

# VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS NA MODIFICAÇÃO DE BETUMES PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Liliana Costa<sup>1</sup>, Sara Fernandes<sup>1</sup>, Hugo M.R.D. Silva<sup>2</sup> e Joel R.M. Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

e-mail: [b6100@civil.uminho.pt](mailto:b6100@civil.uminho.pt)

<sup>2</sup> Universidade do Minho, C-TAC – Centro do Território Ambiente e Construção, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

---

## Sumário

*Com o aumento do tráfego rodoviário são colocadas maiores exigências aos pavimentos, surgindo a necessidade de melhorar o seu desempenho. Um método que pode melhorar significativamente a qualidade dos pavimentos flexíveis é a adição de polímeros aos ligantes/misturas betuminosas. Assim, foram produzidos ligantes modificados com polímeros reciclados, em diferentes condições, cujo desempenho foi comparado com o de ligantes convencionais e de um ligante modificado comercial. Os resultados dos ensaios laboratoriais serão utilizados na seleção de resíduos plásticos e das condições de produção do betume modificado para otimizar o seu comportamento, salientando-se que este estudo procura promover a reutilização de resíduos de uma forma mais ecológica e económica.*

---

**Palavras-chave:** Ligantes betuminosos; Modificação de betumes; Plásticos reciclados; Condições de produção; Comportamento dos ligantes.

## 1 INTRODUÇÃO

O volume de tráfego tem vindo a aumentar em todo o Mundo, inclusive nos países da Europa, e em particular o volume de tráfego dos transportes de mercadorias, e prevê-se que a sua procura continue a aumentar acentuadamente durante a próxima década. Além disso, o aumento do peso bruto e as alterações das configurações das cargas dos veículos pesados levam à aceleração dos danos causados nos pavimentos [1]. Surge então a necessidade de melhorar o desempenho dos pavimentos flexíveis.

Um método que pode melhorar significativamente a qualidade dos pavimentos é a adição de polímeros às misturas betuminosas [2]. Embora a adição de polímeros virgens cumpra com o objetivo de melhorar as propriedades da mistura betuminosa, a utilização de polímeros reciclados poderá apresentar um resultado equivalente na melhoria do desempenho, em comparação com polímeros virgens [3], desde que se faça uma adequada seleção dos polímeros e se efetue um estudo rigoroso das condições de produção[4].

Existem dois métodos principais de se adicionar polímeros às misturas betuminosas, nomeadamente por modificação do betume e por adição de polímeros sólidos às misturas betuminosas. No entanto, a modificação do betume tem sido o mais utilizado para esse fim [5].

De facto, de acordo com estudos anteriores [5, 6], a modificação de betumes com polímeros ou resíduos plásticos tem permitido obter misturas betuminosas com um melhor desempenho, nomeadamente uma maior resistência à deformação permanente e uma maior rigidez a temperaturas elevadas, uma menor suscetibilidade à variação da temperatura. Em alguns casos também se verificou uma melhor resistência à fadiga, dependendo do tipo de polímeros utilizados, o que influencia as propriedades reológicas do betume [7, 8].

No que diz respeito à reutilização de resíduos plásticos na modificação de betumes para pavimentação, apresentam-se alguns polímeros cuja aplicação já tem vindo a ser estudada, tais como o polietileno de baixa densidade (PEBD) [7], o polietileno de alta densidade (PEAD) [9], o polipropileno (PP) [10], o etileno-acetato

de vinilo (EVA) [8, 11], o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) [10], o polietileno tereftalato (PET) [12] e o policloreto de vinilo (PVC) [5]. Tem-se verificado que nem todos estes polímeros são muito adequados para modificar betumes. Por exemplo, o PVC não pode ser aquecido a temperaturas elevadas pois origina emissões perigosas para a atmosfera, o PET tem um elevado potencial de valorização na sua própria reciclagem, sendo ainda necessário verificar se existe uma quantidade suficiente dos polímeros a utilizar na modificação dos betumes que possam estar disponíveis para essa finalidade.

Neste estudo pretende avaliar-se as possíveis vantagens da modificação de betumes com diferentes resíduos plásticos disponíveis, de forma a melhorar as propriedades dos ligantes modificados resultantes para aplicação futura em misturas betuminosas. Será também avaliada a influência das condições de produção dos ligantes nas suas propriedades finais. Foram então produzidos, em diferentes condições, ligantes modificados com SBS e EVA virgens e com polímeros reciclados (EVA, PEBD, PEAD, ABS e borracha de pneus usados), cujo desempenho foi comparado com o betume base convencional e um betume modificado comercial Styrelf. Para isso serão avaliadas as propriedades básicas dos betumes modificados com os diferentes polímeros, bem como a influência das dimensões em que os polímeros são adicionados ao betume. Também se avalia a viscosidade dinâmica a temperaturas elevadas e a resiliência para ajudar a diferenciar os diferentes ligantes produzidos. Por último avalia-se a estabilidade ao armazenamento, que é fundamental para se conseguir garantir a obtenção de um novo produto que possa ser utilizado sem os constrangimentos associados à necessidade de realizar a modificação dos betumes em central.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Materiais utilizados e seleção dos polímeros para o estudo**

O betume base utilizado em todo o estudo foi um betume 35/50 com 46 dmm de penetração e com um ponto de amolecimento aos 52 °C. No futuro, como continuação deste trabalho pretende avaliar-se o efeito de utilizar betumes mais moles para produção dos betumes modificados.

