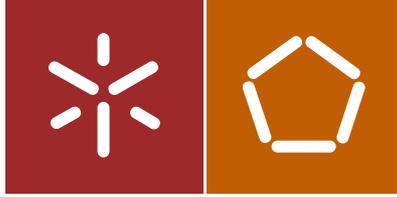




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Daniela Filipa Oliveira Sousa

Avaliação mecânica e ambiental da aplicação  
de resíduos em misturas betuminosas



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Daniela Filipa Oliveira Sousa

Avaliação mecânica e ambiental da aplicação  
de resíduos em misturas betuminosas

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  
Professor Doutor Joel Ricardo Martins de Oliveira

## AGRADECIMENTOS

Aos Professores Hugo Silva e Joel Oliveira quero expressar o meu sincero agradecimento pela disponibilidade manifestada, pelo conhecimento transmitido e pela orientação da presente dissertação.

Ao Centro de Valorização de Resíduos, nomeadamente à Técnica Irene Morais, bem como ao Técnico Hugo Antonino, agradeço por todos os meios dispensados e pelo apoio demonstrado.

À Engenheira Sara Fernandes agradeço todo o apoio disponibilizado, bem como o incentivo e conhecimentos partilhados.

Para a minha família, em especial os meus Pais e Irmão, deixo um enorme obrigado por acreditarem sempre nas minhas capacidades e por todos os ensinamentos de vida. Com esta etapa que agora termino, espero que, de alguma forma, possa retribuir e compensar todo o apoio, dedicação e carinho que constantemente me oferecem. Agradeço também ao meu irmão pelos momentos de descontração e amizade. Dedico a eles todo o meu trabalho.

Agradeço também aos outros membros da minha família, tios, primas, e em especial à minha prima Cátia.

Agradeço ao meu namorado, Fábio André Pinto, por todo o incentivo, por todas as horas ao meu lado e pela enorme paciência que sempre teve comigo.

Agradeço também às amigas que fiz ao longo deste curso e que para sempre guardarei no meu coração: Andreia Torres, Marta Rodrigues, Mariana Azevedo, Joana Alves, Susana Macedo, Andresa Gomes e Ana Dias.

Dedico este trabalho à minha avó Olinda.



## **Avaliação mecânica e ambiental da aplicação de resíduos em misturas betuminosas**

### **RESUMO**

A indústria da pavimentação rodoviária é uma das grandes exploradoras de matérias-primas virgens. Com a temática da sustentabilidade a ser cada vez mais importante para a Sociedade, torna-se crucial desenvolver soluções que reaproveitem materiais, mas que mantenham as mesmas características ou até que as melhore. Nas misturas betuminosas, a substituição total ou parcial do betume por resíduos é cada vez mais frequente, tendo em conta que as reservas de petróleo têm vindo a diminuir e conseqüentemente o seu custo está a aumentar.

Assim, este trabalho tem como principal objetivo estudar o desempenho mecânico e ambiental da aplicação de resíduos em misturas betuminosas. Quanto aos resíduos a estudar, foram selecionados três: óleo de motor usado, PEAD e material fresado. Desta forma, o óleo de motor usado e o PEAD foram utilizados para modificar o betume das misturas. Assim, inicialmente estudou-se o desempenho mecânico de uma mistura betuminosa com estes resíduos e comparou-se com uma mistura convencional. Posteriormente procedeu-se à análise ambiental destas soluções.

Na modificação de betumes foram utilizadas percentagens elevadas de óleo e de polímero, e estes foram avaliados segundo os vários ensaios de caracterização. Relativamente ao material fresado, adotou-se uma percentagem de 50% de forma a maximizar os resíduos utilizados e a economizar o betume novo. Deste modo, após caracterizar o betume modificado, realizou-se uma mistura betuminosa reciclada com o material fresado para avaliar o seu desempenho mecânico em comparação com uma mistura betuminosa convencional. Após comprovar o bom desempenho da nova mistura betuminosa, procedeu-se à análise ambiental. Nesta análise foram efetuados ensaios de lixiviação para determinar a presença de metais pesados prejudiciais.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que da combinação destes resíduos resulta uma mistura betuminosa com bons resultados mecânicos, ou pelo menos similares a uma mistura convencional. Ambientalmente verificou-se que não existe perigosidade na aplicação desta solução, dado que os valores obtidos se encontram abaixo dos limites impostos.

**Palavras-chave:** Modificação de betumes, óleo de motor usado, PEAD, material fresado, toxicidade, metais pesados.

## **Mechanical and environmental evaluation of wastes use in asphalt mixtures**

### **ABSTRACT**

The road paving industry is one of the largest consumers of virgin raw materials. With sustainability thematic being increasingly important for Society, it becomes crucial to develop solutions that reuse materials, while keeping or even improving the characteristics of the resulting products. In asphalt mixtures, the total or partial substitution of bitumen by some wastes is being increasingly frequent, considering that the oil reserves have been decreasing and consequently their cost is increasing.

Thus, this work has as main objective of studying the mechanical and environmental performance of asphalt mixtures incorporating waste materials. Regarding the wastes to be studied, three were selected: used motor oil, HDPE and reclaimed asphalt material. These wastes were used to modify the bitumen of the mixtures. Thus, the mechanical performance of an asphalt mixture with these wastes was initially studied and compared with a conventional mixture. Subsequently, the environmental analysis of these solutions was carried out.

High percentages of oil and polymer were used in the modification of the bitumen, which was evaluated using several characterization tests. Regarding the reclaimed asphalt material, a percentage of 50% was adopted in order to maximize the use of wastes and to cut down the use of new bitumen. Thus, after characterizing the modified binder, a recycled asphalt mixture with the reclaimed asphalt material was produced to evaluate its mechanical performance in comparison with a conventional asphalt mixture. After confirming the good performance of the new asphalt mixture, the environmental analysis was carried out. In this analysis, leaching tests were carried out to evaluate the presence of harmful heavy metals.

According to the results obtained, it can be concluded that the combination of all these wastes results in an asphalt mixture with good mechanical performance, or at least similar to a conventional mixture. Environmentally it was concluded that the application of this solution is not detrimental, since the values obtained are below the limits imposed by law.

**Keywords:** Bitumen modification, used motor oil, HDPE, reclaimed asphalt material, toxicity, heavy metals.

---

**ÍNDICE**

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento temático.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Conteúdo da dissertação.....	3
<b>2. ESTADO DA ARTE SOBRE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM MISTURAS BETUMINOSAS E SUA AVALIAÇÃO.....</b>	<b>5</b>
2.1. Introdução.....	5
2.2. Sustentabilidade e utilização de resíduos na construção e na indústria rodoviária .....	5
2.3. Toxicidade dos materiais de construção.....	12
2.4. Utilização de resíduos em misturas betuminosas .....	20
2.5. Avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas .....	23
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>29</b>
3.1. Introdução.....	29
3.2. Materiais utilizados no estudo.....	29
3.2.1. Polímero a reciclar: polietileno de alta densidade (PEAD) .....	30
3.2.2. Óleo de motor usado .....	30
3.2.3. Material fresado a reciclar .....	31
3.3. Produção e caracterização do betume .....	32
3.3.1. Ensaio de penetração a 25 °C.....	33
3.3.2. Temperatura de amolecimento (anel e bola).....	33
3.3.3. Ensaio de resiliência .....	34
3.3.4. Ensaio de viscosidade rotacional .....	35
3.4. Preparação das misturas betuminosas .....	36
3.5. Caracterização volumétrica e mecânica das misturas betuminosas .....	38
3.5.1. Caracterização volumétrica das misturas betuminosas.....	38
3.5.2. Ensaio de sensibilidade à água.....	38
3.5.3. Ensaio de deformação permanente .....	39
3.6. Análise ambiental das misturas betuminosas .....	40
3.6.1. Considerações iniciais.....	40
3.6.2. Ensaio de lixiviação.....	40

<b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1. Introdução .....	45
4.2. Caracterização dos materiais utilizados nas misturas.....	45
4.2.1. Caracterização inicial do PEAD, do óleo usado e do betume .....	45
4.2.2. Caracterização do material fresado .....	47
4.3. Caracterização dos betumes a utilizar nas misturas .....	49
4.4. Comparação do desempenho mecânico das misturas betuminosas .....	52
4.4.1. Sensibilidade à água das misturas betuminosas .....	52
4.4.2. Resistência à deformação permanente das misturas betuminosas.....	54
4.5. Comparação do desempenho ambiental das misturas betuminosas.....	55
4.5.1. Limites legais para controlo dos lixiviados .....	55
4.5.2. Ensaio de lixiviação das misturas betuminosas em estudo.....	56
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
5.1. Conclusões.....	59
5.2. Trabalhos futuros .....	60
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Caracterização física média dos resíduos urbanos produzidos em Portugal Continental (adaptado de APA (2015)).	7
Figura 2. Gestão dos resíduos urbanos no ano de 2014 (adaptado de APA (2015)).	7
Figura 3. Exemplo de depósito de material proveniente de fresagem (Baptista, 2006).	9
Figura 4. Diferentes cenários de impacto ambiental por lixiviação (Wascon, 2003).	11
Figura 5. Exemplo da poluição do ar na China.	13
Figura 6. Mecanismos de transferência dos PAHs (Interior e Survey, 2011).	14
Figura 7. Ilustração do ensaio penetração a 25 °C (adaptado de Branco et al. (2011)).	33
Figura 8. Ensaio de avaliação da temperatura de amolecimento (Branco et al., 2011).	34
Figura 9: Ensaio de Resiliência	35
Figura 10. Equipamento Brookfield utilizado no ensaio de viscosidade rotacional.	35
Figura 11. Fuso granulométrico da mistura betuminosa AC 14 surf.	37
Figura 12. Curva granulométrica das misturas em estudo no fuso da mistura AC14 surf.	37
Figura 13. Amostras dentro do recipiente com água destilada.	41
Figura 14. Equipamento rotativo com as respetivas amostras.	41
Figura 15. Equipamento para filtragem com filtro de papel.	42
Figura 16. Equipamento para filtragem a 45.	42
Figura 17. Componentes principais da espectroscopia de absorção atómica.	43
Figura 18. Equipamento para espectroscopia de absorção atómica.	43
Figura 19. Resultados de viscosidade rotacional do óleo de motor usado.	46
Figura 20. Resultados do ensaio TGA realizado ao óleo usado e ao betume 35/50.	46
Figura 21. Distribuição do tamanho dos agregados das frações fina e grossa do material fresado.	47
Figura 22. Teores em betume das frações fina e grossa do material fresado.	48
Figura 23. Penetração e temperatura de amolecimento do betume do material fresado.	48
Figura 24. Resultados viscosidade dinâmica do betume existente no material fresado.	49
Figura 25. Resultados do ensaio de penetração dos betumes em estudo.	50
Figura 26. Resultados da temperatura de amolecimento dos betumes em estudo.	50
Figura 27. Resultados de resiliência dos betumes em estudo.	51
Figura 28. Resultados do ensaio de viscosidade rotacional dos betumes em estudo.	52

Figura 29. Valores de ITS e de deformação dos provetes secos das misturas em estudo.....	53
Figura 30. Sensibilidade à água (ITSR) e volume de vazios das misturas em estudo.....	54
Figura 31. Deformação em função do número de ciclos de carga obtida no ensaio de pista para as duas misturas em estudo. ....	55
Figura 32. Relação percentual entre os metais pesados existentes nas misturas em estudo e os limites especificados. ....	57

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1. Materiais constituintes dos RCD (EPA, 1998). .....	9
Tabela 2. Peneiros utilizados para análise granulométrica no presente estudo. ....	31
Tabela 3. Percentagens dos resíduos utilizados na produção dos betumes em estudo. ....	32
Tabela 4. Quantidade de cada um dos agregados novos a usar nas misturas betuminosas. ....	36
Tabela 5. Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura convencional. ....	53
Tabela 6. Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com resíduos. ....	53
Tabela 7. Valores limite dos metais pesados para controlo dos lixiviados (Ministério do Ambiente, 2009). .....	56
Tabela 8. Resultados da análise química dos eluatos das duas misturas em estudo. ....	57



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento temático

A crescente necessidade de se construir de forma sustentável levou à necessidade de melhorar as tecnologias disponíveis, bem como a desenvolver produtos que possibilitem a redução da utilização de matérias-primas virgens. Aliada a este fator está também a diminuição das reservas de petróleo, o que conduz a Sociedade ao desenvolvimento de soluções possíveis de integrar nos pavimentos rodoviários e que ainda assim não prejudiquem o meio ambiente.

De facto, a melhor maneira de reduzir os resíduos é não os criar, ou seja, a reutilização de materiais é a maneira mais eficaz de salvar os recursos naturais, proteger o ambiente e ainda reduzir os custos, garantindo uma maior sustentabilidade dessas soluções.

De forma a utilizar menor quantidade destes recursos, e ainda a melhorar as propriedades das misturas betuminosas, surge como possível solução a modificação do betume com resíduos. A possibilidade de utilização de polímeros reciclados em vez de virgens na modificação de betumes conduz a um conjunto de vantagens ecológicas e económicas. Segundo Fuentes-Audén *et al.* (2007) o desempenho dos ligantes e das misturas betuminosas modificadas com polímeros reciclados é análogo ao observado com polímeros virgens.

Estudos anteriores também referem que é possível substituir uma parte do betume por mais um resíduo, neste caso por óleo de motor usado, aumentando assim também as vantagens económicas e ambientais das misturas betuminosas. Fuentes-Audén *et al.* (2007) estudaram a formulação de ligantes sintéticos obtidos a partir da mistura de polímeros, resinas e óleos nafténicos. Além disso, Lesueur (2009) e Silva *et al.* (2012) já demonstraram que se pode utilizar óleo lubrificante como rejuvenescedor na pavimentação rodoviária. A adição de óleo de motor reduz as temperaturas da mistura e compactação bem como diminui a viscosidade do betume final aplicado na mistura (Silva *et al.*, 2012).

Um dos grandes problemas da atualidade continua a ser a escassez na utilização de recursos renováveis, e os pavimentos rodoviários não são exceção. Para dar resposta a este fator e ainda associada a questões ambientais, surge então a tecnologia de reciclagem de pavimentos rodoviários, que reutiliza o material fresado dos pavimentos degradados na produção de novas misturas betuminosas.

A temática da sustentabilidade na pavimentação rodoviária nem sempre acarreta só vantagens. Um dos aspetos negativos da inclusão de resíduos nas misturas betuminosas é não saber ao certo o nível de toxicidade resultante da mistura. Estudos anteriores referem que a utilização de alguns resíduos, nomeadamente os cerâmicos, provoca a libertação de poluentes prejudiciais (crómio e sulfato) para o meio ambiente (Del Rey *et al.*, 2015).

Schwab *et al.* (2014) referem que a reutilização de resíduos na construção, substituindo assim as matérias-primas, pode ser prejudicial para as águas subterrâneas, uma vez que podem conter metais pesados. Segundo um estudo de Pernagorda (2007), as escorrências rodoviárias são responsáveis pela presença de metais pesados originados pelo tráfego automóvel. Outro aspeto importante de referir é que devido a estas escorrências os lençóis freáticos ficam afetados, acabando por interferir na saúde pública. De acordo com a Agência Europeia do Ambiente os metais pesados são prejudiciais para a saúde humana face ao potencial em provocar cancro, devido à sua toxicidade e à capacidade de causar efeitos nocivos.

Conhecidas assim as vantagens e alguns dos problemas relacionados com a adição de resíduos às misturas betuminosas surgiu o tema desta dissertação, que procura estudar ambas as vertentes para compreender de uma forma integrada se a reutilização de resíduos neste setor da construção é viável sem trazer problemas a nível ambiental. De referir ainda que este trabalho surge ligado de forma particular ao Doutoramento da colega Sara Fernandes, no qual se desenvolveu as soluções mais sustentáveis em estudo para a área da pavimentação rodoviária.

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho consiste em avaliar mecanicamente e ambientalmente a aplicação de resíduos nas misturas betuminosas. Nesse sentido, os resíduos utilizados nestas misturas serão os seguintes: material proveniente da fresagem de pavimentos antigos; óleo de motor usado; um polímero reciclado, que neste caso é o polietileno de alta densidade (PEAD). Deste modo, pretende-se estudar a viabilidade técnica e ambiental da utilização destes resíduos nas misturas betuminosas para que não seja prejudicial para a saúde pública bem como para o ecossistema, devendo ainda assim apresentar bons resultados mecânicos.

De forma a avaliar a componente mecânica das misturas, pretende-se determinar as características volumétricas e ainda realizar ensaios de avaliação de desempenho, nomeadamente o ensaio de sensibilidade à água e de resistência à deformação permanente.

Por sua vez, na componente ambiental pretende-se realizar análises à perigosidade de criação de substâncias poluentes nas estradas, nomeadamente com metais pesados que possam contaminar lençóis freáticos, resultantes da aplicação em obra destas misturas betuminosas com utilização de diversos resíduos.

Por forma a cumprir estes objetivos, será necessário inicialmente comprovar o bom desempenho destas misturas betuminosas e depois realizar ensaios de lixiviação, tanto às misturas convencionais como às misturas modificadas (óleo de motor usado, PEAD e material fresado), para se fazer uma análise comparativa de ambas as soluções.

### **1.3. Conteúdo da dissertação**

O desenvolvimento da presente dissertação encontra-se dividido em cinco capítulos, estando incluído o capítulo atual que serve de introdução, bem como de definição dos principais objetivos e do conteúdo desta dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se a informação relativa à toxicidade dos materiais de construção, nomeadamente os materiais cuja aplicação foi proibida devido aos problemas de saúde aquando da sua aplicação. Aborda-se a temática dos resíduos utilizados atualmente nas misturas betuminosas, tendo em conta a sustentabilidade do setor. E por último, aborda-se a temática da avaliação mecânica das misturas, tendo em conta as características que são melhoradas com a incorporação de resíduos.

Por sua vez, no Capítulo 3 referem-se os materiais utilizados especificamente neste trabalho, e descrevem-se todos os métodos experimentais aplicados em cada fase do trabalho, justificando a sua aplicação de forma a atingir os objetivos acima referidos.

No Capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os diversos resultados obtidos com os diversos ensaios realizados tanto aos betumes modificados como às misturas betuminosas, e ainda à análise ambiental realizada.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais obtidas para este estudo, bem como trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos.



## **2. ESTADO DA ARTE SOBRE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM MISTURAS BETUMINOSAS E SUA AVALIAÇÃO**

### **2.1. Introdução**

No presente capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre utilização de resíduos na área da construção, e mais especificamente na indústria rodoviária, focando aspetos relacionados com a sua toxicidade e riscos que acarreta para o ambiente. Também se apresenta de forma breve a forma de avaliar o desempenho das misturas betuminosas.

Inicialmente, o subcapítulo 2.2 aborda os riscos associados à utilização de alguns materiais nas misturas betuminosas, tendo em conta a sustentabilidade da indústria rodoviária. Também se mencionam os resíduos que atualmente se utilizam no processo de fabrico de materiais de construção, bem como a sua toxicidade.

Em seguida, o subcapítulo 2.3 foca a toxicidade de alguns materiais de construção utilizados nas construções correntes, bem como as razões que levaram a inviabilizar a comercialização de alguns desses produtos.

Por outro lado, no subcapítulo 2.4 mencionam-se os resíduos que atualmente se utilizam nas misturas betuminosas, tendo em conta a temática do desenvolvimento sustentável bem como as características que são melhoradas com a sua incorporação.

Por fim, no subcapítulo 2.5 aborda-se a questão da avaliação mecânica das misturas betuminosas, nomeadamente os aspetos que mais influenciam a deterioração dos pavimentos e ainda as melhorias que determinados resíduos originam quando são incorporados nas misturas.

