

# ÚLTIMA GERAÇÃO DE PÓ DE PNEUS USADOS PARA PAVIMENTOS DE ELEVADO DESEMPENHO: PROJETO POWDER ROAD

Teresa Carvalho<sup>1</sup>, Maria del Mar Colas<sup>2</sup> e Vicente Perez Mena<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEPSA Portuguesa, Asfaltos, Av. Columbano Bordalo Pinheiro 108 – 3º andar, 1070-067 Lisboa, Portugal

email: [teresa.carvalho@cepsa.com](mailto:teresa.carvalho@cepsa.com) <http://www.cepsa.pt>

<sup>2</sup>CEPSA, Asfaltos, Alcalá de Henares, Espanha

<sup>3</sup>CEPSA, Asfaltos, Alcalá de Henares, Espanha

---

## Sumário

A utilização de pó de borracha proveniente de pneus usados em misturas betuminosas, tem demonstrado ser uma opção interessante na modificação de betumes, obtendo-se misturas com maior qualidade e ao mesmo tempo, solucionando um problema ambiental.

O projeto POWDER ROAD pretende representar um avanço neste campo, introduzindo uma importante inovação.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos no decorrer do projeto, na caracterização, tanto empírica como reológica, de diferentes betumes de borracha, fabricados com diferentes pós de pneus. Deste modo, pretende-se alargar o conhecimento sobre estes ligantes, analisando a influência do pó de borracha utilizado e suas características finais.

---

**Palavras-chave:** Inovação; Desenvolvimento de ligantes; Ambiente; Betume borracha; Borracha de Pneus

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de pneus usados na construção de estradas tem sido objeto de numerosos projetos de investigação, durante os últimos anos.

No entanto, as tecnologias de redução do tamanho da borracha utilizada continuam com grandes limitações. As instalações existentes apenas conseguem produzir entre 10 a 15% do pó de pneus para aplicações asfálticas, face à quantidade de pneus usados que entra no processo.

Algumas instalações, mais inovadoras, conseguiram um rendimento até 40%, utilizando processos em várias etapas. Não existe tecnologia, energeticamente, rentável, capaz de reduzir a microns 100% do betume processado.

O projeto Powder Road que aqui se apresenta teve como objetivo dar uma saída massiva ao reciclado de borracha, conseguindo rendimentos próximos de 100% dos pneus usados passíveis de serem tratados, sendo as granulometrias alcançadas com tamanhos a variar entre 600 e 800 microns e recorrendo a apenas três etapas (os processos atuais implicam sete etapas de produção).

A este projeto foi concedido a marca Eureka, e foi realizado em colaboração com as empresas CEPSA, COMSA, PALLMANN e GMN (Gestión Mediambiental de Neumáticos). E contempla toda a cadeia de valor do produto, desde o fabricante de maquinaria para a produção de borracha (Pallmann), a empresa construtora (COMSA), passando pelo produtor de pó de borracha (GMN) e o de betumes borracha (CEPSA).

Nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos neste projeto sobre a caracterização tanto empírica como reológica de diferentes betumes borracha com diferentes pós de pneus usados.

Adicionalmente, o fato destas tecnologias apenas estarem desenvolvidas para o tratamento de pneus de camiões, limita enormemente o objetivo de se reciclar massivamente a borracha. É por isso mesmo que este projeto estuda também a possibilidade de utilizar pneus usados procedentes de viaturas ligeiras.

Para além do desenvolvimento de uma tecnologia de redução do tamanho, que inclui o desenho e construção de um protótipo, este projeto engloba todas as etapas do processo produtivo até à obtenção de um produto final de características ótimas. São então otimizadas tanto as tecnologias para obtenção de ligantes modificados com pó de borracha, como as tecnologias para obtenção de misturas betuminosas. O resultado final será um betume estável ao armazenamento, com temperaturas de colocação em obra inferiores às existentes e com um comportamento reológico melhorado, garantindo as mesmas aplicações que os betumes existentes atualmente.

