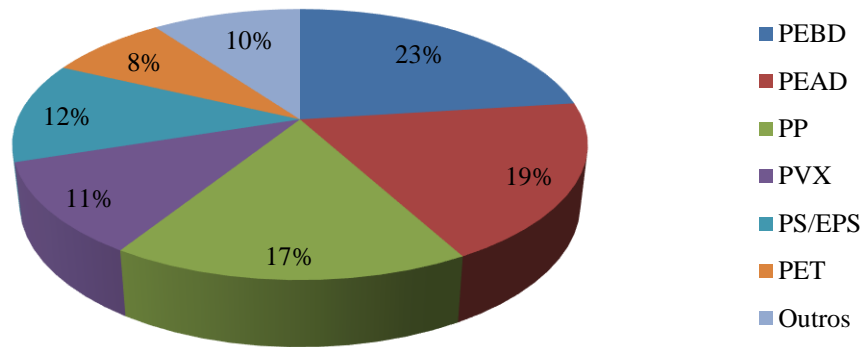


Figura 2.4: Caracterização resíduos plásticos na Europa (Europe, 1995)

Como se pode ver, o PEBD e PEAD, com 23% e 19% respetivamente, são os materiais que apresentam uma percentagem maior dos vários resíduos de polímeros. Em Portugal, de acordo com a empresa de reciclagem local Gintegral, o resíduo plástico reciclado existente em maior quantidade é o polietileno de alta densidade.

## 2.4. Reciclagem de polímeros

Desde a primeira produção à escala industrial de produtos plásticos, a produção, o consumo e geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) aumentou consideravelmente. Assim, a reciclagem dos RSU foi foco de muitos investigadores nas últimas décadas, pesquisa impulsionada por mudanças na regulamentação e por questões ambientais.

Os plásticos são usados em diversas aplicações diárias, sendo que muitos itens acabam como resíduos após uma única utilização ou num curto período de tempo após a sua compra, como por exemplo as embalagens de alimentos. A reutilização do plástico é preferível à sua reciclagem uma vez que consome menos energia e menos recursos levando a uma redução de resíduos (Al-Salem *et al.*, 2009).

Com o aumento dos custos de materiais virgens e diminuição de espaços para aterros é necessário encontrar soluções alternativas para os RSU (Zia *et al.*, 2007). Anos de pesquisa, estudo e desenvolvimento resultaram em algumas formas de tratamento, reciclagem e valorização dos resíduos de forma económica e ambientalmente proveitosa (Howard, 2002).

A reciclagem de polímeros pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária ou energética (Brandrup, 1992, Ehrig e Curry, 1992).

#### **2.4.1. Reciclagem Primária**

A reciclagem primária consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais em produtos com características equivalentes às daquelas dos produtos originais produzidos com polímeros virgens. Pode ser dado como exemplo a reciclagem das aparas de corte de peças plásticas que são novamente introduzidas no processamento.

De acordo com Al-Salem *et al.* (2009) este tipo de reciclagem destina-se também a muitos plásticos que são utilizados em atividades diárias como embalagens de comida, que tem apenas uma única utilização ou durante um período de tempo bastante curto. Neste processo os resíduos plásticos utilizados para reciclagem dão origem a produtos após reciclagem do mesmo tipo do original. Na reciclagem primária é necessário que os resíduos estejam separados pelos diversos tipos e também que estejam quase limpos, o que é uma condicionante neste processo (Barlow, 2008).

#### **2.4.2. Reciclagem Secundária**

A reciclagem secundária consiste na conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos, por um processo ou uma combinação de processos, em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem, por exemplo, reciclagem de embalagens de PP (polipropileno) para obtenção de sacos de lixo. A utilização dos resíduos plásticos em pavimentação, apresentado neste trabalho, também se enquadra neste grupo de reciclagem secundária.

A reciclagem secundária, também conhecida como reciclagem mecânica, é o processo de recuperação de resíduos plásticos para reutilização no fabrico de novos produtos por meio mecânico (Mastellone, 1999). A reciclagem mecânica dos RSU só pode ser realizada em resíduos de polímero único. Para a produção de um material final homogêneo é necessário separar, lavar e preparar os RSU para a reciclagem. Na reciclagem mecânica são necessários os seguintes procedimentos: 1) separação do resíduo, 2) moagem, 3) lavagem, 4) secagem e 5) reprocessamento e transformação do polímero num novo produto (Spinacé e Paoli, 2005).

A etapa de separação é importante pois através dela é necessário limitar o número de impurezas a níveis inferiores 1%. A presença de macro contaminantes, como vidro, papel, metal ou outros polímeros, mesmo em concentrações pequenas, pode alterar as propriedades do polímero (Sandani, 1995).

A separação pode ser realizada manual ou mecanicamente. No primeiro caso a separação dos polímeros é realizada através da identificação da simbologia contida no produto acabado ou através de testes simples, como o do odor dos vapores de queima, aparência da chama, temperatura de fusão e solubilidade, os quais são baseados nas suas características físicas e de degradação térmica que são distintas entre os vários polímeros (Braun, 2013). A separação mecânica é baseada na diferença de densidades, embora como os polímeros apresentam densidades próximas este procedimento torna-se mais difícil. O processo de separação de polímeros pela densidade está descrito na Figura 2.5 (Marques e Tenório, 2000, Pascoe e O’Connell, 2003).

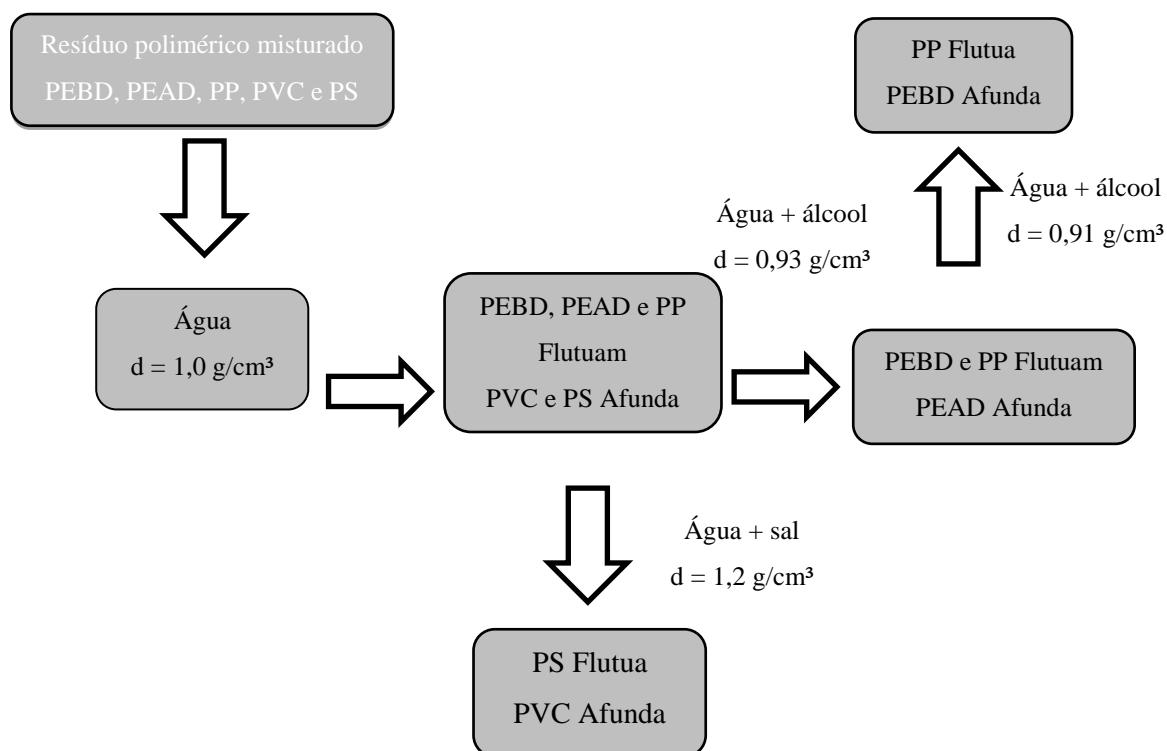


Figura 2.5: Esquema mecânico de separação de polímeros por diferenças de densidade

Independentemente do sistema de reciclagem, o processo de separação é o mais importante no ciclo de reciclagem. Uma das principais preocupações dos recicladores é a remoção da tinta

sobre o plástico, uma vez que as propriedades de plásticos reciclados pode ser comprometida por causa do nível concentração criado por estes materiais de revestimento (Kang e Schoenung, 2005).

Depois da separação, os resíduos poliméricos devem ser moídos em moinhos de facas rotativas e peneirados antes do reprocessamento. Isto permite acomodar melhor o material no equipamento de processamento, como a extrusora ou a injetora (Brandup, 1996).

O polímero depois de moído é lavado normalmente em tanques contendo água ou solução de detergente (Ehrig e Curry, 1992). Nesta etapa é necessária a remoção do detergente nos resíduos. A secagem do material é importante, pois alguns polímeros, como os poliésteres ou as poliamidas, podem sofrer hidrólise durante o reprocessamento.

#### **2.4.3. Reciclagem Terciária**

A reciclagem terciária ou química resume-se a processos que convertem materiais plásticos em pequenas moléculas, normalmente líquidos ou gases, que são adequados para utilização como matéria-prima para a produção de novos produtos petroquímicos e plásticos (Mastellone, 1999). O termo produto químico é usado devido ao facto de ser necessário ocorrer uma alteração na estrutura química do polímero. Produtos de reciclagem química têm provado ser úteis como combustível. A tecnologia por detrás desta alteração é a despolimerização, processo que pode resultar num sistema industrial muito rentável e sustentável, proporcionando um rendimento elevado de produtos e num mínimo desperdício (Al-Salem *et al.*, 2009).

A principal vantagem da reciclagem química é a possibilidade de tratamento de polímeros heterogêneos e contaminados com limitada utilização de pré-tratamento. Quando uma empresa pretende reciclar 40% ou mais do material a solução ideal passa pela reciclagem química (Sheirs, 1998).

#### **2.4.4. Reciclagem Energética**

A reciclagem quaternária ou energética é um processo tecnológico de recuperação de energia por incineração controlada dos resíduos (Spinacé e Paoli, 2005).

Esta é utilizada quando o resíduo polimérico não tem utilização prática ou económica, sendo possível fazer uso do seu conteúdo energético através da inceneração. No entanto, alguns polímeros podem causar problemas durante a combustão, principalmente os que contenham halogénios, como o cloro ou fluor (Mader, 1992). Em geral considera-se que após a incineração dos RSU há uma diminuição de volume dos mesmos na ordem dos 90-99%, o que reduz a ocupação aquando da deposição em aterro. No entanto, no processo de recuperação de energia, a destruição de espumas, entre outros resíduos, liberta para a atmosfera CFCs entre outros agentes perigosos presentes (Zia *et al.*, 2007).

Rigamonti *et al.* (2014) relataram a avaliação do ciclo de vida (ACV) de uma série de tecnologias de recuperação de plástico, incluindo comparações entre diferentes opções para o descarte de plástico contido no lixo doméstico. Os resultados são particularmente sensíveis à qualidade do plástico produzido, o que influencia a proporção do material virgem de substituição. A melhor escolha é concentrar em tecnologias que produzem reciclados de elevada qualidade e, quando isso não é possível com a obtenção de uma qualidade adequada, o plástico deverá ser usado na produção de combustíveis derivados de resíduos. Al-Salem *et al.* (2009) também reviu os passos de recuperação de resíduos de plástico, chegando à conclusão de que tanto a reciclagem de materiais e recuperação de energia, em diferentes formas, desempenham um papel importante na sustentabilidade do fim da vida útil de resíduos urbanos provenientes de itens de plástico.

## **2.5. Pavimentos Rodoviários**

Os pavimentos rodoviários são estruturas constituídas por diversas camadas, ligadas ou não, que têm como função essencial assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, devendo sob a ação do tráfego e das condições climáticas garantir que durante a sua vida útil não ocorrem danos que comprometam as suas condições de serviço (Branco *et al.*, 2008).

Às misturas betuminosas e aos seus materiais constituintes são exigidas determinadas características gerais durante a construção do pavimento e após a sua entrada ao serviço. De uma maneira geral, são exigidas às misturas betuminosas características de estabilidade,



durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Freire, 2004).

De entre as várias propriedades, a estabilidade de uma mistura betuminosa consiste na sua capacidade de resistir à passagem dos veículos com pequenas deformações. Esta aumenta com a compacidade do material e com a quantidade ótima de betume. Para que as misturas betuminosas resistam ao desgaste causado pelo tráfego e pelas condições climáticas exige-se que apresentem ainda elevada durabilidade. Geralmente, quanto maior for a quantidade de betume maior será a durabilidade da mistura, porque este protege os agregados retardando o seu envelhecimento e evitando o preenchimento dos vazios com água. Contudo, uma quantidade excessiva de betume pode comprometer a estabilidade da mistura. A utilização de agregados de granulometria contínua também melhora a sua durabilidade da mistura por a tornarem mais impermeável (Branco *et al.*, 2008).

O facto de uma mistura betuminosa ser flexível garante que se adapta aos assentamentos graduais das camadas inferiores, sem que haja fendilhamento do pavimento. A flexibilidade de uma mistura geralmente aumenta com o aumento da percentagem de betume e da utilização de agregados de granulometria aberta (Branco *et al.*, 2008).

Um dos fenómenos de maior importância nas misturas betuminosas de pavimentação é a fadiga, sendo que esta é originada pela passagem repetida dos rodados dos veículos. A resistência à fadiga aumenta com a durabilidade da mistura e, como tal, com o aumento do teor em betume. No entanto, uma grande percentagem de betume pode originar a exsudação do ligante e comprometer a estabilidade da mistura (Branco *et al.*, 2008).

Os pavimentos rodoviários, logo após a sua construção, são solicitados por diversas cargas que ocorrendo de forma continuada contribuem para a degradação do mesmo. A utilização de betumes modificados tem como objetivo a redução ou eliminação das patologias que os pavimentos apresentam ao longo do tempo. Para os pavimentos flexíveis, podem ser consideradas as seguintes famílias de degradações:

- Deformações;
- Fendilhamento;
- Desagregação da camada de desgaste;
- Movimento de materiais.

Na Tabela 2.2 estão descritos os diferentes tipos de degradações para cada tipo de família (Pereira e Miranda, 1999).

Tabela 2.2: Famílias e tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999)

Família de degradações	Tipos de degradações		
Deformações	- Abatimento		
	- Deformações localizadas:	- longitudinal:     - transversal	- eixo   - berma
	- Ondulação		
	- Rodeiras:	- grande raio (camadas inferiores)   - pequeno raio (camadas superiores)	
Fendilhamento	- Fendas:	- fadiga   - longitudinais:     - transversais   - parabólicas	- eixo   - berma
	- Pele de crocodilo:	- malha fina ( $\leq 40$ cm)   - malha larga ( $> 40$ cm)	
Desagregação da camada de desgaste	- Desagregações		
	- Cabeça de gato		
	- Peladas		
	- Ninhos		
Movimento de materiais	- Exsudação		
	- Subida de finos		

Durante o presente trabalho não deverá ser possível avaliar se a modificação dos ligantes com resíduos plásticos poderá evitar/retardar que todas as degradações apresentadas ocorram nos pavimentos. No entanto, serão avaliadas propriedades que indiciam quanto ao desempenho do dessas misturas contra os agentes climáticos e à ação de cargas que levam à ocorrência de muitas destas patologias. Nomeadamente será avaliada a resistência à variação da temperatura (reologia dos betumes, módulo das misturas a diferentes temperaturas), resistência ao fendilhamento por fadiga, sensibilidade à água e resistência à deformação permanente.

## 2.6. Benefício da Modificação do Betume com Polímeros

O desempenho das estradas pode ser melhorado através da modificação do betume. Existem vários modificadores que podem ser utilizados para melhorar as propriedades da camada de desgaste de uma estrada (Kalantar *et al.*, 2012). A adição de polímeros ao betume permite melhorar o desempenho do pavimento, oferecendo uma maior resistência à deformação

permanente e diminuindo os danos por fadiga. Estes polímeros foram utilizados com sucesso em locais sujeitos a um tráfego elevado, sendo os polímeros mais utilizados o etileno acetato de vinilo (EVA), estireno-butadieno-estireno (SBS), borracha de estireno-butadieno (SBR), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), entre outros.

Os polímeros mais utilizados na modificação de betumes podem dividir-se em duas categorias: os elastómeros e os plastómeros. Dos elastómeros o principal polímero utilizado é o SBS (estireno-butadieno-estireno) que permite aumentar o ponto de amolecimento e reduzir a penetração de betume, aumentando a flexibilidade e a ductilidade a baixas temperaturas, permitindo a sua utilização numa gama de temperaturas mais alargada que os betumes convencionais. Yildirim (2007) refere no seu estudo que a introdução de SBS no betume resulta numa melhor ductilidade a baixas temperaturas, melhora a viscosidade, melhora a recuperação elástica e também as propriedades coesivas e adesivas do pavimento.

As características desejáveis do betume modificado com ligantes incluem uma maior recuperação elástica, um maior ponto de amolecimento, maior a viscosidade, maior coesão e uma maior ductilidade (King, 1999). Com a introdução de polímeros espera-se obter misturas betuminosas mais flexíveis às temperaturas de serviço, reduzir viscosidade a temperaturas de aplicação, melhorar resistência à abrasão das misturas, aumentar a resistência à fadiga das misturas, reduzir a espessura dos pavimentos e reduzir os custos de vida do pavimento (Becker *et al.*, 2001).

Segundo Kalantar *et al.* (2012) o uso de polímeros virgens pode melhorar as propriedades do betume modificado. No entanto, a substituição de materiais virgens por polímeros reciclados deve ser tida em conta, uma vez que os polímeros virgens são bastante caros, e por isso deverá ser utilizada uma percentagem mínima de polímeros reciclados.

González *et al.* (2002) verificaram que a modificação de betumes com polímeros reciclados apresenta resultados idênticos na melhoria do desempenho dos pavimentos comparando com polímeros virgens, sendo além disso, do ponto de vista económico e ambiental, mais vantajosos, uma vez que se resolve o problema da eliminação de resíduos.

Becker *et al.* (2001) referem que quando os polímeros são adicionados à mistura betuminosa as suas propriedades dependem de vários fatores como as características do polímero,

características do betume, condições de mistura e de compatibilidade entre o polímero e o betume.

García-Morales *et al.* (2006) investigaram se a adição de resíduos de polímeros ao betume poderia melhorar o desempenho do pavimento. Uma das conclusões que tiraram foi que a modificação de betume com borracha de pneus usados melhorou o desempenho da mistura para baixas temperaturas de serviço. A mistura de EVA e LDPE ofereceu bons resultados às altas temperaturas de serviço, mostrando propriedades mecânicas favoráveis a temperaturas para as quais o betume base sofre deformações permanentes. O mesmo estudo diz que a quantidade de polímero na mistura deve ser cuidadosamente ajustado para se obter um valor correto de viscosidade às temperaturas envolvidas na aplicação e compactação das misturas betuminosas.

No trabalho efetuado por Araújo *et al.* (2013), em que foram comparadas duas estruturas de pavimentos que diferiam na composição da camada de desgaste, sendo uma constituída por um betão betuminoso convencional (AC14 surf 35/50) e outra por um betão betuminoso semelhante mas com ligante modificado (AC14 surf 35/50+PEAD), concluiu-se que a segunda possuía melhores características superficiais, conduzindo a uma redução da resistência ao rolamento e, conseqüentemente, uma diminuição de cerca de 2,2% do combustível consumido pelos veículos em comparação com a mistura que possuía na camada de desgaste betão betuminoso convencional (AC14 surf 35/50).

Concluindo, e em análise dos vários estudos efetuados por diversos investigadores, verifica-se que os resíduos plásticos EVA e PEAD selecionados para este trabalho poderão fornecer resultados adequados na modificação do betume e das respetivas misturas.

### **2.6.1. Polímeros Utilizados na Modificação de Betumes**

Neste ponto serão apresentados os polímeros mais utilizados na indústria da pavimentação rodoviária, bem como os principais benefícios que estes podem trazer às misturas betuminosas, e conseqüente desempenho do pavimento. De facto, muitos polímeros têm sido utilizados como modificadores de betumes, sendo estes classificados nas seguintes categorias Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Grupos de polímeros usados na modificação de betume (Becker *et al.*, 2001)

Categoria	Polímeros
Termoplásticos	Polietilenos EVA PVC, PS Polipropileno
Borracha natural ou sintética	SBR Borracha natural
Borrachas termoplásticas	SBS SIS
Poliepóxido	Resinas epoxy
Sistemas mistos	Vários

Hoje em dia os polímeros utilizados na modificação de betumes podem ser classificados em duas categorias, os plastómeros e os elastómeros. Como Stroup-Gardiner e Newcomb (1995) relataram, os plastómeros tem pouco ou nenhum componente elástico resultando numa rápida resistência inicial, mas quando sob carga tendem a fendilhar e deformarem-se. Já os elastómeros termoplásticos amolecem com aquecimento (permitindo a modificação do betume) e endurecem pelo arrefecimento (Isacsson e Lu, 1995). Aumentando a rigidez da mistura betuminosa conduzirá a uma maior resistência à deformação permanente uma vez que recuperam elasticamente a forma após a remoção da carga. Assim, observa-se que os elastómeros têm maior êxito na modificação de betume do que os plastómeros.

De todos os polímeros elastómeros virgens o que atraiu maior atenção da indústria foi o SBS devido a ter uma boa capacidade de dispersão em betume, conferir boas propriedades ao ligante, e custos relativamente aceitáveis (Chen *et al.*, 2002, Lu, 1997). No entanto, este material não se encontra com facilidade disponível no seu modo reciclado.

Ainda entre os elastómeros, um reciclado que chamou à atenção à indústria é a borracha reciclada de pneu. Como o volume de tráfego tem vindo a aumentar em todo o mundo, também se origina um maior volume de resíduos de pneus por ano (Huang *et al.*, 2007). Estima-se que cerca de 35% desses resíduos são depositados em aterros ou depósitos ilegais onde são misturados com outros resíduos tornando a sua recuperação difícil.

Segundo os estudos efetuados por Yildirim (2007) os pavimentos que utilizaram borracha de pneu têm resultados rentáveis. No entanto, o mesmo autor diz que características da mistura

betuminosa final dependem do tipo de borracha, tamanho dos fragmentos de borracha e tipo de betume utilizado. As principais vantagens na utilização de borracha de pneu resultam numa melhor resistência à deformação, maior ductilidade e maior elasticidade perante cargas cíclicas (Becker *et al.*, 2001).

As desvantagens da utilização de borracha de pneus focam-se nas altas temperaturas e longos tempos de digestão que os fragmentos de borracha precisam para que se dispersem no betume, pelo que os fragmentos de borracha devem ser moídos para otimizar a sua eficiência (Costa *et al.*, 2013).

As principais vantagens da borracha de pneu reciclado traduzem-se na redução da reflexão de fendas e aumentando a durabilidade do pavimento (Yildirim, 2007). Além disso, quando comparado com outros polímeros, a borracha até apresentou melhor estabilidade ao armazenamento (Costa *et al.*, 2013) e ainda conseguiu obter uma viscosidade adequada para produção e aplicação da mistura a temperaturas mais baixas que os ligantes modificados com outros polímeros (ABS, PEBD, SBS).