### **2.2. Sustentabilidade e utilização de resíduos na construção e na indústria rodoviária**

Um dos maiores e mais ativos setores da Europa é a indústria da construção, representando 28,1% e 7,5% do emprego, respetivamente na indústria e em toda a economia europeia. Este setor representa 25% de toda a produção industrial europeia, faturando anualmente cerca de 750 milhões de euros, levando a que se torne o maior exportador mundial (Torgal e Jalali, 2010a). Um dos grandes problemas deste setor é que, a nível ambiental, é responsável por 30% das emissões de carbono. Tendo em conta estes aspetos, bem como que a nível mundial este

setor consome cerca de 3000 milhões de toneladas por ano de matérias-primas, é evidente que a indústria da construção é insustentável (Torgal e Jalali, 2010a).

Até ao início do século XX a maioria das construções eram feitas com recurso a materiais naturais, mas as construções correntes recorriam a materiais produzidos industrialmente. O problema destes materiais é que grande parte deles podiam conter substâncias químicas, tais como metais pesados e ainda compostos orgânicos voláteis (COV) (Torgal e Jalali, 2010a).

Tendo em conta que a saúde pública e o ambiente são fatores de extrema importância no estabelecimento de padrões de qualidade de vida da Sociedade, torna-se imprescindível avaliar os riscos que estas substâncias químicas acarretam. De acordo com a *European Environment Agency* (EEA, 2015), um dos aspetos que tem vindo a melhorar significativamente e que contribui para a qualidade de vida, é a qualidade do ar. Apesar das suas melhorias, o tráfego rodoviário continua a ser dos principais problemas a combater. Além de piorar a qualidade do ar, o tráfego também influencia a vegetação circundante e conseqüentemente o ecossistema. Assim, o setor dos transportes é responsável por níveis prejudiciais de poluentes atmosféricos, bem como por um quarto das emissões de gases com efeito de estufa da União Europeia (EEA, 2015).

Com a temática da sustentabilidade cada vez mais em voga, e tendo em conta uma meta estipulada pela União Europeia no programa Horizonte 2020 (“zero resíduos”), a indústria da pavimentação tem adotado novas políticas no sentido de diminuir estes gases (EEA, 2015). Uma destas metas é a utilização, cada vez mais frequente, de resíduos na construção, com resultados satisfatórios.

Em Portugal, o setor da construção civil é responsável por uma grande parte dos resíduos produzidos, situação comum aos Estados membros da União Europeia, onde se estima uma produção anual global de 100 milhões de toneladas de resíduos de construção. Para além das quantidades significativas que lhe estão associadas, estes resíduos apresentam outras peculiaridades que dificultam a sua gestão. Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2015), no ano de 2014 foram produzidas 4719 mil toneladas de resíduos urbanos (RU) em Portugal (Figura 1).

De acordo com a Figura 2 (APA, 2015), cerca de 42% dos RU têm como origem o aterro, 19% para tratamento mecânico e biológico, 19% para valorização energética, 9% para tratamento mecânico, 9% para valorização material e 2% para valorização orgânica.

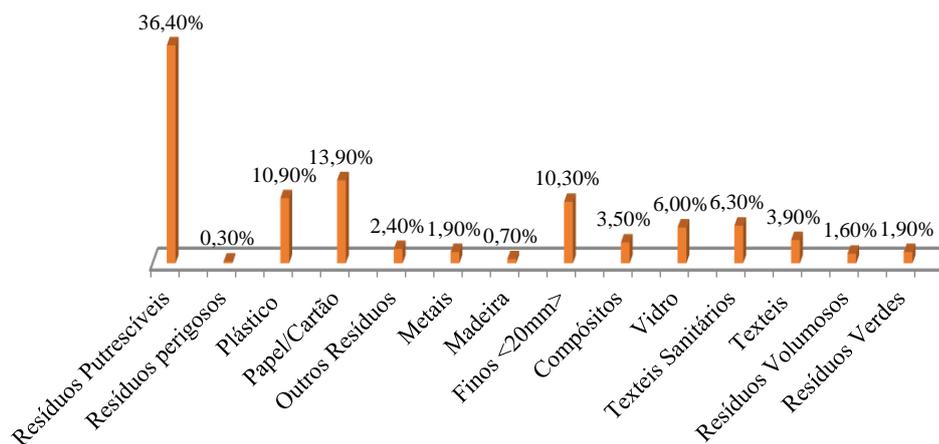


Figura 1. Caracterização física média dos resíduos urbanos produzidos em Portugal Continental (adaptado de APA (2015)).

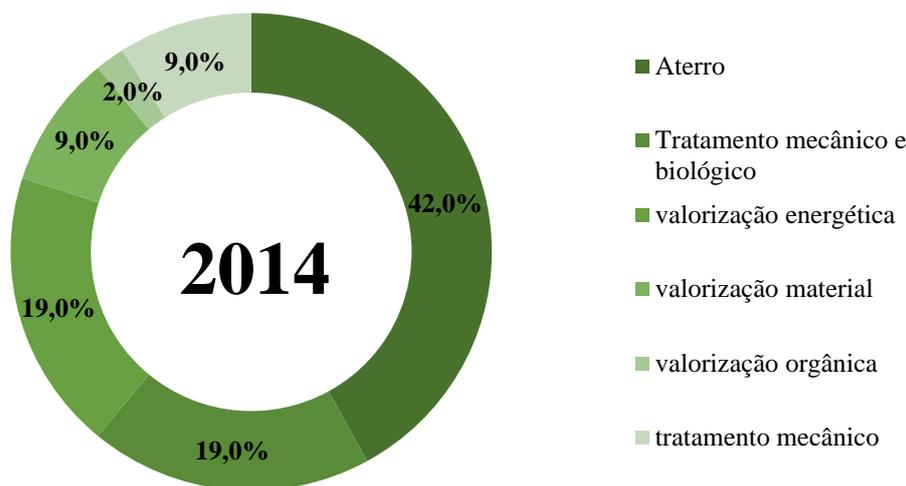


Figura 2. Gestão dos resíduos urbanos no ano de 2014 (adaptado de APA (2015)).

Uma vez que grande parte dos resíduos têm como origem o aterro, será necessário investir em medidas preventivas (bacias de retenção) para estes locais para que estes resíduos não contaminem os locais circundantes nem o ambiente, devido à sua prolongada exposição. Um dos resíduos que teria como destino o aterro são os plásticos. Segundo García-Morales *et al.* (2006) uma maneira de reutilizar os resíduos plásticos, evitando assim o depósito em aterro, é a incorporação destes na modificação de betumes.

Segundo a PlasticsEurope (2014), já em 2010 o setor da construção consumia cerca de 9,54 milhões de toneladas de plásticos, tornando-se assim a segunda maior aplicação de plástico. Apesar deste material nem sempre estar visível na construção, este setor utiliza-os para uma ampla e crescente gama de aplicações (por exemplo, o isolamento, canalizações entre outros).

Este crescimento deve-se sobretudo às características exclusivas deste material, destacando-se a sua sustentabilidade, segurança ao fogo, resistência à corrosão e alta durabilidade.

Dentro da gama dos plásticos, os que mais se utilizam na modificação de betumes são os polímeros. Estes melhoram significativamente o comportamento das misturas betuminosas, nomeadamente a rigidez do betume, a resistência à deformação do betume, entre outras (Ahmadinia *et al.*, 2011). No entanto, além de melhorar as características das misturas, é importante perceber até que ponto os resíduos plásticos não são prejudiciais para o meio ambiente nem para a saúde pública.

O desenvolvimento do setor da construção civil torna crescente o problema de geração de resíduos. De facto, espalhados um pouco por todo o território, observa-se depósitos de entulhos de obra, o que ambientalmente se torna bastante prejudicial. Tendo em conta que na maioria das vezes estes resíduos são depositados a céu aberto, em terrenos baldios, nas bermas das estradas e nas margens de rios, é importante determinar soluções alternativas para que estes resíduos não poluam o meio ambiente.

A utilização destes resíduos, comumente designados por resíduos da construção e demolição (RCD), na pavimentação rodoviária visa diminuir dois problemas: o consumo de elevadas quantidades de matérias-primas, tais como agregados, e ainda o escoamento de elevadas quantidades de resíduos para aterros inapropriados, levando assim à contaminação ambiental e, conseqüentemente, problemas de saúde pública. Assim, tendo em conta a heterogeneidade destes resíduos RCD é imperativo conhecer a sua constituição. Segundo a lista europeia de resíduos ou LER (Jornal Oficial da UE, 2014), os resíduos da construção e demolição podem ser classificados tendo em conta os materiais que o constituem:

- Inertes;
- Não perigosos;
- Perigosos.

Segundo a EPA (1998), os materiais constituintes dos RCD podem-se dividir em orgânicos, materiais compósitos e inertes, tendo em conta a Tabela 1. Ainda à cerca destes resíduos, importa referir que as novas normas e orientações políticas são condicionantes importantes dos materiais e técnicas aplicadas, facto este que é bem evidenciado com a persistente remoção e condicionamento da utilização de produtos que sejam considerados perigosos para o meio ambiente. Exemplo desta remoção é o amianto, que pode ser encontrado sobretudo em telhas

de fibrocimento, revestimentos e coberturas de edifícios, isolamentos térmicos e acústicos, entre outros. De facto, a Direção Geral da Saúde proibiu a utilização e comercialização em Portugal de amianto ou produtos que o contenham a partir de 1 de janeiro e 2005.

Tabela 1. Materiais constituintes dos RCD (EPA, 1998).

<b>Tipo</b>	<b>Material</b>
Orgânicos	Papel, cartão, madeira, plásticos
Materiais compósitos	Tapetes, revestimentos de paredes de gesso, material elétrico, madeira prensada, madeira envernizada
Inertes	Betão, betão armado, tijolos, telhas, azulejos, porcelanas, vidro, metais ferrosos, metais não ferrosos, pedra, asfalto, terra

Na pavimentação rodoviária, a reconstrução ou reabilitação pressupõe a remoção de material do pavimento por fresagem. Desta operação resulta um material de pequena dimensão (resíduo denominado de material fresado) que é diferenciado em função da camada que é demolida, sendo que a sua constituição tem uma elevada percentagem de agregados. Segundo Baptista (2006) o destino mais usual dado a estes resíduos passa pelo seu abandono em locais ermos (Figura 3), ou a deposição em caminhos secundários.



Figura 3. Exemplo de depósito de material proveniente de fresagem (Baptista, 2006).

Uma solução alternativa ao abandono destes resíduos passa pela reciclagem dos mesmos para aplicação em misturas betuminosas. O mesmo autor refere que esta é a solução mais nobre e ambientalmente mais desejável para o material fresado, tendo em conta que este desempenha uma função idêntica e não altera o seu valor económico.

Apesar de ambientalmente esta solução apresentar aspetos positivos, como por exemplo reduzir o problema do abandono dos resíduos e ainda economiza nos materiais e energia, também pode ter aspetos negativos associados. Um dos problemas que pode surgir neste material é a presença de contaminantes, como é o caso dos óleos provenientes dos veículos. Tendo em conta que estes óleos podem conter metais pesados, tais como cádmio, níquel, chumbo, entre outros (Sogilub, 2012), torna-se arriscado a utilização de material fresado em novas misturas betuminosas. Tanto a nível da saúde como para o meio ambiente é importante avaliar corretamente este material para que não haja danos maiores (Sogilub, 2012).

Em Portugal, a gestão de óleos usados é da responsabilidade da Sociedade de Gestão Integrada de Óleos Lubrificantes Usados (Sogilub), assegurando a recolha, transporte, reciclagem ou ainda valorização energética. De acordo com o Decreto-lei nº 73/2011 de 17 de julho, para a gestão dos óleos usados é necessário um controlo das suas características, quer na fase de recolha, quer na fase de tratamento. Assim, devem ser realizadas caracterizações qualitativas bem como quantitativas dos óleos junto dos seus produtores. No ano de 2014, a quantidade de óleos lubrificantes usados recolhidos atingiu um valor de 24459 toneladas, que posteriormente foram enviados para tratamento, onde se eliminam a água e os sedimentos (Sogilub, 2014). A valorização destes óleos varia essencialmente entre a regeneração e a reciclagem: cerca de 14882 toneladas têm como destino a regeneração e 6447 toneladas a reciclagem.

A valorização destes óleos através da reciclagem ou regeneração levou a uma diminuição do desempenho ambiental no ano de 2014 (Sogilub, 2014). De facto, nesse ano houve um ligeiro aumento de emissões geradas por estes óleos, devido ao facto de existir uma menor quantidade de óleos usados gerados disponíveis para a recolha. O abandono destes óleos por parte dos produtores origina impactos negativos para o meio ambiente, por exemplo, através da infiltração no solo.

Assim, é importante avaliar a toxicidade destes óleos quando aparecem nas misturas betuminosas, bem como estudar a sua aplicabilidade como matéria que pode ser reutilizada em novas misturas betuminosas. Esta toxicidade é avaliada através ensaios de lixiviação. Estes ensaios permitem obter uma melhor noção do impacto ambiental dos resíduos comparativamente à sua análise de composição (Wascon, 2003). Ainda segundo este autor, a lixiviação é o processo pelo qual os contaminantes inorgânicos ou orgânicos são libertados da fase sólida para a fase hídrica sob a influência de processos de dissolução, dessorção, oxidação, matéria orgânica dissolvida, entre outros. Este processo é universal, uma vez que qualquer

material exposto ao contacto com a água lixivia os componentes da sua superfície ou do seu interior, dependendo da porosidade do material em questão. Assim sendo, as possíveis formas de contaminação são diversas, tendo em conta que existem vários locais que estão em contacto com a água. Na Figura 4 é possível observar os diversos setores que têm impacto ambiental.

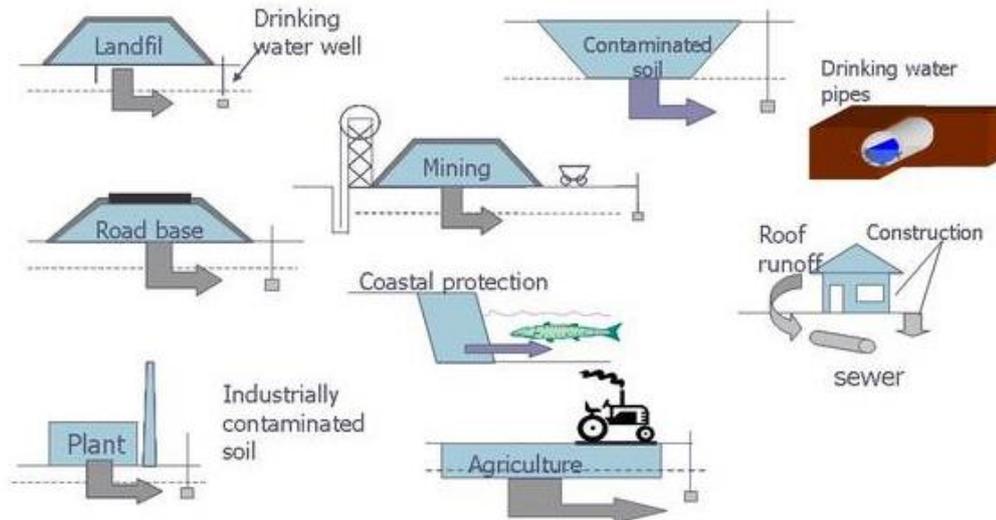


Figura 4. Diferentes cenários de impacto ambiental por lixiviação (Wascon, 2003).

Após aplicação destes ensaios de lixiviação é possível reutilizar de forma segura um material que outrora foi resíduo e, no futuro, pode vir a ser um material secundário. De acordo com Sleet *et al.* (1997c) os testes de lixiviação são realizados para refletir o nível de exposição a metais pesados que determinados locais podem ou não conter. Tendo em conta a constituição do material, existe uma série de fatores que influenciam a velocidade a que estes são dissolvidos (físicos, químicos e biológicos). Os fatores físicos que mais influenciam a lixiviação estão relacionados com a área superficial, propriedades das partículas, técnica de agitação e equipamento utilizado, características da solução lixiviante, entre outras. Uma vez que também a forma do material é importante para o processo de lixiviação, no caso dos materiais granulares, o efeito da área superficial é mais importante do que nos materiais íntegros.

A utilização mais frequente de resíduos nas mais diversas áreas deve ser mais estimulada sob o ponto de vista de conservação de energia bem como de recursos. Para isso, a lixiviação dos componentes dos materiais deve ser tida em conta mais vezes, para que desta forma o impacto dos materiais no ambiente seja reduzido. No entanto, não só a utilização de resíduos requer a utilização destes ensaios. Por exemplo, Hingston *et al.* (2002) realizaram um estudo onde

realizaram ensaios de lixiviação a madeira tratada com arsénio de cobre cromado. Também o solo é alvo destes ensaios para se obter informação acerca dos nutrientes, elementos principais e microelementos (Sleet *et al.*, 1997a).

### **2.3. Toxicidade dos materiais de construção**

Atualmente as construções incorporam elevadas combinações de químicos e metais pesados. Alguns dos materiais de construção utilizados apresentam algum grau de toxicidade, relacionado tanto aos impactos ambientais da sua produção bem como à redução da qualidade do ar do interior das edificações ou mesmo à presença de resíduos tóxicos na sua composição.

De acordo com dados da Health Care (2007) os químicos presentes nos materiais de construção podem afetar a saúde e a produtividade do trabalho bem como o ambiente. Já Torgal e Jalali (2010b) referem que também durante a fase de produção dos materiais há emissão de vários tipos de poluentes, bem como a produção de resíduos muito perigosos, os quais irão afetar negativamente o nosso planeta.

Um dos poluentes que merece destaque são os compostos orgânicos voláteis (COVs). Segundo o Decreto-Lei 181/2006, composto orgânico é definido como qualquer composto que contenha, pelo menos, o elemento carbono e um ou mais dos elementos seguintes: oxigénio, azoto, hidrogénio, enxofre, silício, fósforo ou halogénios. As principais fontes emissoras destes compostos são os materiais de construção bem como os sistemas de ventilação (Bluyssen *et al.*, 1996). Assim é possível encontrar estes COVs em materiais com acabamentos de verniz bem como tintas. Além disto, estes compostos contribuem para a formação de ozono troposférico (provoca efeito de estufa). Consequentemente, tanto a saúde pública como o ambiente ficam debilitados com a utilização destes materiais.

No entanto, também as grandes indústrias, bem como os veículos automóveis, contribuem para a poluição do ambiente, através dos fumos tóxicos que lançam. A queima continuada de combustível faz com que seja libertado para a atmosfera, entre outros metais, chumbo e monóxido de carbono. Estes metais, além de prejudicarem o meio ambiente, também acarretam problemas para a saúde pública. Além disto, as grandes fábricas, como as centrais termoelétricas, são também grandes responsáveis pela poluição do ar. Segundo dados da Organização Mundial de Saúde (OMS), a China é um dos países com maior poluição ambiental, superando em quase 50 vezes os níveis considerados aceitáveis (Figura 5). Assim, uma das

alternativas propostas pelo governo para diminuição da poluição é a reformulação de combustíveis para automóveis, diminuindo desta forma as emissões por estes lançados. Desta forma, além das benesses ambientais, também a saúde dos habitantes fica resguardada.



Figura 5. Exemplo da poluição do ar na China.

Como referido anteriormente, a consequência de se utilizar os resíduos da construção e demolição é não saber ao certo o nível de contaminação destes resíduos. Um dos casos mais mediáticos foi o caso do amianto. O amianto é uma fibra natural que abundantemente se encontra na natureza. Face às suas características (por exemplo, resistência mecânica a altas temperaturas, durabilidade, bom isolante, entre outras) esta fibra foi amplamente utilizada em diversas aplicações. Para o presente estudo destaca-se a sua utilização em diversos materiais de construção, tais como:

- Pavimentos;
- Coberturas;
- Impermeabilizações;
- Isolamentos térmicos e acústicos;
- Canalizações.