## **2 DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA TECNOLOGIA QUE TRITURAÇÃO INTEGRAL DE PNEUS USADOS**

Foi desenvolvido um novo processo de trituração, através de três etapas, para a obtenção de pó de pneus e experimentou-se um novo método para a caracterização e classificação do pó de borracha resultante. Este novo processo deve cumprir uma série de requisitos que afetam tanto o produto obtido (tamanho de partículas inferiores a 800 micrones, características técnicas adequadas tanto para pneus de viaturas ligeiras como para misturas de pneus de ligeiros e camiões, possibilidade de processar pneus desvulcanizados) como o próprio processo (valorizar 100% da borracha à entrada, desenvolver uma solução viável na produção industrializada, otimizar o consumo e a produtividade).

Numa primeira etapa, tritura-se o material proveniente de pneus usados com diferentes tecnologias emergentes como tipos de corte, tamanho de trituração, etc. Foram ensaiados diferentes mecanismos ou combinação destes (corte, cisalhamento, fricção, atrito, etc.) para ver qual o comportamento dos produtos.

Uma vez obtido o material corretamente triturado efetua-se o seu granulamento. O ajuste deste processo requiere o ajuste nos parâmetros de funcionamento (velocidade de rotação e produção da máquina) com o objetivo de obter um produto com um tamanho de 0-40 mm e 0-15 mm, de características adaptadas para a sua aplicação em asfaltos, com especial atenção ao conteúdo em fibras, presença de aço e distribuição granulométrica.

O último passo é a micronização do material. Para isso utilizaram-se diferentes tecnologias, prestando especial atenção às características relacionadas com os rácios de produção, consumo e qualidade de produto.

No âmbito do projeto Powder Road foi construído um protótipo específico para o fabrico de um produto com características adequadas para a sua aplicação em pavimentos de estradas.

Uma das partes mais importantes do projeto consistiu na construção de um modelo capaz de transmitir às partículas de borracha uma energia e velocidade tais que, com o impacto quebrem as diferentes ligações de forma a que ao submeterem-se outra vez à pressão e temperatura possam voltar a unir-se. Consideram-se parâmetros importantes o tamanho da partícula à entrada do processo, a temperatura, o tempo de permanência dentro da máquina, os ângulos e geometrias do impacto, o número de impactos, etc.

No caso particular, a melhoria e/ou modificação dos betumes também é especialmente importante a curva granulométrica e a densidade aparente.

Durante o projeto foram fabricados e analisados em laboratório diferentes amostras de borracha reciclada variando os seguintes parâmetros:

- (i) Proveniência do tipo de pneus usados
- (ii) Curva granulométrica
- (iii) Diferentes tipos de grau de tratamento (normal e reativado)

Analisaram-se diferentes tipos de ensaios com a finalidade de se verificar e quantificar a rotura de ligações e características da borracha. As técnicas utilizadas foram a termogravimetria e a espectrometria infravermelha. Alguns dos resultados são apresentados a seguir.

### **2.1 Caracterização através Análise Termogravimétrica:**

A Figura 1 apresenta uma comparação entre os termogramas correspondentes a uma amostra de borracha reciclada convencional (cor verde) e outra amostra de borracha reciclada reativada mecanicamente (cor encarnada). Os termogramas apresentam duas diferenças significativas, uma a 440 °C e outra, de menor

definição, a uma temperatura de 480 °C. É evidente que o processo de reativação mecânica influi na estrutura do composto, modificando a temperatura de decomposição que se desloca para valores mais elevados.