Na Tabela 2.4 estão apresentados os vários polímeros já utilizados na modificação de betumes, assim como as vantagens e desvantagens da sua utilização (Al-Salem *et al.*, 2009, Becker *et al.*, 2001, Costa *et al.*, 2013).

Após conhecidos os polímeros mais utilizados na modificação dos betumes, bem como os seus benefícios, partiu-se à procura de polímeros reciclados que se pudessem utilizar para esse fim no âmbito deste trabalho. Através do contacto com empresas de reciclagem de materiais poliméricos, conseguiu-se adquirir um elastómero reciclado (o EVA), bem como um termoplástico existente em grandes quantidades (o PEAD). Estes vêm de fases de reciclagem diferentes, o primeiro de reciclagem primária, e o segundo de reciclagem secundária. Estudos referentes a esses materiais serão apresentados nos pontos seguintes.

### **2.6.2. Modificação de Betumes com EVA**

Sendo o EVA um copolímero, isto é, polímeros que derivam de mais do que uma espécie de monómeros, ganharam um interesse considerável em pesquisa científica e aplicações industriais devido às suas características (Brandrup e Immergut, 1989).

Tabela 2.4: Vantagens e desvantagens de polímeros utilizados na modificação de betumes

Polímero	Vantagens	Desvantagens
Polietileno (PE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boas propriedades a altas temperaturas</li> <li>- Baixo custo</li> <li>- Resistência ao envelhecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difícil dispersão no betume</li> <li>- Problemas de instabilidade</li> <li>- Sem recuperação elástica</li> </ul>
Polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo ponto de penetração</li> <li>- Ligante com maior capacidade resistente à carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problemas de separação</li> <li>- Sem alteração das propriedades mecânicas e elasticidade</li> <li>- Baixa resistência à fadiga</li> </ul>
EVA EMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa estabilidade de armazenamento</li> <li>- Alta resistência à deformação</li> <li>- Excelente compatibilidade em alguns casos</li> <li>- Baixo custo comparando outros copolímeros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recuperação elástica limitada;</li> <li>- Melhoria limitada das propriedades a baixa temperatura.</li> </ul>
SBS SIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduz sensibilidade à temperatura</li> <li>- Melhora resposta elástica</li> <li>- Maior flexibilidade a temperaturas mais baixas</li> <li>- Aumento da resistência à deformação</li> <li>- Boa estabilidade</li> <li>- Resistência ao envelhecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução da resistência à penetração</li> <li>- Maior viscosidade a temperaturas de aplicação</li> <li>- Problemas de compatibilidade com alguns betumes</li> <li>- Custo monetário superior a outros polímeros</li> </ul>
Resinas Epoxy	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa adesividade</li> <li>- Alta flexibilidade</li> <li>- Resistência ao fendilhamento</li> <li>- Resistente a ataque químico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo elevado</li> </ul>

O polímero EVA (*Etileno e Acetato de Vinilo*) é obtido através do processo e copolimerização dos monômeros de etileno e acetato de vinilo num sistema de alta pressão (Zattera *et al.*, 2005). Este é muito utilizado na indústria de calçado como matriz polimérica dos diversos componentes do calçado, sendo que os teores em acetato de vinilo variam entre 18% e 28% (Zattera *et al.*, 2005).

Os polímeros EVA têm sido usados na construção de estradas há mais de 20 anos, de forma a melhorar a trabalhabilidade do pavimento durante a construção e aumentar a resistência à deformação em serviço (Cavaliere *et al.*, 1993).

Num estudo de Airey (2002) modificou-se o betume com três percentagens do polímero EVA, uma com uma baixa percentagem de polímero (3%) e outras duas com uma percentagem mais significativa de polímero (5% e 7%), sendo que todos os betumes foram produzidos num misturador de alto corte *Silverson* a temperaturas entre 170 °C e 185 °C.

O mesmo autor realizou ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade para a caracterização das propriedades físicas convencionais e observou que com o aumento da percentagem de polímero utilizado na modificação de betume há um aumento da rigidez e melhoria da suscetibilidade à temperatura. Na caracterização reológica realizou os ensaios de microscopia de fluorescência e os ensaios fundamentais reológicos, que demonstraram que podem ocorrer mudanças físicas, químicas e morfológicas nas propriedades reológicas do betume. Com o aumento da percentagem de ligante há um aumento da temperatura e rigidez do ligante, uma redução no ângulo de fase e um aumento no limite superior de elasticidade.

Costa *et al.* (2013) modificaram um determinado betume com vários polímeros, para uma percentagem definida de 5%. Através dos ensaios realizados verificou que o polímero EVA reciclado é um dos mais promissores na modificação de betumes pois consegue aumentar o ponto de amolecimento, diminuir o valor de penetração e ter uma boa recuperação elástica em comparação com o betume modificado com outros polímeros.

### **2.6.3. Modificação de Betumes com PEAD**

Os resíduos PEAD tem vindo a ser estudados na modificação de betumes. Costa *et al.* (2013) modificaram um betume com 5% de PEAD num misturador IKA RW20 a uma velocidade de agitação de 350 rpm, durante 60 minutos, a uma temperatura de 180°C. Dessa forma, observou que o PEAD reciclado apresenta resultados do ensaio do ponto de amolecimento promissores e também uma boa digestão no betume. No entanto, comparando com o polímero EVA os resultados de resiliência são menos satisfatórios.

Himishoglu e Agar (2004) investigaram a possibilidade de utilização de diversos resíduos contendo polietileno de alta densidade como modificador do betume. No seu estudo determinaram a influência de diferentes percentagens de PEAD (4%, 6% e 8%) e também diferentes temperaturas e tempos de mistura, concluindo que a mistura a uma temperatura de 165°C, durante 30 minutos com 4% de PEAD tem uma maior estabilidade, menor viscosidade e maior quociente de Marshall. O aumento do ponto de amolecimento indica que as misturas modificadas com PEAD tem mais rigidez que as misturas convencionais nessa gama de temperaturas elevadas. A mistura com PEAD revelou valores muito satisfatórios de resistência à deformação permanente em comparação com o betume base, e resolveu o problema da eliminação dos resíduos, que é uma vantagem do ponto de vista ambiental.



### **3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO UTILIZADOS NO ESTUDO**

#### **3.1. Introdução**

Em seguida é apresentada de forma sucinta a organização do Capítulo 3, enumerando os diversos subcapítulos e o que foi objeto de estudo em cada um deles.

Começa-se no subcapítulo 3.2 pela caracterização dos polímeros utilizados na produção de betumes modificados, assim como as suas características.

No subcapítulo 3.3 é feita a descrição dos ensaios necessários para a caracterização dos ligantes betuminosos modificados com polímeros, e respectiva comparação com o betume convencional 35/50 e um betume modificado comercial (Elaster<sup>®</sup> 13/60).

No subcapítulo 3.4 é feita a caracterização dos agregados utilizados para a produção de misturas betuminosas. Nessa caracterização é demonstrado quais as frações granulométricas utilizadas na mistura e também as propriedades dos agregados utilizados nas misturas.

Os subcapítulos 3.5 e 3.6 fazem referência à formulação da mistura, quais as misturas que vão ser produzidas, a percentagem de cada fração de agregados utilizados, a curva granulométrica adotada e os fusos a que esta curva obedeceu. É realizado o estudo das condições de produção, quer da temperatura como da percentagem de betume utilizado.

Por fim, no subcapítulo 3.7 são descritos os procedimentos e ensaios necessários para a caracterização laboratorial das misturas betuminosas em estudo através dos ensaios de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência ao fendilhamento por fadiga.

#### **3.2. Polímeros Utilizados nas Misturas Betuminosas**

O objetivo deste trabalho consiste na utilização de resíduos poliméricos que existam em grandes quantidades para reciclagem, que através da mistura com um betume base resultem num ligante com melhores características por comparação com o betume convencional.

Com a utilização de polímeros reciclados, segundo González *et al.* (2002) na modificação de betumes pode-se obter melhorias no desempenho do pavimento comparando com betumes modificados comercialmente, sendo do ponto de vista económico e ambiental mais vantajoso pois resolvemos o problema da eliminação de resíduos.

De acordo com o estudo efetuado anteriormente (no capítulo 2), os polímeros selecionados para realização deste trabalho são o EVA e o PEAD. O primeiro por mostrar resultados interessantes na modificação de betumes. O segundo, além dos resultados promissores na modificação do betume, também apresenta vantagens ambientais adicionais, pois estamos a reutilizar um resíduo existente em maior escala, contribuindo para a sua valorização.

### 3.2.1. Polímero EVA Reciclado

O polímero EVA é um preparado reciclado, cujo material primário provem de plásticos de estufas. Este foi fornecido em grânulos, com a sua dimensão máxima de 4,0 mm como pode ser visto na Figura 3.1.



Figura 3.1: Polímero EVA utilizado no estudo

As suas propriedades térmicas são importantes para a sua utilização na modificação, pois o polímero deverá apresentar-se fundido na gama de temperaturas utilizadas na produção dos ligantes e das misturas betuminosas. De modo a determinar a temperatura de fusão foi realizado o ensaio de DSC (calorimetria diferencial de varrimento).

Na técnica de ensaio por calorimetria diferencial de varrimento (DSC), com o instrumento de medição da Perkin-Elmer, a amostra e o material de referência (com características térmicas conhecidas) são colocados em diferentes cadinhos com fontes de aquecimento individuais e mantidos à mesma temperatura durante o ciclo térmico programado. Nos ensaios DSC o que se mede é a diferença de energia fornecida à amostra para mantê-la sempre à mesma temperatura do material de referência. Este método possibilita a determinação do pico de fusão/solidificação, do intervalo de temperaturas de fusão/solidificação e da entalpia de fusão/solidificação. Os resultados estão representados na Figura 3.2.

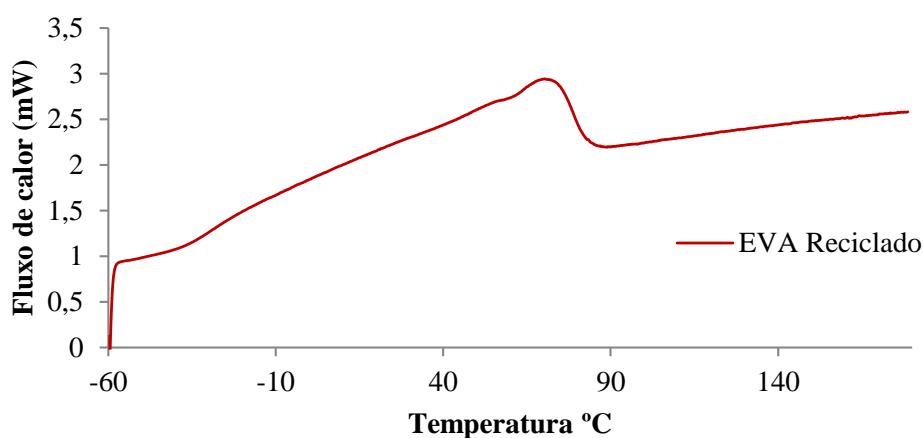


Figura 3.2: Curva de DSC para o polímero EVA

O ensaio DSC revela que o polímero EVA apresenta uma gama de temperaturas de fusão de aproximadamente 50 °C a 80 °C e o pico de fusão ocorre a 69,7 °C. A produção do betume modificado deverá ser feita com facilidade acima da temperatura de fusão do polímero EVA, pelo que a digestão do polímero EVA no betume deverá ocorrer facilmente.

### 3.2.2. Resíduos Plásticos de PEAD

O resíduo de PEAD é um polímero pertencente ao grupo dos termoplásticos, apresentado na Figura 3.3. De acordo com o estudo realizado por Costa (2010) as dimensões do resíduo devem estar compreendidas entre 0,063 e 4,0 mm, pois caso a dimensão seja superior às referidas o tempo de digestão do polímero no betume é muito longo, diminuindo a qualidade na modificação do betume.

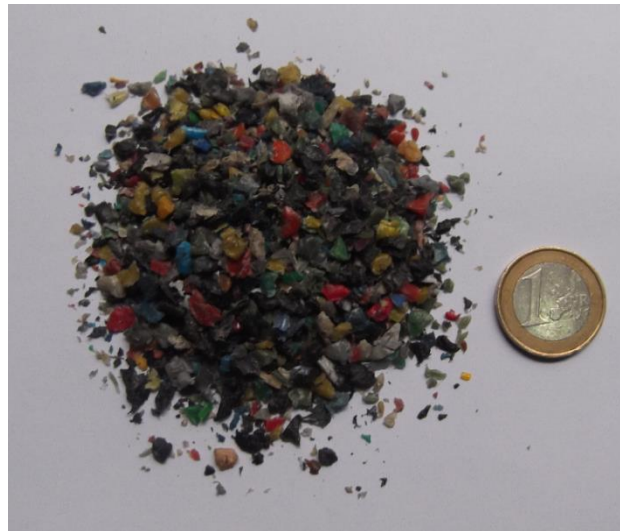


Figura 3.3: Resíduos de PEAD

A realização do ensaio DSC para o polímero reciclado PEAD foi efetuado da forma mencionada anteriormente. Os resultados estão representados na Figura 3.4.

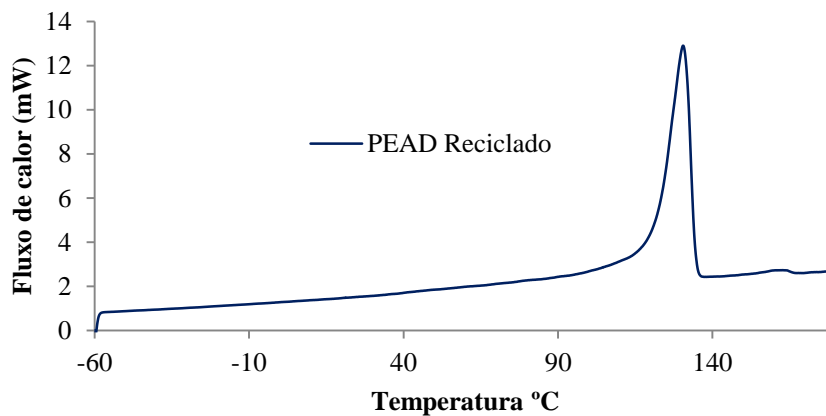


Figura 3.4: Curva de DSC para o polímero PEAD

O resíduo de PEAD mostra uma gama de temperaturas de fusão entre os 120 °C e 135 °C e o pico de fusão ocorre aos 131,2 °C. Este valor é claramente superior ao do polímero EVA, pelo que na produção de betumes modificados com este polímero é necessário ter especial atenção para que seja efetuado a uma temperatura superior a 131,2 °C, primordial para uma boa digestão do polímero no betume. Além disso, é necessário ter um cuidado especial durante a fase de compactação das misturas para que a mistura não perca rapidamente a sua trabalhabilidade abaixo da temperatura de fusão indicada.

### 3.3. Caracterização dos Ligantes Betuminosos

#### 3.3.1. Descrição Inicial do Estudo

Para a produção de misturas betuminosas a primeira etapa passa pelo estudo do ligante, e para isso é necessário realizar os ensaios adequados. Os betumes alvos de estudo foram o 35/50 da CEPSA, o betume comercial modificado Elaster<sup>®</sup> e o 70/100 da CEPSA (que serviu de base para as modificações efetuadas neste trabalho).

Para este trabalho serão objeto de estudo na caracterização de ligantes sete tipos de betumes:

- Betume convencional 35/50 da CEPSA;
- Betume comercial modificado Elaster<sup>®</sup> (13/60);
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 5% de PEAD;
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 5% de EVA;
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 3% de EVA e 2% de PEAD;
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 4% de EVA e 2% de PEAD;
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 5% de EVA e 2% de PEAD.

Na parte de caracterização de betumes deste estudo vão ser estudados três sistemas mistos. No entanto, apenas um desses sistemas mistos vai ser selecionado para ser alvo de estudo na caracterização de misturas betuminosas. Para isso é necessário recorrer aos diversos ensaios na caracterização de ligantes para identificar quais serão as percentagens ideais de cada polímero para conseguir as melhores características das misturas.

#### 3.3.2. Produção de Betumes Modificados

A produção de betumes modificados com polímeros foi realizada através do método húmido com recurso a um dispersador de alto corte da IKA, o ULTRA TURRAX T65. O processo de modificação passa numa primeira fase pelo aquecimento do betume base 70/100 da CEPSA até uma temperatura de 165°C, de seguida é adicionado o polímero e espera-se que a temperatura atinja novamente os 165°C. Atingindo a temperatura requerida é feita a dispersão do polímero no betume durante um período de 20 minutos a uma velocidade de rotação de

7400 rpm (velocidade máxima de rotação do dispersador). Este processo para a produção de betume foi estudado por Costa *et al.* (2013).

### 3.3.3. Propriedades Básicas dos Ligantes

Para a determinação das propriedades dos betumes base e modificados utilizados no âmbito deste projeto, de forma a avaliar o seu desempenho, é necessário realizar a sua caracterização envolvendo uma análise das suas características elementares e reológicas.

A caracterização básica foi realizada através dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, resiliência, viscosidade e o ensaio de estabilidade e armazenamento para os ligantes modificados.

#### 3.3.3.1 Ensaio de Penetração

Para a caracterização dos ligantes é necessário recorrer ao ensaio de penetração a 25 °C segundo a norma EN 1426, que permite determinar indiretamente a rigidez do betume através de uma agulha padrão que penetra verticalmente uma amostra de material betuminoso sob condições específicas de temperatura (25°C), carga (100g) e tempo (5 segundos). O equipamento utilizado para a realização do ensaio de penetração é exibido na Figura 3.5.

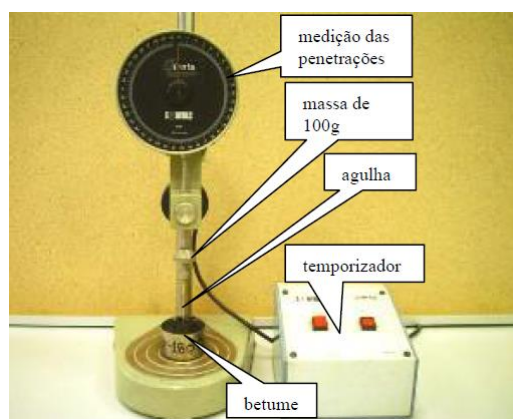


Figura 3.5: Equipamento para o ensaio de penetração a 25 °C

#### 3.3.3.2 Ensaio Anel e Bola para Determinação do Ponto de Amolecimento

O ensaio ponto de amolecimento (ensaio de anel e bola), segundo a EN 1427, permite a determinação da temperatura máxima que a mistura suporta sem grandes deformações. Este

ensaio realiza-se com um anel contendo amostra de betume, com uma esfera de aço apoiada sobre a amostra, que é colocada num banho-maria, com taxa de aumento de temperatura do líquido de 5°C/min (Figura 3.6 (a)). Ao atingir determinada temperatura o betume fluirá com o peso da esfera de aço apoiada na sua superfície e irá deslocar-se até tocar o fundo do recipiente. Essa temperatura chama-se o ponto de amolecimento (Figura 3.6 (b)).

Este ensaio permite prever a resistência de uma mistura à deformação permanente, isto é, a temperatura máxima que se prevê que o pavimento betuminoso consiga suportar antes de começar a formar rodeiras de pequeno raio.

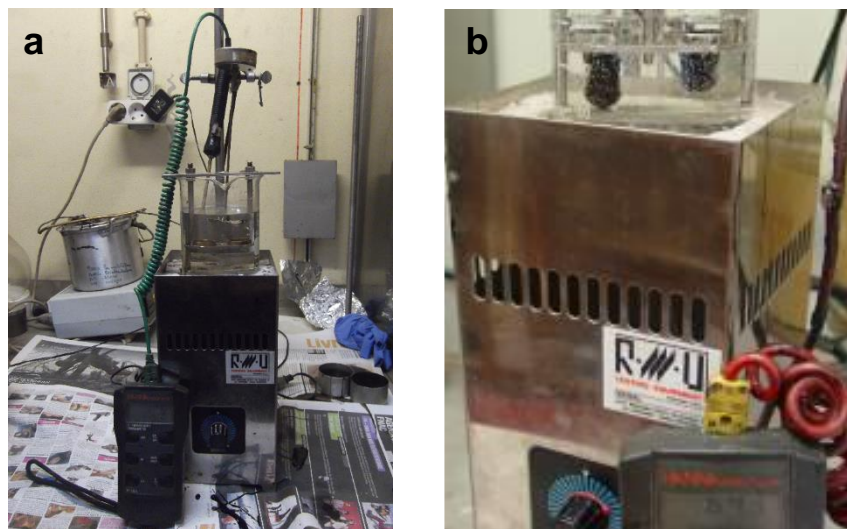


Figura 3.6: Equipamento utilizado para determinar o ponto de amolecimento dos ligantes

### 3.3.3.3 Ensaio de Resiliência

A caracterização de betumes modificados inclui ensaios de resiliência de acordo com a norma EN 13880-3. A realização deste ensaio consiste em aplicar numa amostra de betume modificado, a uma temperatura de 25°C, um deslocamento de 10 mm por meio de uma esfera metálica com uma taxa de deslocamento de 1mm/s (Figura 3.7). Após a aplicação desse deslocamento, é medida a recuperação elástica da amostra que ocorre durante um intervalo de 20 segundos. Este ensaio é realizado com o mesmo equipamento e amostra do ensaio de penetração, exceto a haste que é diferente da agulha utilizada no ensaio de penetração.



Figura 3.7: Equipamento utilizado para o ensaio de resiliência

#### 3.3.3.4 Ensaio de Viscosidade Rotacional

O ensaio para avaliar viscosidade dinâmica usando o viscosímetro rotacional (Figura 3.8) é realizado em conformidade com a norma EN 13302. Este ensaio tem como finalidade a determinação da viscosidade dinâmica dos betumes, através da aplicação de um binário que permite a medição da resistência à rotação da haste a uma velocidade constante. O equipamento utilizado é o viscosímetro rotacional do tipo *Brookfield* e a haste 27. Antes do início do ensaio é necessário aquecer a amostra a uma temperatura até 80°C acima do ponto de amolecimento expectável ou, no máximo, 200°C, dependendo da que for menor. Previamente, a câmara de amostra é também aquecida ao mesmo tempo que a haste pretendida para o estudo é introduzido no interior da unidade de aquecimento (*thermosel*) a aquecer, facilitando a sua introdução na câmara de ensaio com betume. Depois de verificada a estabilização da temperatura da haste e da unidade de aquecimento, coloca-se a amostra com a haste rotativa no seu interior deixando estabilizar durante 15 a 30 minutos. Por fim, são executadas 3 leituras nos 3 minutos seguintes para cada temperatura estudada.