Contudo, a sua utilização foi proibida uma vez que começaram a surgir doenças relacionadas com a sua exposição. De facto, todas as variedades do amianto são classificadas como carcinogénicas, ou seja, são suscetíveis de produzir ou favorecer o cancro. Em Portugal, apesar

de a sua utilização já ter sido proibida, ainda existem cerca de 600 000 hectares de coberturas que contém amianto (Torgal e Jalali, 2010b).

Outros produtos de construção também foram abandonados. De facto, sabe-se que o uso de alcatrão na pavimentação está agora interdito pelo risco de cancro, provocado pelo alto teor de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs). Segundo Mahler *et al.* (2014) as escorrências de um pavimento com este material mostram que após um período de 24 horas as concentrações de hidrocarbonetos mantêm-se bastante elevadas, implicando assim consequências para o ambiente e para a saúde das pessoas. De acordo com a Figura 6, é possível observar que estes hidrocarbonetos afetam tanto a saúde pública como o meio ambiente, dado que a sua transferência para o nosso meio pode ser realizada de diversos modos (vento, circulação de pessoas, escorrências rodoviárias, entre outros).

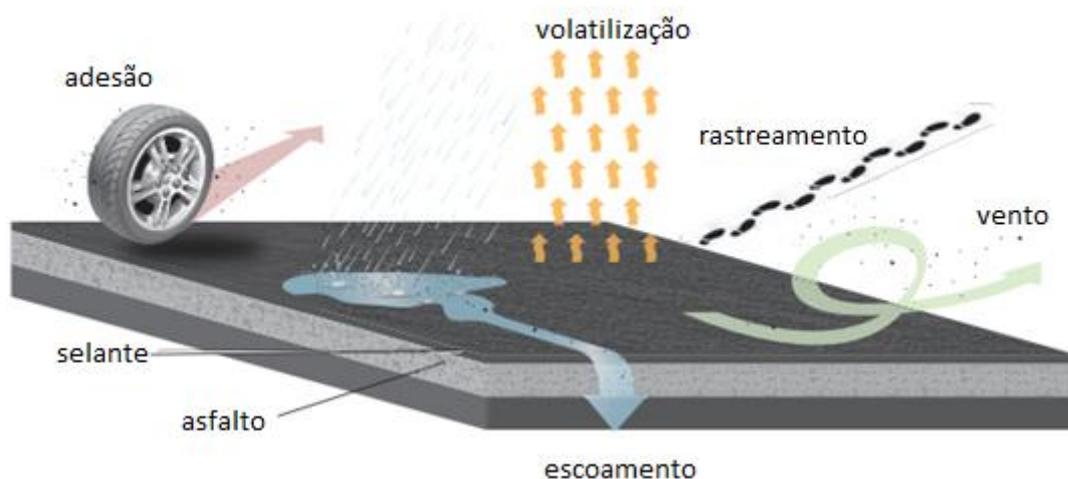


Figura 6. Mecanismos de transferência dos PAHs (Interior e Survey, 2011).

Na pavimentação rodoviária, além dos materiais anteriormente falados, há um outro que é de extrema toxicidade. Sendo assim, um dos principais aspetos a ter em consideração, devido ao seu alto teor de contaminação, são as denominadas escorrências rodoviárias. De uma forma genérica, pode-se referir que estas escorrências são originadas por diversos fatores, dos quais se distingue os seguintes (Pernagorda, 2007):

- Combustão do *fuel*;
- Desgaste dos componentes dos veículos;
- Derrame de produtos durante a normal utilização do veículo (detergentes, óleos, etc.);

- Desgaste e degradação dos constituintes da estrada (guardas, etc.);
- Desgaste e degradação dos materiais dos pavimentos rodoviários;
- Fugas e derrames acidentais;
- Arrasto de poluentes presentes na mesma bacia de drenagem (pesticidas, resíduos sólidos, entre outros).

Devido essencialmente a estes fatores, as escorrências rodoviárias são a maior fonte de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), o que por sua vez são extremamente perigosas para o meio ambiente (Metre *et al.*, 2008). Além disso, segundo Pernagorda (2007) estes têm inúmeros metais pesados, sendo que os principais a ter em atenção são:

- Cobre (Cu);
- Chumbo (Pb);
- Zinco (Zn);
- Cádmio (Cd);
- Níquel (Ni);
- Crómio (Cr).

De acordo com um estudo de Freije (2015), a presença de metais pesados no solo é essencialmente devida pela circulação de veículos, e em zonas de maior concentração, a percentagem de chumbo, por exemplo, é bastante elevada. Tendo em conta que os metais pesados, devido às diversas formas de poluição, podem ficar depositados na sujidade da estrada, as pessoas que utilizam as calçadas das estradas ou até mesmo as que vivem perto destas, ficam expostas a grandes quantidades de metais pesados, prejudiciais para a sua saúde (Duong e Lee, 2011).

A circulação de veículos, além de ser a principal responsável pela presença de metais pesados nos solos, também é originária de várias emissões de gases poluentes. Devido à crescente utilização de veículos, a emissão de gases poluentes para a atmosfera é cada vez maior. Segundo dados da EEA (2015) os poluentes mais frequentes devido aos veículos são o dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Deste modo, de forma a evitar estes poluentes, surgem cada vez mais campanhas de sensibilização para se utilizarem novos meios de transporte ou, então, a substituição destes combustíveis por outros ecologicamente mais favoráveis.

A utilização de determinados materiais no setor da construção não acarreta só vantagens. Um dos materiais comumente utilizados neste setor são os plásticos, que podem contribuir para que

os custos de construção diminuam e a qualidade final da obra aumente. Segundo Halliwell (2002), um dos polímeros mais utilizados nesta indústria é o policloreto de vinila, mais conhecido por PVC. Este material destaca-se pelas suas características vantajosas, entre as quais se destaca a flexibilidade, resiste a ácidos e bases, é reciclável, tem boa resistência mecânica, resistência à corrosão, entre outras. No entanto, este material constitui um problema para o ambiente no que diz respeito à sua inceneração bem como o abandono ao ar livre. Aquando da inceneração deste material, há a libertação de compostos extremamente prejudiciais para a saúde pública (dioxinas) bem como, durante a produção ocorrem reações que produzem toxinas altamente nocivas, capazes de provocar doenças perigosas nos humanos. Relativamente ao segundo ponto, devido à alta durabilidade, este material demora anos a deteriorar-se quando é depositado ao ar livre (aterros, por exemplo).

Por sua vez, o polietileno de alta densidade (PEAD) é um polímero cuja aplicação neste setor é vasta. Sendo um material que possui uma resistência a altas temperaturas, baixa densidade quando comparado com metais e outros materiais, viscosidade menor, entre outras, é possível aplica-lo na pavimentação rodoviária. Segundo Köfteci (2016) a utilização deste material para modificação do betume melhora o desempenho do pavimento, nomeadamente a estabilidade e a flexibilidade. De acordo com Coutinho *et al.* (2003) este material é utilizado para o fabrico de diferentes embalagens, brinquedos e ainda em revestimentos de tubagens, isolamento de fios entre outros. No entanto, este polímero pode constituir um sério problema ecológico, uma vez que, como são usados na fabricação de embalagens habitualmente descartadas após a utilização, e tendo em conta que estas se vão acumulando ao longo do tempo na natureza, provoca assim uma forte poluição. Desta forma, se o local onde são depositados não estiver devidamente selado, estes penetram no solo atingindo os lençóis freáticos. Assim, além de poluir o ambiente, também a saúde humana fica afetada.

Tendo em conta que a valorização de resíduos é cada vez mais importante, torna-se crucial determinar se ambientalmente não há risco maior. Como já foi referido anteriormente, a utilização de resíduos da construção e demolição nos pavimentos é uma estratégia frequentemente adotada em muitos países Europeus. No entanto, estes resíduos podem conter tijolos, betão, asfalto, detritos minerais, entre outros (Butera *et al.*, 2014), sendo de extrema necessidade determinar sob o ponto de vista ambiental a perigosidade dos produtos de lixiviação originados aquando da sua utilização.

Os ensaios de lixiviação, além de determinar a presença de metais pesados, ainda avaliam o potencial que os componentes dos materiais têm em libertar para o meio ambiente estes poluentes, prejudicando desta forma os solos e as águas subterrâneas. Há, no entanto, uma variada gama de ensaios de lixiviação, que se diferem, entre outros fatores, pelo pH da solução lixiviante, formato da amostra, agitação do meio, proporção da amostra e solução lixiviante. Dos diversos métodos de teste de lixiviação, destacam-se os seguintes (Wascon, 2003):

- Ensaios de lixiviação com dependência do pH;
- Ensaios de lixiviação de coluna;
- Ensaios de lixiviação em tanque;
- Ensaios de lixiviação de material granular compactado.

Relativamente ao primeiro ensaio, este consiste em extrações paralelas do material durante um período de 48 horas sob valores pré-estabelecidos de pH. Note-se que o pH é uma das características principais do controlo da lixiviação. Como vantagens, este método apresenta informações sobre as condições de pH impostas por influências externas, funciona como base de comparação a nível internacional e ainda se destaca pelas informações da capacidade de neutralização de ácido, entre outras. No que diz respeito ao segundo ensaio, é efetuado durante 21 dias e o lixiviante é água desmineralizada, e o equilíbrio é estabelecido rapidamente. O terceiro ensaio, o utilizado neste trabalho, é aplicável a vários materiais de construção (por exemplo, betão, alvenarias, misturas betuminosas). É ideal para materiais duros, com baixa permeabilidade. Por fim, o último ensaio, tem o funcionamento semelhante ao anterior na forma como é realizado e na manipulação de dados.

Assim, consoante o órgão ambiental responsável bem como as normas em vigor escolhe-se o melhor método para os resultados pretendidos. A norma que se utiliza em Portugal para caracterizar a lixiviação de resíduos é a EN 12457-4.

Estes ensaios tornam-se então de extrema importância, tendo em conta a vasta gama de materiais onde podem ser realizados. Além dos materiais de construção, esta técnica pode ser utilizada, por exemplo, na análise de solos provenientes da agricultura. Tendo em conta que, segundo dados da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2015) este setor consome cerca de um terço da água, o uso de águas residuais na agricultura é uma solução economicamente favorável. De acordo com um estudo de Maggi *et al.* (2010), onde se estudou a utilização de águas residuais da suinicultura como fertilizante para uma plantação de soja, após proceder à análise do lixiviado proveniente do solo fertilizado, verificaram que o pH não se alterou nem

se houve mudanças significativas nos metais. Em relação aos metais pesados presentes, o lixiviado não apresentou risco de toxicidade.

Segundo estudo de Jalali *et al.* (2008), o uso de águas residuais em solos calcários originou o aumento da taxa de sódio do solo das águas subterrâneas, tendo em conta que as águas residuais são mais salinas e com maior teor de sódio do que as águas subterrâneas regionais. Apesar deste aumento, verificou-se também os resultados dos lixiviados não apresentavam perigosidade, tanto para o cultivo como para o ambiente.

No entanto, o uso de águas residuais em plantações origina por vezes que o produto final contenha níveis superiores de toxicidade permitida para a saúde humana. Um estudo de Marofi *et al.* (2015) demonstra que a utilização de águas residuais numa plantação de manjeriço provoca, após o processo de lixiviação do respetivo solo, o aumento de todos os nutrientes em comparação com o de controlo. Inclusive, observa-se que as concentrações de nitrato foram superiores ao permitido para consumo humano.

Tendo em conta que a sustentabilidade é procurada em todas as áreas, a utilização de resíduos nos mais diversos produtos é cada vez uma opção. A produção de calçado origina quantidades enormes de resíduos de couro, os quais não têm soluções ambientalmente favoráveis de armazenamento. Desta forma, para solucionar este problema, surge a incorporação destes resíduos na produção de materiais cerâmicos para a construção. Assim, é evitada a sua deposição em aterro, o que a longo prazo, é prejudicial para o meio ambiente, devido ao alto teor de crómio que os lixiviados contêm. Valente *et al.* (1999) desenvolveram um estudo onde incorporaram estes resíduos (couro curtido) em produtos cerâmicos da construção. Desta forma foi possível observar que a introdução destes resíduos não inviabilizou a utilização dos novos produtos cerâmicos, verificando-se até que esta é uma técnica de valorização tecnicamente viável. Relativamente aos lixiviados do crómio, estes permanecem dentro dos limites impostos. Assim, foi possível constatar que o uso de resíduos do setor do calçado é uma solução quer ambientalmente e economicamente favorável.

A utilização de madeira é uma das soluções ambientalmente favoráveis para sustentabilidade do setor da construção. No entanto, é necessário proceder a tratamentos no sentido de a conservar para que a longo prazo não perca as suas características. Existem estudos que utilizam o cobre como um conservante da madeira. De acordo com Temiz *et al.* (2014) foram estudados dois tipos de amostras de madeira (pinheiro silvestre e amieiro). Estas foram tratadas com

conservantes à base do cobre, para determinar a resistência que estas mostravam à decomposição. Após a realização dos testes de lixiviação conclui-se que as amostras que foram tratadas com arseniato de cobre cromado (frequentemente utilizado como conservante da madeira) libertaram menos cobre comparativamente com outros conservantes. Também Sleet *et al.* (1997b) apresenta um estudo onde se observa o comportamento de conservantes de madeira, evitando desta forma que ela se degrade a longo prazo, perdendo a qualidade inicial.

Assim, os progressos no uso de resíduos sólidos como fontes de matéria-prima na construção civil têm permitido reverter os aspetos ambientais em produtos com valor agregado, por forma a reduzir custos e prejuízos ambientais relativos ao destino final. Além disso, permite minimizar os impactos ambientais resultantes da extração de nova matéria-prima. Esta tendência está a originar que a indústria da reciclagem aumente, originando estudos que avaliam o processo de reaproveitamento ou reciclagem de resíduos, garantindo o seu sucesso em todos os aspetos, nomeadamente o técnico, económico e de segurança ambiental (Kulakowski *et al.*, 2016).

Se por um lado, a utilização de resíduos melhora a sustentabilidade do sistema, uma vez que poupa nos recursos naturais, por outro lado é importante que a interação desses produtos no meio ambiente não seja um entrave, pelos problemas que podem causar (perigo para o ambiente e para a saúde pública). Vários estudos foram já realizados neste contexto, comprovando que é possível esta interação, evitando em alguns casos que a deposição dos resíduos seja realizada por exemplo em aterros. Como já foi mencionado anteriormente, um dos resíduos que habitualmente se utiliza, evitando o seu despejo em aterros, são os resíduos de construção e demolição. Tendo em conta a variedade destes resíduos (LNEC, 2012) é necessário a realização de ensaios para que a sua utilização seja mais benéfica.

De acordo com Saca *et al.* (2015) devem ser realizados ensaios de lixiviação aos resíduos provenientes da construção e demolição (RCD) para determinar as concentrações dos poluentes existentes, independentemente da aplicação que se prevê. Assim, um estudo do mesmo autor refere a elaboração destes ensaios a alguns dos materiais presentes nos resíduos, tais como o betão, tijolos, restos de cerâmica entre outros. Para este estudo foram realizados ensaios de lixiviação, determinando desta forma a concentração dos elementos inorgânicos (metais pesados, entre eles níquel, chumbo e zinco). Como conclusão deste estudo é possível dizer que apesar destes metais pesados estarem presente, os valores obtidos em nada são prejudiciais. Segundo esse estudo, é claramente possível a reutilização destes materiais em novas aplicações.

Relativamente ao objetivo desta dissertação, importa conhecer se a incorporação de alguns destes resíduos é benéfica para os pavimentos rodoviários, não alterando nem o meio ambiente nem a saúde humana.

Assim sendo, existem na literatura estudos que comprovam que a incorporação destes (e outros) resíduos é uma solução alternativa ao uso de recursos naturais, economicamente melhor, e até melhorando as propriedades finais do produto.

#### **2.4. Utilização de resíduos em misturas betuminosas**

Numa ótica de preservação de recursos naturais e tendo em conta que as reservas de petróleo têm vindo a diminuir gradualmente, a indústria da pavimentação rodoviária têm dado cada vez mais ênfase à valorização dos resíduos gerados pelo setor da construção.

A construção de pavimentos rodoviários com boas características está associada a um conjunto de fatores, entre os quais se destaca a seleção de materiais de construção, principalmente o betume. Este material é um componente essencial na mistura betuminosa, uma vez que proporciona a ligação entre os agregados, bem como fornece coesão e estabilidade à mistura. Assim sendo, existe uma variedade de ligantes que podem ser utilizados nas misturas betuminosas, mas no geral utilizam-se betumes asfálticos provenientes da refinação do crude (Teixeira, 2000).

Contudo, na busca de soluções economicamente favoráveis, bem como ambientalmente benéficas, a indústria da pavimentação rodoviária começa a utilizar determinados resíduos na modificação de betumes. Um dos materiais frequentemente usados são os plásticos. Dependendo da aplicação que se pretende, existe uma vasta gama de materiais poliméricos que se podem introduzir nas misturas. Segundo Hınıslioğlu e Ağar (2004) vários estudos já foram realizados demonstrando que é possível integrar polímeros nas misturas betuminosas melhorando assim as suas características. De acordo com Kalantar *et al.* (2012) a modificação de betumes com polímeros permite obter misturas com uma maior resistência à deformação permanente e uma maior rigidez a temperaturas elevadas bem como uma menor suscetibilidade à variação da temperatura.

A nível nacional, um estudo de Costa *et al.* (2013) refere que, apesar de o polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD, respetivamente) existirem em maior quantidade para a reciclagem e com elevada aplicabilidade para a modificação de betumes, estudos mais recentes

demonstram que os polímeros mais utilizados são o SBS e o EVA (estireno-butadieno-estireno e etileno-acetato de vinilo).

A conclusão do estudo foi que, com a utilização destes polímeros foi possível obter propriedades semelhantes, tendo em conta que em alguns dos casos, melhores do que do betume modificado comercial. Os polímeros que concedem melhores propriedades são o EVA, SBS ou o PEAD, mas estes são condicionados pela sua suscetibilidade ao armazenamento, condicionante que não afeta o ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). Também Casey *et al.* (2008) refere que este resíduo é uma boa alternativa na modificação de betumes.

Contudo, existem outros resíduos plásticos que também são utilizados na modificação de betumes. Ahmadinia *et al.* (2012) referem a utilização do polietileno tereftalato (PET), e por sua vez Kalantar *et al.* (2012) fazem referência ao policloreto de vinilo, usualmente conhecido por PVC.

Como foi mencionado no subcapítulo anterior, outro material utilizado na modificação de misturas betuminosas são os resíduos da construção e demolição (RCD). De acordo com um estudo de Fernandes *et al.* (2013) a utilização destes resíduos permite reduzir os impactos negativos inerentes a estes setores, diminuir o consumo de energia e ainda diminuir a quantidade de materiais novos a usar. Assim, do ponto de vista ambiental e até económico, a preferência por estes materiais é mais benéfica. Na sua constituição, dependendo de onde foram extraídos, observa-se vários tipos de materiais, sendo por isso obrigatório uma seleção criteriosa para posteriormente se poder aplicar, por exemplo, nos pavimentos rodoviários.

Desta forma, existem alguns documentos que definem as mais diversas operações de gestão, destacando-se o Decreto-Lei nº 46/2008 de 12 de março e ainda o Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de setembro. No primeiro é possível observar as operações de prevenção, reutilização e as operações de recolha, transporte e armazenamento. Por sua vez, o segundo decreto expõe o Regime Geral de Resíduos.