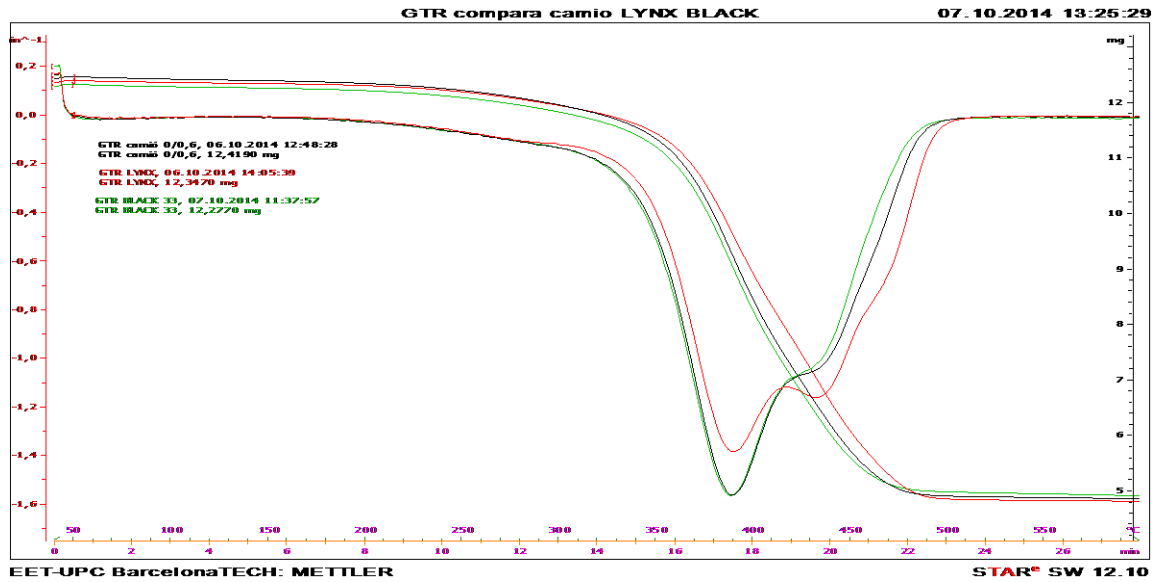


Fig.1. TGA e DTGA comparativo da amostra de borracha convencional e outra de borracha reativada

Na Figura 2 apresentam-se os termogramas (TGA) e a derivada da curva (DTGA) de amostras de borracha, proveniente de pneus de camiões, reativada (cor preta), de viaturas ligeiras, reativada (cor encarnada) e de uma mistura de ambos, reativada (cor azul).

Estes termogramas apresentam dois mínimos que correspondem a duas temperaturas de decomposição, atribuídas a componentes com distintas estruturas, presentes em todas as amostras. Para a amostra do ligeiro reativada, estas temperaturas são de 390 °C e 460 °C, e para a amostra de camião reativada temos 390 °C e 442°C. A temperatura de 390 °C (que se obtém através da derivada da curva do termograma) corresponde à decomposição dos componentes maioritários da mistura elastomérica de pneus, enquanto que as temperaturas de 460 °C e 442 °C correspondem à decomposição de outro(s) componente(s) que também formam parte da formulação dos pneus.

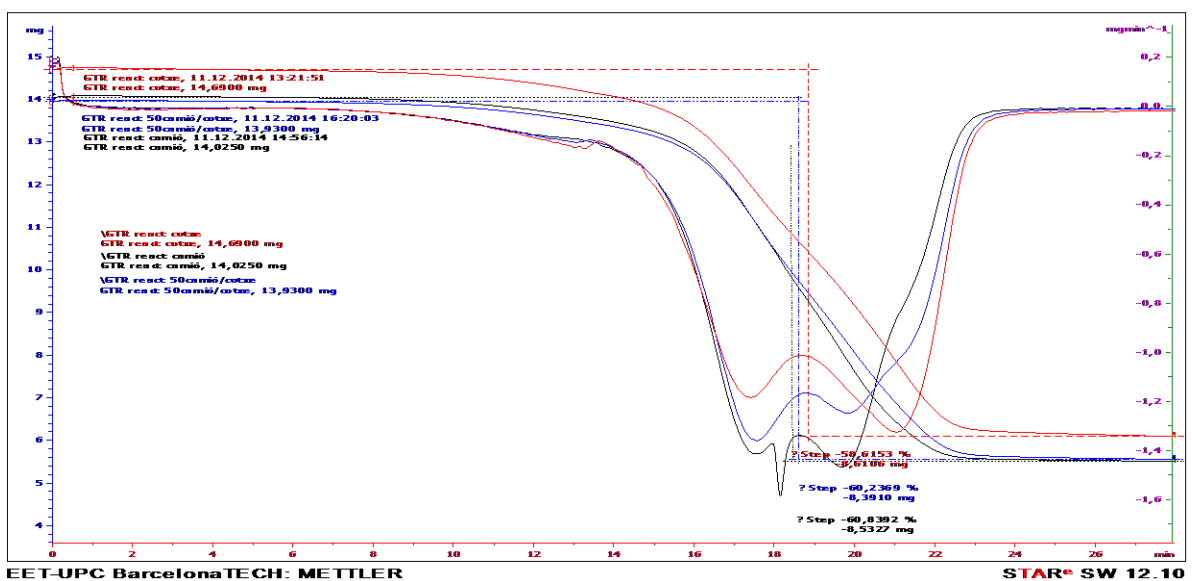


Fig.2. Caracterização TGA e DTGA das amostras de ligeiro, camião e mistura ligeiro/camião reativadas, com uma granulometria de 0-0,5 mm

Os DTGA evidenciam que existem alterações estruturais nalgum componente do pneu. O deslocamento desta temperatura significa que a modificação estrutural na borracha do ligeiro reativada e na borracha do camião reativada não ocorreu nos mesmos componentes.