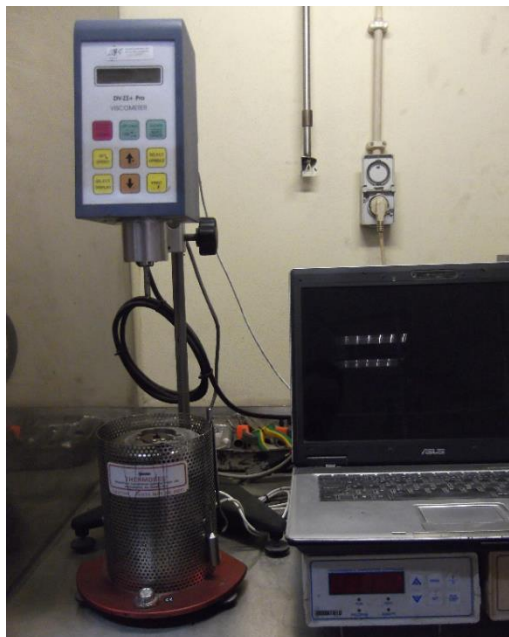


Figura 3.8: Equipamento utilizado no ensaio de viscosidade

#### 3.3.3.5 Estabilidade ao Armazenamento

O ensaio de determinação de estabilidade e armazenamento realiza-se de acordo com a norma EN 13399 e tem por objetivo medir a estabilidade ao armazenamento de betumes modificados a temperaturas elevadas, nomeadamente os betumes modificados com polímeros, que são conhecidos por apresentarem separação de fases (betume e polímero).

Depois da preparação da amostra, esta é colocada num tubo de alumínio, tipo pasta de dentes com 160mm de altura. O enchimento do recipiente deve ser feito com cuidado para evitar a incorporação de bolhas de ar, até uma altura de 100 a 120mm, e fecham-se bem, de modo a evitar o contacto com o ar durante o tempo de armazenamento. A amostra homogénea de betume modificado é mantida num recipiente vertical, a 180 ° C - ou a uma temperatura especificadas pelo produtor - durante 3 dias. Depois de a amostra ter arrefecido, ela é cortada em três partes iguais, as duas extremidades (superior e inferior) são analisados para avaliar possíveis diferenças nas suas características, enquanto a terceira parte (intermédia) é suprimida. Seguidamente são efetuados os ensaio de penetração (EN 1426), ponto de amolecimento (EN 1427), ensaio para determinar a viscosidade (EN 13302) e o ensaio de resiliência (13380-3) às amostras do topo e da base. A estabilidade de armazenamento diz respeito à variação destas propriedades entre “topo” e ”base”.

O ensaio de estabilidade e armazenamento foi realizado aos seguintes betumes modificados:

- Betume modificado com 5% de EVA (E5);
- Betume modificado com 5% de PEAD (P5);
- Betume modificado com 3% de EVA e 2% de PEAD (E3P2).

Relativamente aos betumes modificados com o sistema misto apenas foi estudado o E3P2, para que todos os ligantes em estudo apresentassem a mesma percentagem total de polímero a modificar o betume, ou seja, 5% (facilitando a sua comparação).

### 3.3.4. Caracterização Reológica dos Ligantes

O betume é um material viscoelástico, apresentando ao mesmo tempo características viscosas e elásticas. Uma das suas características é a sua suscetibilidade térmica, ou seja, as suas propriedades estão dependentes da temperatura. A altas temperaturas o betume comporta-se como um fluido viscoso, enquanto a baixas temperaturas apresenta-se sólido ou elástico.

Através da caracterização reológica espera-se, através do ensaio de corte com varrimento de frequências prever qual o comportamento dos betumes estudados à deformação permanente e à fadiga, com a determinação do módulo complexo e o ângulo de fase. No ensaio MSCR (*Multi Stress Creep Recovery*) espera-se prever o comportamento do betume à deformação permanente, prevendo-se assim “à posteriori” a formação de rodeiras nas misturas.

#### 3.3.4.1 Ensaio de Corte com Varrimento de Frequências

O ensaio reológico de varrimento de frequências (*frequency sweep*) decorre segundo a norma EN 14770. O equipamento utilizado para caracterizar o comportamento térmico foi o reómetro AGR2 TA (Figura 3.9). Os pratos paralelos de teste utilizados têm a geometria de 40mm de diâmetro.



Figura 3.9: Reômetro AGR2 TA (rotativo)

A temperatura de ensaio variou entre os 30 e 80 °C e a gama de frequências de ensaio foi de 0,01 a 100 Hz. As tensões de ensaio foram ajustadas ao comportamento do material com o propósito de ser mantido o limite viscoelástico linear do mesmo.

#### 3.3.4.2 Ensaio *Multi Stress Creep Recovery*

O ensaio MSCR segundo a norma AASHTO TP70 é realizado com o intuito de servir como indicador da qualidade do betume, no que concerne à sua resistência à deformação permanente e genericamente à sua capacidade de recuperar da deformação (nos betumes modificados). O reômetro utilizado para caracterizar a fluência das amostras em estudo foi o StressTech FC (Figura 3.10), com placas paralelas de 40mm de diâmetro.

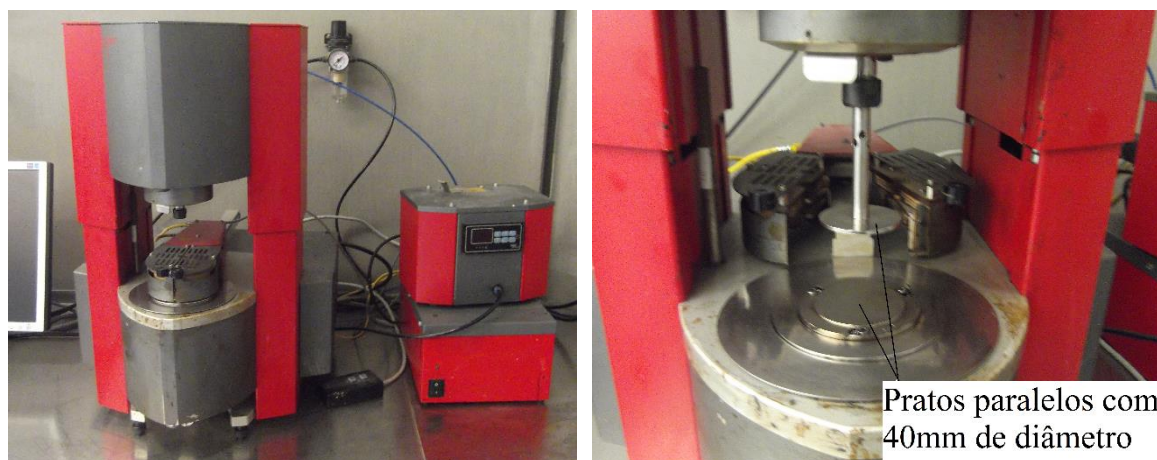


Figura 3.10: Equipamento utilizado no ensaio *Multi Stress Creep Recovery*

O procedimento mais comum para a realização deste ensaio consiste na aplicação de 1 segundo de deformação seguido de 9 segundos de recuperação, para os diferentes níveis de tensão 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 e 3600 Pa. Para cada nível de tensão são efetuados 10 ciclos de deformação e recuperação. A deformação não recuperada para cada nível de tensão a dividir pela tensão aplicada em cada ciclo resulta no índice de deformação não recuperável (document, 2010).

#### 3.3.4.3 Microscopia de fluorescência

Através da microscopia pretende-se estudar a microestrutura da interação entre o betume e os polímeros. A análise da estrutura da morfologia é feita por microscopia por fluorescência. O equipamento utilizado é o microscópio Olympus BH2-RFCA.

A análise dos resultados de microscopia de fluorescência é baseada no princípio de que os betumes apresentam uma fase escura e os polímeros uma fase mais clara devido à absorção de alguns constituintes fluorescentes do betume base.

### **3.4. Caracterização dos Agregados**

#### **3.4.1. Granulometria das Frações de Agregados**

Os agregados utilizados para a produção da mistura betuminosa são de origem natural, devem apresentar-se homogêneos não devem conter matéria orgânica ou quaisquer substâncias estranhas, tais como madeira, vidro e plástico que afetem as misturas betuminosas. Os agregados devem seguir a Norma Europeia NP EN 13043 que define os requisitos aplicáveis aos agregados para misturas betuminosas.

Para formular uma mistura é necessário proceder à análise granulométrica dos agregados. Os agregados são provenientes da pedreira Bezerras e encontram-se armazenados no laboratório de Engenharia Civil na Universidade do Minho. Na mistura AC14 a dimensão máxima dos agregados é 14 milímetros. As frações de agregados utilizados neste estudo são: britas 10/14, 6/14, 4/6, pó 0/4, 2/4, 0,5/2 e filler.

De forma a obter uma curva granulométrica uniforme foi necessário criar novas frações de agregados a partir das frações já existentes no laboratório. Os agregados com dimensão 0/4 foram separados em 0,5/2 e 2/4, com o recurso a um aparelho vibratório mecânico que peneirou os agregados durante 10 minutos, os agregados resultantes com dimensões inferiores a 0,5 não foram utilizados. Também foi necessário peneirar os agregados com granulometria 6/14 em que apenas é retirado para a formulação da mistura os agregados 10/14. O processo de separação foi o mesmo referido anteriormente, exceto o tempo de peneiração que foi de apenas 3 minutos. A análise granulométrica dos agregados representada na Tabela 3.1 foi feita com base na norma EN 933-1, enquanto as curvas granulométricas de cada fração de agregados estão expostas na Figura 3.11.

Tabela 3.1: Granulometria dos diversos agregados

Peneiro (mm)	filer	Pó 0.5/2	Pó 2/4	Pó 0/4	Brita 4/6	Brita 6/14	Brita 10/14
20.0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
14.0	100%	100%	100%	100%	100%	91%	87%
12.5	100%	100%	100%	100%	100%	78%	67%
10.0	100%	100%	100%	100%	100%	43%	0%
6.3	100%	100%	100%	99%	96%	10%	0%
4.0	100%	100%	68%	91%	12%	6%	0%
2.0	100%	99%	1%	69%	4%	4%	0%
0.5	100%	0%	0%	37%	3%	3%	0%
0.125	100%	0%	0%	15%	2%	2%	0%
0.063	96%	0%	0%	100%	1%	1%	0%

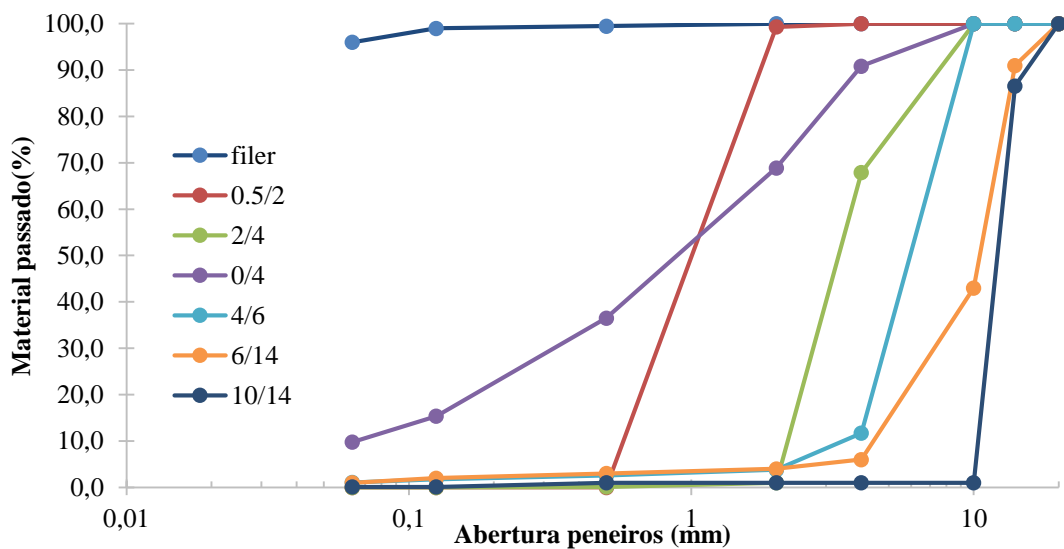


Figura 3.11: Curva granulométrica dos agregados utilizados na produção de misturas

### 3.4.2. Características dos Agregados

Os agregados têm como função conferir às misturas betuminosas um esqueleto mineral, isto é, uma estrutura que forneça estabilidade da mistura betuminosa. Para os agregados fornecerem a estabilidade necessária às camadas superficiais é necessário preencherem um conjunto de requisitos relacionados com a limpeza, dureza, reduzida alteração sob efeitos climáticos desfavoráveis, boa adesividade ao ligante, agregados uniformes e isenção de materiais estranhos como matéria orgânica ou objetos prejudiciais.

A avaliação das propriedades dos agregados passa pelo ensaio de Los Angeles (EN 1097-2) para determinar a resistência mecânica dos agregados ao desgaste ou fragmentação. A análise geométrica é feita pela norma NP EN 933-1 e NP EN 933-4. Para avaliar a limpeza dos agregados finos realiza-se o ensaio de equivalente de areia segundo a norma EN 1097-8. Para a determinação da massa volúmica dos agregados e a quantidade de água absorvida pelos mesmos realizam-se os ensaios segundo a norma EN 1097-6.

As características referenciadas anteriormente foram determinadas pela empresa Bezerras, pelo que os resultados fornecidos pela mesma empresa estão representados na Tabela 3.2.

A seguir estão representadas as diversas frações de agregados onde é visível o seu tamanho, geometria e limpeza (Figura 3.12).

Tabela 3.2: Características dos agregados utilizados neste trabalho

Propriedade	Limites definidos	Unidades	Pó 0/4	Brita 4/6	Brita 6/14
Origem do agregado	-	-	Granítico	Granítico	Granítico
Massa volúmica das partículas (EN 1097-6)	-	(g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,65	2,66
Absorção/sucção de água (EN 1097-6)	< 2%	(%)	<1	<1	<1
Los Angeles (EN 1097-2)	< 30%	(%)	30	30	30
Teor de Finos (EN 933-1)	-	-	16	4	2
Índice de forma (NP EN 933-4)	<25_%	(%)	-	-	-
Índice de achatamento (NP EN 933-3)	<25%	(%)	-	20	15

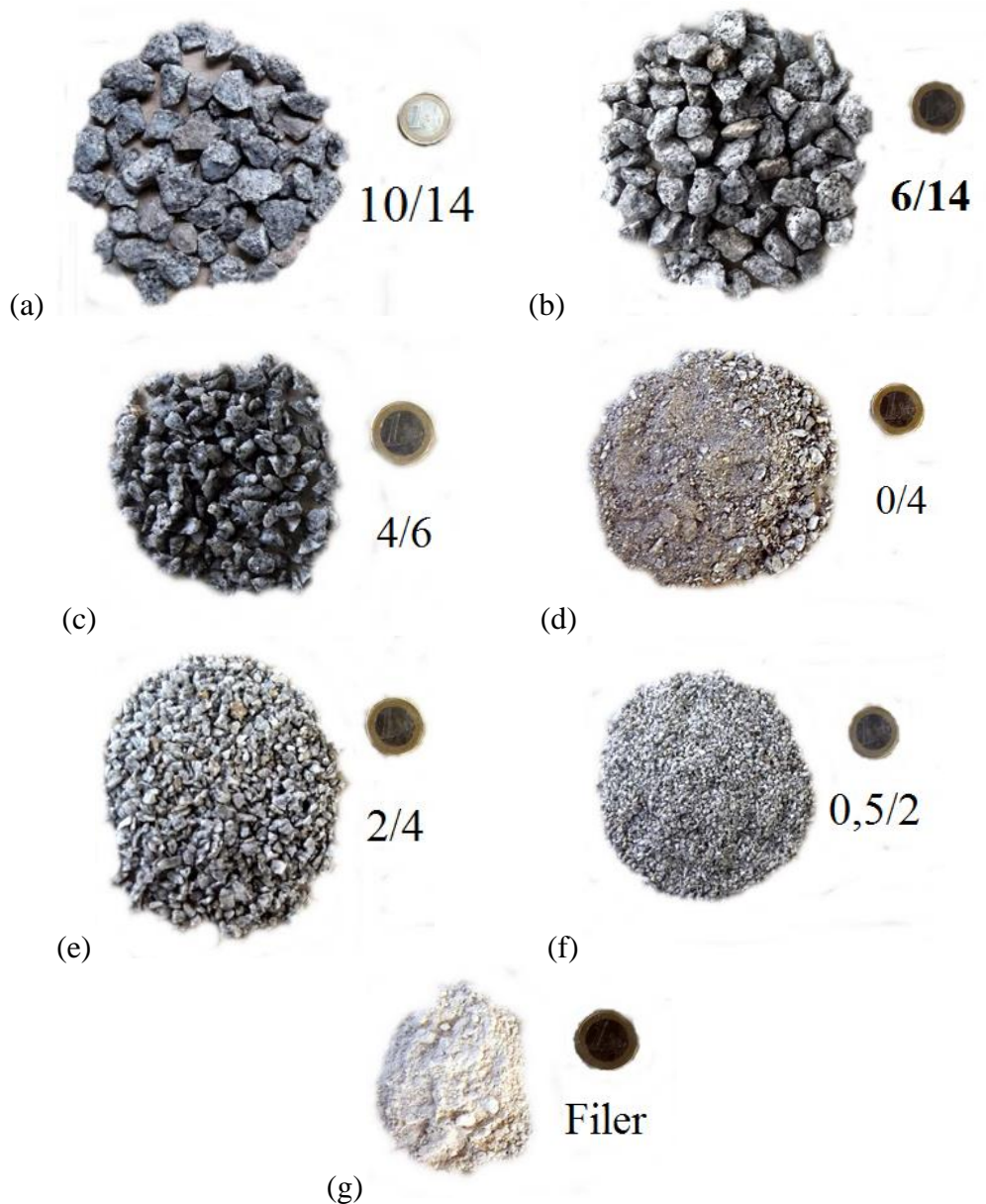


Figura 3.12: Agregados utilizados na produção das misturas betuminosas

### 3.5. Composição Granulométrica das Misturas em Estudo

Neste trabalho estudou-se uma mistura betuminosa para camada de desgaste do tipo AC 14 surf, em que os fusos granulométricos seguiram o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP). A formulação da mistura segue a Norma Europeia EN13108-1. No trabalho realizado foram estudadas cinco tipos de misturas betuminosas diferentes, em que o que a variável em estudo é o betume. As cinco misturas betuminosas efetuadas foram:

- Mistura convencional com betume 35/50 (Convencional),
- Mistura com betume comercial modificado (Elaster<sup>®</sup>);

- Mistura com betume modificado com 5% de PEAD (P5);
- Mistura com betume modificado com 5% de EVA (E5);
- Mistura com betume modificado com 4% de EVA e 2% de PEAD (E4P2).

Apenas um sistema misto foi estudado na caracterização das misturas betuminosas. A seleção do sistema misto foi efetuada no capítulo 4.2.6 que se encontra na caracterização dos ligantes.

Na Tabela 3.3 estão demonstradas as percentagens de agregados das diversas frações granulométricas utilizadas para obter a curva granulométrica da mistura betuminosa para camada de desgaste. Na Figura 3.13 estão presentes as curvas referentes aos limites superiores e inferiores do Caderno de Encargos das EP, e também a curva granulométrica adotada para a mistura AC 14 Surf.

Tabela 3.3: Percentagem de cada fração para a mistura betuminosa AC 14 Surf

Fração Agregados	Brita 6/14	Brita 10/14	Brita 4/6	Pó 0/4	Pó 2/4	Pó 0.5/2	Filer
Percentagem utilizada de cada fração na mistura betuminosa	29.0%	10.5%	11.0%	36.0%	8.0%	3.0%	2.5%

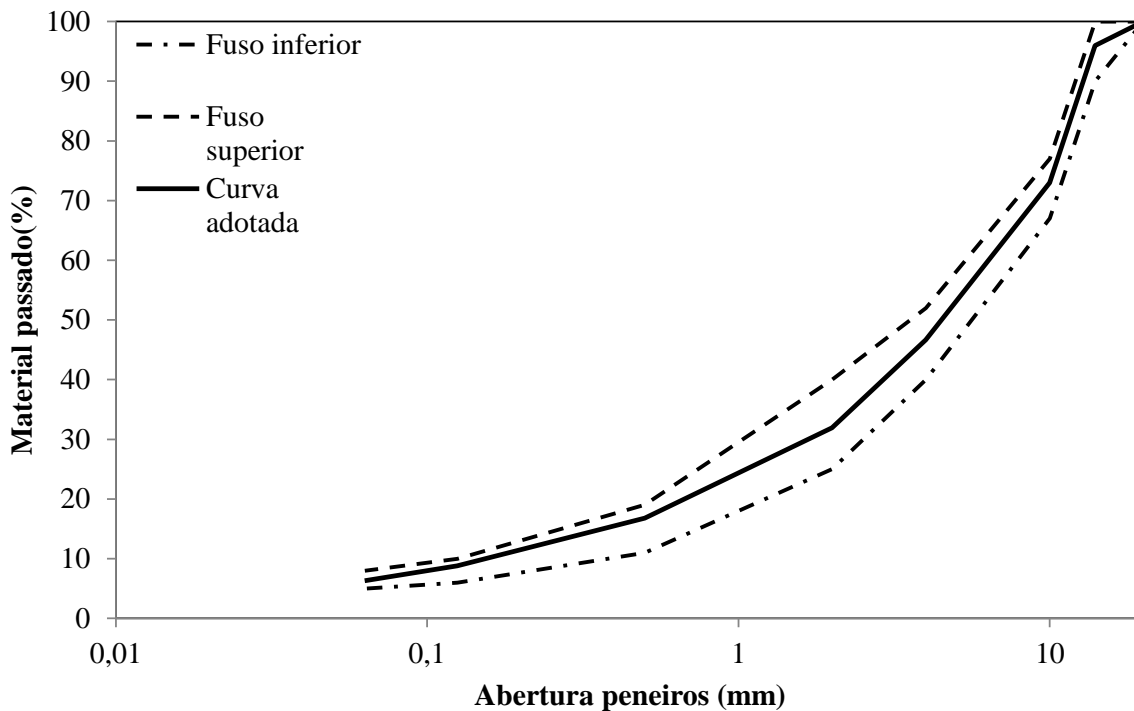


Figura 3.13: Curva adotada e fusos granulométricos para a mistura AC14 Surf



### **3.6. Estudo das Condições de Produção das Misturas**

Para determinar as condições de produção das misturas recorreu-se à formulação de Marshall para determinar o teor ótimo de betume. A determinação da temperatura de produção das misturas é feita analisando os resultados de viscosidade.

#### **3.6.1. Formulação Marshall das Misturas em Estudo**

##### **3.6.1.1 Considerações Iniciais**

A aplicação de misturas betuminosas deve ser precedida por ensaios que permitam a obtenção do teor de ligante a ser utilizado na mistura, para que a mesma se enquadre dentro de especificações que são definidas com a finalidade de evitar a desagregação da mistura por falta de ligante, ou superfícies vulneráveis a deformações por excesso de ligante.

Através do ensaio de Marshall determina-se a quantidade ótima de ligante a ser utilizada em misturas betuminosas fabricadas a quente para a pavimentação de estradas.

O ensaio de Marshall permite determinar a estabilidade, que é a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo provete em ensaio, expressa em kN, a deformação apresentada pelo provete desde a carga inicial até à aplicação da carga máxima, expressa em milímetros, e o volume de vazios (%) de cada provete.

Neste trabalho foi estudado o teor ótimo para as cinco misturas mencionadas anteriormente, em que o tipo e percentagem de agregados são iguais, sendo o tipo de ligante utilizado o que diferencia as várias misturas.

##### **3.6.1.2 Preparação dos Provetes**

O primeiro passo para a preparação dos provetes passa pelo fabrico da mistura. A granulometria da mistura que será utilizada foi apresentada no subcapítulo 3.5. Para cada mistura betuminosa foi necessário preparar um grupo de nove provetes, três para cada percentagem de betume, respetivamente 4.5%, 5.0% e 5.5%. Convém referir que se limitou o estudo de formulação a três percentagens por mistura por questões de tempo.