Fernandes *et al.* (2013) concluíram que, da variada gama de RCD, os que tem maior potencial para utilização em pavimentos são os constituídos por resíduos de betão, argamassa, misturas betuminosas ou agregados.

Além de benefícios ambientais, a reciclagem acarreta bastantes aspetos positivos a nível económico, uma vez que contribui para a criação de novos postos de trabalho. Vários são os

estudos neste âmbito. De acordo com Kaur *et al.* (2013) uma das diferentes alternativas de reabilitação de pavimentos é a reciclagem, uma vez que se torna rentável a reutilização de materiais existentes. Ziari e Khabiri (2005) concluem que a adição de material reciclado numa mistura tem um efeito bastante pronunciado no módulo de resiliência, uma vez que torna a mistura bastante mais rígida. Por sua vez, Pradyumna *et al.* (2013) constatam que a adição de material reciclado melhora todas as propriedades das misturas betuminosas.

Contudo a característica crucial do material reciclado, que afeta o desempenho das misturas, é o envelhecimento do seu ligante. Para compensar este facto existem métodos que consistem no uso de aditivos rejuvenescedores, a utilização de um ligante virgem mais macio ou então o aumento do teor de ligante na mistura (Zaumanis e Mallick, 2014). Estes aumentam a resistência à fadiga de misturas recicladas devido ao efeito combinado da redução no grau de penetração do ligante e ao ligeiro aumento do seu teor nas misturas (Oliveira *et al.*, 2011).

Desta forma, o uso destes rejuvenescedores é cada vez mais frequente, tendo já sido comprovada a sua eficácia (Shen *et al.* (2007) e Widyatmoko (2008)). Sendo assim, o óleo de motor usado surge como uma boa alternativa para a substituição de parte de betume nas misturas betuminosas. Além de benefícios ambientais, a utilização destes óleos nas misturas é uma solução que economiza na quantidade de material novo que se introduz.

Segundo Jia *et al.* (2014) a incorporação de resíduos de óleos nas misturas betuminosas recicladas pode recuperar a flexibilidade do betume. De facto, a utilização deste material nas misturas recicladas melhora o desempenho das mesmas. Silva *et al.* (2012) e Abreu *et al.* (2013) comprovam que a viscosidade a elevadas temperaturas é reduzida, bem como a percentagem de vazios das misturas. Consequentemente, a resistência à compactação é menor e ainda se observa melhorias na trabalhabilidade. Analisando os resultados destes estudos, é possível concluir que a incorporação deste resíduo nas misturas melhora significativamente a sensibilidade à água em comparação com as misturas betuminosas convencionais.

No entanto, a opção por este material acarreta algumas condicionantes. De acordo com Jia *et al.* (2014), e tendo em conta que a proveniência dos óleos utilizados são os próprios veículos, estes contêm diversos metais pesados, como foi mencionado no subcapítulo anterior. Assim, a percentagem óleo utilizada deve ter em conta que quanto mais elevada for, maior será a quantidade de poluentes presentes na mistura final.

Existe ainda a possibilidade de se introduzir vários resíduos na modificação de betumes das misturas. Segundo um estudo de Fernandes *et al.* (2015) sobre incorporação de resíduos plásticos (PEAD), resíduos de óleos de motor usado e ainda material fresado resulta uma mistura com significativas melhorias. Uma vez que o óleo de motor funciona como um rejuvenecedor, as temperaturas da mistura bem como da compactação reduzem. Tendo em conta que a altas temperaturas estes resíduos podem causar problemas de deformação, a introdução de resíduos plásticos ajuda a prevenir este fator. Assim, estes resíduos diminuem a penetração do betume, e aumentam a temperatura de amolecimento. Na conclusão desse estudo pode-se observar que a reutilização destes resíduos não só é possível, como eficaz. Além disso, ajuda a reduzir bastante as quantidades de ligante virgem a ser utilizado.

Contudo, não só óleo de motor usado tem sido utilizado nas misturas betuminosas. Um estudo de Peralta *et al.* (2013) refere a utilização de bio ligantes com o objetivo de modificar ou até mesmo substituir o betume (parcial ou totalmente), permitindo assim obter ligantes alternativos com comportamentos iguais ou até superior aos betumes convencionais.

Por sua vez, Zargar *et al.* (2012) estudaram a incorporação de óleo de cozinha usado como um rejuvenecedor do betume envelhecido. Desta forma, evita-se que estes óleos tenham o destino final de poluir rios e aterros. No entanto, apesar de este resíduo rejuvenescer o betume, não consegue atingir as características do betume convencional.

## **2.5. Avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas**

Geralmente as misturas betuminosas são aplicadas nas camadas dos pavimentos rodoviários durante a sua construção ou reabilitação. Assim sendo, é importante avaliar as suas características para que a estrutura final do pavimento não se degrade com a aplicação de carregamentos, bem como com as variações de temperatura.

Dependendo do tipo de pavimentos, as misturas betuminosas têm na sua composição determinados materiais. Para os pavimentos flexíveis, são utilizadas misturas betuminosas nas suas camadas superiores, enquanto nas camadas subjacentes utilizam-se materiais granulares não ligados. Por sua vez, os pavimentos semirrígidos são constituídos por materiais granulares, nas suas camadas inferiores, estabilizados com ligantes hidráulicos. Contudo, apresentam características semelhantes aos anteriores.

Os pavimentos rodoviários são submetidos a vários tipos de ações ao longo da sua vida útil que afetam as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. De acordo com Baptista (2006) é importante o conhecimento dessas propriedades, tendo em conta que assumem particular importância no âmbito da formulação de misturas betuminosas bem como no dimensionamento de um pavimento.

Assim, são exigidas às misturas betuminosas características de flexibilidade, durabilidade, estabilidade, resistência à fadiga, impermeabilidade, aderência e trabalhabilidade (Freire, 2004).

De uma forma geral, a resistência à fadiga das misturas betuminosas, é uma das mais importantes características das misturas betuminosas. É a capacidade que estas apresentam quando são sujeitas a esforços de flexão sem atingir a rotura. Tendo em conta que é originada pela passagem repetida dos veículos, esta aumenta com a durabilidade da mistura, e como tal com o aumento do betume (Pais *et al.*, 2000).

Já as deformações permanentes podem ocorrer quer nas camadas betuminosas quer nas camadas granulares ou ainda no solo de fundação. Assim, a forma de podermos observar estas deformações é pelo aparecimento de depressões longitudinais à superfície do pavimento. Tendo em conta que o comportamento das misturas betuminosas é altamente influenciado pela temperatura, o aparecimento destas depressões é ainda mais suscetível, uma vez que aumentando a temperatura, o seu módulo de rigidez diminui (Pais *et al.*, 2000).

Por outro lado, é importante que as misturas betuminosas resistam ao desgaste causado pelas condições climáticas bem como do tráfego, por isso exige-se que estas apresentem elevada durabilidade. Devem ainda apresentar uma adequada estabilidade, por forma a resistir à repetida passagem dos veículos, sem o aparecimento de deformações. Além disso, as misturas betuminosas devem possuir uma flexibilidade capaz de permitir a adaptação das camadas betuminosas a assentamentos graduais observados nas camadas inferiores. No entanto, estas misturas devem ter uma impermeabilidade capaz de proteger as camadas subjacentes (Branco *et al.*, 2011). Contudo, as misturas betuminosas devem ainda possuir uma adequada trabalhabilidade para facilitar as operações de fabrico, colocação e compactação.

Geralmente, o comportamento mecânico das misturas betuminosas é avaliado através de ensaios laboratoriais, em que se aplica repetidamente cargas aos provetes. Tendo em conta, que os principais problemas que as misturas betuminosas apresentam prendem-se com a

deformabilidade bem como o fendilhamento, é importante que determinadas propriedades sejam avaliadas (Pais *et al.*, 2000).

Uma vez que as misturas betuminosas apresentam uma natureza viscosa, o seu comportamento depende de fatores tais como o tempo de carregamento e a temperatura. Assim, para a caracterização da deformação permanente interessa a gama de temperaturas elevadas (Neves e Correia, 2006), dado que a estas temperaturas, a componente viscosa do comportamento das misturas assume maior relevo. Por outro lado, baixas temperaturas originam o aparecimento de fendas, devido à elevada rigidez do betume nestas condições.

Contudo, o aparecimento do fendilhamento está também relacionado com o aumento da temperatura, conjugado com o aumento da precipitação. À superfície do pavimento, a subida da temperatura origina a perda da rigidez da mistura betuminosa, o que acompanhado pela intensificação da radiação UV, causa um aumento da taxa de oxidação (Branco *et al.*, 2011). Desta forma, a capacidade de flexibilidade da mistura betuminosa fica afetada, o que resulta no envelhecimento do betume. Assim, este fenómeno provoca a diminuição da capacidade de suporte induzido pela circulação de veículos, resultando no fendilhamento da superfície do pavimento. Uma das consequências deste fendilhamento da superfície é a infiltração da água para as camadas inferiores.

Para além destas condicionantes, a variação das condições climatéricas, o aumento de tráfego, com o conseqüente aumento de cargas aplicadas nos pavimentos rodoviários, faz com que a durabilidade e o desempenho das misturas betuminosas reduza (Simões *et al.* (2016), Lesueur e Youtcheff (2013)).

Devido a estes condicionantes, a necessidade de obter um ligante que apresentasse condições mais favoráveis para a solução destes problemas começa cada vez mais a ser procurada. Assim, como já foi mencionado anteriormente, a utilização de betumes modificados é uma resposta a estes problemas. Em Portugal o consumo de betume modificado é relativamente inferior quando comparado, por exemplo, com a França (2,47 milhões de toneladas). Contudo, a maior taxa de utilização de betume modificado é feita por parte da Roménia (EAPA, 2014). Assim, a utilização de betume modificado nas misturas betuminosas tem um longo caminho a percorrer, tendo em conta que este betume melhora as propriedades do pavimento e ainda é considerado ambientalmente favorável, na medida em que é possível introduzir resíduos (como já foi mencionado anteriormente).

No entanto, é necessário averiguar se esta solução melhora os principais condicionantes dos pavimentos, anteriormente mencionados. Assim, surge a necessidade de avaliar mecanicamente e ambientalmente as misturas betuminosas com este betume, para que o pavimento corresponda às exigências pretendidas.

Como anteriormente se constatou, um dos resíduos que se pode introduzir nos betumes são os plásticos (Costa *et al.*, 2013). Estes permitem melhorar o desempenho das misturas betuminosas, nomeadamente, a suscetibilidade térmica, a resistência à fadiga, à deformação permanente e ainda ao envelhecimento. No estudo realizado por Costa *et al.* (2013) foram realizadas misturas (granulometria descontínua e granulometria aberta) com betume modificado com polímeros e com borracha, que foram posteriormente comparadas com duas misturas com betume modificado com SBS, que é um dos polímeros mais frequentemente utilizados na modificação de betumes (Costa *et al.*, 2013). A caracterização mecânica destas misturas foi realizada tendo em conta ensaios laboratoriais, nomeadamente o ensaio de flexão de 4 pontos (medir deformabilidade) e ensaios de fadiga por flexão em 4 pontos (avaliar resistência a fadiga). Conclui-se que as misturas abertas com betume modificado com borracha possuem uma melhor resistência à fadiga, comparativamente às misturas modificadas com SBS.

Segundo um estudo de Pais *et al.* (2008) a incorporação de betume modificado com borracha nas misturas betuminosas acarreta bastantes melhorias, quer ao nível da suscetibilidade térmica, quer na resistência ao envelhecimento, comparativamente às convencionais.

Um dos aspetos que mais influencia o comportamento dos pavimentos rodoviários é a água, uma vez que afeta a durabilidade do mesmo. Assim, o ensaio de sensibilidade à água é também importante para que a mistura betuminosa passe nos critérios de formulação. Segundo um estudo desenvolvido por Torres *et al.* (2015) a utilização de betumes modificados na regeneração de misturas com elevadas taxas de reciclagem apresenta melhorias no desempenho mecânico. Para este estudo utilizaram material fresado e polímeros (virgens – SBS, e reciclado – EVA). Após a devida caracterização, constatou-se que a incorporação de betumes modificados em misturas com elevadas taxas de reciclagem melhora a resistência à deformação permanente e a sensibilidade da água.

Ambientalmente, existe uma crescente pressão internacional para que sejam reduzidas as emissões de gases com efeito de estufa provenientes da produção das misturas betuminosas. Assim, uma das vantagens associadas ao uso dos polímeros (concretamente o PEAD) na

modificação de ligantes é a redução de emissões de gases poluentes da atmosfera, bem como a redução de energia utilizada (Araújo *et al.*, 2013).

Neste sentido, e tendo em conta que a reciclagem é uma das técnicas mais utilizadas nas misturas betuminosas, este sistema acarreta não só vantagens estruturais, mas também vantagens ambientais. Este método reduz as emissões de gases para a atmosfera. Segundo Kerkhof (2012), a utilização de uma mistura betuminosa reciclada com 50% de material fresado reduz o consumo da energia de produção em cerca de 14%, o que em termos de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivale a uma redução de 11%.

Contudo, apesar de a reciclagem ser frequentemente utilizada, também apresenta desvantagens. Entre elas destaca-se o fato da heterogeneidade presente no material fresado, e de na sua constituição ter presente betume que já se encontra envelhecido. A solução pode passar, entre outras, pela adição de um aditivo com função rejuvenescedora (Silva *et al.*, 2010).

De acordo com um estudo de Palha *et al.* (2014) foi estudada a incorporação de certos aditivos de maneira a obter características semelhantes aos betumes convencionais mais utilizados em Portugal. A utilização de óleos vegetais, rejuvenescedores, bem como aditivos comerciais em betumes, apresenta melhorias mecânicas e ambientais nas misturas betuminosas. Nesse estudo foi possível concluir que, quer em relação à sensibilidade à água, quer à resistência a deformação permanente, bem como na resistência a fadiga, estes aditivos apresentaram bastantes melhorias, comparativamente a uma mistura reciclada sem aditivos.

Desta forma, a utilização de misturas betuminosas recicladas com altas taxas de material fresado é cada vez mais uma opção tendo em conta que, mecanicamente, já vários estudos provaram que têm um bom desempenho, e ambientalmente também apresentam várias vantagens (redução de emissão de gases poluentes, redução de materiais novos a utilizar, redução de energia, entre outros).



### **3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

#### **3.1. Introdução**

O presente capítulo tem como objetivo definir os materiais e métodos experimentais usados ao longo desta dissertação, e ainda os procedimentos utilizados para a produção dos ligantes bem como das misturas betuminosas.

O subcapítulo 3.2 diz respeito aos materiais utilizados, tendo em conta a justificação quanto à sua utilização para a modificação do betume bem como para a realização deste trabalho. Refere-se ainda a proveniência dos materiais bem como as características dos agregados utilizados nas misturas.

Relativamente ao betume, no subcapítulo 3.3 menciona-se a preparação deste, bem como a quantidade de resíduos a incorporar. Ainda neste subcapítulo refere-se todos os ensaios de caracterização realizados ao betume, nomeadamente ensaio de penetração a 25 °C, temperatura de amolecimento, resiliência e ainda viscosidade rotacional.

Nos subcapítulos 3.4 e 3.5 descreve-se, respetivamente, a preparação das misturas betuminosas, as suas características volumétricas e os ensaios de caracterização mecânica.

Por último, mas não menos importante, no subcapítulo 3.6 descreve-se análise ambiental realizada às misturas, nomeadamente os ensaios de lixiviação.

#### **3.2. Materiais utilizados no estudo**

O presente estudo tem como principal objetivo avaliar o desempenho mecânico e a toxicidade (desempenho ambiental) resultante da introdução de resíduos nas misturas betuminosas. Sendo assim, é crucial a escolha dos resíduos a estudar, uma vez que atualmente já existem inúmeros resíduos introduzidos nas misturas betuminosas. Com base nos trabalhos desenvolvidos no Doutoramento da colega Sara Fernandes, optou-se por maximizar a utilização de resíduos (o pior cenário), usando: polímero reciclado PEAD, óleo de motor usado e material fresado.

Optou-se pelo plastómero polietileno de alta densidade (PEAD), uma vez que existe uma grande quantidade deste material no mercado, bem como o seu custo é reduzido. Este polímero é da gama dos reciclados e foi fornecido pela Gintegral Gestão Ambiental S.A.

Quanto ao óleo de motor usado, este é proveniente de veículos pesados, sem qualquer tipo de tratamento.

O material fresado foi fornecido pelo Grupo Elevo no âmbito de um projeto conjunto de investigação sobre reciclagem. Foi fresado de uma camada com características de desgaste na autoestrada A3, e encontra-se separado em duas frações, como se explica posteriormente.

Relativamente ao betume utilizado, optou-se por um betume convencional 35/50 da Cepsa, tendo em conta o seu baixo valor de penetração, e por se tratar de um betume corrente na pavimentação rodoviária.

Para a produção das misturas betuminosas, para além dos betumes modificados, são necessários agregados. Com a exceção do filer de origem calcária, os agregados seleccionados são de origem granítica. Tanto o filer como os agregados foram fornecidos pela empresa Bezerras, Lda.

Tendo em conta estes materiais, a quantidade de betume utilizado na mistura betuminosa será bastante reduzida, uma vez que o óleo de motor usado e o betume envelhecido do material fresado substituirão uma parte significativa do betume. As propriedades mecânicas das misturas serão melhoradas com a adição dos polímeros.

Após a indicação dos materiais usados, menciona-se a descrição dos métodos experimentais utilizados para todos os materiais utilizados

#### 3.2.1. Polímero a reciclar: polietileno de alta densidade (PEAD)

A caracterização do plastómero a reciclar ou polietileno de alta densidade (PEAD) foi realizada tendo em conta a sua dimensão, fornecida pelo fornecedor. Para a realização deste estudo, a dimensão máxima deste polímero foi de 4 mm.

#### 3.2.2. Óleo de motor usado

O óleo de motor usado foi caracterizado através do ensaio de viscosidade rotacional, segundo a norma EN 13302 e ainda foi realizada uma análise termogravimétrica (TGA).

Tendo em conta que o ensaio de viscosidade rotacional é tipicamente utilizado em betumes, este será descrito mais em pormenor posteriormente.

A análise termogravimétrica (TGA) consiste na avaliação da perda de massa às temperaturas de produção dos ligantes e da mistura. Caso não haja uma perda significativa de massa de óleo às temperaturas referidas, o óleo poderá ser usado com mais segurança. De um modo geral, através desta análise é possível ainda determinar os seguintes aspetos:

- Estabilidade térmica dos materiais;
- Vida útil estimada de um produto;
- Humidade e teor de voláteis de materiais;
- Decomposição cinética de materiais.

### 3.2.3. Material fresado a reciclar

Para o presente estudo é também importante caracterizar o material fresado, uma vez que este é composto por dois tipos de materiais: os agregados e o betume. Os agregados mantêm as características originais, variando apenas as suas dimensões. Relativamente ao betume, é necessário realizar uma análise mais profunda, tendo em conta que este foi submetido durante alguns anos às condições ambientais. Sendo assim, o material fresado será caracterizado quanto à sua granulometria, teor em betume e a ainda caracterização básica do betume envelhecido.

Segundo a norma EN 933-1, o método de peneiração consiste na separação, através de um conjunto de peneiros, de um material com diversas classes granulométricas de granulometria decrescente. Na Tabela 2 estão descritos os peneiros utilizados no presente estudo.

Tabela 2. Peneiros utilizados para análise granulométrica no presente estudo.