Além disso, e para ser possível ter um betume modificado comercial que servisse de comparação aos novos betumes modificados a produzir com os diferentes polímeros reciclados, o betume modificado comercial Styrelf também foi avaliado neste estudo.

Após contactos com empresas de reciclagem de plásticos, e em especial com a Gintegral (que fornece os polímeros reciclados para este estudo), os plásticos que existem em maior quantidade para reciclagem e que poderão ser adequados para a modificação de betumes são o polietileno de alta e baixa densidade e o ABS, tendo por isso maior potencial de valorização.

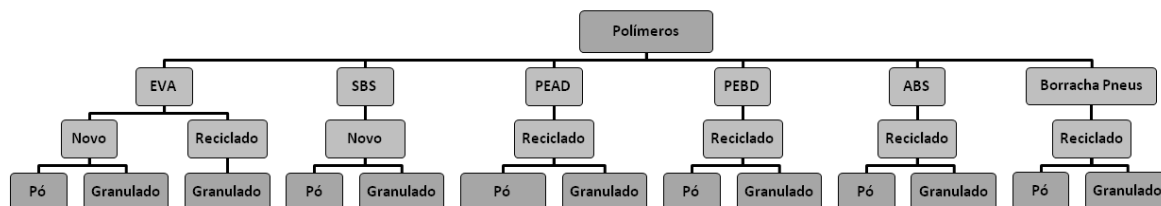
Entretanto, através de pesquisa bibliográfica verificou-se que entre os polímeros mais utilizados comercialmente na modificação de betumes destacam-se o SBS e o EVA [10]. Devido a isso o estudo também prosseguiu com a modificação de betumes com esses polímeros no seu estado virgem.

Para o polímero EVA também foi possível obter material reciclado, sendo assim possível comparar as diferenças de comportamento verificadas quando se aplica este polímero no ligante nas suas duas fases (virgem/reciclado). Este aspeto é importante porque os polímeros reciclados costumam estar misturados com outros componentes (fileres, corantes, entre outros) que alteram a eficiência do polímero na modificação do betume, sendo assim possível verificar para este polímero em particular se existe uma redução significativa do desempenho do betume modificado pelo facto de se utilizar EVA reciclado em substituição de virgem.

Finalmente, a borracha granulada reciclada de pneus usados, por ser um material reciclado fortemente utilizado comercialmente na modificação de betumes, foi também utilizada neste estudo.

Em resumo, a Fig.1 apresenta de forma esquemática os polímeros utilizados neste estudo. Foram modificados betumes com SBS e EVA virgens, bem como com PEAD, PEBD, ABS, EVA e borracha de pneu reciclados.

Os diferentes polímeros, virgens ou reciclados, foram fornecidos em forma granulada e com dimensão máxima de aproximadamente 4,00 mm.



**Fig. 1. Polímeros reciclados e virgens (em pó ou granulados) utilizados neste estudo**

Como houve alguma dificuldade em conseguir assegurar a digestão de alguns polímeros granulados nessa dimensão, tais como o SBS (Fig. 2) e o ABS (Fig. 3), foi necessário definir uma solução alternativa para garantir uma modificação mais eficaz dos betumes pelos polímeros.



**Fig. 2. Aspeto heterogéneo do betume modificado com SBS granulado (má digestão no betume)**



**Fig. 3. Partículas de ABS granulado não digeridas no betume após filtragem do betume modificado**

Assim, numa segunda fase do estudo os diferentes polímeros utilizados neste trabalho foram convertidos em pó com uma dimensão inferior a 0,45 mm. Este processo foi realizado num moinho do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, após congelação dos polímeros com azoto líquido de modo a garantir que os polímeros não se colavam entre si devido ao aquecimento que acontece no processo de moagem, o que permitiu obter partículas inferiores à dimensão indicada. Os vários polímeros utilizados neste estudo são apresentados na Fig. 4, novos ou reciclados (neste caso com a indicação de <sub>R</sub> em índice), e nas duas dimensões em que foram misturados ao betume (em pó – esquerda; granulado – direita).



**Fig. 4. Diferentes polímeros em pó e granulados utilizados no trabalho**

No futuro, na continuação deste estudo, vão avaliar-se outras possibilidades em alternativa à redução da dimensão dos polímeros para obter uma boa digestão dos polímeros no betume, tais como a utilização de misturadores de alto corte, maiores temperaturas e tempos de digestão e a utilização de aditivos.

## 2.2 Descrição inicial dos métodos utilizados no estudo

O processo de avaliação inicial envolveu a incorporação de polímeros novos e reciclados nas suas dimensões iniciais ao betume. O objetivo inicial deste estudo foi verificar se as dimensões dos materiais quando fornecidos

seriam as mais adequadas para este processo de mistura, o que eliminaria custos associados à transformação do polímero em pó ou à necessidade de utilização de um misturador de alto corte, entre outros.