Os agregados foram colocados em estufa no dia anterior à produção da mistura a uma temperatura de  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$ , num tabuleiro com todas as frações de agregados previamente pesadas. Cada tabuleiro possui os agregados suficientes para um grupo de 3 provetes, mais os agregados necessários para a obtenção da baridade máxima teórica (BMT).

Estando os materiais à temperatura indicada, agregados a  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$  e o betume a  $165^{\circ}\text{C}$ , pode proceder-se à mistura. A mistura é feita utilizando uma misturadora (Figura 3.14) e, de acordo a norma EN 12697-35, decorreu durante 2 minutos. No entanto, deve terminar após todos os agregados estarem envolvidos por uma película de betume, para este não perder as suas propriedades características.



Figura 3.14: Equipamento utilizado na produção de misturas

### 3.6.1.3 Compactação dos Provetes Marshall

Concluído o processo de mistura coloca-se em três recipientes diferentes a quantidade de mistura que é necessária para cada provete. Assim que se enche um recipiente coloca-se na estufa antes de encher o segundo e assim sucessivamente para não baixar a temperatura da mistura antes da compactação. A mistura de cada recipiente vai ser colocada num molde que é constituído por 3 peças: a base, o cilindro e a alonga. Antes de colocar a mistura é necessário colocar na base do molde uma folha de papel para impedir que esta se “cole” à base do molde

e possibilite o seu descolamento uma vez compactado. Depois de colocar a mistura no molde deve espalhar-se bem por todo o volume de forma a mistura ficar bem distribuída sem segregação, o que pode ser feito com a ajuda de uma espátula. Por fim deve ser colocada outra folha de papel no topo da mistura, pelas mesmas razões que foi colocada a primeira, e assim está pronta para ser compactada.

A compactação é efetuada com recurso a um compactador de impacto (Figura 3.15) ao qual é anexo um pilão de compactação que vai compactar a mistura. O pilão é constituído por um eixo guia cilíndrico, uma massa deslizante e um suporte. O procedimento passa por deixar cair a massa do pilão a partir de uma determinada altura e, com a aplicação de um determinado número de pancadas (neste caso, 75 pancadas em cada lado do provete), num determinado intervalo de tempo, sobre a base do pilão que se encontra posicionada sobre o provete betuminoso. Após as primeiras 75 pancadas, o molde deve ser retirado do dispositivo de fixação e invertido o cilindro do molde, com o intuito de compactar com mais 75 pancadas na outra face do provete.



Figura 3.15: Compactador de impacto para os provetes de Marshall

Após concluída a compactação, o provete é arrefecido à temperatura ambiente, ou recorrendo a uma ventoinha. O mesmo procedimento deverá ser executado para os restantes provetes até todos estarem concluídos. Depois de arrefecidos os provetes dá-se início à sua desmoldagem, que se realiza recorrendo a um dispositivo de extrusão.

#### 3.6.1.4 Ensaio de Marshall

Para a obtenção dos valores de estabilidade e deformação dos provetes é necessário seguir os seguintes passos: i) depois de extraídos do molde e medido a altura e determinando a baridade máxima teórica, os provetes são imersos em banho-maria a (60 °C) por um período de 40 minutos; ii) após o banho-maria o corpo é colocado no molde de compressão, que deve estar a uma temperatura próxima dos provetes (foi colocado também em banho-maria no mesmo período de tempo que os provetes), limpo e com os pinos-guia lubrificadas; iii) o molde de compressão, contendo o corpo de prova é posicionado na prensa segundo a geratriz, e o medidor de deformação colocado e ajustado na posição de ensaio; iv) a prensa é operada de tal forma que o seu êmbolo inferior se eleva a uma velocidade de 5cm por minuto até ao rompimento do provete; v) a carga necessária para produzir o colapso do provete, em kN, é anotada, sendo que este valor deve ser corrigido pela Equação 1 em função da espessura do provete ensaiado, sendo esse resultado o valor de estabilidade de Marshall; vi) a deformação é obtida simultaneamente com a estabilidade, durante a aplicação da carga.

$$f = 927,23h^{-1,64} \quad (1)$$

Onde:

f – fator de conversão de carga;

h – espessura do provete

#### 3.6.1.5 Apresentação dos Resultados de Formulação Marshall

Para cada mistura obtém-se três gráficos com os resultados de estabilidade, deformação e volume vazios obtidos através da formulação de Marshall. Nas tabelas seguintes estão representados esses resultados para as várias misturas estudadas.

Para a análise dos resultados de Marshall as principais condições que devem ser seguidas são um valor de estabilidade superior a 14 kN, deformação inferior a 4mm e volume de vazios igual ou próximo de 4%.

Na mistura convencional (Tabela 3.4), após a realização dos ensaios de Marshall, podemos observar que os valores ótimos para o teor em betume aproximam-se dos 5,0%, pois com o

aumento do teor em betume a deformação aumenta, ultrapassando os 4mm. Também há uma diminuição da estabilidade embora não ultrapasse o limite mínimo de 14 kN. Observando a relação entre o volume de vazios e o teor em betume observamos que o valor ideal andarรก próximo dos 5,0%, uma vez que o aumento da percentagem de betume implica um volume de vazios muito baixo.

Tabela 3.4: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura convencional

Propriedade avaliada	Unidade	Valores de referência	Percentagem de ligante		
			4,50%	5,00%	5,50%
Estabilidade	(kN)	8 a 14	17,22	16,96	16,24
Deformação	(mm)	>4	3,86	3,91	4,17
Porosidade	(%)	3 a 5	4,60	4,20	2,60
BMT	(kg/m <sup>3</sup> )	---	2509,90	2501,10	2476,00

Nos provetes realizados com o betume Elaster<sup>®</sup> (Tabela 3.5) observa-se que o teor ideal de betume andarรก no intervalo entre 5,0% e 5,1%, pois são os valores que preenchem todos os requisitos estabelecidos.

Tabela 3.5: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura Elaster<sup>®</sup>

Propriedade avaliada	Unidade	Valores de referência	Percentagem de ligante		
			4,50%	5,00%	5,50%
Estabilidade	(kN)	8 a 14	15,14	15,53	17,89
Deformação	(mm)	<4	3,89	4,40	5,14
Porosidade	(%)	3 a 5	5,80	4,60	2,70
BMT	(kg/m <sup>3</sup> )	---	1524,70	1504,10	2474,20

O teor ótimo para um betume base 70/100 modificado com uma percentagem de 5,0% do polímero EVA (Tabela 3.6), de acordo com os resultados do método de formulação Marshall, aponta para valores inferiores mas próximos de 5,0% de ligante para esta mistura.

Para este teor de betume a estabilidade é superior a 14,0 kN, situando-se aproximadamente nos 15,5 kN, sendo que a deformação não deve passar os 4mm. Para um valor de 4,0% de vazios a percentagem de betume é aproximadamente 4,8%, e tendo em conta estes resultados pode-se afirmar que o teor em betume para uma mistura modificada com 5,0% de EVA deverá situar-se no intervalo entre 4,8% e 5,0%.

Tabela 3.6: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura E5

Propriedade avaliada	Unidade	Valores de referência	Percentagem de ligante		
			4,50%	5,00%	5,50%
Estabilidade	(kN)	8 a 14	14,39	15,48	14,53
Deformação	(mm)	<4	3,94	4,18	4,56
Porosidade	(%)	3 a 5	4,50	3,00	1,90
BMT	(kg/m <sup>3</sup> )	---	2506,10	2487,00	2469,40

O betume modificado com 5% de PEAD (Tabela 3.7) também apresentou um teor de betume ótimo próximo dos 5,0%, uma vez que com o aumento deste teor a deformação aumenta bastante, ultrapassando o valor limite dos 4mm, apesar da estabilidade aumentar ligeiramente. Ao diminuir o teor em betume abaixo dos 5% há uma deformação menor, mas a estabilidade diminui bastante. O volume de vazios também atinge o seu valor ideal para um teor em betume próximo dos 5,0%.

Tabela 3.7: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura P5

Propriedade avaliada	Unidade	Valores de referência	Percentagem de ligante		
			4,50%	5,00%	5,50%
Estabilidade	(kN)	8 a 14	14,54	14,93	15,87
Deformação	(mm)	<4	3,83	4,04	4,34
Porosidade	(%)	3 a 5	4,30	3,90	2,10
BMT	(kg/m <sup>3</sup> )	---	2491,30	2489,90	2454,30

Após realizar o ensaio de Marshall às misturas com betume modificado com o sistema misto com 4% de EVA e 2% PEAD, e tendo em conta a Tabela 3.8, observa-se que a estabilidade se encontra num patamar próximo dos 15 kN e a deformação aumenta com uma maior percentagem de betume, pelo que o valor ideal de betume deve andar num intervalo entre 4,8% e 5,0%.

Tabela 3.8: Propriedades volumétricas e estabilidade Marshall da mistura E4P2

Propriedade avaliada	Unidade	Valores de referência	Percentagem de ligante		
			4,50%	5,00%	5,50%
Estabilidade	(kN)	8 a 14	14,71	15,01	14,63
Deformação	(mm)	<4	3,74	4,03	4,28
Porosidade	(%)	3 a 5	4,30	3,70	1,70
BMT	(kg/m <sup>3</sup> )	---	2491,30	2482,50	2455,50

Após a análise de todos os gráficos do ensaio de Marshall conclui-se que a teor ótimo de betume de 5% seria o mais indicado para todas misturas, uniformizando esta variável para um estudo mais fácil na caracterização das misturas betuminosas.

### 3.6.2. Temperaturas de Produção das Misturas Betuminosas

A temperatura de produção das misturas betuminosas foi determinada com base nos valores de viscosidade. Sendo considerado o valor de viscosidade ideal de produção de misturas 0,3 Pa.s, verificou-se que o ligante convencional atinge esse valor a uma temperatura próxima dos 150°C, enquanto os outros ligantes atingem uma viscosidade ideal próxima dos 180°C.

Analisando as temperaturas na linha de equi-viscosidade (Figura 3.16) e considerando a viscosidade ideal de produção das misturas de 0,3 Pa.s, o ligante convencional (35/50) atingiu essa viscosidade a uma temperatura próxima de 150°C, o ligante E5 a uma temperatura aproximada de 175°C, o ligante E4P2 a uma temperatura de 180°C. Os ligantes P5 e Elaster® não atingiram a viscosidade ideal de 0.3 Pa.s, embora essa viscosidade deva ser atingida para uma temperatura ligeiramente superior a 180°C.

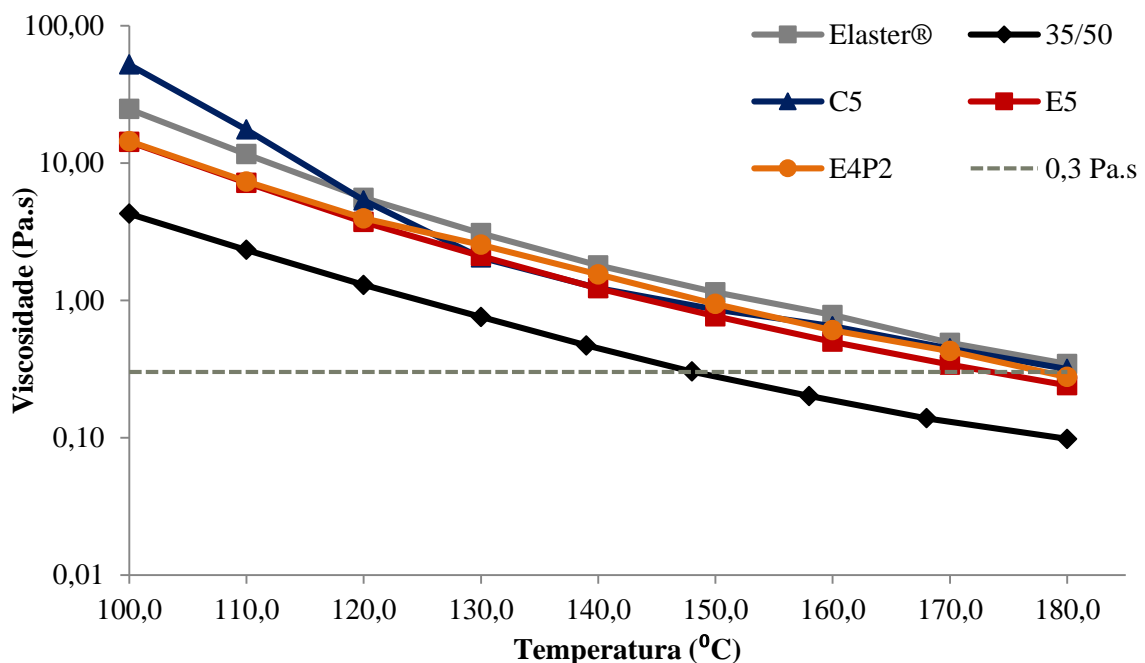


Figura 3.16: Linhas equi-viscosidade dos ligantes em estudo

### 3.7. Caracterização Laboratorial das Misturas Betuminosas

A caracterização das misturas betuminosas é feita tendo em vista a avaliação do desempenho mecânico das misturas em estudo. As misturas estudadas são as mencionadas no subcapítulo 3.5. Para a caracterização das misturas betuminosas estudadas são realizados os ensaios de sensibilidade à água (EN 12697-12), ensaio de resistência à deformação permanente (EN 12697-22), ensaio de resistência à fadiga (EN 12697-24) e o ensaio para determinar módulo de rigidez (EN 12697-26).

#### 3.7.1. Análise Volumétrica

Para a caracterização das misturas betuminosas é necessário produzir várias amassaduras para produzir lajes para o ensaio de deformação permanente, sensibilidade à água, módulo de rigidez e fadiga. Os carotes para o ensaio de sensibilidade à água e as vigas para o ensaio de módulo e fadiga são obtidas após o corte das lajes confeccionadas com esse objetivo. A laje do ensaio de pista é dividida em duas lajetas para cada tipo de mistura.

As lajes foram confeccionadas com vista a terem as seguintes características volumétricas presentes na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Características volumétricas das lajes realizadas

Porcentagem de betume	Baridade Máxima Teórica	Baridade mistura agregados	Volume de vazios
5,0%	2,468 kg/m <sup>3</sup>	2,66 kg/m <sup>3</sup>	4,5%

Depois de extraídos os provetes, e antes da realização dos ensaios, é necessário fazer a caracterização volumétrica para cada tipo de mistura, uma vez que é possível que apresentem valores um pouco diferentes para os quais foi formulada a mistura.

#### 3.7.2. Sensibilidade à Água

De uma forma geral, a avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas é realizada com recurso a ensaios de resistência mecânica realizados sobre dois grupos de provetes de misturas betuminosas com características idênticas, que são previamente acondicionados em



condições distintas: um dos grupos é acondicionado em condições mais severas, do ponto de vista da ação da água.

Existem vários métodos de ensaio baseados neste conceito, e neste trabalho considera-se oportuno realizar ensaios para a avaliação da sensibilidade à água segundo a norma Europeia EN 12697-12.

No estudo da sensibilidade à água foram ensaiadas as misturas betuminosas AC14 Surf mencionadas no subcapítulo 3.5, com a mesma percentagem de ligante (5,0%).

A avaliação à sensibilidade à água é feita através de provetes cilíndricos. Para a obtenção dos provetes foi necessário produzir uma laje de cada mistura para depois retirar os provetes. O formato do provete deverá ser cilíndrico e respeitar as dimensões de  $101,6 \pm 0,1$  mm de diâmetro e  $63,5 \pm 2,5$  mm de altura.

Tendo sido obtidos os provetes e após anotar as suas dimensões pode-se prosseguir para o ensaio. Para cada mistura são preparados seis provetes cilíndricos.

O primeiro grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “a seco” (ITSd) é acondicionado ao ar a uma temperatura de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ . O segundo grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “imersos” (ITSw), é submetido ao acondicionamento em vácuo. Este procedimento consiste em manter os provetes em água destilada durante  $30 \pm 5$  minutos a uma pressão de  $6,7 \pm 0,3$  kPa, sendo depois colocados num banho de água a  $40^\circ\text{C}$  durante um período de 68 a 72 horas.

Terminado o período de condicionamento, os dois grupos de provetes são colocados à temperatura desejada para o ensaio de tração indireta: o primeiro grupo (ITSd) é colocado durante duas horas a  $15^\circ\text{C}$  (recorreu-se a um frigorífico programado a essa temperatura, sendo ainda verificada a temperatura com o recurso a uma sonda); o segundo grupo (ITSw) é colocado num novo banho de água à mesma temperatura de ensaio ( $15^\circ\text{C}$ ).

De seguida os provetes são submetidos ao ensaio de tração indireta. Este ensaio é muito semelhante ao de Marshall, com a diferença da forma de aplicação da carga e temperatura de ensaio, que são diferentes para este ensaio.

A norma Europeia EN 12697-12 também exige que após o ensaio se visualize que tipo de rotura foi verificada, podendo ser: tração indireta evidente; por deformação; ou combinada (Figura 3.17). Deve ser verificado o revestimento de ligante na superfície do agregado exposto e a existência ou não de agregado fraturado ou esmagado. O ideal é que a fratura ocorra pelo agregado e não pela ligação betume agregado.

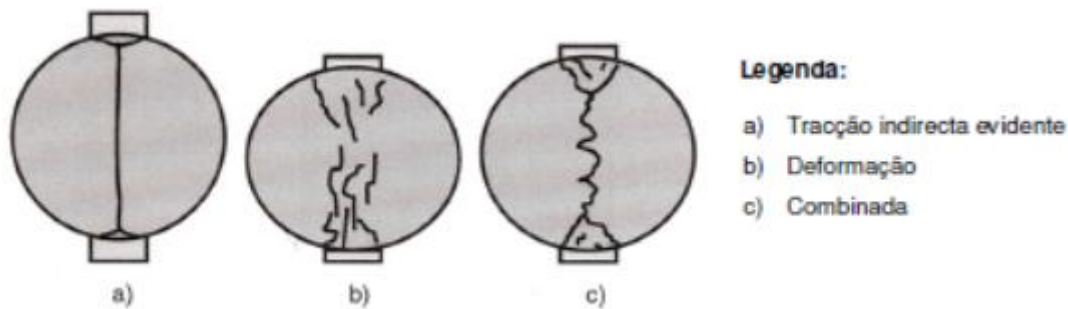


Figura 3.17: Tipo de rotura dos provetes de sensibilidade à água

A partir dos valores médios das resistências à tração indireta dos provetes “imersos” (ITS<sub>w</sub>) e “a seco” (ITS<sub>d</sub>) é calculada a resistência conservada em tração indireta (ITRS) através da Equação 2, que é a medida da sensibilidade à água.

$$ITRS = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 (\%) \quad (2)$$

### 3.7.3. Resistência à Deformação Permanente

O ensaio de pista (também denominado de *Wheel Tracking Test* ou WTT) foi utilizado para determinação da resistência à deformação permanente, de acordo com o procedimento da norma europeia EN 12697-22.

As lajes foram realizadas em laboratório, sendo a mistura colocada num molde metálico e compactada através com um cilindro de rasto liso. As características volumétricas das lajetas em estudo são apresentadas na Tabela 3.10. A temperatura de compactação de todas as misturas rondou os 140°C (Figura 3.18), sendo a mistura betuminosa compactada até obter uma superfície nivelada.

Tabela 3.10: Características volumétricas das lajetas usadas no ensaio de pista

Mistura	Laje	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	BMT (kg/m <sup>3</sup> )	Dimensões (mm)	Vv (%)
Convencional	Conv_1	2355	2482,0	40,2×301×301	5,1
	Conv_2	2352		40,2×301×301	5,2
Elaster <sup>®</sup>	Elaster <sup>®</sup> _1	2342	2483,1	40,1×301×302	5,5
	Elaster <sup>®</sup> _2	2351		40,4×301×302	5,3
PEAD	P_1	2344	2490,0	40,2×301×301	5,5
	P_2	2360		39,9×301×301	5,4
EVA	E_1	2380	2491,0	40,4×301,5×301,5	4,2
	E_2	2391		40,0×300,5×300,5	4,5
A4C2	E4C2_1	2336	2482,0	40,4×300×300	5,8
	E4C2_2	2348		40,7×301×301	5,4



Figura 3.18: Temperatura de compactação de uma laje para avaliar a resistência à deformação permanente

A avaliação da suscetibilidade à deformação dos materiais betuminosos foi feita medindo a profundidade de rodeira formada após sucessivas passagens de uma roda sobre o provete, a temperatura constante. Foi adotado o procedimento B (mais usual) no qual é utilizado um equipamento pequeno realizando-se o acondicionamento ao ar (Figura 3.19). Segundo a norma a temperatura deve ser controlada entre 25 e 60°C, sendo que como condições de ensaio foi adotada uma temperatura de 50°C. Seguindo-se a norma, foram aplicados 10 000 ciclos de carga a um mínimo de 2 provetes (procedimento B), dando-se o ensaio por terminado quando se atingiu este valor ou quando a profundidade da rodeira atingiu 20 mm.

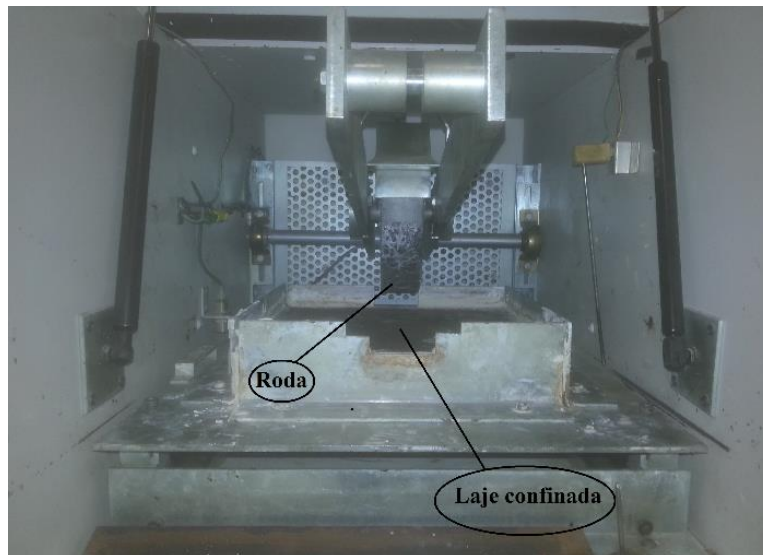


Figura 3.19: Equipamento utilizado no ensaio de pista

Os principais resultados a retirar no ensaio de pista são a média da variação da deformação permanente ao ar – *Wheel Tracking Slope in air* ( $WTS_{AIR}$ ), a média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados – *Mean Proportional Rut Depth in air* ( $PRD_{AIR}$ ) e a profundidade média da rodeira – *Mean Rut Depth in air* ( $RD_{AIR}$ ).

#### 3.7.4. Módulo de Rigidez das Misturas Betuminosas

As misturas betuminosas utilizadas nas camadas dos pavimentos têm um comportamento mecânico do tipo viscoelástico. O comportamento reológico é influenciado principalmente pela presença de betume, depende da temperatura e da frequência da aplicação de cargas. A temperaturas mais baixas as misturas betuminosas apresentam um comportamento elástico, a temperaturas elevadas um comportamento viscoso e a temperaturas intermédias um comportamento viscoelástico representativo das condições de serviço.