Peneiros (mm)											
22,4	20	16	14	12,5	10	6,3	4	2	0,5	0,125	0,063

Na análise granulométrica o material fresado foi dividido em duas frações (fração fina e fração grossa) com recurso ao peneiro de 8 mm. Esta separação é importante para se garantir a produção da mistura reciclada em condições mais favoráveis (apenas a fração grossa é aquecida, protegendo o betume da fração fina sem perder demasiada produtividade). Posteriormente, será necessário analisar tanto a granulometria como o teor de betume das duas frações do material fresado, efetuando-se a respetiva caracterização do betume envelhecido.

De facto, um dos aspetos importantes a determinar no material fresado é o teor de ligante. De acordo com a norma EN 12697-3 esta determinação tem por base a incineração do ligante.

Por último, a caracterização do betume envelhecido de cada fração do material fresado foi realizada com recurso a ensaios de penetração (EN 1426), ensaio “anel e bola” (EN 1427) e ensaio de viscosidade rotacional (EN 13302), que são descritos posteriormente.

### 3.3. Produção e caracterização do betume

Para o presente estudo a preparação dos betumes modificados foi realizada tendo em conta dois resíduos (óleo de motor usado e PEAD). Com base nos resultados obtidos no Doutoramento da colega Sara Fernandes, foram selecionadas as percentagens de óleo de motor usado e de polímero de alta densidade a serem adicionadas ao betume convencional 35/50, para produzir o betume BP10O20 modificado com resíduos. Este betume foi depois adicionado a um betume recuperado do material fresado (betume envelhecido), de forma a simular o betume final que existirá na mistura reciclada (50% de material fresado) com o betume modificado com resíduos (RBP5O10). Na Tabela 3 pode-se observar as percentagens de cada um dos betumes (novo e envelhecido) e resíduos (óleo de motor usado e PEAD) utilizados no estudo dos betumes.

Tabela 3. Percentagens dos resíduos utilizados na produção dos betumes em estudo.

Betume em estudo	Betume novo	Betume envelhecido	Óleo de motor usado	PEAD
B35/50	100%	-	-	-
BP10O20	70%	-	20%	10%
RBP5O10	35%	50%	10%	5%

De seguida passará a explicar-se a forma de preparação dos betumes mencionados. Ao betume convencional 35/50 foi adicionado inicialmente 10% de PEAD e 20% de óleo usado. Com recurso a um misturador de alto corte, a uma velocidade compreendida entre 6000 e 7200 rpm e a uma temperatura de 180°C durante 20 minutos, obteve-se assim o betume modificado BP10O20.

Posteriormente, num misturador de baixo corte, adicionou-se numa percentagem de 50/50 o betume anteriormente obtido a um betume envelhecido (recuperado do material fresado). Por consequência, as percentagens de PEAD e óleo baixaram para 5% e 10%, respetivamente. Como mencionado, este processo foi realizado num misturador de baixo corte, a uma velocidade de 350 rpm, durante 5 minutos. Este betume modificado que se prevê existir na mistura reciclada final designou-se por RBP5O10.

A caracterização dos betumes modificados é realizada visando um conjunto de ensaios que avaliam o seu comportamento a diferentes temperaturas. Tendo em conta o objetivo deste estudo, apenas se utilizaram os seguintes ensaios:

- Ensaio de penetração a 25 °C;
- Temperatura de amolecimento (anel e bola);
- Ensaio de resiliência;
- Ensaio de viscosidade dinâmica.

### 3.3.1. Ensaio de penetração a 25 °C

De acordo com a norma EN 1426, este ensaio consiste na penetração de uma agulha normalizada de 100 g, durante 5 segundos, numa amostra de betume, à temperatura de 25 °C. Na Figura 7 é possível observar as condições do ensaio.

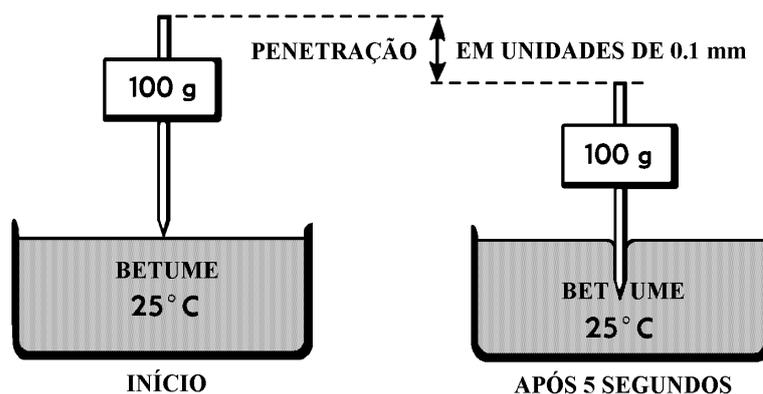


Figura 7. Ilustração do ensaio penetração a 25 °C (adaptado de Branco *et al.* (2011)).

O valor da penetração, em décimos de milímetro, é a profundidade que a agulha perfura na amostra de betume. Este ensaio é realizado 3 vezes, sendo que a penetração final é a média dos valores. Com a realização deste ensaio é também possível determinar indiretamente a rigidez e classificar o betume para temperaturas de serviço.

### 3.3.2. Temperatura de amolecimento (anel e bola)

O ensaio designado de temperatura de amolecimento anel e bola (Figura 8) permite avaliar o comportamento do betume a altas temperaturas de serviço, bem como fornece indiretamente a deformabilidade do mesmo.

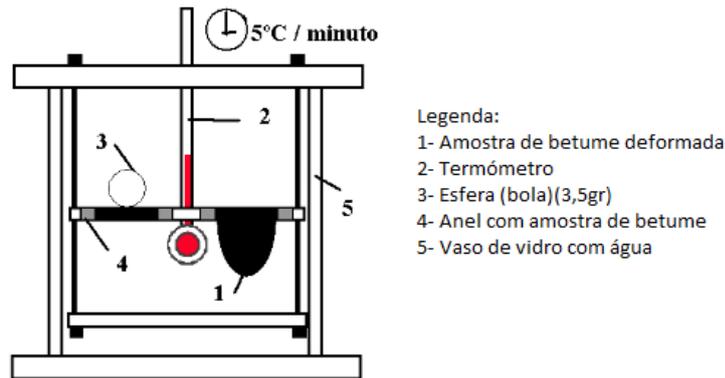


Figura 8. Ensaio de avaliação da temperatura de amolecimento (Branco *et al.*, 2011).

Tendo em conta a norma EN 1427, este método consiste em colocar uma amostra de betume num anel. Posteriormente é colocado uma esfera metálica sobre este, mergulhando-a de seguida em água. A cada minuto a temperatura da água será aumentada, e o betume irá começar a deformar-se até atingir a parte inferior do vaso, através da ação do peso da esfera. Quando a amostra toca na parte inferior do suporte, a temperatura registada é o ponto de amolecimento do betume (temperatura de amolecimento).

### 3.3.3. Ensaio de resiliência

Tendo por base a norma EN 13880-3, o ensaio de resiliência permite obter a recuperação elástica que o betume modificado possui após a aplicação de uma carga de penetração no mesmo à temperatura de serviço.

Este ensaio consiste na colocação de uma amostra de betume a uma temperatura de 25 °C sob um penetrómetro, impondo-se uma deformação de 10 mm ao betume com uma esfera metálica de 17 mm de diâmetro, a uma taxa de deslocamento de 1 mm/s (Figura 9). Em seguida, a amostra fica a recuperar durante 20 segundos, e é medida a recuperação elástica da mesma.



Figura 9: Ensaio de Resiliência

#### 3.3.4. Ensaio de viscosidade rotacional

O ensaio da viscosidade rotacional possibilita a determinação da resistência à deformação diferencial do betume a temperaturas mais elevadas (produção e compactação de misturas). Para a realização deste trabalho recorreu-se ao viscosímetro de *Brookfield* (Figura 9). Este equipamento permite avaliar a consistência de maneira mais precisa, uma vez que é possível executar o ensaio a diferentes temperaturas.



Figura 10. Equipamento *Brookfield* utilizado no ensaio de viscosidade rotacional.

Segundo a norma EN 13302, o ensaio da viscosidade consiste no movimento rotativo de um objeto cilíndrico (denominado *spindle*) no interior de uma amostra de betume. A viscosidade é medida e fornecida pelo equipamento de forma contínua, através da força de torque exercida entre a parede do *spindle* e o betume.

### 3.4. Preparação das misturas betuminosas

Posteriormente à preparação e caracterização dos ligantes utilizados no presente estudo, foi realizada uma mistura betuminosa com os respectivos ligantes de base e modificados. Estas misturas foram preparadas tendo em conta uma formulação de uma mistura convencional realizada no laboratório, previamente a este trabalho, com o betume base 35/50. Sendo assim, nessa formulação aferiu-se que a percentagem ótima de betume a utilizar era 5,0%, mantendo-se esse valor para a mistura convencional e reciclada com betume modificado para permitir uma melhor comparação das duas misturas.

As quantidades de cada tipo de agregado a utilizar em ambas as misturas, bem como a quantidade de material fresado e as temperaturas de mistura e compactação são apresentadas na Tabela 4. Para determinar a quantidade de agregado a incorporar em cada mistura betuminosa utilizou-se o fuso granulométrico da mistura AC 14 surf, imposto no Caderno de Encargos da EP (Figura 10). Deste modo, e de maneira a que o comportamento do novo material seja similar nas duas misturas, deve-se delimitar a curva granulométrica dos novos materiais a este fuso. Após o estudo das quantidades de material a incorporar em cada mistura, apresentadas na Tabela 4, obteve-se a curva granulométrica das misturas em estudo (Figura 11).

Tabela 4. Quantidade de cada um dos agregados novos a usar nas misturas betuminosas.

Material	Quantidade (%)	
	Mistura convencional	Mistura reciclada modificada
Pó 0/4	48,0	15,5
Brita 4/6	6,5	3,0
Brita 6/14	43,0	30,0
Filer	2,5	1,5
Material fresado	0,0	50,0
Temperatura de produção	165 °C	180 °C
Temperatura de compactação	145 °C	160 °C

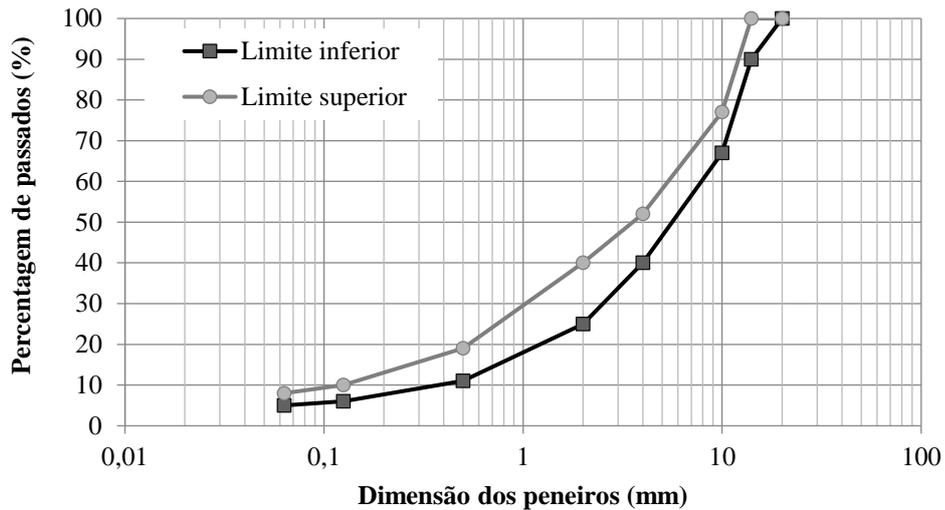


Figura 11. Fuso granulométrico da mistura betuminosa AC 14 surf.

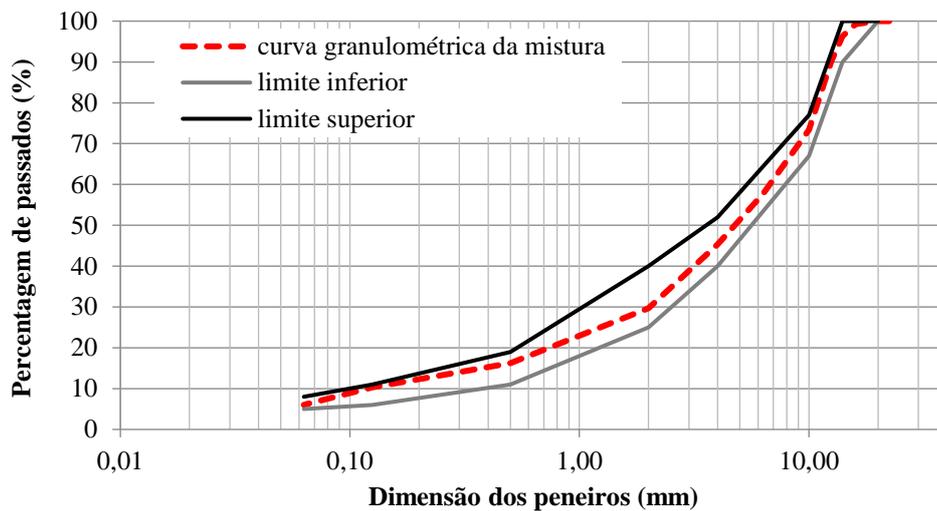


Figura 12. Curva granulométrica das misturas em estudo no fuso da mistura AC14 surf.

A produção das misturas betuminosas em questão foi realizada inicialmente com o betume base (mistura convencional) e posteriormente com o betume modificado com resíduos (mistura reciclada). Relativamente à mistura reciclada, esta foi produzida de forma a maximizar a utilização de resíduos, tendo em conta o material fresado, o PEAD e ainda o óleo usado. As percentagens finais de PEAD e óleo usadas nessa mistura foram 5% e 10%, respetivamente.

Para cada tipo de mistura foram obtidos seis provetes Marshall com dimensões de 6,3 cm de altura e 10,2 cm de diâmetro. Estes provetes foram compactados no compactador Marshall, com 75 pancadas em cada face. Além disso, compactou-se com cilindro uma laje com 4 cm de espessura para cada mistura, de forma a obter duas lajetas de  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  para o ensaio de pista.

Após a obtenção dos provetes de ensaio é fundamental avaliar o seu desempenho através do ensaio de sensibilidade à água, bem como com o ensaio de pista para avaliar a deformação permanente. Porém, é necessário primeiramente realizar uma análise volumétrica dos provetes em questão. Sendo assim, para a determinação das características volumétricas recorre-se à determinação da baridade máxima teórica (BMT) e da baridade aparente (BA).

### **3.5. Caracterização volumétrica e mecânica das misturas betuminosas**

#### 3.5.1. Caracterização volumétrica das misturas betuminosas

A produção de uma mistura betuminosa é um processo volumétrico, pois é necessário determinar o volume de betume e de agregado para que a mistura possua determinadas características.

A baridade máxima teórica (BMT) é determinada segundo a norma EN 12697-5 utilizando o procedimento A. Este procedimento consiste em utilizar um picnómetro no qual se coloca a mistura solta, fazendo-se várias medições de peso e volume de forma a avaliar a baridade da mistura sem vazios, após submeter o equipamento a uma força de vácuo. Todas as medições são feitas a uma temperatura de  $20 \pm 5$  °C para não influenciarem o resultado.

Dependendo do tipo de mistura, a baridade aparente (BA) pode ser obtida através de diversos métodos da norma EN 12697-6. Para o presente estudo, foi utilizado o método A, presente na mesma norma, que consiste em pesar o provete seco e de seguida imergir o provete em água para posterior pesagem. Para este ensaio é necessário verificar a temperatura da água quando os provetes estão submersos, uma vez que esta influência a baridade dos provetes.

Com os valores da baridade máxima teórica e da baridade aparente é possível determinar o volume de vazios das misturas. Em seguida, de modo a avaliar a aplicabilidade dos ligantes em estudo para a pavimentação rodoviária, deve-se realizar ensaios que avaliem as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. Para esse estudo, foi realizado o ensaio de sensibilidade à água e ainda o ensaio de deformação permanente, descritos de seguida.

#### 3.5.2. Ensaio de sensibilidade à água

Devido às diversas condições climáticas a que as misturas betuminosas estão sujeitas é importante avaliar a sua durabilidade. Sendo a água um dos agentes que mais danifica as

misturas, uma vez que diminui a adesividade entre o ligante e o agregado, que por consequente origina uma diminuição da rigidez ou da resistência da mistura, é essencial determinar a sensibilidade à água das misturas. Assim, o ensaio de sensibilidade à água tem como finalidade avaliar a resistência à água das misturas ou a sua durabilidade na presença de água.

De acordo com a norma EN 12697-12, para este ensaio são necessários seis provetes cilíndricos com características volumétricas semelhantes (baridade e altura). Os limites impostos para estas características são  $15 \text{ kg/m}^3$  e 5 mm, respetivamente. Após o fabrico, os provetes são separados em dois grupos (3 provetes cada). Um desses grupos, denominados provetes a “seco” é mantido ao ar a uma temperatura de  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por sua vez, o segundo grupo, denominados provetes “imersos”, são inicialmente submetidos a vácuo durante um período de 30 minutos, para garantir que todos os poros dos provetes são preenchidos pela água. Após este período, estes provetes são imersos em água a uma temperatura de  $40 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , durante 68 a 72 horas. Finalizada a etapa de condicionamento, e segundo a norma, os provetes são colocados ao ar ou em banho de água (consoante o grupo) a uma temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Por fim, os grupos de provetes são ensaiados à tração indireta, para se determinar a resistência à tração indireta dos provetes secos ( $\text{ITS}_d$ ) e imersos ( $\text{ITS}_w$ ).

De maneira a obter a resistência à tração indireta ( $\text{ITS}_R$ ) é realizado um quociente entre a resistência à tração indireta dos provetes imersos ( $\text{ITS}_w$ ) e a resistência à tração dos provetes secos ( $\text{ITS}_d$ ). Este valor utiliza-se como indicador da sensibilidade à água.

### 3.5.3. Ensaio de deformação permanente

O ensaio de deformação permanente pode ser realizado de diversas formas, sendo possível determinar a resistência através de cargas estáticas ou cargas rolantes. Para o presente trabalho foi realizado o ensaio de pista ou *Wheel Tracking Test* (WTT) para a análise da resistência à deformação permanente. De acordo com a norma EN 12967-22, este ensaio permite determinar a suscetibilidade das misturas betuminosas à deformação sob cargas a temperaturas de serviço mais altas. Assim sendo, o ensaio consiste na passagem repetida de uma roda sobre uma mistura betuminosa, medindo-se a profundidade que esta deixa. De uma forma geral, este ensaio simula a passagem de veículos, para ser possível antever o comportamento das misturas betuminosas.

Tendo em consideração a norma referida em cima, para este ensaio utilizou-se uma temperatura de ensaio de 50 °C, sendo a força de 700 N, com uma frequência de 0,44 Hz e ainda o número de ciclos aplicados foram de 10 000.

### **3.6. Análise ambiental das misturas betuminosas**

#### 3.6.1. Considerações iniciais

Tendo por base um dos objetivos principais deste trabalho, era imprescindível realizar uma análise ambiental às misturas estudadas, de modo a avaliar a viabilidade técnica e ambiental das mesmas. De facto, uma vez que a incorporação de resíduos nas misturas está cada vez mais em voga, é importante averiguar se esta opção não é prejudicial para a saúde humana nem para o meio ambiente.

Sendo assim, para esta análise recorreu-se essencialmente a ensaios de lixiviação que serão descritos em seguida. Também é importante referir que a realização destes ensaios só foi possível com o apoio do Centro de Valorização de Resíduos (CVR) localizado em Guimarães.

#### 3.6.2. Ensaio de lixiviação

Atualmente, a utilização de resíduos nas misturas betuminosas é cada vez mais frequente. Estes resíduos, por sua vez, podem conter metais pesados além de substâncias tóxicas, sendo importante comprovar que não existe perigo para a saúde pública, nem para o meio ambiente, resultantes da sua utilização. Neste contexto, os ensaios de lixiviação são usados para avaliar o risco de contaminação ambiental, proveniente dos resíduos, quando estas misturas entram em contacto com águas subterrâneas ou superficiais.