Para se poder comparar eficazmente os vários polímeros em estudo, os betumes modificados foram todos preparados nas mesmas condições, com 5,0% de polímero em relação ao peso de betume, sendo a mistura realizada durante 60 minutos a 180 °C, num misturador IKA RW20 a uma velocidade de agitação de 350 rpm.

Tanto a borracha como o SBS e o ABS, nas suas dimensões iniciais, não foram totalmente digeridas no betume, não resultando um ligante homogéneo após o período de digestão (Fig. 2), optando-se nesta fase por filtrar o ligante resultante (Fig. 3) de forma a avaliar, ainda assim, possíveis alterações produzidas pela parte desses polímeros que tenham conseguido fundir-se o modificar o betume.

Em seguida avaliou-se a influência da redução das dimensões do polímero na maior facilidade em conseguir a sua digestão e respetiva modificação mais eficaz do betume. Assim, foram produzidos ligantes modificados com os mesmos polímeros, nas mesmas condições, mas desta vez utilizando os polímeros em pó (com dimensões inferiores a 0,45 mm). Este procedimento inicial acrescentará custos ao processo, os quais podem ser justificados caso se consiga obter ligantes mais homogéneos e estáveis.

Para ser possível obter conclusões deste trabalho, procedeu-se à caracterização dos vários betumes modificados produzidos de modo a avaliar quais os polímeros com maior potencial de serem utilizados na modificação de betumes, em especial para sua valorização numa fase de reciclagem, e qual a vantagem de se efetuar um processamento prévio dos mesmos (redução a pó) antes da sua mistura com o betume.

Inicialmente, e no sentido de classificar os betumes usados neste estudo, foi levada a cabo a sua caracterização básica, de acordo com a norma EN 12591. A caracterização incluiu a realização de ensaios para determinação do ponto de amolecimento dos betumes (também conhecido por temperatura anel e bola, ou A&B), de acordo com a norma EN 1427, e ensaios de penetração a 25 °C, de acordo com a norma EN 1426. Em seguida, e visto que foram utilizados alguns elastómetros, foram realizados ensaios de resiliência para avaliar a capacidade do betume recuperar elasticamente alguma da deformação sofrida após aplicação duma carga. Também se avaliou a viscosidade dinâmica a temperaturas mais elevadas (produção e compactação), principalmente porque alguns betumes modificados são muito viscosos nesta gama de temperaturas e obrigam a uma produção das misturas a temperaturas mais altas. Finalmente avaliou-se a estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados, que é uma das características mais importantes para se conseguir garantir a criação de um novo produto competitivo que possa ser utilizado sem os inconvenientes associados à produção junto à central betuminosa.

### **2.3 Ponto de amolecimento dos betumes**

O ponto de amolecimento (EN 1427) é a temperatura à qual um betume começa a fluir, e tem uma influência direta sobre a resistência à deformação permanente das misturas, ou seja, indica a temperatura máxima que se prevê que uma mistura betuminosa com esse betume consiga suportar na estrada sem ter tendência para aumentar de forma rápida a formação de rodeiras. Assim, o ponto de amolecimento de um betume modificado pode dar uma indicação da melhoria do desempenho dos ligantes em termos de sensibilidade a temperaturas de serviço elevadas, que pode ser conseguida através da adição do polímero.

Neste ensaio as amostras de betume são vertidas para dentro de dois anéis, sendo em seguida rasadas para que a sua superfície fique horizontal. O betume é deixado a arrefecer e imerso em água (ou glicerina). São colocadas esferas de aço sobre cada amostra de betume e o líquido é aquecido a uma taxa de 5 °C/min até que o betume amoleça o suficiente para fluir através do anel e até encontrar a placa da base. A temperatura do fluido no momento em que o ligante toca na placa é considerada como sendo o ponto de amolecimento do betume.

### **2.4 Penetração dos betumes**

A penetração (EN 1426) é uma medida da consistência de um betume à temperatura de referência de 25 °C e é o ensaio mais comum na caracterização de ligantes betuminosos. Assim, a classificação dos betumes costuma ser feita usualmente com base no valor de penetração. O ensaio utiliza uma agulha de aço inoxidável padronizada, que aplica uma carga de 100 g ao betume. A agulha penetra a amostra de betume, que se encontra à temperatura de 25 °C, durante 5 segundos, e a penetração é a distância que a agulha penetra no betume medida em décimas de milímetro (dmm). Este processo repete-se três vezes e o valor da penetração do ligante corresponde à média das três repetições.

## **2.5 Resiliência (penetração e recuperação) dos betumes modificados**

A caracterização dos betumes modificados em estudo também incluiu ensaios de resiliência (penetração e recuperação elástica) a uma temperatura de 25 °C, de acordo com a EN 13880-3. O ensaio de resiliência consiste em aplicar numa amostra de betume modificado, a uma temperatura de 25 °C, um deslocamento de 10 mm, por meio de uma esfera metálica com 17 mm de diâmetro, com uma taxa de deslocamento de 1 mm/s. Após a aplicação desse deslocamento, é medida a recuperação elástica da amostra (redução percentual da penetração) que ocorre num intervalo de 20 segundos. Este processo é feito no mesmo equipamento onde se realiza o ensaio de penetração, incluindo o “recipiente” com a amostra de betume (ao qual a esfera não pode aderir), mas com uma haste diferente da agulha utilizada nesse ensaio.