O ensaio para determinar o módulo de rigidez foi realizado no âmbito deste trabalho, às diversas misturas em estudo, de acordo com o especificado na norma EN 12697-26. Os provetes de ensaio, prismáticos, foram obtidos de lajes preparadas segundo o segundo a norma EN 12697-33, utilizando-se igualmente o cilindro de rasto liso.

A determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase é realizado aplicando um carregamento sinusoidal aos provetes para determinar o valor da temperatura, da frequência e

amplitude. Os ensaios foram realizados usando as frequências de 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 8 e 10 Hz, e a uma temperatura de 20 °C. Esta temperatura para além de estar dentro do intervalo estipulado pela norma, tem a vantagem de ser semelhante à temperatura de projeto muitas vezes utilizada para dimensionamento de pavimentos.

A norma 12697-26 apresenta vários métodos de ensaio para a caracterização do módulo complexo das misturas betuminosas, sendo que o método utilizado neste trabalho consiste em aplicar flexão a uma viga em quatro pontos. As vigas para ensaio são montadas num dispositivo composto por duas amarras nas extremidades (as reações) e duas amarras interiores (as ações). Estas amarras, além de terem a função de amarrar o provete, têm a particularidade de terem liberdade de movimento de rotação e de translação horizontal para não originarem tensões adicionais no provete.

O módulo de rigidez é definido como a relação entre as amplitudes das tensões aplicadas e das deformações medidas. O ângulo de fase é uma medida do desfasamento entre as tensões e as deformações, permitindo inferir se o comportamento da mistura betuminosa é predominantemente elástico (ângulo de fase nulo) ou viscoso (ângulo de fase próximo dos 90°).

#### 3.7.4.1 Módulo de Rigidez a Várias Temperaturas

O ensaio para a caracterização do módulo de rigidez é feita a uma temperatura de 20°C e uma frequência de 8 Hz. No entanto, é de todo o interesse estudar a variação do módulo de rigidez a diferentes temperaturas. Foi então avaliado o módulo de rigidez e o ângulo de fase das misturas em estudo às temperaturas de 0, 10 e 30°C, além dos 20°C já mencionados, para as frequências de 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 8 e 10 Hz.

#### 3.7.4.2 Curvas Mestras das Misturas Betuminosas em Estudo

As curvas mestras são possíveis de representar quando há o estudo do módulo de rigidez e ângulo de fase a várias temperaturas. As curvas mestras são obtidas pela translação das curvas “módulo-frequência” de diversas temperaturas para a mesma curva, sendo a translação realizada pela aplicação de um fator de escala  $\log \alpha_T$ , função da temperatura. Assim, após esta

transformação de escalas permite que as variáveis temperatura e frequência ( $f$ ) sejam combinadas numa nova variável conhecida por frequência reduzida ( $f_R$ ), pela Equação 3.

$$f_R = \alpha_T \times f \quad (3)$$

Em que:

$f$  – é a frequência de ensaio;

$\alpha_T$  - é um fator de translação dependente de vários parâmetros, tais como a temperatura de ensaio e a temperatura de referência.

A vantagem desta curva é permitir, através de interpolação, obter o módulo de rigidez de uma mistura betuminosa, para qualquer combinação de temperatura e frequência dentro da gama de valores medidos.

A fórmula geralmente utilizada para definição dos fatores de translação baseia-se na equação de Arrhenius, dada pela Equação 4.

$$\ln(\alpha_T) = \frac{\Delta H}{R} \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (4)$$

Em que:

$\Delta H$  - energia de activação aparente característica do material;

$R$  - constante do gás universal (8,314 J/mole/°K);

$T$  - temperatura de ensaio expressa em °K;

$T_s$  - temperatura de referência expressa em °K.

### **3.7.5. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga**

A caracterização da resistência à fadiga é efetuada, neste caso, tendo por base a norma europeia EN 12697-24, correspondente ao ensaio de flexão em quatro pontos, e foi realizado a uma frequência de 10 Hz e a uma temperatura de 20 °C. Os provetes de ensaio, prismáticos, foram os utilizados nos ensaios do módulo de rigidez.

O fenómeno de fadiga que um material sofre acontece quando é submetido a um estado de tensões e de extensões repetidas elevadas, resultando na formação de fendas ou rotura

completa, após um número suficiente de repetições de carregamento. Resumindo, a fadiga conduz ao aparecimento do fendilhamento resultante da aplicação repetida das cargas do tráfego e das variações térmicas (Pais e Pereira, 2000).

A norma refere que a largura e a altura do provete deverão ser no mínimo três vezes superiores ao do agregado de maior dimensão utilizado na mistura. O comprimento efetivo do provete, correspondente à distância máxima entre os dois apoios exteriores, deverá ser no mínimo seis vezes superior ao valor do agregado de maior dimensão.

A partir dos ensaios realizados pretende-se obter leis de fadiga (relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga até atingir a rotura), resultantes da aplicação de cargas repetidas a diferentes níveis de extensão e ou de tensão, tentando reproduzir as condições a que o pavimento está em serviço.

O critério de rotura para a lei de fadiga pode ser traduzido pela Equação 5, desenvolvida por Monismith (1981), a partir do qual se pode relacionar o nível de extensão aplicado no ensaio com o número de ciclos de carga que originam a rotura dos provetes (vigas).

$$N = a * \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^b \quad (5)$$

Em que:

N - é a resistência à fadiga da mistura betuminosa;

$\varepsilon_0$  - é a extensão de tração;

a,b - são coeficientes determinados experimentalmente.

O ensaio de fadiga consiste na aplicação de cargas sinusoidais até se atingir a rotura por fadiga dos provetes. Assim sendo, e contrariamente aos ensaios de módulo, os ensaios de fadiga são ensaios destrutivos. O objetivo do ensaio é determinar o número de ciclos de aplicação de carga até que o provete atinja a rotura mediante um critério escolhido. O critério adotado foi a diminuição do módulo de rigidez para 50 % do seu valor inicial, visto que o ensaio foi realizado em controlo de extensão. O módulo de rigidez inicial foi definido como sendo aquele atingido após os primeiros 100 ciclos.





## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos em cada ensaio quer para a caracterização dos ligantes como para a caracterização das misturas betuminosas, fazendo uma análise sobre os diferentes ensaios realizados e o modo como se relacionam.

No subcapítulo 4.2 são analisados os resultados da caracterização dos ligantes com base nos ensaios a que foram submetidos. Neste subcapítulo é feita a comparação entre os betumes isolados modificados e os sistemas mistos, e também é realizado um estudo para determinar quais as percentagens de polímero a utilizar no sistema misto e que dará à mistura betuminosa um melhor desempenho. Finalmente também é feita a análise dos resultados da caracterização reológica dos betumes estudados.

No subcapítulo 4.3 são apresentados os resultados da caracterização das misturas betuminosas. Para essa caracterização foram realizados os ensaios de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência à fadiga.

### 4.2. Resultados de Caracterização dos Ligantes Betuminosos

Relembrando o que já foi mencionado anteriormente, neste trabalho foram estudados três ligantes base, dois convencionais e um modificado comercial, e também cinco ligantes que foram modificados com polímeros reciclados, nomeadamente:

- Betume convencional 35/50 da CEPSA (35/50);
- Betume convencional 70/100 da CEPSA (35/50);
- Betume comercial modificado Elaster<sup>®</sup> 13/60 (Elaster<sup>®</sup>);
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 5% de PEAD (P5);
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 5% de EVA (E5);
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 3% de EVA e 2% de PEAD (E3P2);
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 4% de EVA e 2% de PEAD (E4P2);
- Betume 70/100 da CEPSA modificado com 5% de EVA e 2% de PEAD (E5P2).

#### 4.2.1. Ensaio de penetração

Os resultados obtidos para os betumes base e betumes modificados no ensaio de penetração a 25°C estão representados na Figura 4.1.

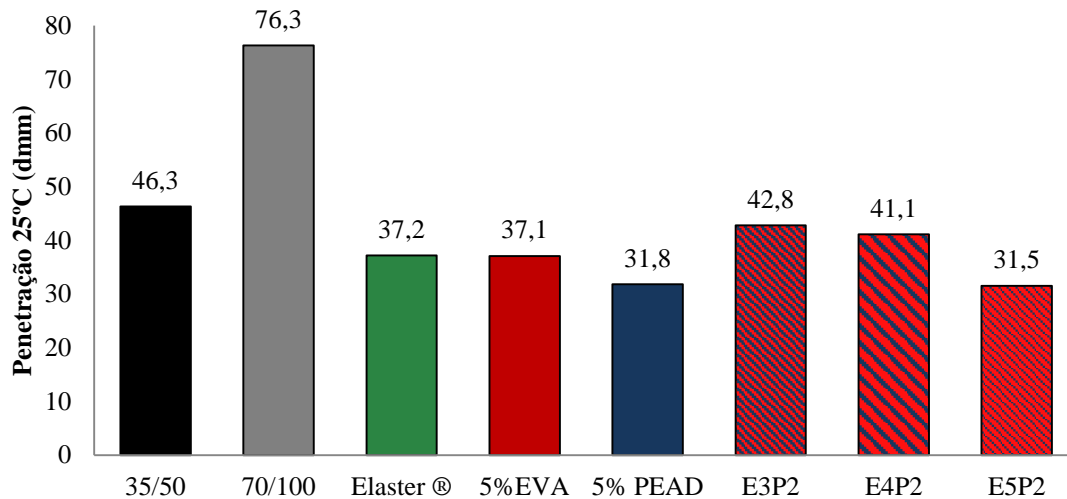


Figura 4.1: Propriedades dos ligantes no ensaio de penetração

Avaliando os resultados de penetração a 25°C dos betumes produzidos no laboratório, e comparando com o betume base 70/100 utilizado na modificação mesmos, podemos concluir que em todos os casos há uma redução do valor de penetração, sendo que o que mais diminuiu esse valor foi o betume alterado com PEAD e o sistema misto E5P2, devido no primeiro caso ao polímero utilizado ser um plastómero aumentando a rigidez do ligante, e no segundo caso a alta percentagem de polímero (7%) diminuiu a penetração do betume.

Fazendo também uma comparação dos betumes modificados com polímeros e o betume base 35/50 observamos que em todos o valor de penetração é menor que o 35/50. Observando a Figura 4.1 visualizamos que o betume puro 70/100 é o que tem maior valor de penetração, e também o betume modificado comercial Elaster® apresenta valores idênticos aos modificados com polímeros, sendo muito semelhante ao ligante modificado com o polímero EVA.

#### 4.2.2. Ponto de Amolecimento dos Ligantes

Os resultados do ensaio anel e bola para determinação do ponto de amolecimento estão apresentados na Figura 4.2.

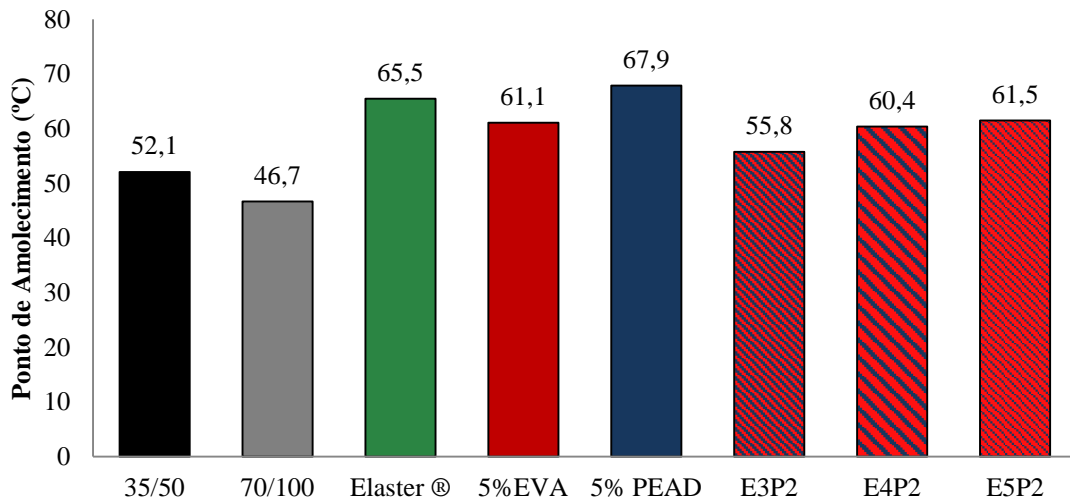


Figura 4.2: Ponto de amolecimento dos vários ligantes estudados

Todos os betumes que foram modificados com polímero apresentaram um aumento do ponto de amolecimento comparado com o betume base 70/100. Verificou-se que o betume modificado com PEAD apresenta a maior temperatura de amolecimento, e logo espera-se que obtenha os melhores resultados da resistência à deformação permanente e um melhor desempenho em termos de sensibilidade a temperaturas de serviço elevadas.

#### 4.2.3. Ensaio de Resiliência

Os resultados ao ensaio de resiliência estão representados na Figura 4.3.

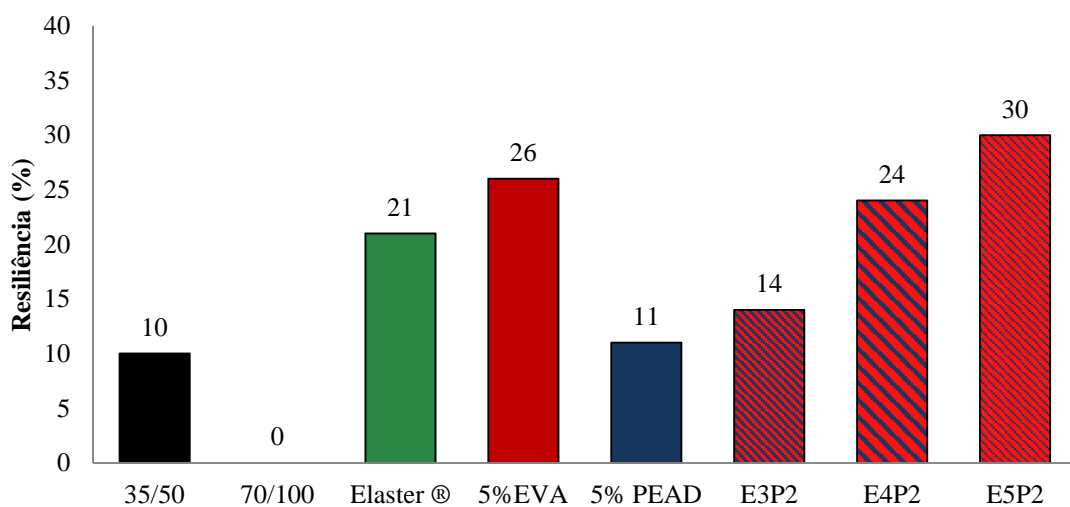


Figura 4.3: Resultados dos ligantes no ensaio de resiliência

Relativamente aos resultados de resiliência, tal como se estava à espera, os ligantes que obtiveram melhores resultados foram os modificados com o polímero elastómero, neste caso o EVA. Os ligantes com 5% EVA e o sistema misto E5P2 apresentam os melhores valores de recuperação elástica, pois como já foi referido os betumes foram modificados com o elastómero EVA que confere aos betumes propriedades elásticas. O betume base 35/50 e o betume com 5%PEAD (mais viscoso) são os que apresentam piores resultados, excluído o 70/100 que foi o betume que serviu de base para a modificação com polímeros e que, por ser muito mole, apresentou uma recuperação elástica nula.

#### 4.2.4. Viscosidade dos Ligantes Estudados

A avaliação da viscosidade dinâmica à temperatura de 150°C é apresentada na Figura 4.4., e permite concluir que os betumes modificados têm uma viscosidade superior aos betumes base. Nos betumes modificados com polímeros constatamos que quanto maior a percentagem de polímero mais elevado é o valor da viscosidade, o que pode estar relacionado com a maior dificuldade de digestão do polímero no betume, ou com a criação de redes poliméricas mais resistentes à deformação. O valor da viscosidade do betume comercial Elaster® é bastante alto, sendo equiparado com o valor do betume E5P2.

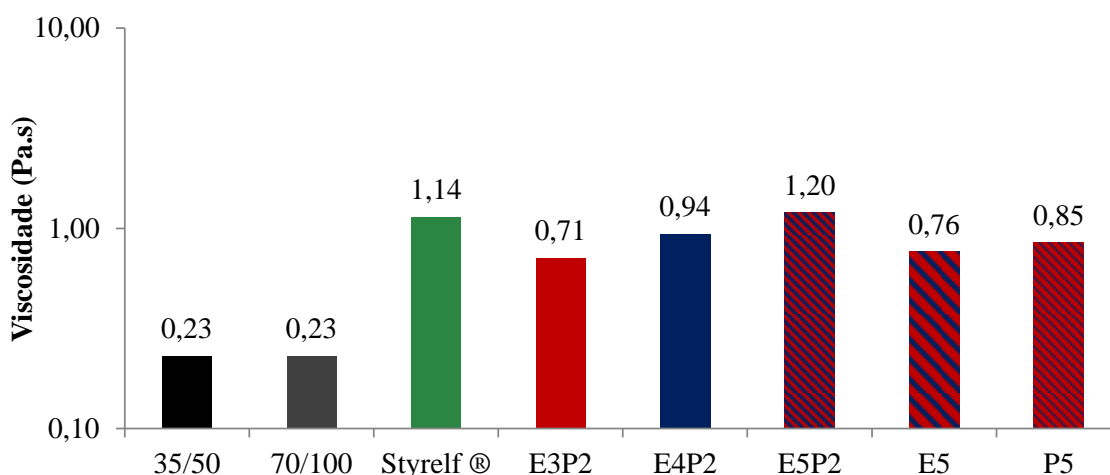


Figura 4.4: Resultados dos ligantes no ensaio de viscosidade a 150°C

Analisando as temperaturas na linha de equi-viscosidade apresentadas na Figura 4.5 e Figura 4.6, constata-se que o betume 35/50 tem sempre viscosidades mais baixas do que os outros ligantes, a qualquer temperatura. O ligante P5 apresenta uma viscosidade superior em

comparação com os outros até uma temperatura aproximada de 135°C, mas após atingir o ponto de fusão do PEAD há uma diminuição significativa do valor da viscosidade. Nos sistemas mistos, quanto maior a percentagem de polímero a modificar o betume maior é a viscosidade às várias temperaturas, concluindo-se quanto maior a percentagem de polímero utilizado mais viscoso é o betume.

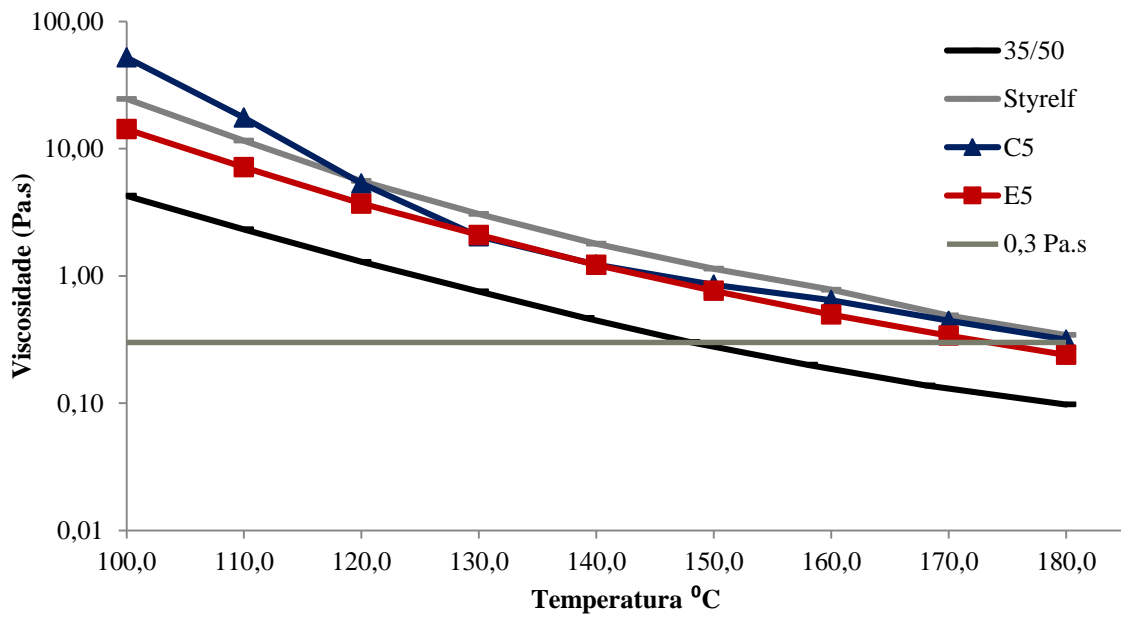


Figura 4.5: Resultados dos ligantes base e sistemas isolados no ensaio de viscosidade

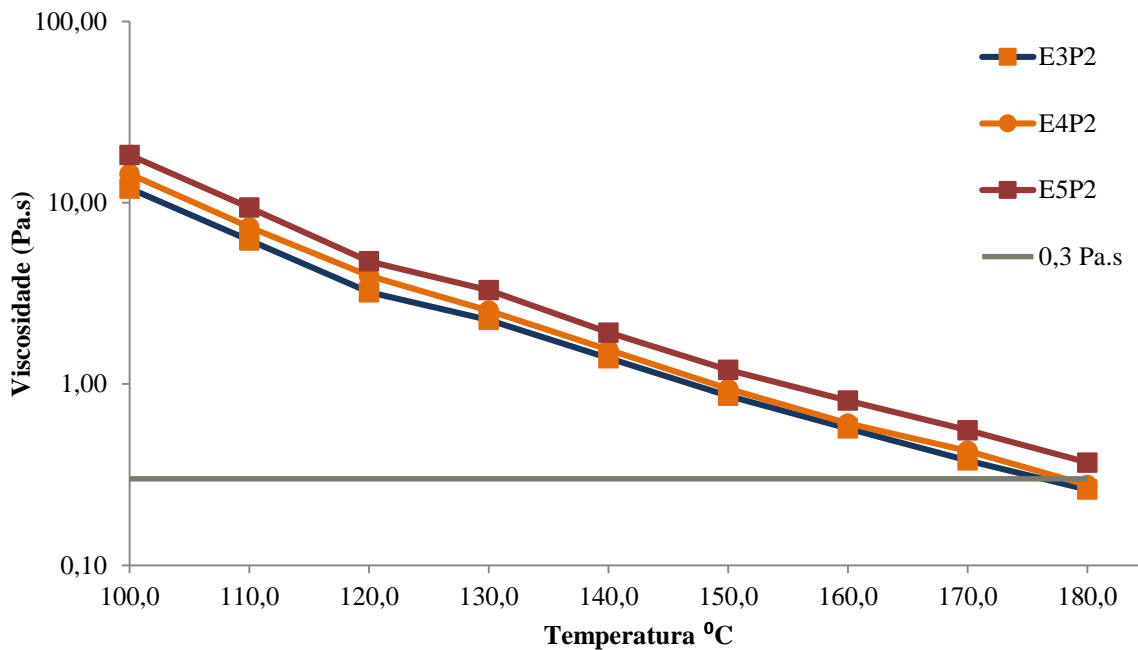


Figura 4.6: Resultados dos ligantes modificados com sistema misto no ensaio de viscosidade

#### 4.2.5. Estabilidade ao armazenamento

Nas Figura 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 estão representados os resultados dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e resiliência ao topo e base das amostras estudadas no ensaio de estabilidade ao armazenamento, assim como a variação do resultado de cada ensaio entre o topo e base.