É importante referir que este ensaio apenas é realizado para materiais sólidos. Sendo assim, foi impossível analisar individualmente o óleo usado. Posto isto, foi analisada a mistura atrás mencionada (que inclui óleo usado, PEAD e material fresado) para que desta forma se obtivesse resultados possíveis de comparar com a mistura convencional (também analisada).

O ensaio de lixiviação foi realizado segundo a norma EN 12457-4. Este ensaio consiste em colocar uma amostra de mistura betuminosa, com um peso de 90 g, no interior de um recipiente fechado com 900 ml de água destilada (Figura 12).



Figura 13. Amostras dentro do recipiente com água destilada.

Posteriormente estas amostras são colocadas num aparelho rotativo (EQ LCR 8) e lá permanecem durante um período de 24 horas (Figura 13). Esta característica rotativa do equipamento permite que toda a amostra esteja constantemente em contacto com a água.



Figura 14. Equipamento rotativo com as respetivas amostras.

Após esse período, e seguindo a norma do ensaio, é necessário realizar duas filtrações, sendo que a primeira operação é realizada apenas para facilitar a segunda filtração:

- Filtro de papel, com ajuda de um funil (Figura 14);
- Filtro a 45, com recurso a bomba de vácuo (Figura 15).



Figura 15. Equipamento para filtragem com filtro de papel.



Figura 16. Equipamento para filtragem a 45.

Desta última operação resulta o eluato que, através do ensaio de espectroscopia de absorção atômica, foi analisada para quantificação dos metais pesados. Para a realização deste ensaio teve-se em conta o Decreto-Lei nº 183/2009, Anexo IV, Parte B, onde tem estipulado os valores limites de lixiviação.

A técnica de espectroscopia de absorção atômica é uma análise para determinar qualitativamente e quantitativamente a presença de metais pesados. Através da absorção de radiação por parte dos átomos, este ensaio determina a presença de um determinado elemento. Permite a análise a mais de 62 elementos.

Na Figura 16 é possível observar os componentes principais para o funcionamento da espectroscopia de absorção atômica, enquanto na Figura 17 é possível observar o equipamento onde se realiza o respetivo ensaio.



Figura 17. Componentes principais da espectroscopia de absorção atômica.



Figura 18. Equipamento para espectroscopia de absorção atômica.

De acordo com a *Royal Society of Chemistry* (RSC), esta técnica utiliza o princípio de que os átomos livres atomizados podem absorver radiação numa frequência específica. Os átomos, através da absorção de luz ultravioleta ou visível, fazem transições para níveis mais elevados de energia. A análise da concentração é determinada a partir de uma curva de trabalho, posteriormente à calibração do aparelho com os padrões de concentração da amostra.

Os resultados deste ensaio foram avaliados de forma comparativa entre a mistura convencional e com os diversos resíduos, de forma a avaliar se a introdução de resíduos potencia a libertação em metais pesados para o meio ambiente.



## **4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1. Introdução**

O presente capítulo tem como finalidade apresentar e analisar os resultados obtidos através dos ensaios realizados ao longo do trabalho. Desta forma é possível comparar as características dos betumes modificados com as características do betume convencional. Ainda neste capítulo avalia-se o desempenho mecânico e ambiental da mistura betuminosa reciclada produzida com betume modificado (com vários resíduos) em comparação com uma mistura convencional.

No subcapítulo 4.2 são apresentados e analisados todos os resultados obtidos na caracterização dos diferentes materiais utilizados neste estudo, incluindo o material fresado.

Relativamente à caracterização dos betumes modificados, no subcapítulo 4.3 serão apresentados os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados bem como a comparação entre o betume convencional e o betume modificado.

No subcapítulo 4.4 serão analisados os resultados do desempenho mecânico da mistura betuminosa reciclada modificada com o ligante modificado com resíduos, por comparação a uma mistura convencional. Por fim, no subcapítulo 4.5 serão apresentados os resultados da análise ambiental realizada às mesmas misturas.

### **4.2. Caracterização dos materiais utilizados nas misturas**

#### **4.2.1. Caracterização inicial do PEAD, do óleo usado e do betume**

É importante caracterizar os materiais utilizados na modificação do betume, para que desta forma se entenda o comportamento e assim analisar as alterações que possam surgir. Assim, de seguida apresenta-se a caracterização do polietileno de alta densidade (PEAD) e, em especial, do óleo de motor usado. De facto, tal como descrito no capítulo 3, o polietileno foi caracterizado apenas com base na sua dimensão máxima de 4,0 mm. Já o óleo de motor usado foi caracterizado através da viscosidade a diferentes temperaturas e por uma análise termogravimétrica (TGA).

A incorporação de óleo de motor nas misturas betuminosas tem como principal objetivo reduzir a quantidade de betume novo, bem como prevenir o seu envelhecimento. Assim, analisou-se a viscosidade para se analisar o seu comportamento a diferentes temperaturas (Figura 18).

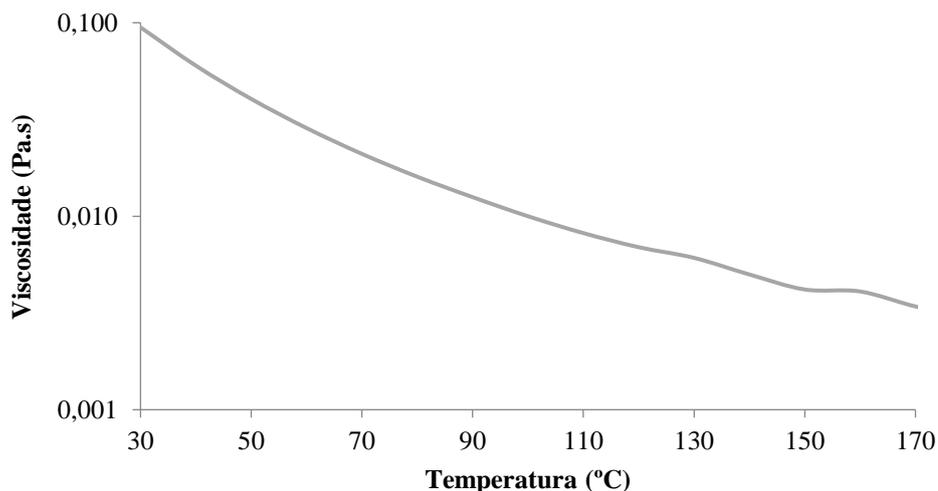


Figura 19. Resultados de viscosidade rotacional do óleo de motor usado.

É possível observar que a viscosidade ao longo de uma gama crescente de temperaturas vai diminuindo, indicando assim que é possível a introdução deste material nos betumes. Além disso, é notório que a viscosidade apresenta valores abaixo da viscosidade recomendada ao betume para a produção de misturas betuminosas (aproximadamente 0,3 Pa.s). É importante ainda constatar que, à temperatura de produção da mistura betuminosa do estudo (180 °C), este material atinge uma viscosidade de apenas 0,003 Pa.s. Os baixos valores da viscosidade do óleo permitirão a trabalhabilidade e adesividade do betume melhorando assim a sua aplicação no processo de produção das misturas betuminosas.

Ainda na caracterização do óleo foi realizada uma análise termogravimétrica (TGA) para posterior comparação com o betume (Figura 19).

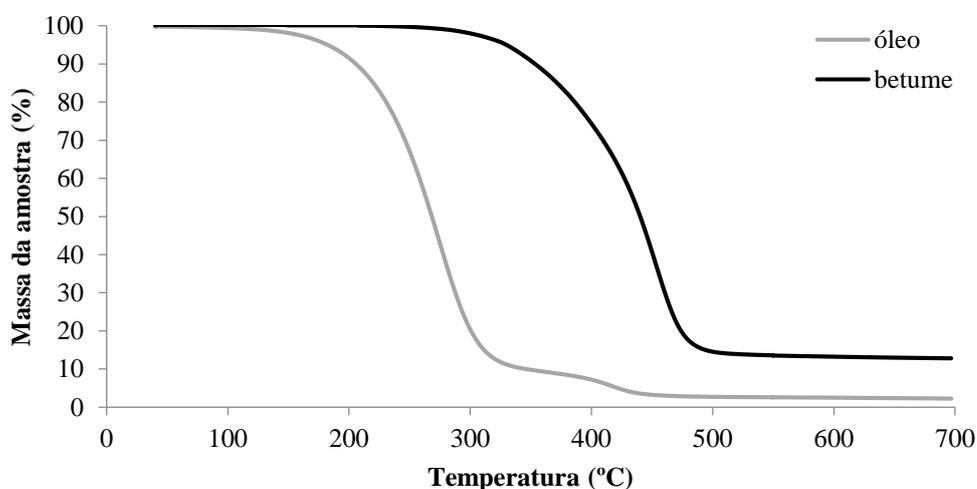


Figura 20. Resultados do ensaio TGA realizado ao óleo usado e ao betume 35/50.

No resultado do ensaio TGA observa-se que para uma temperatura de 200 °C (próximo da temperatura de produção das misturas betuminosas) o óleo tem uma perda de massa superior ao do betume. De facto, é importante referir que a essa temperatura de produção, o óleo já apresenta 9% de perda de massa, enquanto o betume só aos 300 °C é que começa a perder a sua massa ( $\approx 2\%$ ). Apesar disso, ambos os valores de perda são reduzidos e não comprometem a possibilidade de usar óleo em misturas betuminosas.

Verifica-se que para os dois materiais existe essencialmente um evento de perda de massa. Relativamente ao betume, a perda de massa principal ocorre aproximadamente entre os 300 e os 450 °C, e equivale a cerca de 87% da massa total. Por sua vez, o óleo apresenta uma perda de massa para uma temperatura mais baixa, entre 200 e 300 °C.

#### 4.2.2. Caracterização do material fresado

Após a caracterização do polímero bem como do óleo, passou-se à caracterização do material fresado. Inicialmente foi necessário conhecer a quantidade de material fresado a utilizar para cumprir o fuso da mistura AC 14 surf, e para isso recorreu-se à obtenção da curva granulométrica, dividindo assim o material em fração fina e fração grossa (Figura 20).

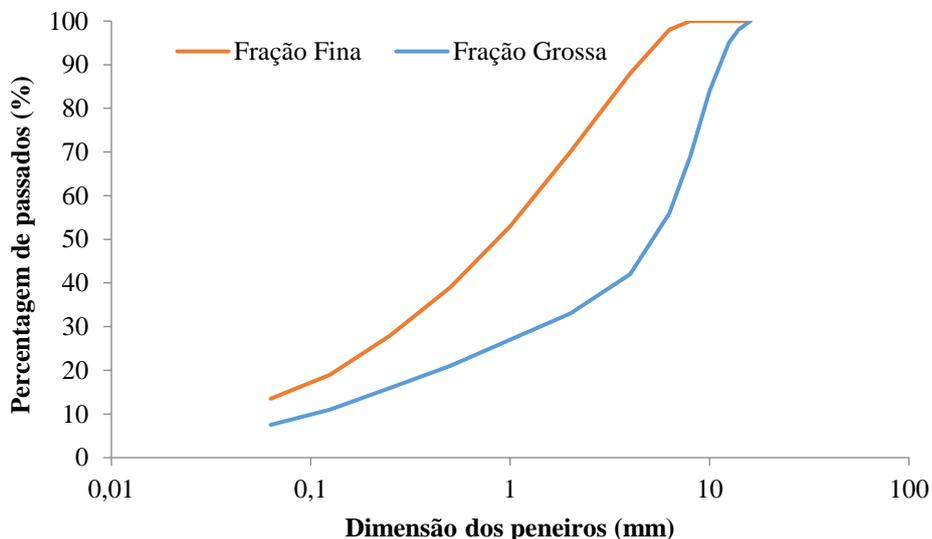


Figura 21. Distribuição do tamanho dos agregados das frações fina e grossa do material fresado.

Verificou-se que a quantidade de material fresado da fração fina é bastante superior à obtida na fração grossa. Assim, optou-se por utilizar na mistura reciclada 30% de material fresado fino e apenas 20% de material fresado grosso.

De seguida, para cada fração foi necessário determinar a quantidade de betume existente no material fresado, para que desta forma a quantidade de betume novo a introduzir seja calculada de forma mais rigorosa (Figura 21).

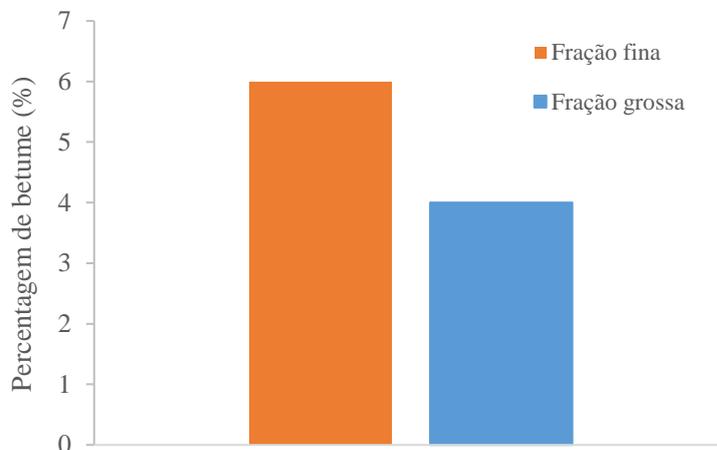


Figura 22. Teores em betume das frações fina e grossa do material fresado.

Da análise da figura anterior, observa-se que a fração fina do material fresado é a que contém uma quantidade superior de betume. Este facto pode ser explicado pelo tamanho da superfície específica dos agregados, pois a superfície na fração fina é maior do que na fração grossa, obrigando assim a que a concentração de betume nesta fração seja mais elevada. Assim, a fração fina não será aquecida para preservar esse betume. Os valores acima indicados ainda permitiram concluir que é necessário adicionar apenas 2,4% de betume modificado na mistura reciclada.

Posteriormente fez-se a caracterização básica do betume recuperado das frações de material fresado, através dos ensaios de penetração a 25 °C e do ensaio “anel e bola” (Figura 22).

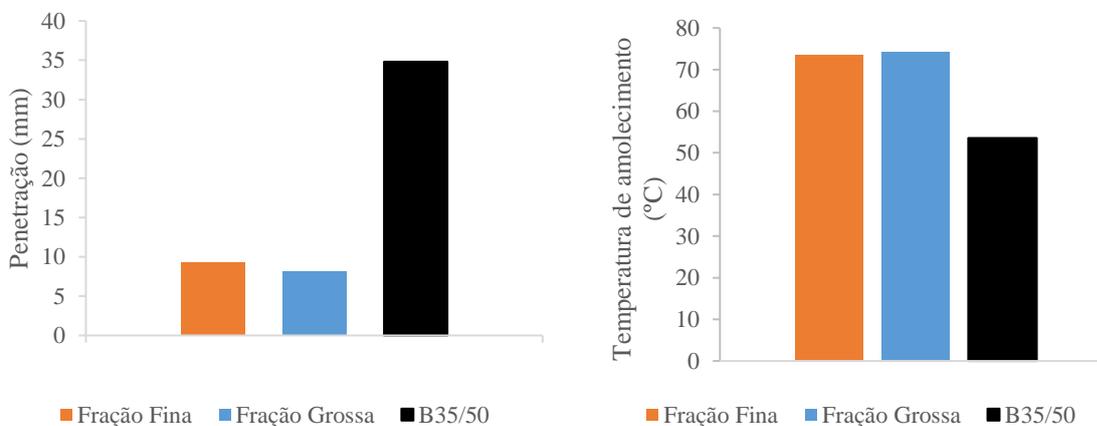


Figura 23. Penetração e temperatura de amolecimento do betume do material fresado.

No ensaio de penetração a 25 °C verifica-se que a gama de valores da penetração não é muito diferente, tanto na fração fina como na fração grossa, o que leva a concluir que os betumes são muito envelhecidos e evidentemente mais duros que o betume convencional 35/50. Apesar disso, observa-se que na fração fina o betume está menos envelhecido, o que é bastante positivo para a nova mistura reciclada a produzir, uma vez que esta fração tem uma maior quantidade de betume sujeito a um envelhecimento inferior do que a fração grossa.

Relativamente aos resultados da temperatura de amolecimento, estes confirmam a análise aos resultados da penetração, tendo em conta que os betumes com baixa penetração têm uma temperatura de amolecimento mais elevada, que ajuda a resistir à deformação permanente.

Por fim realizou-se a análise à viscosidade (Figura 23) de cada fração do material fresado.

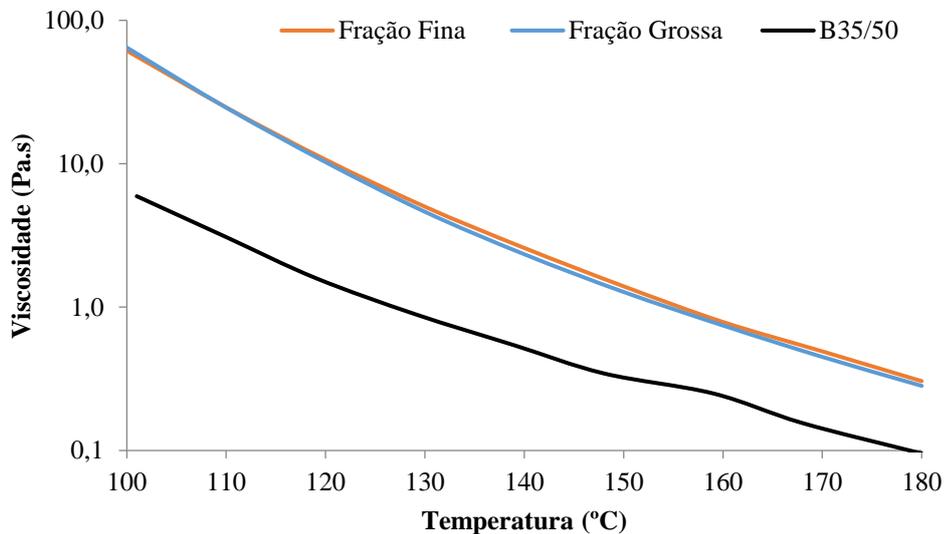


Figura 24. Resultados viscosidade dinâmica do betume existente no material fresado.

O betume recuperado do material fresado apresenta uma viscosidade muito superior ao betume convencional 35/50, tal como seria esperado. Volta a verificar-se propriedades próximas em ambas as frações, embora a fração fina seja ligeiramente mais viscosa nestas temperaturas.

#### 4.3. Caracterização dos betumes a utilizar nas misturas

De maneira a compreender o comportamento dos diferentes betumes modificados, realizaram-se os ensaios descritos no subcapítulo 3.3, nomeadamente o ensaio de penetração a 25 °C, o ensaio de temperatura de amolecimento, o ensaio de resiliência e o ensaio de viscosidade rotacional.

Como se pode observar na Figura 24, o betume modificado (BP10O20) apresenta uma penetração superior à do betume convencional (B35/50). Este aumento deve-se ao facto de o óleo atuar como rejuvenescedor, aumentando assim a componente volátil do betume, originando a diminuição da consistência do betume.