## **2.6 Viscosidade dinâmica dos betumes a temperaturas elevadas**

De forma a avaliar as propriedades dos diversos ligantes sujeitos a temperaturas elevadas às quais as misturas betuminosas são produzidas e aplicadas, a sua viscosidade dinâmica foi determinada usando o viscosímetro rotacional (EN 13302). A viscosidade dinâmica foi determinada para temperaturas de 130, 150 e 180 °C.

## **2.7 Estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados**

Para evitar a necessidade de gastos elevados em equipamentos de modificação de betumes junto à central, é fundamental que o ligante seja satisfatoriamente estável ao armazenamento. O ensaio de estabilidade ao armazenamento foi realizado de acordo com a norma EN 13399. Assim, após a produção dos betumes modificados, foram enchidos tubos de alumínio (com dimensões e forma semelhante aos utilizados para pasta de dentífrico). Esses tubos, contendo as amostras dos betumes modificados, foram armazenados a 180 °C durante 72 horas. Em seguida, as amostras foram removidas da estufa e após atingirem a temperatura ambiente foram colocadas durante 30 min a -10 °C de forma a facilitar a separação e recolha das amostras. De acordo com a norma as amostras de betume que estiveram armazenadas nas condições referidas devem ser divididas em 3 partes iguais (topo, meio e base), e o terço médio deve ser descartado. As secções do topo e do fundo do tubo foram em seguida submetidas a ensaios convencionais de caracterização, tais como o ensaio de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. Caso o ligante modificado seja estável ao armazenamento não haverá grandes diferenças nas propriedades do topo e da base, acontecendo o contrário caso tenha havido uma separação de fase. Em alguns casos verifica-se que os polímeros tendem a ficar na parte superior do tudo devido à sua baixa densidade, inferior à do betume, enquanto noutros casos o polímero tem tendência a depositar-se na parte inferior do tubo pelo motivo inverso.

# **3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS BETUMES**

O Quadro 1 apresenta o resumo de todos resultados de caracterização dos betumes modificados com os diferentes polímeros em estudo, no que diz respeito às propriedades básicas (ponto de amolecimento e penetração), à resiliência e à viscosidade dinâmica a diferentes temperaturas (130, 150 e 180 °C). Também se apresenta as propriedades no betume base utilizado para preparação de todos os betumes modificados, bem como um betume modificado comercial (Styrelf) utilizado como referência (por ser um dos mais utilizados) para compreender a eficácia dos vários polímeros em estudo. De modo a facilitar a análise dos resultados também se apresentam os mesmos resultados de forma gráfica na Fig. 5.

## **3.1 Ponto de amolecimento**

Tal como esperado, todos os polímeros aumentaram o ponto de amolecimento do betume base. Entre os mais eficazes em termos de aumento do ponto de amolecimento estão os elastómeros (em especial o SBS em pó, e o EVA, tanto em virgem granular como em pó e reciclado). Além disso verificou-se que o EVA tem uma boa capacidade de digestão no betume, o que permitiu obter propriedades semelhantes independentemente da forma como foi introduzido no betume. Por outro lado, o SBS tem uma digestão difícil, pelo que teve de ser filtrado quando foi introduzido granulado (o que reduziu a sua eficácia). Entre os polímeros termoplásticos o PEAD granulado foi o que apresentou melhor resistência à deformação, sendo que os restantes polímeros já apresentaram características inferiores às do Styrelf (utilizado como referência).

Quadro 1. Resultados das propriedades básicas, resiliência e viscosidade dos ligantes em estudo

Descrição do ligante	A&B (°C)	Penetração (dmm)	Resiliência (%)	Viscosidade (Pa.s)		
				130 °C	150 °C	180 °C
Betume base	52,2	45,9	9	0,8	0,3	0,1
Styrelf	65,5	37,2	21	3,1	1,1	0,3
EVA <sub>NOVO</sub> pó	66,4	26,4	30	3,8	1,3	0,4
EVA <sub>NOVO</sub> granulado	66,8	26,1	30	3,8	1,3	0,4
EVA <sub>R</sub> granulado	65,2	26,0	23	3,8	1,3	0,4
SBS <sub>NOVO</sub> pó	82,1	28,1	36	5,4	1,4	0,8
SBS <sub>NOVO</sub> granulado (filtrado)	59,2	31,5	17	2,0	0,8	0,2
PEAD <sub>R</sub> pó	61,9	25,0	4	3,1	1,1	0,4
PEAD <sub>R</sub> granulado	71,1	26,6	11	3,3	1,3	0,4
PEBD <sub>R</sub> pó	55,9	30,6	4	3,5	1,5	0,5
PEBD <sub>R</sub> granulado	59,5	30,7	12	2,9	1,1	0,4
ABS <sub>R</sub> pó	61,8	37,4	6	1,1	0,4	0,1
ABS <sub>R</sub> granulado (filtrado)	52,3	39,6	8	0,9	0,3	0,1
Borracha pneus <sub>R</sub> pó	57,2	30,5	19	1,4	0,5	0,1
Borracha pneus <sub>R</sub> granulado (filtrado)	55,1	32,1	13	1,0	0,4	0,1