A primeira conclusão que se obtém destes ensaios é que a composição da borracha dos pneus provenientes de ligeiros e camiões é diferente, com uma decomposição térmica também distinta. A segunda é que o processo de reativação mecânica das partículas de borracha afeta de forma mais significativa os pneus provenientes dos ligeiros do que dos camiões e que afeta todos os componentes que se decompõem a temperaturas mais elevadas.

## 2.2 Caracterização estrutural através de espectrometria infravermelha (FTIR):

Na Figura 3 podemos observar os espectros das três amostras de pó de borracha analisadas e que apresentam evoluções com picos distintos. No pó convencional Black 33 (cor encarnada) aparecem 4 picos muito muito significativos a 718, 669, 609 e 531  $\text{cm}^{-1}$  que se devem, respetivamente, a ligações C-S-C ( $\text{CH}_2\text{-S-CH}_2\text{-}$ ), C-S ( $\text{RCH}_2\text{-SyR}_2\text{CHS}$ ) e S-S ( $\text{R-S-S-R}$ ). Observa-se que estes picos decrescem nas amostras de borracha provenientes de pneus de ligeiros reativada (cor preta) e de camiões reativada (cor azul clara) referentes ao pó convencional. Isto significa que existe uma rotura das ligações C-S e S-S que provoca este decréscimo em ambos os picos.

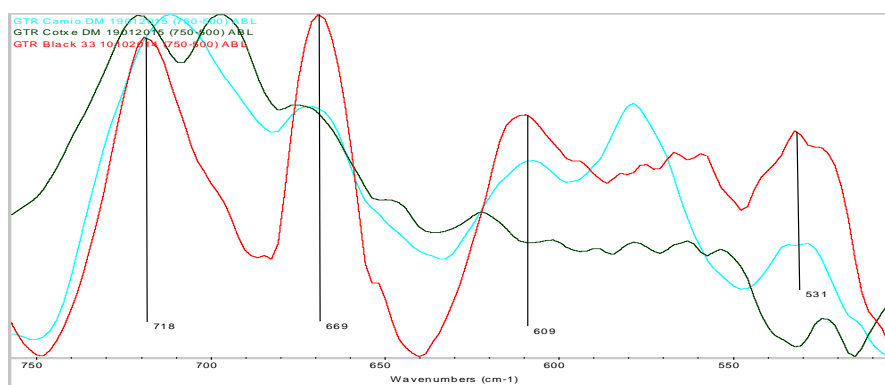


Fig.3. Estudo comparativo dos espectros de pós de camião, ligeiro e Black 33 (que é pó convencional)

Por último, e analisando a curva de 1635  $\text{cm}^{-1}$ , atribuída ao grupo de carbonilo ( $\text{C=O}$ ), na Figura 4 apresentam-se todos os picos característicos da zona espectral de flexão correspondentes às amostras de pó convencional de camião (cor azul), de camião reativado (cor verde) e de ligeiro reativado (cor encarnada). A curva de 1635  $\text{cm}^{-1}$  decresce significativamente nas amostras de pó reativado, se as compararmos com a amostra de pó convencional. Isto deve-se ao fato do tratamento de reativação mecânica não só quebrar as ligações relativas à ponte C-S e S-S, como também é afetar as alterações de configuração relativas aos grupos funcionais de carbonilo. Na curva de 1383  $\text{cm}^{-1}$ , atribuída ao grupo metilo ( $-\text{CH}_3$ ), observa-se que a amostra de pó reativada de ligeiro apresenta maior intensidade do que a de camião reativada, o que significa que os componentes elastoméricos do pó de borracha proveniente de pneus de ligeiros apresentam maior número de ramificações que os dos camiões. Também se observam outras curvas atribuídas a distintos grupos funcionais que se encontram afetadas em menor medida.