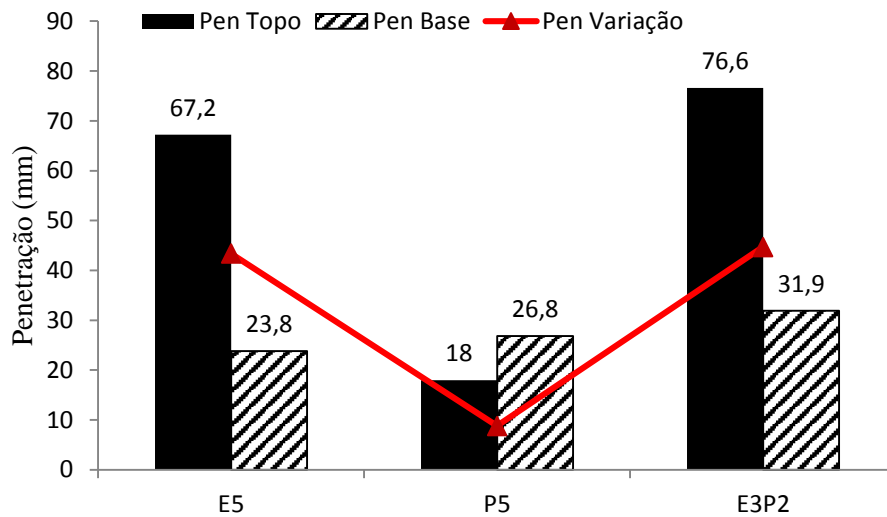


Figura 4.7: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de penetração

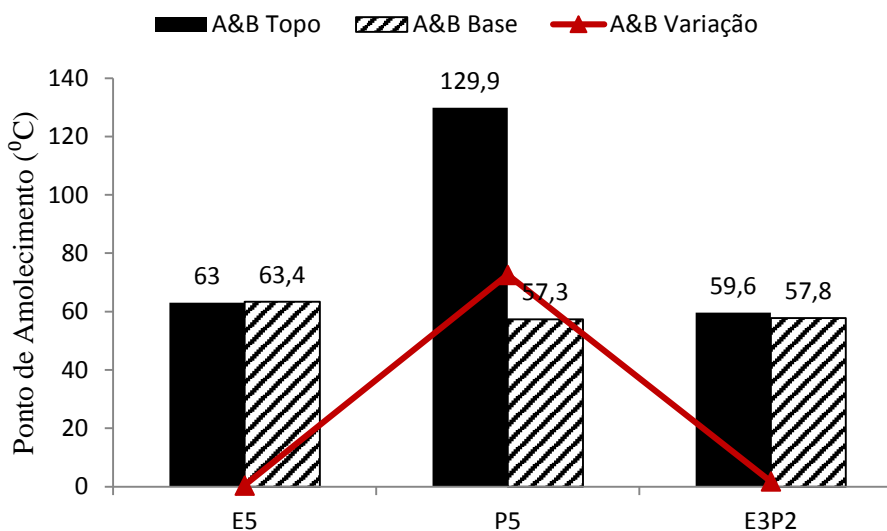


Figura 4.8: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de anel e bola

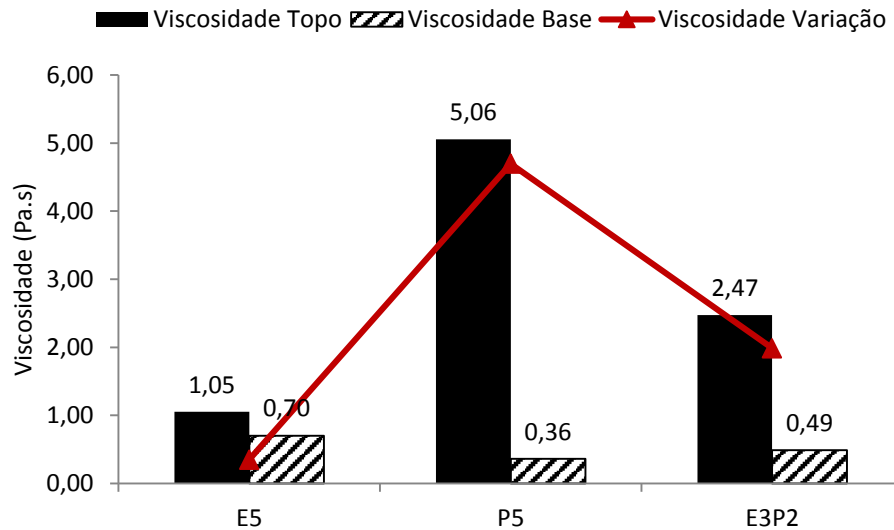


Figura 4.9: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de viscosidade

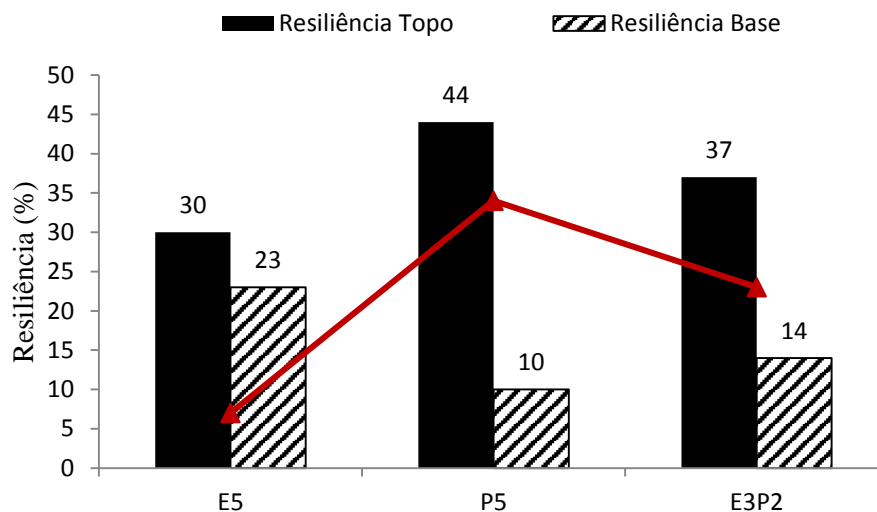


Figura 4.10: Resultados de estabilidade ao armazenamento no ensaio de resiliência

Através da análise aos ensaios de estabilidade ao armazenamento podem ser observadas diferenças significativas nas propriedades de base e topo dos diversos betumes modificados. É possível verificar que diferentes polímeros apresentam diferentes comportamentos nas várias propriedades estudadas.

O betume modificado com PEAD tem diferentes comportamentos nos valores de viscosidade, ponto de amolecimento e resiliência, sendo apenas satisfatórios nos valores de penetração. Já o betume modificado com EVA apresentou maiores diferenças entre “topo” e “base” nos ensaios de penetração e resiliência. O sistema misto de dois polímeros também não teve um

comportamento satisfatório à estabilidade ao armazenamento, verificando-se diferenças significativas entre “topo” e “base” em todos ensaios, exceto no ponto de amolecimento.

Pode-se concluir que todos os betumes alvo de estudo tiveram mau comportamento no ensaio de estabilidade e armazenamento, sendo que depois de a amostra ser colocada no recipiente de armazenamento, o polímero tem tendência a “subir” resultando em diferentes valores no “topo” e “base” nos ensaios efetuados. Estes resultados implicam que se deva optar por realizar estes ligantes através da modificação junto à central betuminosa.

#### 4.2.6. Seleção do Sistema Misto a Utilizar na Produção de Misturas Betuminosas

O estudo do sistema misto a utilizar na produção de misturas betuminosas passa por tentar “equilibrar” da melhor forma possível os resultados dos ensaios feitos na sua caracterização, tendo também em consideração a questão do custo (que aumenta com a quantidade de polímero utilizado). Analisando a Figura 4.11 e Figura 4.12 o ligante modificado E3P2 (3% EVA e 2% PEAD) tem o maior valor de penetração e menor ponto de amolecimento e resiliência. Já o ligante modificado E5P2 (5% EVA e 2% PEAD) apresenta os resultados mais satisfatórios dos parâmetros de penetração e resiliência, mas no ensaio de viscosidade a 150°C tem valores bastante elevados e por isso mais desfavoráveis para produção em central (além do maior custo desta solução).

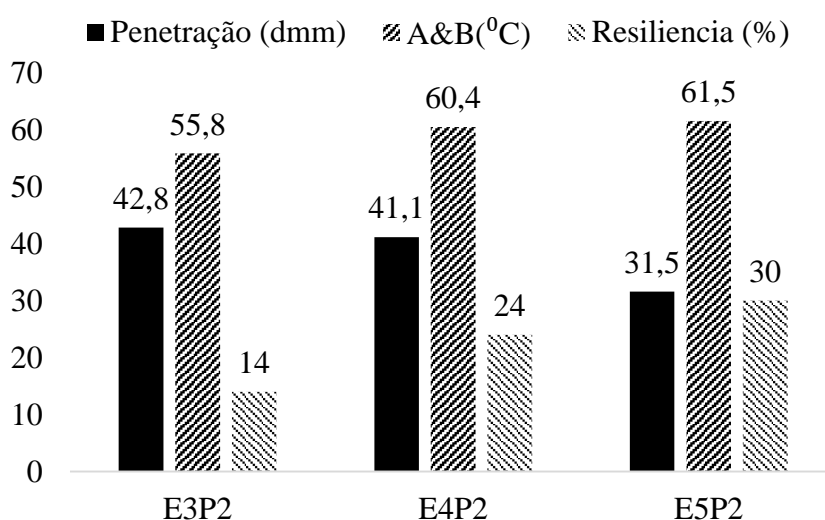


Figura 4.11: Resultados de penetração, ponto de amolecimento e resiliência dos sistemas mistos



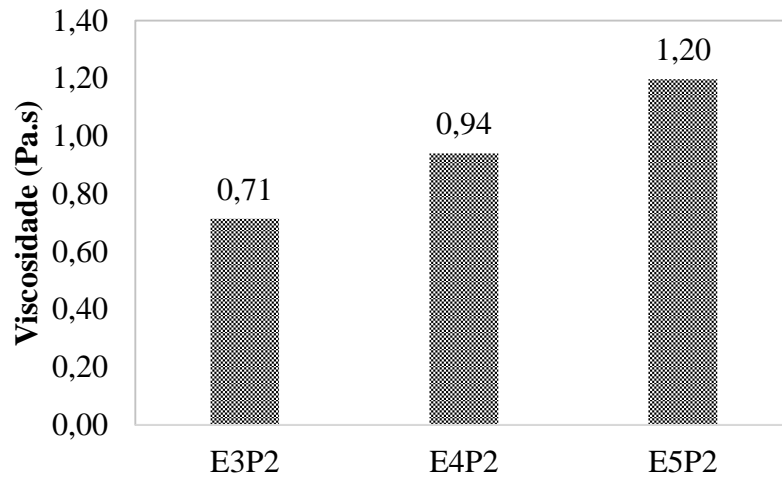


Figura 4.12: Resultados do ensaio de viscosidade a 150 °C dos sistemas mistos

Em conclusão o sistema misto E4P2 (4% EVA e 2% PEAD) é a solução que proporcionará resultados mais equilibrados dos parâmetros de desempenho da mistura betuminosa. Fazendo uma análise global, os melhores ligantes tendo em conta os valores de penetração, ponto de amolecimento e resiliência são o E4P2 e E5P2. No entanto, atendendo às razões já referidas, o ligante E4P2 foi o sistema misto selecionado para prosseguir com o estudo.

#### 4.2.7. Caracterização Reológica dos Ligantes

##### 4.2.7.1 Ensaio de Corte com Varrimento de Frequências

Com a realização deste ensaio é possível construir curvas mestras através de ensaios isotérmicos dinâmicos por varrimento de frequência. O princípio de sobreposição tempo-temperatura é válido para todos os materiais em estudo, e os deslocamentos horizontais são satisfatoriamente descritos pela relação do WLF.

Pelo princípio de sobreposição tempo-temperatura é possível a construção de curvas mestras à temperatura de referência de 60°C, correspondente à temperatura alta de serviço do pavimento betuminoso. O deslocamento dos resultados do varrimento em frequência, medidos a temperaturas diferentes de 60°C, ao longo do eixo horizontal, permite formar uma curva contínua referente ao módulo complexo e ângulo de fase (como descrito anteriormente para os ensaios de módulo das misturas betuminosas).

Relativamente ao módulo complexo (Figura 4.13) dos ligantes em estudo, às frequências altas (baixas temperaturas) constata-se que a mistura P5 (PEAD) tem um módulo de rigidez mais alto, pelo que será expectável ter maior rigidez e pior comportamento nos ensaios de fadiga. Os ligantes modificados com polímeros apresentam valores muito idênticos de módulo complexo, em especial as misturas E5 (EVA) e E4P2 (sistema misto). A baixas frequências (altas temperaturas) todas as misturas apresentam módulos superiores à mistura convencional, pelo que é de esperar que todas tenham melhor desempenho na resistência à deformação permanente do que a convencional, e em especial o ligante modificado comercial Elaster®.

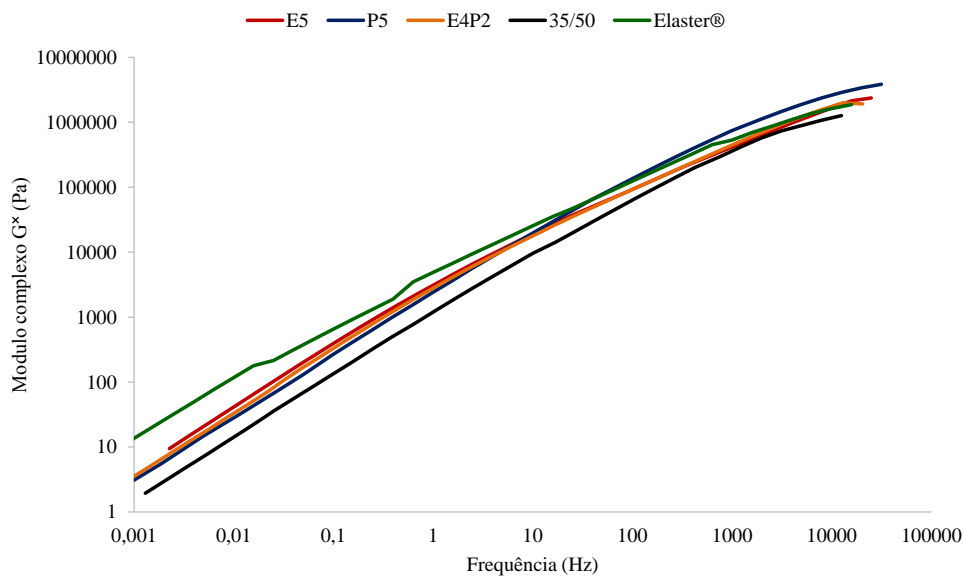


Figura 4.13: Módulo complexo dos ligantes em estudo

O ângulo de fase é um indicador da relação entre as propriedades elásticas e viscosas de um ligante. Na Figura 4.14 é possível observar que os ligantes Elaster®, E5 e E4P2 apresentam menores valores de ângulo de fase numa gama mais alargada de frequências e temperaturas, pelo que podem oferecer às misturas betuminosas um comportamento mais elástico e com menos deformações viscosas em várias condições. As misturas P5 e convencional apresentam valores mais elevados de ângulo de fase que resultam em misturas menos elásticas.

#### 4.2.7.2 Ensaio de fluência *Multi Stress Creep Recovery*

O objetivo da realização do ensaio MSCR é obter o índice de deformação não recuperada ( $J_{nr}$ ) para avaliar o comportamento das misturas à deformação permanente a partir dos ligantes estudados.

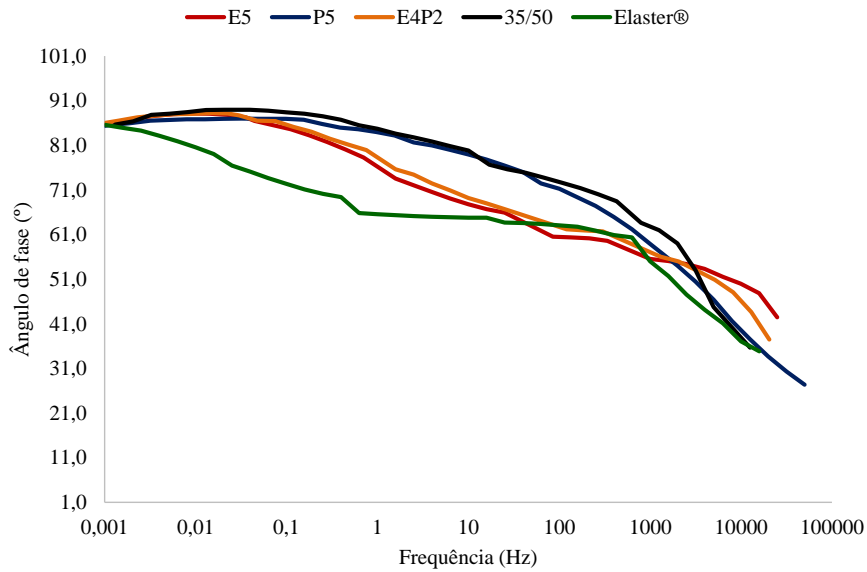


Figura 4.14: Ângulo de fase dos ligantes em estudo

A Figura 4.15 mostra o índice de deformação não recuperada ( $J_{nr}$ ), tendo em conta a tensão aplicada, para os cinco betumes em estudo. À medida que se ia aumentando a tensão no ensaio MSCR era evidente que os betumes tinham diferentes comportamentos. Nos betumes modificados com polímeros reciclados é evidente um ponto de inflexão do seu comportamento com o aumento da tensão aplicada (a partir dos 300 Pa).

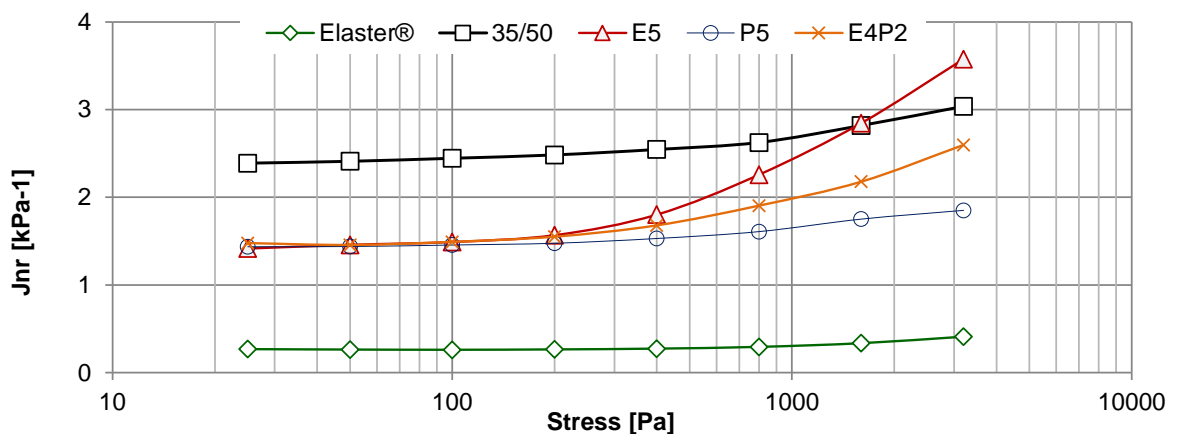


Figura 4.15: Resultados do ensaio MSCR aos ligantes estudados

O ligante que apresenta menores valores de  $J_{nr}$  é o ligante Elaster® que apresentou valores constantes em toda a gama de tensões aplicadas, podendo assim considerar-se o betume mais resistente à deformação.

O ligante convencional tem os maiores valores de  $J_{nr}$  durante quase toda a gama de tensões aplicadas (pela falta da recuperação que é garantida pela rede polimérica aos restantes betumes), exceto para níveis de tensão muito elevados (3000 Pa) em que o ligante E5 (EVA) apresenta o maior valor de  $J_{nr}$ , tornando-se o menos resistente à deformação.

#### 4.2.7.3 Microscopia de fluorescência

A realização da microscopia de fluorescência permite avaliar a dispersão dos polímeros utilizados no betume. Na Figura 4.16 é visível uma boa dispersão do polímero EVA no betume 70/100.

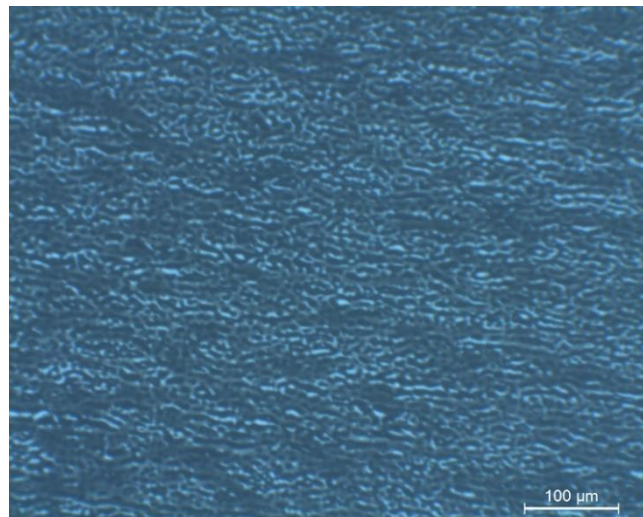


Figura 4.16: Microscopia de fluorescência do betume com 5% de polímero EVA

Na Figura 4.17 são visíveis os pontos mais claros pertencentes ao polímero PEAD. No entanto é possível observar que também foi conseguida uma boa dispersão do polímero no betume, que apresenta apesar disso uma estruturação diferente da observada no EVA.

A Figura 4.18 diz respeito ao sistema misto (4% do polímero EVA e 2% do polímero PEAD), no qual a dispersão não foi totalmente conseguida, uma vez que são visíveis fases mais claras bastante acentuadas que dizem respeito aos polímeros utilizados. O aparecimento das manchas brancas indica que a percentagem total de polímero (6%) já será demasiado elevada para se obter uma boa digestão do polímero no betume. É interessante ainda verificar que se nota a ocorrência conjunta dos dois tipos de estruturas poliméricas do EVA e do PEAD atrás apresentados, o que também poderá ter dificultado a dispersão dos polímeros no betume.