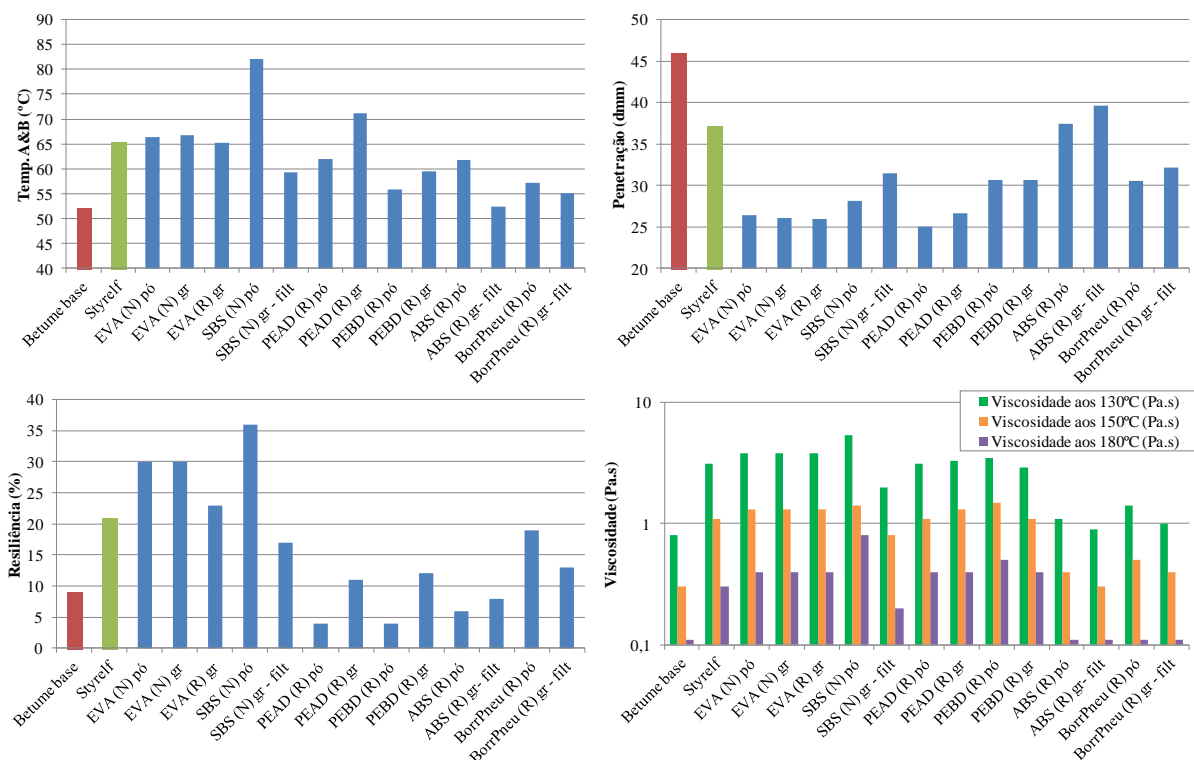


Fig. 5. Propriedades básicas, resiliência e viscosidade dos ligantes em estudo

Como seria de esperar, para cada grupo de ligantes modificados com determinado polímero, quando o polímero foi usado na sua forma granular e posteriormente filtrado, apresentou menores alterações em termos de ponto de amolecimento comparando com os dos betumes modificados com polímero em pó. No entanto, os polietilenos

(PEAD, PEBD) conseguiram fundir-se no betume na sua forma granular, obtendo nesse caso um ponto de amolecimento superior ao do ligante equivalente modificado com polímero em pó. Supõe-se que devido às dimensões elevadas do polímero este forme mais facilmente uma matriz polimérica na superfície da amostra aumentando o ponto de amolecimento. De todos os polímeros, e tomando como referência os polímeros em pó, os menos eficazes na redução da deformação foram o PEBD e a borracha de pneus usados.

### **3.2 Penetração**

Relativamente ao efeito dos diferentes polímeros no valor da penetração do betume base, pode observar-se que em todos os casos os polímeros conduzem a uma redução do valor da penetração. Os polímeros mais eficazes na redução do valor da penetração coincidiram com os indicados anteriormente, ou seja, o PEAD e os elastómeros (EVA e SBS em pó). Mais uma vez, o ligante modificado com EVA virgem ou reciclado também apresentaram entre si resultados semelhantes, o que potencia a sua utilização futura.

Os betumes modificados com o mesmo tipo de polímero, mas introduzindo o polímero granulado e em pó, apresentaram valores de penetração semelhantes. No entanto, verifica-se uma ligeira diferença no caso dos ligantes filtrados (que têm maior penetração), que mesmo assim é pouco significativa.