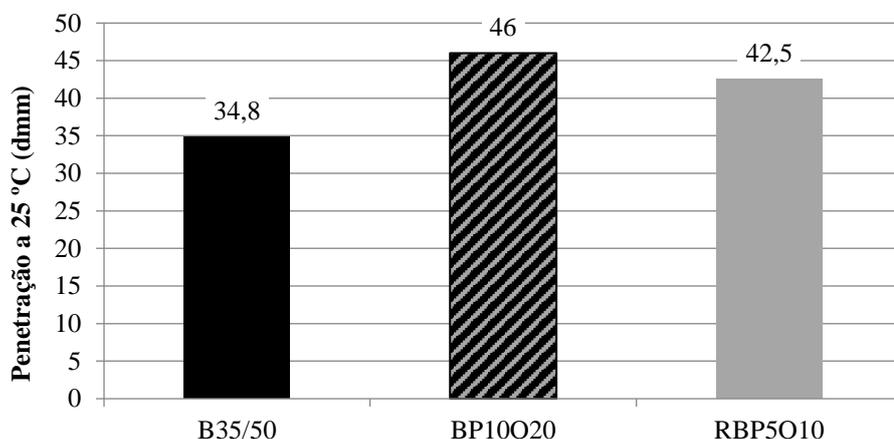


Figura 25. Resultados do ensaio de penetração dos betumes em estudo.

Relativamente ao betume modificado com incorporação de material fresado, este apresenta uma diminuição na penetração (quando comparada com betume modificado), uma vez que a interação do betume modificado com o betume envelhecido origina o restauro das propriedades do betume envelhecido. Desta forma o betume final apresenta uma diminuição da penetração.

Como se observou, a incorporação de óleo nos betumes origina o aumento dos valores do ensaio de penetração, e consequentemente deveria diminuir os valores da temperatura de amolecimento correspondentes. No entanto isso não aconteceu, como se observa na Figura 25.

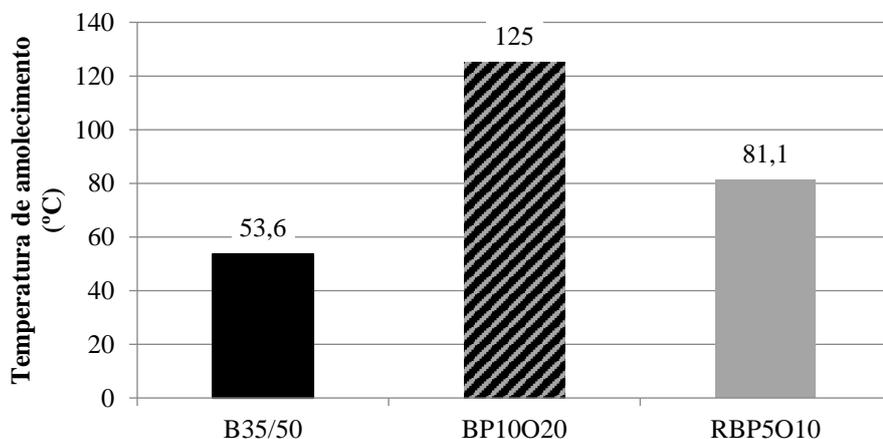


Figura 26. Resultados da temperatura de amolecimento dos betumes em estudo.

De facto, o valor da temperatura de amolecimento aumentou drasticamente no betume modificado com óleo e PEAD, o que aconteceu devido à percentagem muito elevada de polímero existente neste ligante modificado, que compensaram largamente a maior deformação causada pelo óleo. Assim, quando se adicionou este ligante ao betume recuperado do material fresado a temperatura de amolecimento baixou devido à menor concentração de polímero existente nesse betume final, mesmo sabendo que o betume envelhecido tem uma temperatura de amolecimento muito elevada.

Relativamente ao ensaio de resiliência, que está relacionado com a recuperação elástica dos ligantes após penetração, constata-se na Figura 26 que quanto maior for a quantidade de polímero no betume maior será a sua resiliência. De facto, o betume modificado com 10% de polímero e 20% de óleo (BP10O20) apresenta uma resiliência elevada quando comparado com o betume modificado RBP5O10. Apesar disso, todos os valores de resiliência são reduzidos, dado que o polímero PEAD não é um elastómero, e por isso não tem uma elevada capacidade de recuperação elástica que se poderia observar, por exemplo, com borracha.

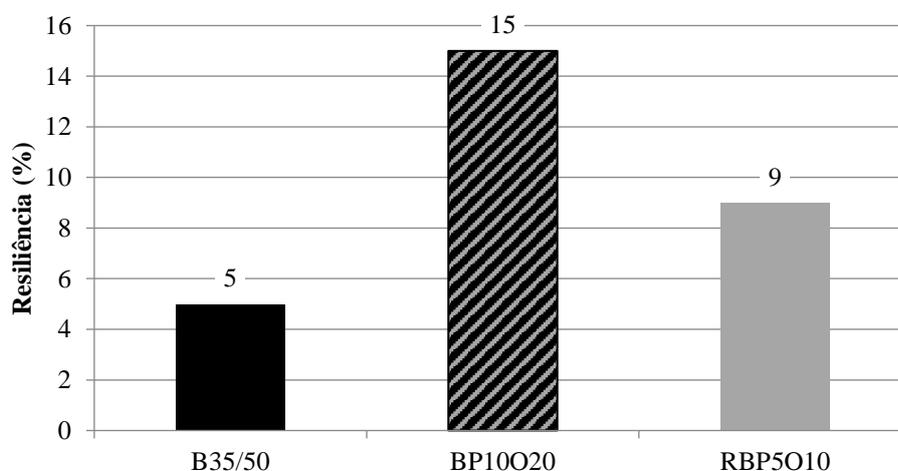


Figura 27. Resultados de resiliência dos betumes em estudo.

Finalmente, em relação à viscosidade, verificou-se que não foi possível ensaiar o betume BP10O20 devido à sua elevada viscosidade promovida pela elevada concentração de PEAD. É interessante verificar que o betume modificado final RBP5O10 apresenta uma viscosidade muito elevada a baixas temperaturas (inferiores a 130 °C, que corresponde à temperatura de fusão do polímero PEAD, aproximadamente). A uma temperatura de 180 °C (temperatura de produção da mistura) o betume apresenta uma viscosidade ligeiramente semelhante à do betume convencional (Figura 27).

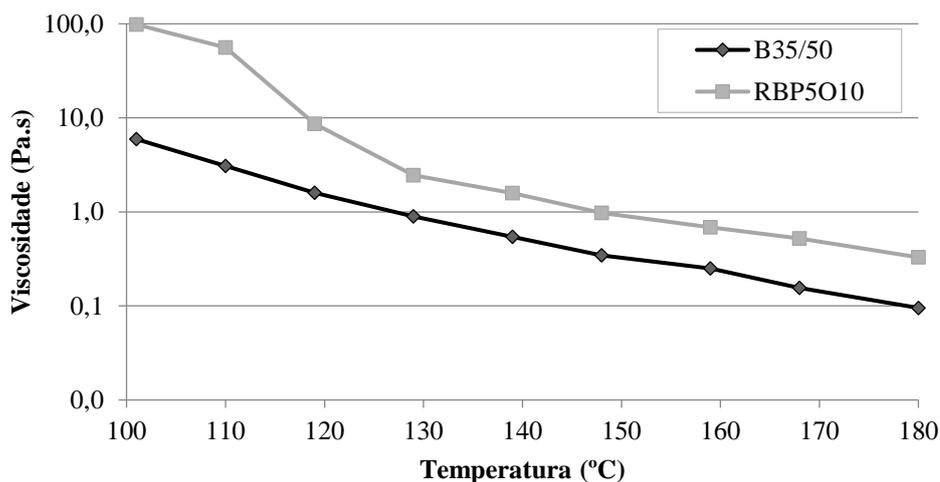


Figura 28. Resultados do ensaio de viscosidade rotacional dos betumes em estudo.

Assim, é importante notar que a utilização do betume modificado com elevada quantidade de óleo e polímero não será difícil de realizar caso se utilizem temperaturas de produção e compactação elevadas, mas há o problema de ser fundamental garantir que a temperatura de compactação nunca se aproxima muito de 130 °C em situações práticas.

#### 4.4. Comparação do desempenho mecânico das misturas betuminosas

Tendo em conta os resultados obtidos, o betume estudado (RBP5O10) foi utilizado para a produção da mistura betuminosa reciclada foi uma vez que apresenta resultados mecânicos aceitáveis para garantir um bom funcionamento da mistura betuminosa em causa.

Assim, foi produzida uma mistura betuminosa com 50% de material fresado, e com o betume modificado com 10% óleo e 5% de PEAD. De forma a avaliar o seu desempenho, esta mistura foi comparada com uma mistura betuminosa convencional (sem material fresado e com betume 35/50) tendo em conta os ensaios de sensibilidade à água e de deformação permanente. Dado que se está a comparar a nova mistura reciclada com a mistura AC14 surf (convencional), sua características volumétricas também foram comparadas. O Caderno de Encargos da EP (2014), refere que o volume de vazios destas misturas deve estar compreendido entre 3 e 5%.

##### 4.4.1. Sensibilidade à água das misturas betuminosas

Relativamente à mistura betuminosa convencional (AM-B ou 35/50) e à mistura reciclada (AM-RBP5O10), é possível observar os resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água, respetivamente nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura convencional.

Ensaio	Força máxima (kN)	Deformação média (mm)	ITS (kPa)	ITS média (kPa)	ITSR (%)	Volume de vazios (%)	Volume de vazios (%)
<i>ITS<sub>d</sub></i>	20,0		1909,6			3,4	
	21,1	2,12	2014,8	1924		3,0	
	19,4		1847,3		71	3,6	3,4
<i>ITS<sub>w</sub></i>	14,1		1346,3			2,9	
	13,8	2,09	1317,9	1362		3,6	
	14,9		1422,5			3,5	

Tabela 6. Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com resíduos.

Ensaio	Força máxima (kN)	Deformação média (mm)	ITS (kPa)	ITS média (kPa)	ITSR (%)	Volume de vazios (%)	Volume de vazios (%)
<i>ITS<sub>d</sub></i>	14,9		1431,4			5,8	
	14,8	2,05	1443,0	1406		5,9	
	13,7		1345,1		66	5,8	5,9
<i>ITS<sub>w</sub></i>	9,7		940,6			5,5	
	9,1	2,02	893,2	925		5,6	
	8,2		939,8			6,6	

Tendo em conta os resultados das tabelas anteriores foi possível traçar o gráfico da Figura 26, relativo aos valores de ITS e respetiva deformação dos provetes secos.

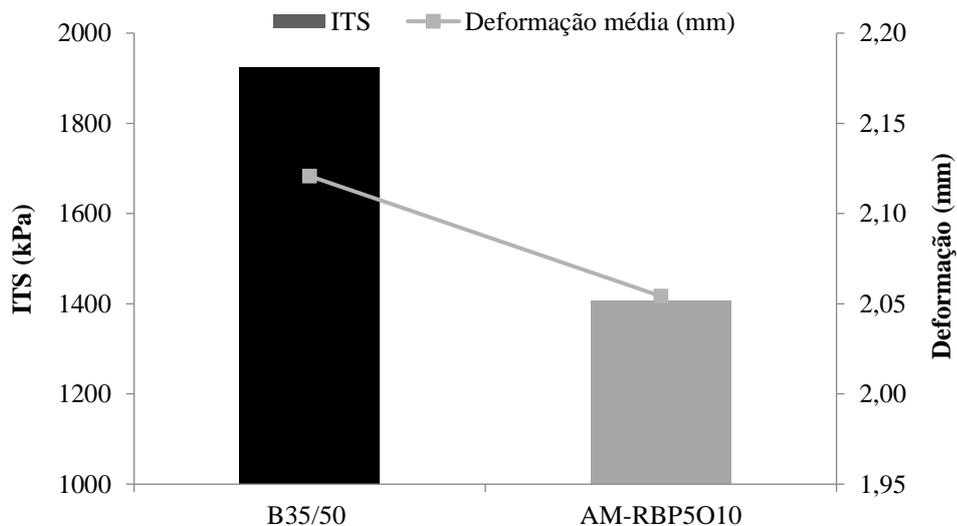


Figura 29. Valores de ITS e de deformação dos provetes secos das misturas em estudo.

Neste gráfico verifica-se que, comparativamente com a mistura convencional, os valores da resistência à tração indireta (ITS) da mistura reciclada são bastante inferiores. Uma vez que na mistura reciclada houve uma diminuição de betume novo, sendo substituído por óleo usado e betume envelhecido (proveniente do material fresado), a diferença de valores poderá dever-se a este fator. Para explicar esse resultado tem especial relevo o efeito que o óleo tem na redução da penetração do ligante. Apesar disso, relativamente à deformação, a mistura reciclada apresenta melhores valores (inferiores) comparativamente à mistura convencional, como resultado da utilização do polímero e do material fresado.

Analisando o rácio da resistência à tração indireta (ITSR) dos provetes secos e molhados, e tendo em conta que este indica a sensibilidade à água das misturas, verifica-se que a nova mistura reciclada em estudo apresenta um valor de sensibilidade à água (Figura 29) ligeiramente inferior à mistura convencional, o que é uma pequena desvantagem desta solução.

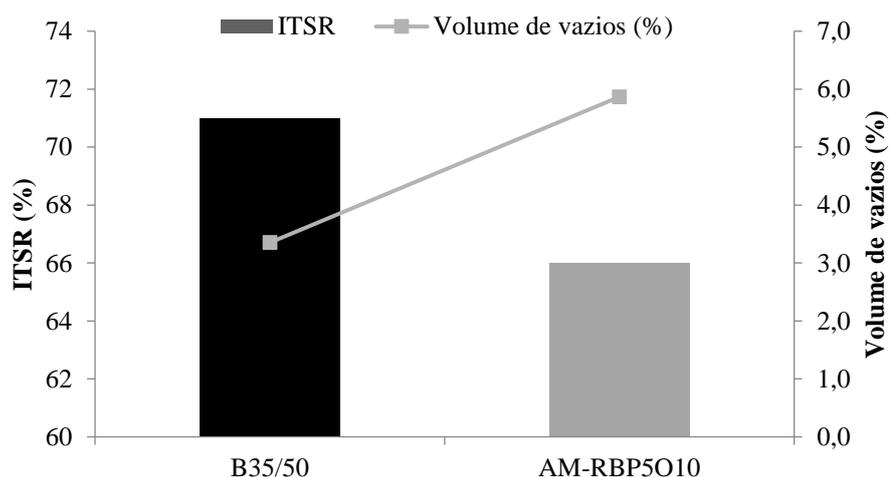


Figura 30. Sensibilidade à água (ITSR) e volume de vazios das misturas em estudo.

O volume de vazios da mistura reciclada modificada é bastante superior ao da mistura convencional, o que ajuda a justificar a sua maior sensibilidade à água. Assim, para melhorar estas propriedades da mistura reciclada é necessário melhorar a sua trabalhabilidade.

#### 4.4.2. Resistência à deformação permanente das misturas betuminosas

De modo a garantir um bom desempenho das misturas betuminosas, deve-se avaliar ainda a resistência à deformação permanente. Nos países de climas quentes este ensaio tem particular importância, tendo em conta que os betumes a temperaturas elevadas têm tendência a reduzir a sua viscosidade, e devido à ação das cargas dos veículos deformam-se bastante.

Na Figura 30 é possível observar a evolução da deformação de cada uma das misturas betuminosas ao longo dos diversos ciclos de carga. Da análise da referida figura constata-se que a mistura modificada AM-RBP5O10 apresenta uma deformabilidade muito menor quando comparada com a mistura convencional, o que confirma e reforça os resultados obtidos no ensaio de “anel e bola”.

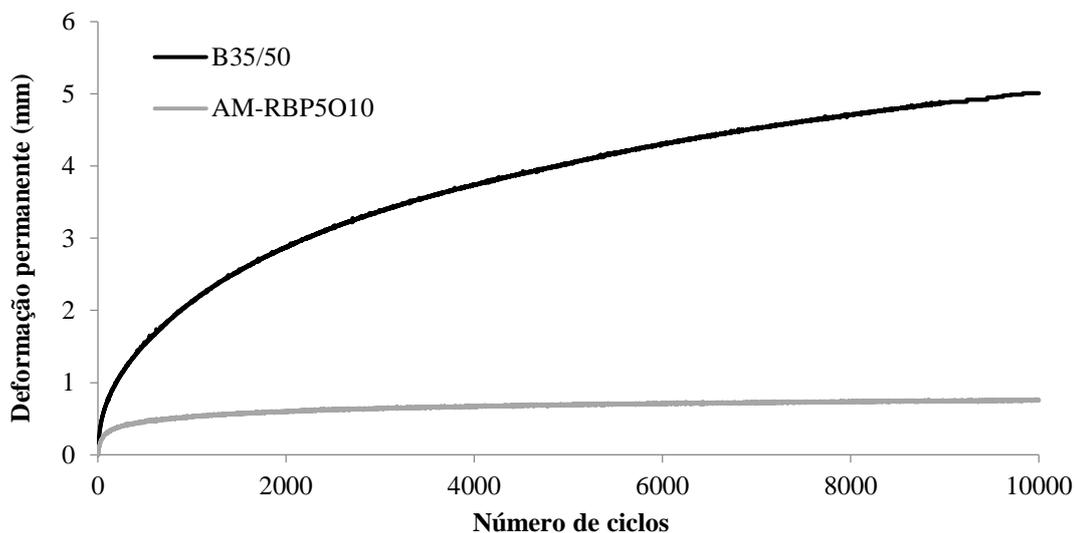


Figura 31. Deformação em função do número de ciclos de carga obtida no ensaio de pista para as duas misturas em estudo.

Após a análise dos dados mencionados anteriormente, a mistura reciclada modificada com óleo e polímero apresenta, comparativamente com a mistura convencional, um excelente desempenho à deformação permanente.

Uma vez que se demonstrou que a mistura betuminosa modificada desenvolvida neste trabalho apresenta um bom desempenho, com um excelente desempenho relativamente à resistência à deformação permanente e apenas com um ligeira redução de durabilidade determinada no ensaio de sensibilidade à água, avançou-se então para a análise ambiental.

#### 4.5. Comparação do desempenho ambiental das misturas betuminosas

##### 4.5.1. Limites legais para controlo dos lixiviados

Os ensaios de lixiviação têm como objetivo essencial determinar até que ponto os resíduos utilizados para a modificação das misturas são prejudiciais tanto para o ecossistema como para a saúde pública. Estes ensaios são de extrema importância, uma vez que determinam a presença

de metais pesados nestas misturas e assim avaliam a possibilidade de se poder utilizar ou não nas misturas betuminosas. Como já foi referido, para a realização destes ensaios recorreu-se ao Centro de Valorização de Resíduos (CVR) em Guimarães.

De acordo com o Decreto-Lei nº 183/2009, Anexo IV, Parte B, os metais pesados que devem ser analisados para controlo dos lixiviados são os apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores limite dos metais pesados para controlo dos lixiviados (Ambiente, 2009).

<b>Componente</b>	<b>Matéria seca (mg/kg)</b>
Arsénio (As)	0,5
Bário (Ba)	20
Cádmio (Cd)	0,04
Crómio (Cr total)	0,5
Cobre (Cu)	2
Mercúrio (Hg)	0,01
Molibdênio (Mo)	0,5
Níquel (Ni)	0,4
Chumbo (Pb)	0,5
Antimônio (Sb)	0,06
Selénio (Se)	0,1
Zinco (Zn)	4
Cloreto	800
Fluoreto	10
Sulfato	1000
Índice de Fenol	1
COD	500
SDT	4000

Para o presente estudo apenas foram estudados alguns dos metais pesados presente na tabela anterior, sendo eles Pb, Cr, Cd, Ni, Cu e Zn, uma vez que são os mais prováveis de se encontrar nas misturas betuminosas. Tendo em conta os limites impostos pelo referido documento foi possível comparar os resultados obtidos para as duas misturas.