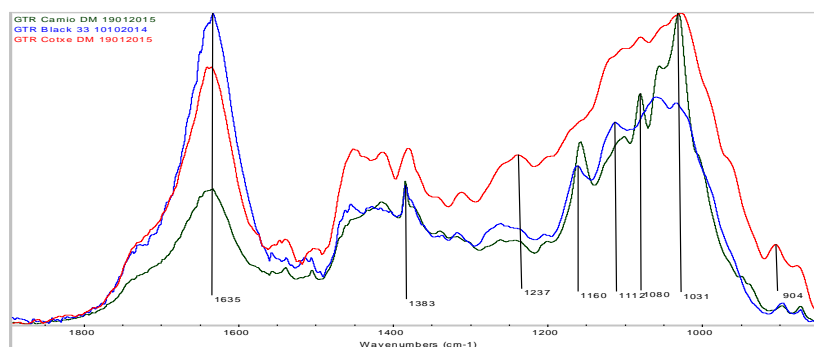


Fig.4. Área espectral correspondente à zona de flexão

Assim sendo, os resultados obtidos através do ensaio com FTIT permitem determinar que processo de reativação mecânica modifica a estrutura dos componentes elastoméricos dos pós utilizados (leigos e pesados), com a ruptura de ligações C-S e S-S e alterações de configuração com evidência nos grupos de carbonilo.

### 2.3 Caracterização por densidade

A densidade aparente do pó de borracha convencional ( $500\text{-}550\text{ kg/m}^3$ ) diminui com o processo de reativação, chegando a valores  $<400\text{ kg/m}^3$ . Isto deve-se ao fato da morfologia das partículas se altera, passando de ser uma partícula cúbica para ser uma de forma mais irregular e “aberta” (ver Figura 5).

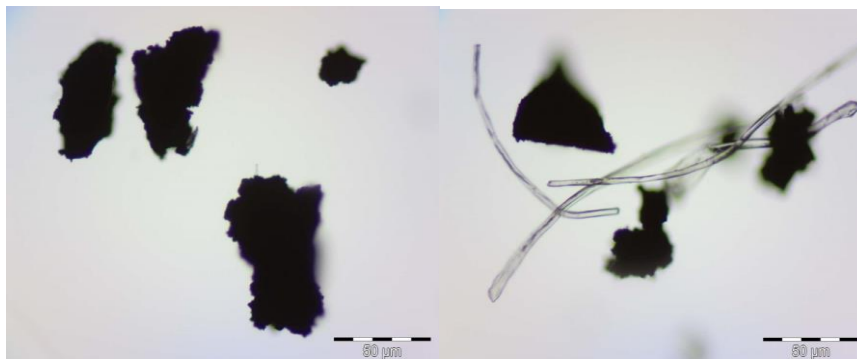


Fig.5. Microfotografias óticas de amostras de pó de borracha reativado

## 3 BETUMES DE BORRACHA

Com a borracha obtida, procurou-se elaborar um mapa do comportamento dos ligantes obtidos com distintos tipos e granulometrias de borracha, procurando a estabilidade do ligante, inclusivamente sem a utilização de aditivo, assim como menores viscosidades que permitam uma redução das temperaturas de utilização destes ligantes.

Para isso, fabricaram-se diferentes ligantes pelo processo de via húmida, que consiste em misturar, a elevada temperatura, uma determinada quantidade de pó de borracha com betume asfáltico para obter um ligante modificado ou melhorado com borracha. Os fabricos foram realizados unicamente com betume e pó de borracha de pneus em duas percentagens (4,5% e 9%), procurando estudar a influência das diferentes borrachas.

O pó de pneus é constituído por borracha vulcanizada de estireno e/ou natural. Por tratar-se de borracha vulcanizada a sua dispersão no betume é difícil, pelo que se devem utilizar temperaturas e energias de cisalhamento elevadas. O controlo adequado destas variáveis de fabrico contribui para a obtenção de um bom betume de borracha.

Do ponto de vista do tamanho, quanto menor for o tamanho da partícula, em geral, menor tempo de reação ou “digestão” será requerido, bem como menor temperatura, no entanto, e por outro lado, maior será o custo envolvido. Pelo contrário, uma partícula mais grossa seria mais económica, mas requer um maior consumo de tempo e energia para a modificação. Nesta etapa foram comprovadas estas premissas e para isso foram ensaiadas diferentes granulometrias (0-0,5 mm, 0-0,8 mm, 0-1,0 mm) e composições de pó de borracha: 100% de pneus de viatura ligeira, 50% de viatura ligeira + 50% de viatura pesada.