O betume modificado com ABS em pó foi o que apresentou valores de penetração mais elevados, demonstrando uma menor eficácia na alteração desta propriedade, sendo seguido pelo PEBD e borracha de pneus. Confirma-se desta forma as diferentes formas como o polietileno de baixa ou alta densidade modificam o betume. Outra análise que deve ser feita diz respeito ao facto do betume Styrelf ter uma penetração superior a todos os betumes modificados produzidos neste trabalho, o que pode significar que a percentagem de polímero utilizado (5%) é muito elevada, ou que existem aditivos estabilizadores no Styrelf que limitam o aumento da penetração.

### **3.3 Resiliência**

Em relação aos resultados do ensaio de resiliência, que estão relacionados com a recuperação elástica percentual dos ligantes após penetração, os polímeros que apresentaram melhores resultados foram, tal como esperado, os elastómeros: o SBS em pó, seguido pelo EVA e pela borracha de pneus. Todos estes betumes modificados apresentaram valores de resiliência semelhantes ou superiores aos do betume Styrelf, eventualmente devido à percentagem de polímero utilizado (5%).

Como seria de esperar os betumes filtrados apresentaram valores de recuperação elástica inferiores aos dos respetivos ligantes modificados com o polímero em pó. Os betumes modificados com os polietilenos (PEAD e PEBD) e com ABS, bem como o betume base, apresentaram valores de resiliência muito baixos por terem uma capacidade reduzida de recuperar elasticamente a deformação inicial a que foram sujeitos, o que apenas ocorreu devido ao comportamento viscoelástico do betume.

### **3.4 Viscosidade dinâmica**

A relação entre a viscosidade e a temperatura do ligante é muito importante para a identificação do intervalo de temperaturas para a mistura e compactação das misturas betuminosas. A viscosidade normalmente recomendada para a mistura é cerca de 0,3 Pa.s e os ligantes modificados com polímeros virgens são normalmente misturados a uma temperatura entre 170 e 190 °C. Usando os dados apresentados no Quadro 1 pode concluir-se que em quase todos betumes modificados produzidos, excluindo com o ABS e a borracha de pneus, é possível obter a viscosidade adequada para a produção da mistura betuminosa apenas perto de ou a 180 °C. No caso do ABS e da borracha de pneus é possível proceder à produção a temperaturas ligeiramente mais baixas, embora estes materiais não se tenham mostrado tão eficazes em relação às características já avaliadas.

Pode também verificar-se que o Styrelf tem uma viscosidade semelhante à dos restantes betumes modificados, sendo a viscosidade ligeiramente mais elevada para os elastómeros, seguindo-se de perto os polietilenos e por último, com uma viscosidade mais baixa surge o betume borracha e o ABS, bem como o betume base.

### **3.5 Estabilidade ao armazenamento**

De modo a avaliar o comportamento dos betumes modificados em relação à sua estabilidade ao armazenamento, uma propriedade de grande importância para a sua comercialização e valorização futura, foram avaliados os efeitos do armazenamento (diferenças absolutas entre as propriedades da base e do topo dum tubo onde foi

armazenado o betume modificado a temperaturas elevadas, durante diversas horas) nos resultados do ponto de amolecimento, penetração, resiliência e viscosidade (Quadro 2 e Fig. 6). As especificações apresentam regras a cumprir em termos de diferença de A&B e penetração, sendo fundamental o seu cumprimento neste estudo ou na sua continuação futura para que a utilização destes novos ligantes seja de facto viável.

Quadro 2. Estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados

Descrição do ligante	A&B (°C)		Penetração (dmm)		Resiliência (%)		Viscosidade a 150 °C (Pa.s)	
	Topo	Fundo	Topo	Fundo	Topo	Fundo	Topo	Fundo
Styrelf	64,3	64,9	38,7	37,5	22	23	1,5	1,1
EVA <sub>NOVO</sub> pó	64,6	68,0	75,5	16,2	53	19	1,6	1,0
EVA <sub>NOVO</sub> gran.	64,3	69,0	79,8	15,6	52	31	2,0	1,3
EVA <sub>R</sub> gran.	62,4	68,9	63,9	11,8	65	44	1,6	1,4
SBS <sub>NOVO</sub> pó	124,0	61,2	51,7	22,5	67	13	14,4	0,6
SBS <sub>NOVO</sub> gran. (filtr.)	63,9	58,8	31,1	25,9	25	19	1,3	0,5
PEAD <sub>R</sub> pó	128,1	62,2	18,2	20,7	33	11	5,3	0,6
PEAD <sub>R</sub> granulado	127,2	62,7	17,5	19,0	33	8	5,4	0,8
PEBD <sub>R</sub> pó	117,1	64,4	25,3	19,7	22	9	5,3	0,6
PEBD <sub>R</sub> gran.	119,8	61,7	17,8	17,2	42	20	5,1	0,6
ABS <sub>R</sub> pó	53,9	59,0	41,8	33,0	8	6	0,4	0,7
ABS <sub>R</sub> gran. (filtr.)	53,4	53,6	35,3	34,6	7	0	0,3	0,4
Borracha pneus <sub>R</sub> pó	56,1	61,5	34,9	36,9	14	23	0,5	1,7
Borracha pneus <sub>R</sub> gran. (filtr.)	55,2	55,3	29,9	30,2	9	10	0,4	0,4