#### 4.5.2. Ensaios de lixiviação das misturas betuminosas em estudo

Tendo em conta o procedimento descrito no Capítulo 3 obteve-se os eluatos das misturas convencional (AM-B) e modificada com resíduos (AM-RBP5O10). Na Tabela 8 é possível observar que ambas as misturas cumprem os limites impostos para a totalidade dos metais

pesados em estudo. É importante referir que durante a análise de alguns dos metais teve-se que repetir o procedimento uma vez que não apareciam valores, mas mesmo assim o resultado era idêntico. Daí que na Tabela 8 alguns dos resultados aparecem com o símbolo de inferior a (<), uma vez que o resultado obtido é inferior ao limite imposto pela especificação, e porque o equipamento não apresenta o rigor necessário para o quantificar.

Tabela 8. Resultados da análise química dos eluatos das duas misturas em estudo.

Parâmetros	Especificação	Resultados (mg/kg)	
		Mistura convencional	Mistura com resíduos
Cádmio (Cd)	0,04	<0,04	<0,04
Crómio (Cr total)	0,50	<0,50	<0,50
Cobre (Cu)	2,00	0,42	0,64
Níquel (Ni)	0,40	<0,30	<0,30
Chumbo (Pb)	0,50	<0,30	<0,30
Zinco (Zn)	4,00	0,12	0,46

De forma a verificar se a introdução de resíduos altera os resultados dos lixiviados, procedeu-se à comparação entre as duas misturas em estudo, para os metais que foram detetados, nomeadamente cobre (Cu) e zinco (Zn). Na Figura 31 observa-se a comparação, a nível percentual, entre as misturas e os referidos valores com os limites impostos.

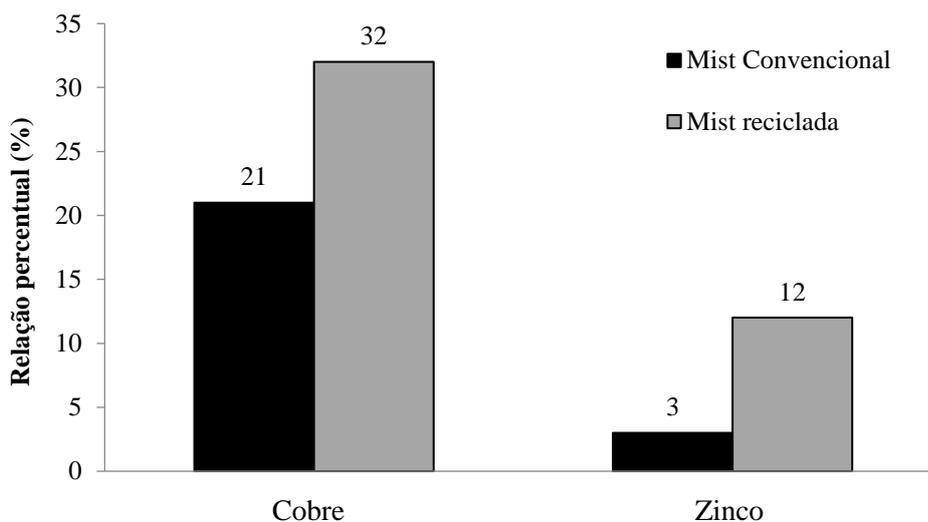


Figura 32. Relação percentual entre os metais pesados existentes nas misturas em estudo e os limites especificados.

É possível verificar através da figura anterior, que a mistura reciclada apresenta maiores percentagens de cobre e zinco do que a mistura convencional. Tendo em conta que a mistura reciclada apresenta resíduos de óleo usado e polímero e ainda material fresado era esperado este facto acontecer, uma vez que estes resíduos ao longo da sua vida útil estão sujeitos a diversas formas de contaminação.

Concluindo, a mistura betuminosa modificada desenvolvida neste trabalho apresenta um bom desempenho mecânico. Tanto o polímero usado (PEAD), bem como o óleo e o betume envelhecido contribuem para que o desempenho final do ligante e da mistura seja bom. Assim, comparativamente com a mistura convencional, esta apresenta melhores resultados na caracterização do betume e resultados semelhantes ao nível da sensibilidade à água. Outro aspeto importante de referir é que a resistência à deformação permanente da mistura modificada é bastante melhor do que a mistura convencional.

Como foi possível demonstrar, é possível utilizar esta mistura modificada em detrimento da mistura convencional, sendo que também a nível ambiental não há perigosidade nem para o ecossistema nem para a saúde pública.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusões

Com base nos objetivos do presente estudo, que compreendiam a determinação da toxicidade presente nos resíduos incorporados nas misturas betuminosas, pode-se concluir que esta foi observada, sendo que a presença de metais pesados se encontrava abaixo dos limites impostos. Assim, para este estudo, inicialmente estudou-se o desempenho de betumes com 5% de polímero (PEAD), 10% de óleo usado e ainda material fresado (numa percentagem de 50%).

De acordo com o estudo dos resultados dos betumes modificados constata-se que ambos os resíduos apresentam um bom desempenho. A análise ao óleo mostra que a sua viscosidade vai diminuindo, o que evidencia a possibilidade da introdução deste material no betume, permitindo assim a trabalhabilidade e adesividade do mesmo. Por sua vez, o polímero PEAD aumenta a viscosidade do betume. Assim sendo, é possível aumentar a utilização conjunta destes resíduos. Relativamente ao material fresado, foi utilizada uma quantidade elevada de 50%, para que se reduzisse a quantidade de betume novo a introduzir, tendo em conta também a incorporação dos resíduos atrás mencionados. O material fresado fez com que a viscosidade do betume aumentasse comparativamente ao betume convencional utilizado (B35/50).

No que respeita aos ligantes, os betumes modificados BP10O20 e RBP5O10 apresentam uma penetração relativamente semelhante a um betume 35/50, o que é muito positivo tendo em conta a elevada percentagem tanto de óleo usado, bem como de PEAD.

A incorporação de óleo usado nos betumes origina que a penetração aumente e a temperatura de amolecimento diminua. No entanto, quando comparado com o ligante sem betume recuperado, o betume RBP5O10 apresenta uma diminuição da penetração devido à incorporação de betume envelhecido (material fresado), bem como a diminuição de percentagens de óleo e PEAD. O PEAD permitiu aumentar drasticamente a temperatura de amolecimento dos betumes modificados, o que compensou largamente o efeito contrário causado pelo óleo. No caso da resiliência, e tendo em conta que uma maior quantidade de polímeros faz com que esta aumente, no primeiro ligante (com maior concentração de PEAD) observa-se uma resiliência mais elevada. Relativamente à viscosidade, o ligante RBP5O10, a baixas temperaturas, apresenta valores de viscosidade superiores comparativamente a um ligante convencional, em especial pela presença de polímeros neste ligante.

No que respeita à mistura final, tal como seria de esperar devido aos resultados obtidos anteriormente, esta apresenta um bom desempenho quando comparadas com a mistura convencional. Para a produção desta mistura, utilizou-se o ligante RBP5O10, uma vez que apresenta um bom desempenho e, comparativamente ao ligante convencional, mostra resultados melhorados. A mistura reciclada AM-RBP5O10, produzida com o ligante modificado, evidenciou uma sensibilidade à água ligeiramente superior à mistura convencional, sendo esse o aspeto menos positivo dessa mistura. Apesar disso, como apresenta uma resistência à deformação permanente muito superior em comparação com a mistura convencional, considera-se que o seu desempenho mecânico é muito satisfatório.

Tendo em conta o objetivo principal deste trabalho, e concluindo que esta solução apresenta bons resultados mecanicamente, procedeu-se então à análise ambiental. De facto, a introdução do material fresado, do óleo usado e de PEAD acarreta uma maior contaminação com metais pesados para a nova mistura, tendo em consideração a exposição destes resíduos. No entanto, os ensaios de lixiviação demonstram que os resultados obtidos se encontram abaixo dos limites impostos. Desta forma, é possível concluir que a incorporação destes resíduos não acarreta problemas nem para o ecossistema nem para a saúde pública.

Além de resolver problemas de valorização de resíduos, a utilização de betumes modificados com óleos usados e PEAD em misturas recicladas é uma solução exequível no desenvolvimento sustentável da pavimentação rodoviária, com vantagens e sem efeitos ambientais.

## **5.2. Trabalhos futuros**

O trabalho desenvolvido nesta Dissertação de Mestrado permitiu desenvolver conhecimentos num domínio que ainda não tinha sido muito explorado. Até então, apenas foram realizados estudos para avaliar a toxicidade de materiais de construção no geral, como seja, por exemplo, o betão, materiais contendo amianto, materiais radioativos, entre outros. Poucos são os estudos conhecidos na modificação do betume com resíduos.

Assim, é importante que novos estudos ambientais sejam realizados a diferentes resíduos incorporados na modificação do betume, para que desta forma seja cada vez mais possível a utilização destas misturas na pavimentação. Aliado a este fator está também a análise económica destas soluções com resíduos. A transposição destas soluções para trechos experimentais em estrada também é desejável a curto prazo.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abreu, L., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2013). *Fomulação e caraterização de ligantes numa mistura betuminosa com uma taxa de reciclagem elevada*.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 984-989.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials & Design*, Vol. 32 (10), pp. 4844-4849.
- Ambiente, M.d. (2009). Decreto-Lei n.º 183
- APA (2015). *Resíduos Urbanos. Relatório Anual 2014*, Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. Departamento de Resíduos, Amadora.
- Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2013). *Avaliação da influencia da camada de desgaste na sustentabilidade dos pavimentos rodoviários*.
- Baptista, A.M.C. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição Para o Seu Estudo e Aplicação. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra*.
- Bluyssen, P.M., de Oliveira Fernandes, E., Groes, L., Clausen, G., Fanger, P.O., Valborn, O., Bernhard, C.A.a.R., C.A. (1996). "European indoor air quality audit project in 56 office buildings". *Indoor Air*, 6, pp. 221-238.
- Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2011). "Pavimentos Rodoviários ". Edições Almedina.
- Butera, S., Christensen, T.H., Astrup, T.F. (2014). Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 276, pp. 302-311.
- Care, H. (2007). *Toxic Chemicals in Building Materials-An Overview for Health Care Organizations*.
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A., Gilchrist, M.D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52 (10), pp. 1167-1174.
- Costa, L., Fernandes, S., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. (2013). Valorização de resíduos plásticos na modificação de betumes para pavimentos rodoviários.
- Coutinho, F.M.B., Mello, I.L., Maria, L.C.d.S. (2003). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*
- Del Rey, I., Ayuso, J., Galvín, A.P., Jiménez, J.R., López, M., García-Garrido, M.L. (2015). Analysis of chromium and sulphate origins in construction recycled materials based on leaching test results, *Waste Management*, Vol. 46, pp. 278-286.
- Duong, T.T.T., Lee, B.-K. (2011). Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics, *Journal of Environmental Management*, Vol. 92 (3), pp. 554-562.
- EAPA (2014). *Asphalt in Figures 2014, European Asphalt Pavement Association*.
- EEA (2015). *Air quality in Europe — 2015 report*, European Environment Agency, Copenhaga.
- EP, E.d.P. (2014). Caderno de Encargos Tipo Obra, Pavimentação Capítulo 1403.pdf.
- EPA, U.S.E.P.A. (1998). Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States.
- Fernandes, G., Capitão, S., Picado-Santos, L. (2013). *Utilização de Resíduos de Construção e Demolição em pavimentos rodoviários*.
- Fernandes, S., Costa, L., Silva, H., J.Oliveira, Machado, A., Duarte, F. (2015). Can oil, plastic and RAP wastes have a new life in novel asphalt mixtures?

- Freije, A.M. (2015). Heavy metal, trace element and petroleum hydrocarbon pollution in the Arabian Gulf: Review, *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, Vol. 17, pp. 90-100.
- Freire, A.C. (2004). *Palestra sobre Agregados para Misturas Betuminosas*.
- Fuentes-Audén, C., Martínez-Boza, F.J., Navarro, F.J., Partal, P., Gallegos, C. (2007). Formulation of new synthetic binders: Thermo-mechanical properties of recycled polymer/oil blends, *Polymer Testing*, Vol. 26 (3), pp. 323-332.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Gallegos, C. (2006). Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, *Fuel*, Vol. 85 (7-8), pp. 936-943.
- Halliwell, S.M. (2002). *Polymer in Building and Construction*.
- Hingston, J.A., Moore, J., Bacon, A., Lester, J.N., Murphy, R.J., Collins, C.D. (2002). The importance of the short-term leaching dynamics of wood preservatives, *Chemosphere*, Vol. 47 (5), pp. 517-523.
- Hınısliođlu, S., Ađar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, Vol. 58 (3-4), pp. 267-271.
- Interior, U.S.D.o.t., Survey, U.S.G. (2011). *Coal-Tar-Based Pavement Sealcoat, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), and Environmental Health*.
- Jalali, M., Merikhpour, H., Kaledhonkar, M.J., Van Der Zee, S.E.A.T.M. (2008). Effects of wastewater irrigation on soil sodicity and nutrient leaching in calcareous soils, *Agricultural Water Management*, Vol. 95 (2), pp. 143-153.
- Jia, X., Huang, B., Bowers, B.F., Zhao, S. (2014). Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues, *Construction and Building Materials*, Vol. 50, pp. 683-691.
- Jornal Oficial da UE (2014). *Deciso da Comisso 2014/955/UE*, Bruxelas.
- Kalantar, Z.N., Karim, M.R., Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 55-62.
- Kaur, K., Swamy, A.K., Das, A. (2013). Constituent Proportioning in Recycled Asphalt Mix with Multiple RAP Sources, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 104, pp. 21-28.
- Kerkhof, E.V.d. (2012). *Warm waste asphalt recycling in Belgium - 30 years of experience and full confidence in the future*.
- Kofteci, S. (2016). Effect of HDPE Based Wastes on the Performance of Modified Asphalt Mixtures, *Procedia Engineering*, Vol. 161, pp. 1268-1274.
- Kulakowski, M.P., Brehm, F.A., Kazmierczak, C.d.S., Maciel, E.F., Lunckes, M. (2016). *Avaliao Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resduos: Lixiviao e Solubilizao*.
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 145 (1-2), pp. 42-82.
- Lesueur, D., Youtcheff, J. (2013). *Chapter 24. Asphalt*, Environmental Degradation of Advanced and Traditional Engineering Materials.
- LNEC (2012). *RESDUOS DE CONSTRUO E DEMOLIO*  
*Atividade desenvolvida no LNEC*.
- Maggi, C.F., Freitas, P.S.L.d., Sampaio, S.C., Dieter, J. (2010). *Lixiviao de nutrientes em solo cultivado com aplicao de gua residual de suinocultura*.
- Mahler, B.J., Van Metre, P.C., Foreman, W.T. (2014). Concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and azaarenes in runoff from coal-tar- and asphalt-sealcoated pavement, *Environmental Pollution*, Vol. 188, pp. 81-87.
- Marofi, S., Shakarami, M., Rahimi, G., Ershadfath, F. (2015). Effect of wastewater and compost on leaching nutrients of soil column under basil cultivation, *Agricultural Water Management*, Vol. 158, pp. 266-276.

- Metre, P.C.V., Mahler, B.J., Wilson, J.T. (2008). *PAHs Underfoot: Contaminated Dust from Coal-Tar Sealcoated Pavement is Widespread in the United States*.
- Neves, J.M.C., Correia, A.G. (2006). *Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaios de Tracção Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos* Publicação nº26, Universidade do Minho Guimarães.
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Jesus, C.M.G. (2011). *ASPHALT MIXTURES PRODUCED WITH 100% RECLAIMED MATERIALS*
- Pais, J., Pereira, P., Azevedo, M.d.C.M. (2000). *1º Congresso Rodoviário Portugues - Ensaios mecânicos para caraterização de misturas betuminosas*.
- Pais, J., Pereira, P., Gardete, D., Minhoto, M. (2008). *O comportamento de misturas betuminosas com betume modificado com borracha 5º Congresso Luso- Moçambicano de Engenharia, Moçambique, Maputo, 2 a 4 de Setembro, 2008*.
- Palha, D., Fonseca, P., Guimarães, C., Abreu, L., Silva, H., Oliveira, J., Pereira, P. (2014). *Avaliação do desempenho de misturas betuminosas recicladas com elevadas taxas de material fresado*.
- Peralta, J., Williams, R.C., Silva, H.M.R.D., Machado, A.V. (2013). *Combining asphalt-rubber (AR) and fast-pyrolysis bio-oil to create a binder for flexible pavements*.
- Pernagorda, P.J.R. (2007). Phd Thesis Paulo Ramísio.
- PlasticsEurope (2014). *Plastics - The facts 2014*, Association of plastic manufacturers, Bruxelas.
- Pradyumna, T.A., Mittal, A., Jain, P.K. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 104, pp. 1149-1157.
- Saca, N., Dimache, A., Radu, L.R., Iancu, I. (2015). Leaching behavior of some demolition wastes, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, pp. 1-8.
- Schwab, O., Bayer, P., Juraske, R., Verones, F., Hellweg, S. (2014). Beyond the material grave: Life Cycle Impact Assessment of leaching from secondary materials in road and earth constructions, *Waste Management*, Vol. 34 (10), pp. 1884-1896.
- Shen, J., Amirghani, S., Tang, B. (2007). Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (5), pp. 958-964.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60, pp. 38-48.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, J., Zoorob, S.E. (2010). *Optimization of Warm Mix Asphalts Using Different Blends of Binders and Synthetic Paraffin Wax Contents*.
- Simões, A.R., Barbosa, A.E., Fontul, S., Freira, A.C. (2016). *Os Pavimentos Rodoviários em Cenários de Alterações Climáticas . Impactes Ambientais da Drenagem*.
- Sleet, H.A.v.d., Heasman, L., Ph, Q. (1997a). Chapter 3: Soils, *Studies in Environmental Science*, p. 41-56, Elsevier.
- Sleet, H.A.v.d., Heasman, L., Ph, Q. (1997b). Chapter 11: Preservative treated wood, *Studies in Environmental Science*, p. 209-226, Elsevier.
- Sleet, H.A.v.d., Heasman, L., Quevauviller, P. (1997c). Chapter 2: General principles for the leaching and extraction of materials, *Studies in Environmental Science*, p. 13-39, Elsevier.
- Sogilub (2012). *Gestão e Processamento de óleos usados*.

- Sogilub (2014). Relatório Atividades 2014, Sociedade de Gestão Integrada de Óleos Lubrificantes Usados;
- Teixeira, A. (2000). Caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas em equipamento servo-pneumático. Tese de Mestrado. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Porto.
- Temiz, A., Alfredsen, G., Yildiz, U.C., Gezer, E.D., Kose, G., Akbas, S., Yildiz1, S. (2014). *Leaching and Decay Resistance of Alder and Pine Wood Treated with Copper based Wood Preservatives*
- Torgal, F.P., Jalali, S. (2010a). <A Sustentabilidade dos Materiais de Construção.pdf>.
- Torgal, F.P., Jalali, S. (2010b). *Toxicidade de materiais de construção: uma questão incontornável na construção sustentável.*
- Torres, H., Silva, H., Oliveira, J., Pereira, P. (2015). *Regeneração de misturas betuminosas recicladas pela utilização de betumes modificados.*
- Valente, A.R., Pires, M.J., Aguiar, J.L., Tavares, T., Ferreira, M.J. (1999). *Incorporação e Resíduos da Indústria do Calçado em Produtos Cerâmicos de Construção.*
- Wascon (2003). Leaching Background - Workshop.
- Widyatmoko, I. (2008). Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling, *Construction and Building Materials*, Vol. 22 (2), pp. 77-87.
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 233–234, pp. 254-258.
- Zaumanis, M., Mallick, R.B. (2014). Review of very high-content reclaimed asphalt use inplant-produced pavements: state of the art, *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 39-55.
- Ziari, H., Khabiri, M.M. (2005). *Effect of Bitumen and RAP Content on Resilient Modulus of Asphalt Concrete*