Para a avaliação dos produtos, foram utilizados em primeiro lugar os ensaios empíricos (penetração, temperatura de amolecimento, recuperação elástica, estabilidade ao armazenamento, resistência ao envelhecimento, etc...). Foram avaliadas especialmente a estabilidade ao armazenamento e a compatibilidade dos produtos obtidos, o que dá uma ideia sobre a qualidade do pó utilizado, assim como a variação da viscosidade com a temperatura, que permite conhecer as temperaturas de trabalho e de colocação em obra destes ligantes, de modo a poder confirmar se se podem reduzir as temperaturas utilizadas habitualmente.

### 3.1 Ensaios empíricos

Como se pode observar nos resultados apresentados no Quadro 1 e 2 os valores de penetração e temperatura de amolecimento são similares em todos os casos, não se observando grandes diferenças em função da composição ou do tamanho da partícula.

As viscosidades são elevadas, se bem que os valores mais baixos pertencem aos produtos fabricados com pó de maior dimensão (0-1,0 mm), o que permite utilizar maiores granulometrias com as vantagens daí advindas em relação ao armazenamento, manipulação e custo das matérias-primas.

A maior elasticidade é conseguida com pneus de camiões, que é o que tem uma maior percentagem de borracha natural, ainda que em todos os casos se obtenham valores elevados, por volta de 40% ou maiores.

Quadro 1. Resultados dos ensaios empíricos dos betumes fabricados

4,5%	Ligeiro			Pesado			50% Ligeiro + 50% Pesado			
	I-00414-13 (0-0,5 mm)	I-00415-13 (0-0,8 mm)	I-00416-13 (0-1 mm)	I-00417-13 (0-0,5 mm)	I-00418-13 (0-0,8 mm)	I-00419-13 (0-1 mm)	I-00420-13 (0-0,5 mm)	I-00421-13 (0-0,8 mm)	I-00422-13 (0-1 mm)	
Penetração	60	62	67	65	66	63	63	65	61	
Temperatura de amolecimento	52,1	51,8	51,8	52,2	52,3	52,3	52,5	52,2	51,5	
Índice de penetração	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	-0,1	0	0	-0,4	
Estabilidade ao armazenamento	Dif pen	-13	-11	-11	-16	-13	-14	-19	-17	-16
	Dif temp amol	-3,4	-4,4	-3,6	-4,3	-3,2	-3,7	-3,2	-4,9	-4,2
RTFOT	V. massa %	0,32	0,38	0,35	0,42	0,37	0,34	0,37	0,35	0,33
	Pen %	65	64	61	56	56	63	61	61	66
	Temp. Amol °C	8,0	8,1	8,8	9,3	7,6	7,3	7,6	6,8	8,9
Viscosidade Brookfield	135 °C	898,2	756,3	792	944,6	820	1035	950	1042	785,9
	150 °C	381,5	408,8	355	441	325	385	413,7	386,2	391,4
	175 °C	163,8	152,5	126,3	197	197,5	173,7	165	168,8	156,3
Força-Ductilidade a 25°C (J/cm2)	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	
% Recuperação elástica	39	41	41	50	46	46	47	48	42	
% Solubilidade xileno	95,67	97,42	97,47	97,49	98,36	95,98	97,61	96,18	95,96	
% Compatibilidade borracha	26,7	26,7	26,7	28,1	29,1	25	25,9	26,3	25	