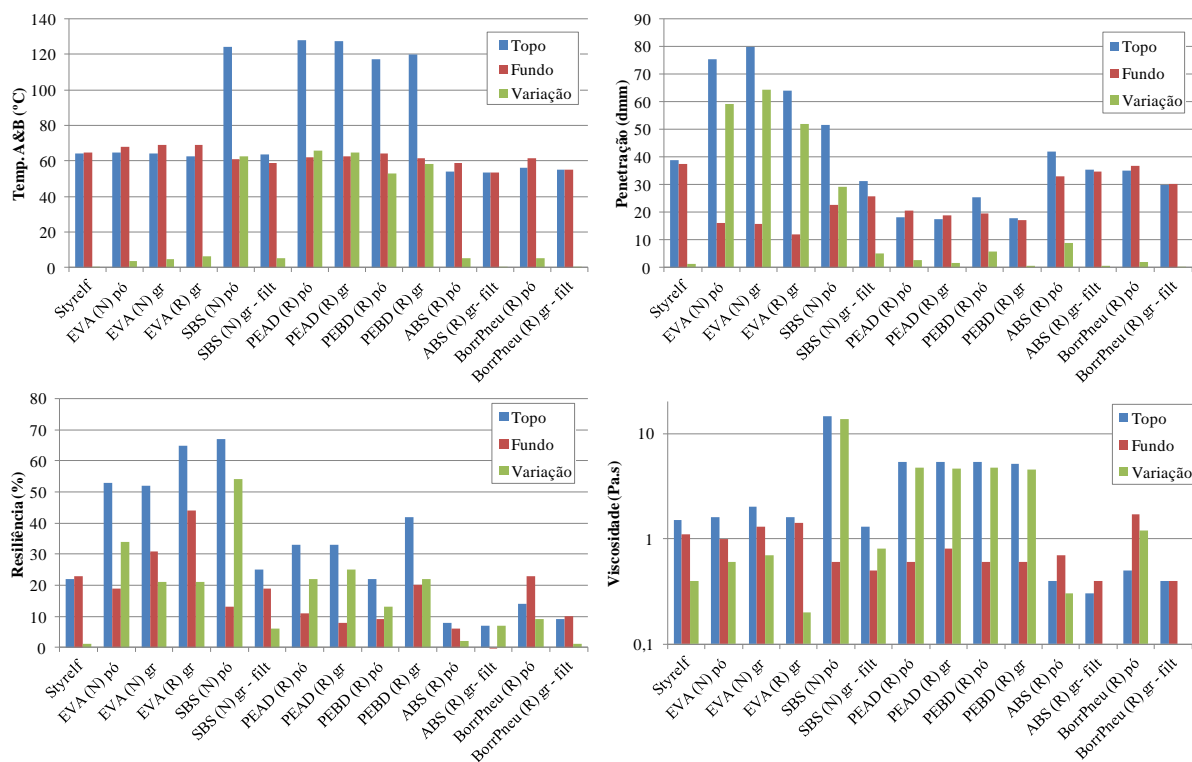


Fig. 6. Estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados



Pode ser visto que os níveis de dissociação foram evidentes para os polímeros EVA, SBS e para os polietilenos PEBD e PEAD, visto que houve diferenças significativas nas propriedades na base e topo dos tubos de armazenamento. Esse facto é ainda mais evidente quando o betume Styrelf apresentou resultados excelentes em termos de estabilidade ao armazenamento, sendo uma referência em relação a esta propriedade que não foi atingida por nenhum dos polímeros em estudo.

Verificou-se ainda algumas diferenças na forma como os diferentes polímeros manifestaram a sua má estabilidade ao armazenamento. As principais diferenças entre as propriedades da base e do topo dos polímeros PEAD e PEBD foram observadas na temperatura de amolecimento e na viscosidade (por serem as propriedades mais influenciadas por estes polímeros). Por outro lado, o polímero EVA apresentou mais diferenças nos resultados de penetração e de resiliência. O polímero SBS, sendo aquele que mais influência tem na modificação de betumes, demonstrou uma má estabilidade ao armazenamento em todas as propriedades. Em trabalhos futuros este pior comportamento em relação à estabilidade ao armazenamento pode ser retificado por meio de um outro método de mistura (misturador de alta velocidade), pela redução da percentagem de polímero ou pela utilização de aditivos químicos.

Os ligantes que apresentaram maior estabilidade ao armazenamento foram os modificados com ABS em pó e com borracha de pneus usados em pó. No entanto, de facto também se verificou que estes polímeros foram os que menos modificaram o desempenho do betume base, o que pode ajudar a justificar as menores diferenças encontradas na estabilidade ao armazenamento. Assim, deve-se em primeiro lugar procurar solucionar o problema de estabilidade dos restantes polímeros, sendo uma solução alternativa a aplicação destes polímeros que aparentam ter uma maior estabilidade ao armazenamento (sendo nesse caso a borracha uma melhor escolha).