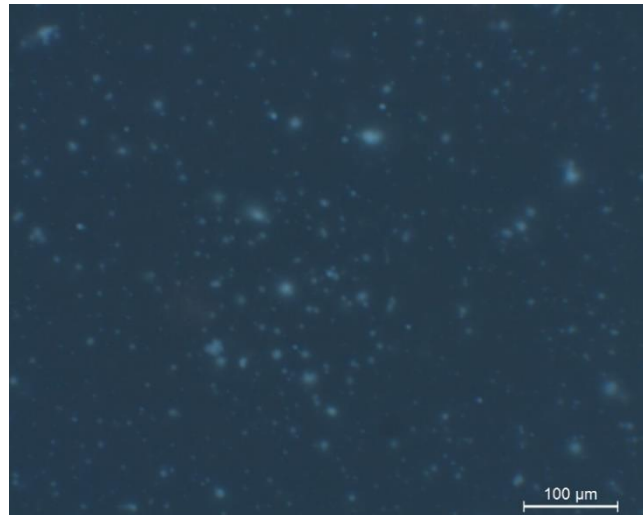


Figura 4.17: Microscopia de fluorescência do betume com 5% de polímero PEAD

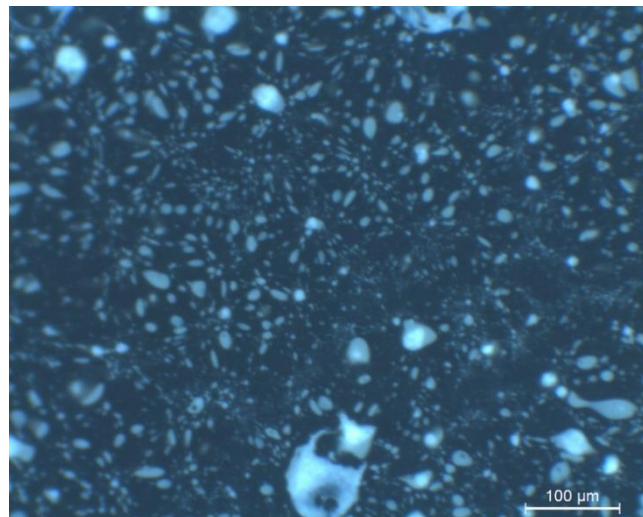


Figura 4.18: Microscopia de fluorescência do betume com 4% de EVA e 2% de PEAD

### 4.3. Resultados caracterização misturas betuminosas

Relembrando o que já foi mencionado anteriormente, para a execução deste trabalho foram realizadas cinco misturas em que o que diferia entre elas é o ligante utilizado, mas a percentagem de betume é igual para todas as misturas. As cinco misturas produzidas foram:

- Mistura convencional com betume 35/50 (Convencional);
- Mistura com betume comercial modificado (Elaster<sup>®</sup>);
- Mistura com betume modificado com 5% de PEAD (P5);
- Mistura com betume modificado com 5% de EVA (E5);
- Mistura com betume modificado com 4% de EVA e 2% de PEAD (E4P2).

### 4.3.1. Sensibilidade à água

O principal parâmetro avaliado pelo ensaio de sensibilidade à água é o índice de resistência conservada por tração indireta (ITSR), que é a razão entre a resistência à tração indireta média do grupo de provetes “molhados” e o grupo de provetes “secos”. Na Figura 4.19 estão representados os valores de ITSR para as misturas em estudo. Através da análise da Figura 4.19 podemos concluir que as misturas que foram produzidas com betume modificado com EVA, quer o sistema isolado quer o sistema misto, são as que apresentam melhores resultados, na ordem dos 80%. Sendo o polímero EVA um elastómero com um ponto de fusão próximo dos 70°C, que apresenta uma boa interação com o betume, isso poderá justificar o melhor desempenho dessas misturas betuminosas neste ensaio (o que também resulta do menor volume de vazios destas misturas). As misturas betuminosas convencionais, Elaster® e P5 apresentam valores de sensibilidade à água ligeiramente inferiores, e muito idênticos, na ordem dos 70%.

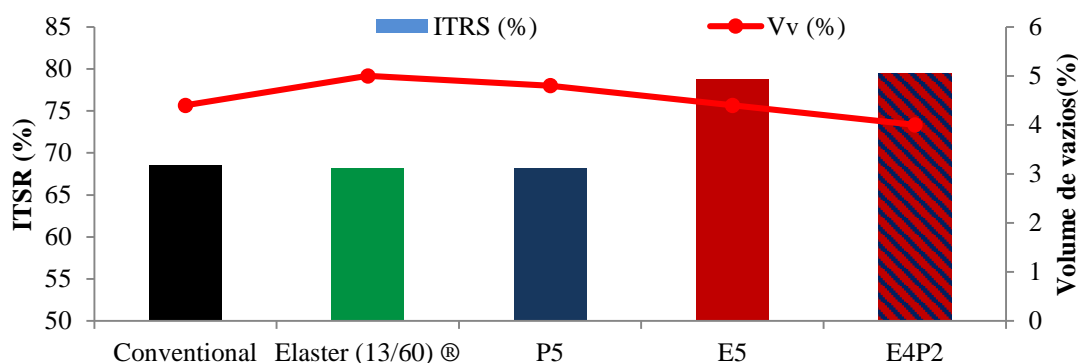


Figura 4.19: Índice de tração indireta das misturas em estudo

Seria espectável a mistura modificada com o betume comercial Elaster® apresentar um valor de ITSR um pouco superior, mas o volume de vazios mais elevado dessa mistura ( $V_v=5\%$ ) em comparação com as outras misturas pode justificar o valor de ITSR menor do que aquele que se estava à espera, pois normalmente quanto maior o volume de vazios, mais sensível é a mistura à água (e por consequência menor valor de ITSR).

Os resultados da resistência à tração indireta e deformação estão representados na Figura 4.20 e também na Tabela 4.1 que apresenta o resumo de todos os resultados obtidos do ensaio de sensibilidade à água das misturas estudadas. A mistura convencional apresentou maior resistência à tração indireta comparativamente com as outras misturas, que apresentaram

comportamento idêntico entre elas. A principal razão para as misturas modificadas terem um menor valor de ITS resulta de utilizarem um betume base bastante mole, e que apesar da modificação com polímeros não consegue garantir o mesmo nível de ITS da mistura convencional com o betume 35/50. A mistura Elaster<sup>®</sup> tem uma maior deformação em comparação com as outras misturas, que têm uma deformação bastante similar entre si.

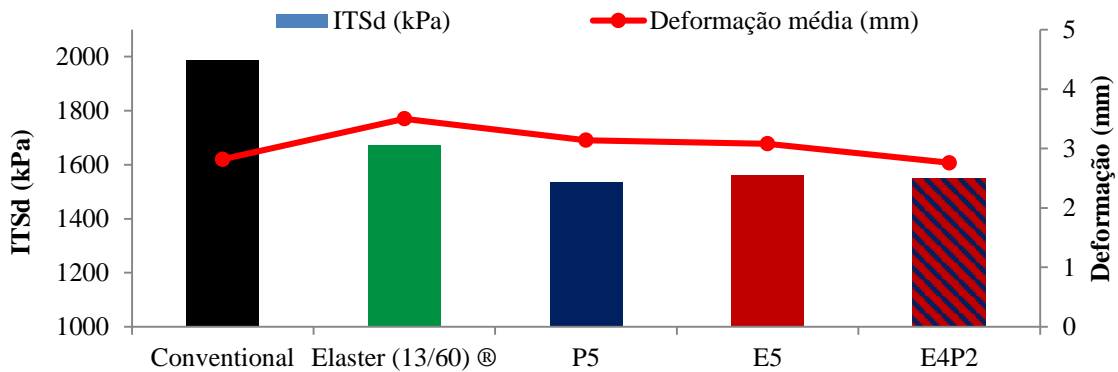


Figura 4.20: Resistência à tração indireta e deformação dos provetes secos

Tabela 4.1: Resultados de sensibilidade à água das misturas em estudo

Grupo	Provete	Força média (kN)	Deformação média (mm)	ITS (kPa)	ITSR(%)	Vv (%)
Convencional	Conv(d)	20,16	2,82	1988,70	68,6	4,4
	Conv(w)	13,79	2,39	1363,10		
Elaster <sup>®</sup>	Elaster <sup>®</sup> (d)	16,39	3,50	1671,75	68,1	5,0
	Elaster <sup>®</sup> (w)	11,18	3,24	1138,66		
E5	E(d)	15,70	3,08	1561,10	78,7	4,4
	E(w)	12,22	2,96	1228,50		
P5	P(d)	14,93	3,14	1535,62	68,1	4,8
	P(w)	10,37	2,61	1046,11		
E4P2	A4C2(d)	15,33	2,76	1548,40	79,5	4,0
	A4C2(w)	12,14	2,63	1230,40		

Concluindo, a mistura E5 e E4P2 são as que apresentam melhores resultados no ensaio de sensibilidade à água. Por outro lado, a mistura P5 mostra-se mais sensível à presença de água comparativamente com as outras.

#### 4.3.2. Resistência à deformação permanente

Os resultados do ensaio de pista podem ser representados de forma gráfica obtendo-se as curvas representadas na Figura 4.21.

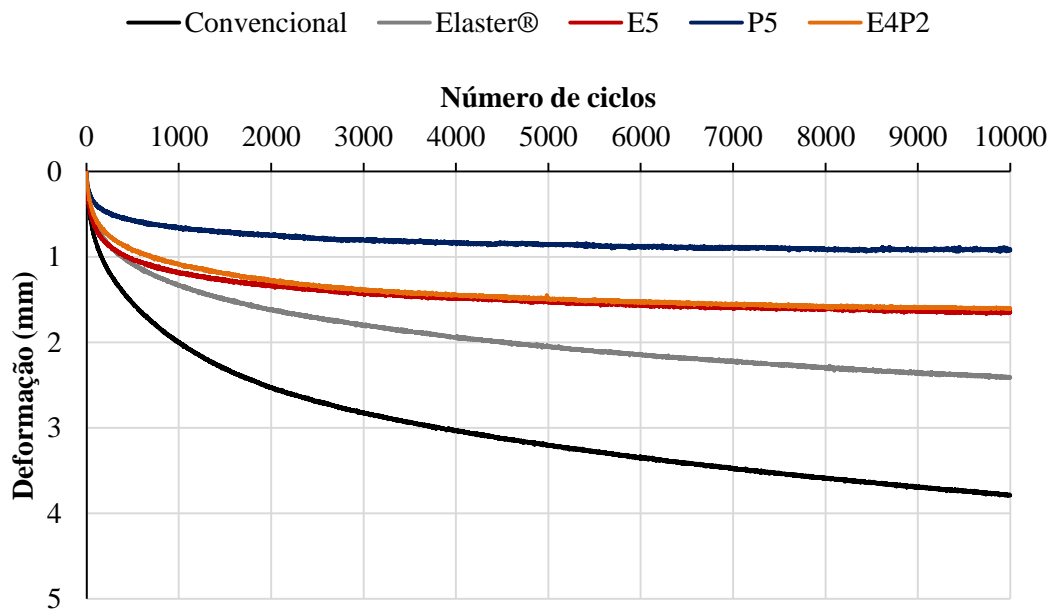


Figura 4.21: Evolução da deformação das lajes durante o ensaio de pista

Nessas curvas de deformação pode ser possível distinguir três fases:

- Fase 1 – resulta numa variação rápida e acentuada da inclinação da curva, devido à pós-compactação da mistura.
- Fase 2 – a velocidade de deformação é inferior à da fase 1. Nesta fase a curva de deformação é quase linear, pelo que a velocidade de deformação obtida nesta fase é normalmente o indicador utilizado para a caracterização das misturas quanto à deformação permanente.
- Fase 3 – nesta fase a velocidade de deformação cresce rapidamente, estando associada à rotura das lajetas.

Através da análise da curva representativa da evolução da deformação obtida no ensaio de pista não é possível observar a fase 3 da curva (rotura), dado que não se verificou a rotura total de nenhuma das lajetas ensaiadas.

Na Figura 4.22 pode observar-se que as misturas com maior resistência à deformação (com menor rodeira) são as que utilizam betume modificado com o polímero PEAD, tanto o sistema isolado como o sistema misto. Sendo o PEAD um plastómetro, este conferiu uma maior rigidez às misturas betuminosas, o que é benéfico nas temperaturas de serviço altas. O facto da mistura com PEAD ter o melhor resultado da resistência à deformação permanente



confirma o que foi previsto no ensaio de ponto de amolecimento dos ligantes, no qual o ligante modificado com PEAD apresentou o melhor desempenho.

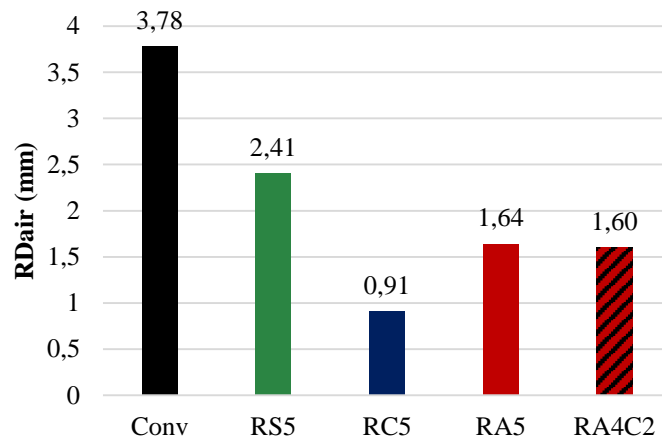


Figura 4.22: Rodeira em das misturas betuminosas estudadas

As misturas betuminosas com betume modificado desenvolvidas neste trabalho obtiveram melhores resultados do que a mistura base e do que a mistura com betume modificado comercial (Elaster<sup>®</sup> 13/60). Estes resultados também eram os esperados de acordo com a caracterização anterior aos ligantes, quer nos ensaios de MSCR, quer através da determinação do ponto de amolecimento.

Os parâmetros  $PRD_{AIR}$  e  $WTS_{AIR}$  (que permite avaliar corretamente a segunda fase de deformação atrás indicada) foram obtidos de acordo com os resultados das curvas de deformação do ensaio de pista, e são apresentados nas Figura 4.23 e 4.24, respetivamente.

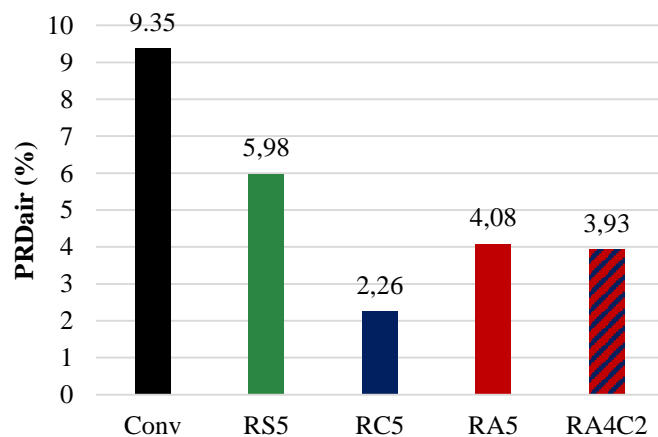


Figura 4.23: PRDaIR das misturas estudadas

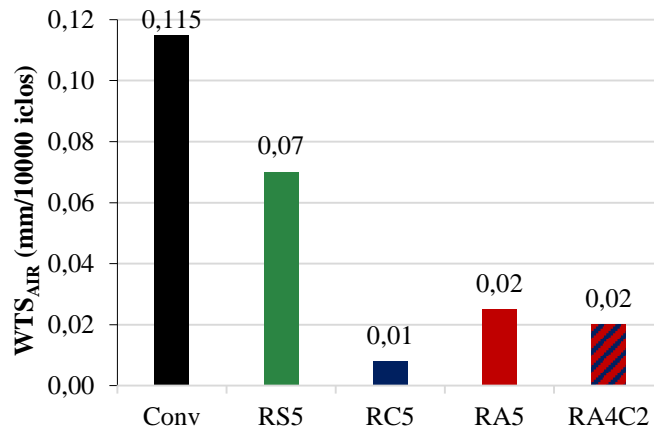


Figura 4.24: WTSair das misturas estudadas

O parâmetro  $PRD_{AIR}$  (média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados) é calculado através da Equação 6. Já a variação da deformação permanente (WTSair) no ensaio de pista é calculada através da Equação 7.

$$PRD_{AIR} = \frac{RD_{AIR}}{e} \times 100 \quad (6)$$

$$WTR_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (7)$$

Em que:

$RD_{AIR}$  – profundidade média da rodeira (mm);

$e$  – espessura da laje (mm);

$d_{10000}$  – profundidade da rodeira após 10000 ciclos;

$d_{5000}$  – profundidade da rodeira após 5000 ciclos.

Estes dois parâmetros confirmam as observações feitas anteriormente em relação ao excelente desempenho das misturas modificadas com polímeros reciclados no ensaio de pista, e em especial da mistura com PEAD.

Na Figura 4.25 e Figura 4.26 apresenta-se a rodeira na laje da mistura P5 (PEAD) e a rodeira na laje da mistura convencional, respetivamente as misturas com menos e mais deformação. Observa-se que a laje P5 sofreu uma deformação mínima ao utilizar um polímero plastómero (PEAD) que confere rigidez à laje. Por outro lado, a laje convencional foi a que sofreu a maior deformação entre as misturas estudadas, ficando a rodeira bem visível.



Figura 4.25: Rodeira da laje produzida com a mistura P5 (5% de PEAD)

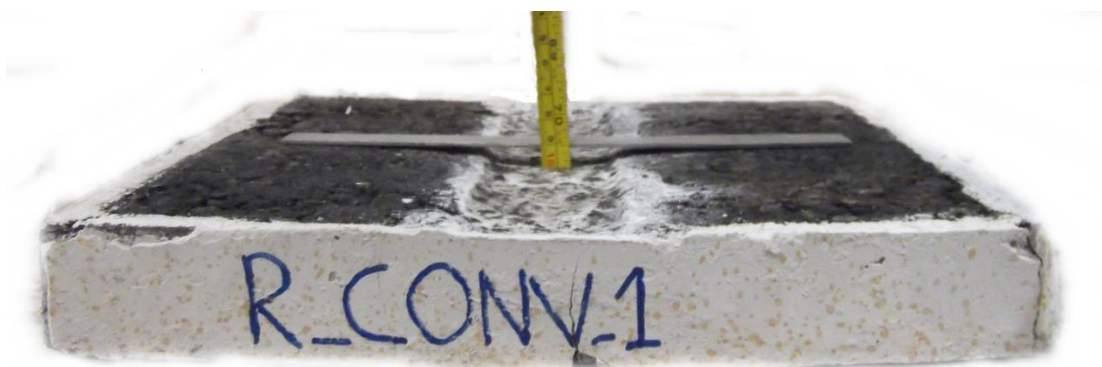


Figura 4.26: Rodeira da laje produzida com a mistura convencional

### 4.3.3. Módulo de Rigidez

O módulo de rigidez das misturas betuminosas estudadas, segundo a norma EN 12697-26, foi obtido num ensaio de flexão em quatro pontos com a aplicação de uma carga repetida e sinusoidal. A norma EN 13108-20 estabelece como referencia para o ensaio a temperatura de 20°C e frequência de 8 Hz. No entanto, para prever o comportamento do pavimento de uma forma mais abrangente, foi avaliado o módulo de rigidez a temperaturas de 0, 10, 20 e 30°C, com a variação da frequência entre 0,1 e 10 Hz.

Neste trabalho o módulo de rigidez é apresentado através de curvas mestras considerando uma temperatura de referência de 20°C. As curvas mestras são obtidas pela translação das curvas modulo-frequência das temperaturas estudadas. A vantagem da utilização desta curva é que permite, por interpolação, obter o módulo de rigidez para qualquer combinação de temperaturas e frequências da gama de valores medidos. Assim, os resultados para o módulo de rigidez das misturas estudadas estão apresentados na Figura 4.27.

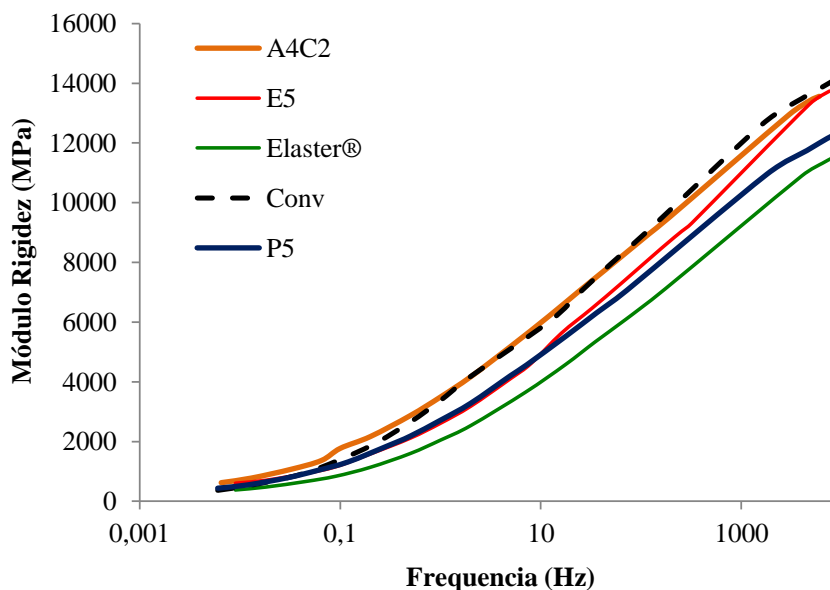


Figura 4.27: Módulo de rigidez das misturas estudadas

Analisando os módulos de rigidez das misturas estudadas conclui-se que a mistura convencional apresenta maiores valores de módulo de rigidez devido à utilização do betume 35/50, o que torna a mistura mais rígida em comparação com as misturas modificadas em laboratório e que utilizaram como betume base o 70/100 (tal como se tinha observado no resultado de ITS). Comparando as misturas modificadas com polímeros reciclados constatou-se que a mistura E4P2 apresenta um módulo de rigidez superior pelo facto de ter utilizado uma percentagem de polímero superior às outras (6%). A mistura Elaster® apresenta o menor módulo de todas as misturas estudadas, porventura por ter uma menor percentagem de polímero a modificar o betume. Apesar de tudo, os resultados do módulo de rigidez não seguiram totalmente a tendência que se estava à espera.

O ângulo de fase é um indicador de qualidade relativa da deformação recuperável ou não recuperável e das propriedades elásticas e viscosas de um material. Materiais completamente elásticos tem um ângulo de fase igual a  $0^\circ$  e para materiais completamente viscosos um ângulo de fase igual a  $90^\circ$ . A altas temperaturas o betume tende a torna-se completamente viscoso ( $\delta = 90^\circ$ ) enquanto a baixas temperaturas o betume adquire um comportamento elástico ( $\delta = 0^\circ$ ).

Os resultados do ângulo de fase das misturas betuminosas em estudo são apresentados na Figura 4.28.

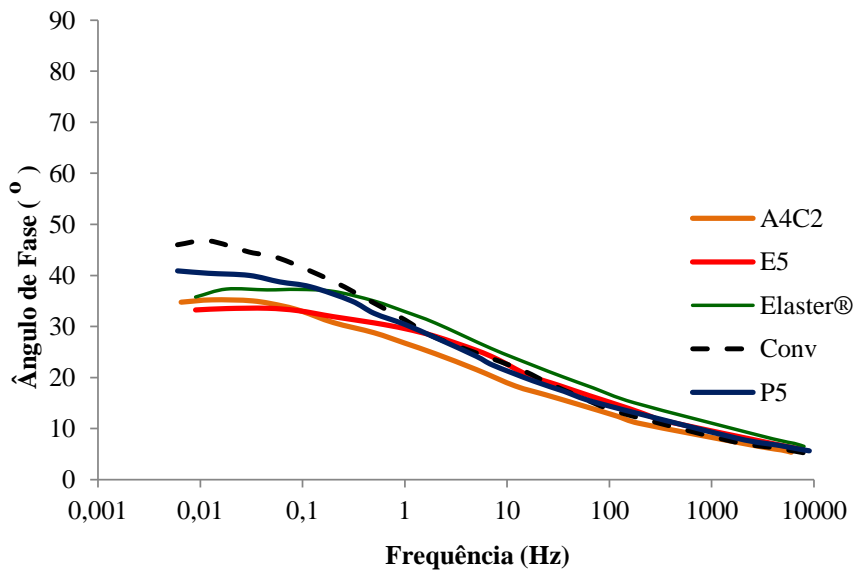


Figura 4.28: Ângulo de fase das misturas betuminosas estudadas

Avaliando o ângulo de fase, é visível que a mistura convencional apresentou valores mais elevados do ângulo de fase para as frequências mais baixas, pelo menos em comparação com as misturas betuminosas modificadas (sendo a única que ultrapassa os  $45^\circ$ ). Assim, a mistura convencional apresenta o comportamento mais viscoso das misturas estudadas, nessas condições de ensaio referidas, o que está de acordo com a menor resistência à deformação desta mistura sem polímeros.