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados vários polímeros (granulado e em pó) quanto à sua adequação na modificação de betumes, em especial para a avaliação do potencial de utilização de polímeros reciclados em misturas betuminosas para sua valorização, sendo eles o EVA (virgem e reciclado), o SBS (virgem), o PEAD (reciclado), o PEBD (reciclado), o ABS (reciclado) e a borracha de pneus usados (reciclada).

Em relação aos resultados de desempenho dos betumes modificados com os diferentes polímeros em estudo (5%) verificou-se que é possível obter propriedades semelhantes, ou até melhores, do que as obtidas com um betume modificado comercial, sendo que:

- o ponto de amolecimento do SBS, PEAD e EVA revelaram que estes eram os mais promissores;
- os resultados de penetração indicaram que o PEAD e o EVA são os polímeros que mais influenciaram este resultado;
- em relação à resiliência (recuperação elástica após penetração) o SBS, o EVA e a borracha de pneus apresentaram o melhor desempenho;
- todos betumes modificados produzidos, excluindo o com ABS e borracha de pneus, só conseguem obter a viscosidade adequada para produzir misturas perto de ou a mais de 180 °C, bem como o betume comercial;
- o PEAD, o PEBD e o EVA têm uma boa digestão no betume, enquanto o SBS, o ABS e a borracha têm dificuldade em serem digeridos e devem ser moídos para otimizar a sua eficácia.

A menor capacidade do ABS e da borracha para modificar o betume (quando se utiliza a mesma percentagem de polímero) podem justificar o facto destes apresentarem melhor comportamento em relação à estabilidade ao armazenamento, visto que os restantes polímeros (EVA, SBS, PEAD e PEBD) tiveram uma má estabilidade.

Como conclusão considera-se que se deve procurar em primeiro lugar utilizar os polímeros com melhores propriedades (SBS, EVA, ou em alternativa PEAD), depois de solucionar o problema de estabilidade desses polímeros. Uma solução alternativa passa pela aplicação de borracha ou ABS que aparentam ter uma maior estabilidade ao armazenamento (sendo nesse caso a borracha uma melhor escolha). Como futura estratégia para tentar solucionar o problema de estabilidade ao armazenamento deverá, numa primeira fase, proceder-se a uma mistura mais eficaz dos materiais com recurso a misturadores ou dispersores de alta velocidade, ao ajuste da percentagem de polímero a utilizar e posteriormente ao estudo de aditivos que possam melhorar a afinidade entre os componentes do ligante. Dessa forma poderá ser possível atingir o objetivo de poder utilizar polímeros reciclados na produção de betumes modificados com elevado desempenho.

## 5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PLASTIROADS (PTDC/ECM/119179/2010) e do projeto estratégico UI 4047 – 2011-2012 do Centro do Território Ambiente e Construção. Ainda se agradece à Cepsa pelo fornecimento dos betumes utilizados neste trabalho e às empresas Gintegral, Gestão Ambiental S.A. e Betominho, Sociedade de Construções S.A., do grupo Monte Adriano, pelo fornecimento do resíduo plástico granulado, utilizado para modificar o betume.

## 6 REFERÊNCIAS

1. L. Mantzos, P. Capros, *European energy and transport: trends to 2030: update 2005*. Belgium: European Commission, 2006.
2. Y. Becker, M.P. Méndez, Y. Rodríguez, Polymer Modified Asphalt, *Vision Tecnologia*, Vol. 9 (1), pp. 39-50, 2001.
3. C. Fuentes-Audén, J.A. Sandoval, A. Jerez, F.J. Navarro, F.J. Martínez-Boza, P. Partal, C. Gallegos, Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen, *Polymer Testing*, Vol. 27 (8), pp. 1005-1012, 2008.
4. A. Pérez-Lepe, F.J. Martínez-Boza, C. Gallegos, O. González, M.E. Muñoz, A. Santamaría, Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen, *Fuel*, Vol. 82 (11), pp. 1339-1348, 2003.
5. Z.N. Kalantar, M.R. Karim, A. Mahrez, A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 55-62, 2012.
6. Y. Yildirim, Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (1), pp. 66-72, 2007.
7. M. García-Morales, P. Partal, F.J. Navarro, C. Gallegos, Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, *Fuel*, Vol. 85 (7-8), pp. 936-943, 2006.
8. M. García-Morales, P. Partal, F.J. Navarro, F. Martínez-Boza, C. Gallegos, N. González, O. González, M.E. Muñoz, Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen, *Fuel*, Vol. 83 (1), pp. 31-38, 2004.
9. S. Hınıslioğlu, E. Ağar, Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, Vol. 58 (3-4), pp. 267-271, 2004.
10. D. Casey, C. McNally, A. Gibney, M.D. Gilchrist, Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 52 (10), pp. 1167-1174, 2008.
11. U. Isacsson, X. Lu, Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers, *Journal of Materials Science*, Vol. 34, pp. 3737-3745, 1999.
12. E. Ahmadiania, M. Zargar, M.R. Karim, M. Abdelaziz, E. Ahmadiania, Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 984-989, 2012.