O módulo viscoso ou dissipativo corresponde à componente não recuperável ou viscosa, caracterizando-se pela energia perdida a cada ciclo. Para a análise deste parâmetro deve ter-se em conta que quanto mais baixo a componente viscosa do módulo melhor a mistura resistirá à fadiga. O pico no gráfico (Figura 4.29) corresponde ao valor máximo do módulo viscoso, que indica a zona de transição de comportamento da mistura tendencialmente para um pior desempenho à fadiga. Analisando os gráficos verifica-se que a mistura convencional apresenta valores mais elevados comparativamente com as misturas modificadas, seguindo a tendência que vinha sendo demonstrada pelos resultados de módulo de rigidez e ângulo de fase.

O módulo elástico ou dissipativo representa a componente elástica ou recuperável, caracterizando-se pela quantidade de energia armazenada de uma amostra durante cada ciclo de carregamento. Os resultados estão apresentados na Figura 4.30, e seguem globalmente a tendência dos resultados do módulo de rigidez já referidos.

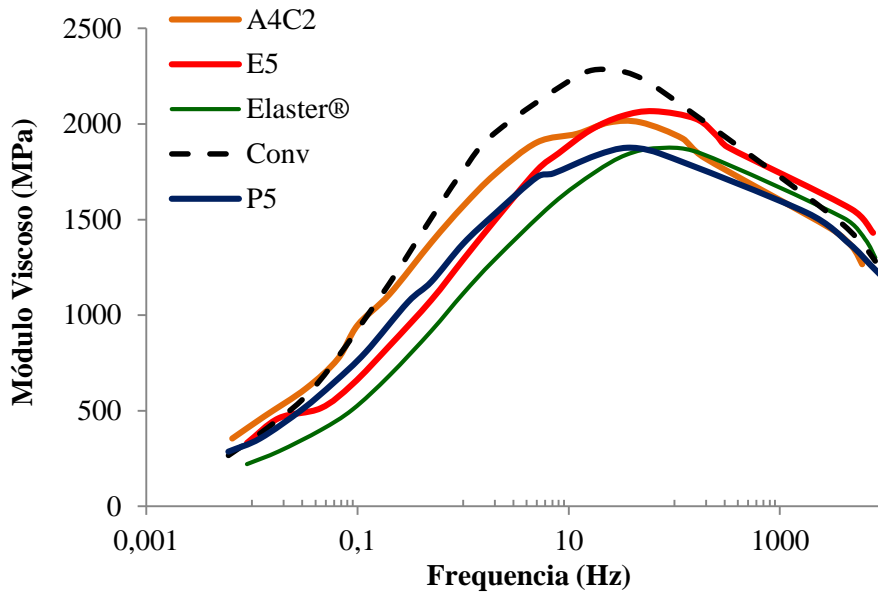


Figura 4.29: Módulo viscoso das misturas em estudo

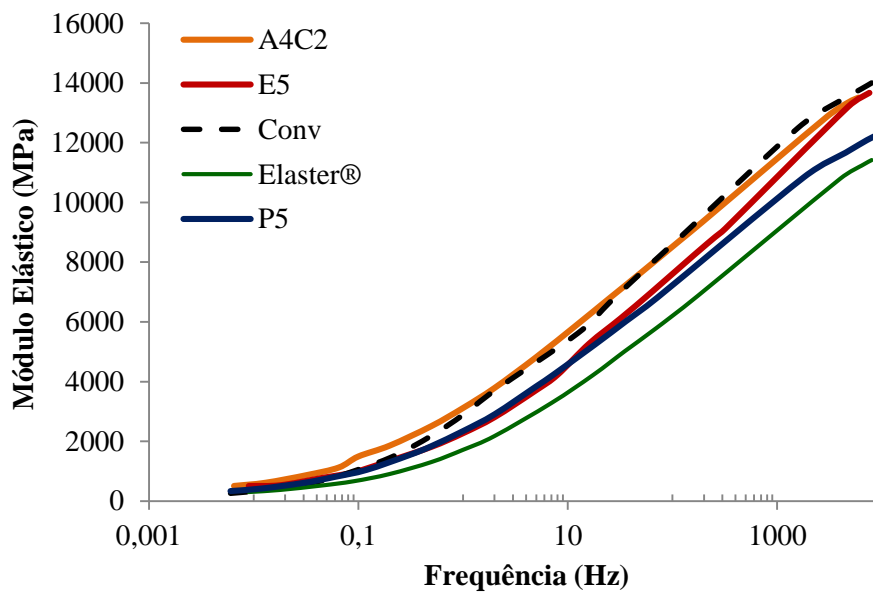


Figura 4.30: Módulo elástico das misturas em estudo

Segundo a norma EN 13108-20 a frequência e temperatura que devem servir de referência para determinar o módulo de rigidez das misturas betuminosas é 8Hz e 20°C respetivamente. Assim tendo em conta os valores de referência definidos pela norma é possível obter o gráfico apresentado na Figura 4.31.

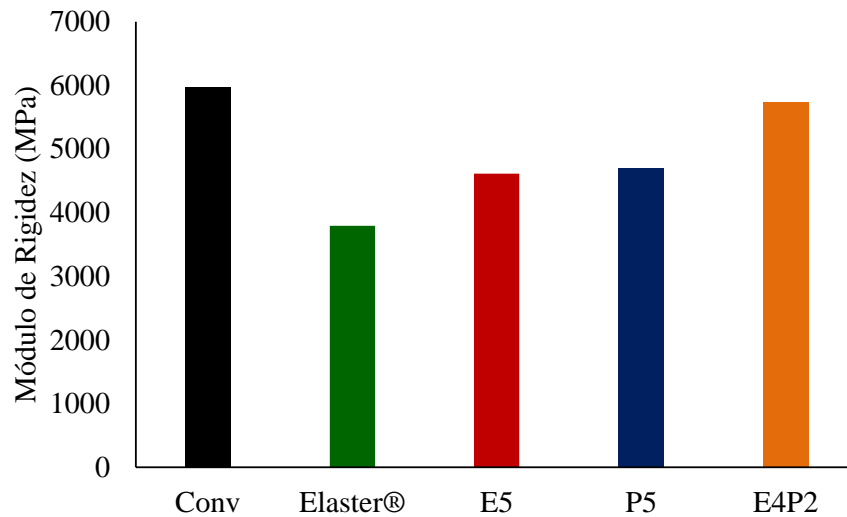


Figura 4.31: Módulos de rigidez das misturas à temperatura de 20 °C e frequência de 8 Hz

À temperatura de 20 °C e frequência de 8 Hz a mistura convencional e a mistura E4P2 apresentam os módulos de rigidez mais elevados, enquanto as misturas E5 e P5 apresentam valores muito semelhantes na ordem dos 4650 MPa. Por fim a mistura Elaster® apresenta o valor mais baixo, não atingindo os 4000 MPa. Um módulo de rigidez elevado é favorável em termos de dimensionamento, pois pode estar relacionado com uma menor espessura da camada. No entanto, tendencialmente quanto maior a rigidez da mistura, menor será a sua resistência à fadiga.

#### 4.3.4. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga

O ensaio de fadiga é muito importante para classificar o desempenho das misturas. Este ensaio decorre segundo a norma EN 12697-24 em que foi usado o método de flexão de uma viga apoiada em quatro pontos.

As vigas utilizadas no ensaio foram acondicionadas num câmara climática, durante um período mínimo de 3 horas a uma temperatura de 20°C. A frequência de ensaio foi de 10 Hz, que permitir um ensaio rápido e representativo dos ciclos de carga gerados pelo tráfego.

Com a realização dos ensaio de fadiga a cada viga das misturas betuminosas estudadas foi possível determinar as leis de fadiga para cada uma das misturas em estudo. Os gráficos para as leis de fadiga estão representados na Figura 4.32.

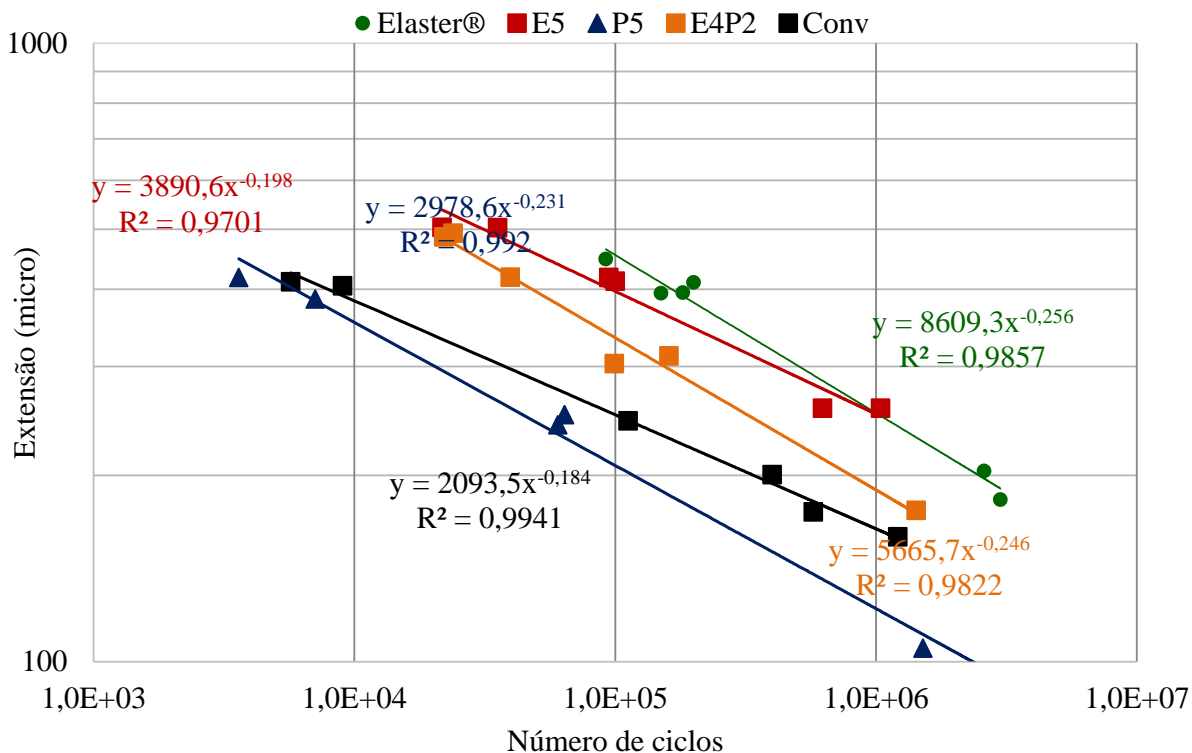


Figura 4.32: Leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas

Com base nas leis de fadiga obtidas, foi possível observar que as misturas com o betume modificado comercial (Elaster®) e com EVA (E5) foram as que tiveram claramente o melhor comportamento à fadiga. Por outro lado, a misturas com PEAD (P5) apresentou o pior desempenho nesta propriedade, ainda pior do que a mistura convencional. Ainda é interessante verificar que a mistura que utilizou o sistema misto (com EVA e PEAD), apresentou um comportamento intermédio à fadiga, entre o bom desempenho do EVA e o mau desempenho do PEAD. Estes resultados acabam por confirmar em grande parte as expectativas sobre este tipo de misturas, e algumas das observações que tinham sido feitas anteriormente ao analisar outros ensaios.

Para a análise dos resultados obtidos da resistência à fadiga das misturas betuminosas utilizam-se dois parâmetros para uma melhor interpretação dos resultados. O parâmetro  $E_6$  representa a extensão de tração necessária para provocar a ruína por fadiga ao fim de 1 milhão e ciclos. O parâmetro  $N_{100}$  corresponde ao número de ciclos que cada mistura é capaz de suportar para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$ . Estes parâmetros são conhecidos através das equações de fadiga de cada mistura, e estão apresentados na Tabela 4.2.



Tabela 4.2: Parâmetros de avaliação das misturas estudadas à fadiga

Mistura	$E_6$ (micro)	$N_{100}$
Convencional	164,768	1,51E+07
Elaster <sup>®</sup>	250,592	3,62E+07
E5	252,358	1,07E+08
P5	122,465	2,40E+06
E4P2	189,345	1,34E+07

Confirma-se que a mistura E5 apresenta um ótimo desempenho na resistência à fadiga, sendo muito semelhante ou até superior (parâmetro  $N_{100}$ ) em relação mistura com o betume comercial modificado, devido à modificação ser efetuada com um elastómero (EVA) que fornece propriedades elásticas à mistura e aumenta o tempo de vida à fadiga. A mistura P5 apresentou o pior comportamento à fadiga tanto na análise do parâmetro  $E_6$  como  $N_{100}$ , tal como era espectável, pois a modificação é feita com um plastómero (PEAD) que torna as misturas mais rígidas e logo mais suscetíveis ao fendilhamento por fadiga. A mistura E4P2 é interessante do ponto de vista que conseguiu melhores resultados que a mistura convencional, embora inferiores à mistura E5 e Elaster<sup>®</sup> (o que se justifica pelo facto do betume ser modificado com 2% de PEAD que aumentou a rigidez da mistura).



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho era estudar o desempenho das misturas betuminosas utilizando como ligante betume modificado, e comparar com as misturas convencionais.

Sendo o objetivo deste trabalho modificar betumes com polímeros reciclados foi necessário fazer uma pesquisa de forma a determinar quais os polímeros que poderiam melhorar o desempenho das misturas betuminosas, tendo ainda em consideração que ao utilizar resíduos plásticos a mistura será economicamente mais barata e vantajosa a nível ambiental, pois estamos a reutilizar resíduos que possivelmente seriam depositados em aterros ou incinerados.

Após a seleção dos polímeros a utilizar, neste caso o polímero EVA e o polímero PEAD, foi necessário fazer a caracterização dos ligantes. Foi feito um estudo adicional para definir qual o sistema misto que proporcionará melhores características da mistura betuminosa. Na formulação da mistura foi determinado qual o teor ótimo de betume a utilizar na mistura através do ensaio de Marshall e definiu-se também a temperatura de produção das misturas através dos resultados de viscosidade.

A última etapa deste trabalho passou pela caracterização laboratorial das misturas betuminosas estudadas neste trabalho, para validação das soluções desenvolvidas com polímeros reciclados.

### 5.1. Conclusões

Analisando os resultados efetuados aos ligantes verificou-se que com a introdução de polímeros no betume os valores da viscosidade e ponto de amolecimento aumentam em comparação com os betumes base. Em relação ao ensaio de penetração os betumes modificados mostraram resultados mais satisfatórios (menores valores de penetração) que os betumes base. Para o sistema misto através da análise dos ensaios efetuados foi escolhido o E4P2 (betume modificado com 4% do polímero EVA e 2% do polímero PEAD) pois é o que de entre os três sistemas mistos estudados prospectiva um melhor desempenho das misturas betuminosas.

Na produção de misturas verificou-se que a percentagem de ligante rondava os 5% de betume em todas as misturas, pelo que foi escolhida essa percentagem de betume para todas as misturas de forma a uniformizar este parâmetro.

No desempenho das misturas betuminosas aos ensaios efetuados verificou-se que para o ensaio de sensibilidade à água as misturas E5 e E4P2 obtiveram melhores resultados em comparação com as outras misturas. A mistura P5 apresentou melhores resultados à deformação permanente devido à modificação do betume com o polímero PEAD que sendo um plastómero conferiu à mistura uma maior rigidez. Todas as misturas obtiveram melhores resultados à resistência à deformação permanente em comparação com a mistura convencional.

Relativamente à deformação permanente a mistura P5 apresentou a menor rotação entre as misturas estudadas, considerando-se a mistura com o melhor desempenho na resistência à deformação permanente. Globalmente todas as misturas obtiveram um desempenho superior à mistura Convencional que demonstrou o pior desempenho no ensaio de pista.

A mistura betuminosa P5 demonstrou um ótimo desempenho na resistência há deformação permanente mas insatisfatório na resistência ao fendilhamento por fadiga. Tendo em conta o comportamento da mistura P5 será uma boa escolha para locais em que o pavimento tem elevadas temperaturas de serviço e frequência de tráfego baixo (trânsito lento).

Globalmente das misturas modificadas com polímeros a que apresenta melhores resultados é a E5. A mistura E5 caracterizou-se por um bom comportamento à sensibilidade à água, resistência à deformação permanente e um ótimo resultado na resistência ao fendilhamento por fadiga superiorizando-se largamente à mistura convencional e com resultados muito idênticos ou em alguns casos superiores à mistura comercial modificada Elaster<sup>®</sup>.

## **5.2. Trabalhos Futuros**

A mistura E4P2 apresentou resultados bastante satisfatórios no entanto fica a ideia que poderiam ser melhores diminuindo a percentagem de polímero utilizado na modificação de betume por exemplo para 5% na soma dos dois polímeros.

Neste trabalho foi utilizado um betume base 70/100 que após a modificação devia ter as propriedades de um betume 35/50. No entanto em alguns ensaios, como no módulo de rigidez verificou-se que os ligantes modificados com EVA e PEAD tinham um módulo mais baixo que o betume convencional, isto é, o polímero não modificava totalmente as propriedades do ligante (principalmente quando percentagem do ligante é 5%) por este ser um betume base bastante “mole”, fica como possibilidade a utilização de um betume base diferente por exemplo um 50/70.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Airey, G.D. (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, Vol. 16, pp. 473-487.
- Al-Salem, S.M., Lettieri, P., Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review, *Waste Management*, pp. 2625–2643.
- Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R., Silva, H.M., Sampaio, J., Palha, C. (2013). Avaliação da influência da camada de desgaste na sustentabilidade dos pavimentos rodoviários.
- Barlow, C. (2008). *Intelligent Recycling*, Institute for Manufacturing, Department of Engineering.
- BASF (2007). *Plastics, Toward new levels of performance*; [http://www.basf.com/group/corporate/en\\_GB/function/conversions:/publish/content/investor-relations/news-publications/presentations/2007/download/070625\\_BASF\\_IR-Day\\_Feldmann\\_Plastics.pdf](http://www.basf.com/group/corporate/en_GB/function/conversions:/publish/content/investor-relations/news-publications/presentations/2007/download/070625_BASF_IR-Day_Feldmann_Plastics.pdf).
- Becker, Y., Méndez, M.P., Rodríguez, Y. (2001). Polymer Modified Asphalt.
- Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2008). *Pavimentos Rodoviários*
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2006). *Pavimentos Rodoviários*, Almedina, Coimbra.
- Brandrup, J. (1992). Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia, Vol. 57, pp. 57–74.
- Brandrup, J., Immergut, E.H. (1989). *Polymers Handbook*, A Wiley-Interscience publication.
- Brandup, J. (1996). *Recycling and Recovery of Plastics*, Munich.
- Braun, D. (2013). *Simple Methods for Identification of Plastics*, 5th Edition ed, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Cavaliere, M.G., Diani, E., Sacconi, L.V. (1993). *Polymer modified bitumens for improved road application*, Proceedings of the 5th Eurobitume Congress Stockholm.
- Chen, J., Liao, M., Shiah, M. (2002). Asphalt Modified by Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14 (3), pp. 224–229.
- Costa, L.M.B. (2010). *Incorporação de Resíduos Plásticos em Misturas Betuminosas*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Costa, L.M.B., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Fernandes, S.R.M. (2013). Incorporation of Waste Plastic in Asphalt Binders to Improve their Performance in the Pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp. 457-464.

- document, U.a.i.g. (2010). *Implementation of the multiple stress creep recovery test and specification*.
- Ehrig, R.J., Curry, M.J. (1992). *Plastics recycling: products and processes*.
- Europe, A.o.P.M.i. (1995). *Energy recovery analysis of plastics in municipal solid waste*, Bruxelas.
- Europe, P. (2011). *Plastics - the Facts 2011*, An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010.
- Eurostat (2012). *Estatísticas de resíduos*; [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Waste\\_statistics/pt](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics/pt).
- Freire, A.C. (2004). *Agregados para misturas betuminosas*, Universidade Nova de Lisboa.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Gallegos, C. (2006). Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, *Fuel*, pp. 936–943.
- González, O., Peña, J.J., Muños, M.E., Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. (2002). Rheological techniques as a tool to analyze polymer–bitumen interactions, *Energie Fuel*, pp. 56-63.
- Harper, C.A. (1975). *Handbook of Plastics and Elastomers*.
- Hmişloğlu, S., Agar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, Vol. 58, pp. 267-271.
- Howard, G. (2002). Biodegradation of polyurethane: a review, *International Biodeterioration & Biodegradation*, pp. 245-252.
- Huang, Y., Bird, R.N., Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, pp. 58-73.
- Isacsson, U., Lu, X. (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art, *Materials and Structures*, Vol. 28 (3), pp. 139-159.
- Kalantar, Z., Karim, M.R., Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*.
- Kang, H.-Y., Schoenung, J.M. (2005). Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options, *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 348-400.
- King, G. (1999). Additives in asphalt, *Asphalt Paving*, pp. 32–69.



- Lu, X. (1997). *On polymer modified road bitumens* Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- Mader, F.W. (1992). Plastics waste management in Europe, *Makromolekulare Chemie Macromolecular Symposia*, Vol. 57 (1), pp. 15-31.
- Marques, G.A., Tenório, J.A.S. (2000). *Waste Management*, Vol. 20.
- Mastellone, M.L. (1999). *Thermal treatments of plastic wastes by means of fluidized bed reactors*, Second University of Naples, Italy.
- Pais, J.C., Pereira, P.A. (2000). Um novo método de dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis considerando a reflexão de fendas.
- Pascoe, R.D., O'Connell, B. (2003). *Waste Management*, Vol. 23.
- Pereira, P., Miranda, C. (1999). *Gestão da Construção de Pavimentos Rodoviários*, Universidade do Minho.
- plastval (2012). <http://www.plastval.pt/?info=plastico/consumo>.
- Rigamonti, L., Grosso, M., Møller, J., Martinez Sanchez, V., Magnani, S., Christensen, T.H. (2014). Environmental evaluation of plastic waste management scenarios, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 85, pp. 42-53.
- Sandani, G. (1995). *Chem Eng*, Vol. 102.
- Sheirs, J. (1998). *Polymer Recycling*, Wiley, New York.
- Soliz, V.V.P. (2007). *Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Spinacé, M.A.d.S., Paoli, M.A.D. (2005). A Tecnologia da reciclagem dos polímeros, *Química Nova*, Vol. 28 (1), pp. 65-72.
- Stroup-Gardiner, M., Newcomb, D.E. (1995). *Polymer Literature review*.
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 66-72.
- Zattera, A.J., Bianchi, O., Zeni, M., Ferreira, C.A. (2005). Caracterização de Resíduos de Copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila - EVA, *Polímeros ciência e tecnologia*, Vol. 15, pp. 73-78.
- Zia, K.M., Bhatti, H.N., Bhatti, I.A. (2007). Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery, *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 67 (8), pp. 675-692.