Quadro 2. Resultados dos ensaios empíricos dos betumes fabricados

9,0%	Ligeiro			Pesado			50% Ligeiro + 50% Pesado			
	I-004223-13 (0-0,5 mm)	I-004124-13 (0-0,8 mm)	I-00425-13 (0-1 mm)	I-00426-13 (0-0,5 mm)	I-00427-13 (0-0,8 mm)	I-00428-13 (0-1 mm)	I-00429-13 (0-0,5 mm)	I-00430-13 (0-0,8 mm)	I-00431-13 (0-1 mm)	
Penetração	54	54	53	54	54	53	54	55	54	
Temperatura de amolecimento	57,3	56,3	57,6	58	57,4	57,3	56,8	56,5	56,5	
Índice de penetração	0,7	0,5	0,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	
Estabilidade ao armazenamento	Dif pen	-16	-21	-21	-24	-20	-20	-19	-17	-26
	Dif temp amol	-8,3	-9	-8,6	-10,6	-5	-11	-7,9	-9,4	-9,3
RTFOT	V. massa %	0,34	0,32		0,39	0,36	0,35	0,37	0,37	
	Pen %	65	66		70	69	70	70	66	
	Temp. Amol °C	7,7	9,1		8,8	8,3	7,8	9,3	8,8	
Viscosidade Brookfield	135 °C	1793	1871	1500	2183	2300	1700	2320	2992	2000
	150 °C	883,9	910,7	723,6	1011	916,1	823,3	942,6	834,4	865
	175 °C	345	383,8	320	421,3	367,5	350	382,6	341,2	355
Força-Ductilidade a 25°C (J/cm2)	0,06	0,04	0,03	0,1	0,08	0,06	0,08	0,08	0,07	
% Recuperação elástica	57	58	56	66	62	62	60	59	64	
% Solubilidade xileno	92,04	92,25	91,73	92,54	92,95	92,89	92,26	92,50	92,78	
% Compatibilidade borracha	61,1	51,7	50,9	55,6	49,1	56	56,6	51	60,4	

Os melhores resultados de estabilidade ao armazenamento obtêm-se para os ligantes fabricados a partir de borracha proveniente de pneus de viaturas ligeiras, especialmente com 4,5% de borracha, cumprindo praticamente as especificações atuais para um betume 50/70, sem utilizar qualquer aditivo.

Os valores de coesão para estes produtos, avaliada através do ensaio Força/ductilidade segundo a norma EN 13589, são baixos, uma vez que foram determinados a 25 °C e não a 5 °C, como é exigido na norma destes produtos, o que conduz a uma diminuição drástica da energia de coesão obtida. Por isso foi utilizado o ensaio do pêndulo, descrito na norma EN 13588, como método de ensaio que nos permita avaliar a coesão nestes ligantes.

Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 6, em que se pode observar como são cumpridos os valores mínimos da energia de coesão que é exigido na norma (0,5 J/cm<sup>2</sup>) a valores de temperatura mais elevados do que se utiliza para o ensaio de Força/ductilidade, o que garante o requisito mínimo de coesão a temperaturas mais baixas.

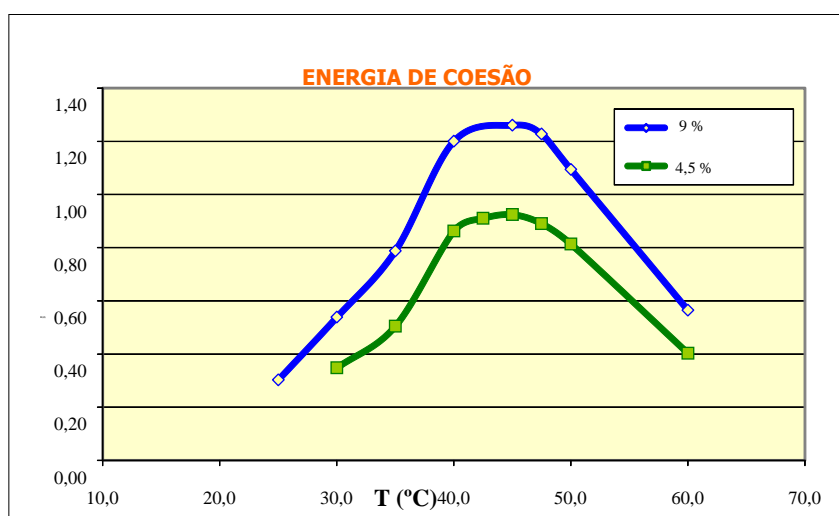


Fig.6. Resultados de pêndulo Vialit dos betumes fabricados

### 3.2 Ensaios reológicos

Adicionalmente, avaliou-se o comportamento reológico destes betumes de borracha através de um reómetro de corte dinâmico (DSR) de deformação controlada e segundo o procedimento descrito na norma EN 14770.

Quadro 3. Resultados dos ensaios reológicos dos betumes fabricados

4,50%	Dados reológicos	Ligeiro			Pesado			50% Ligeiro + 50% Pesado		
		I-00414-13	I-00415-13	I-00416-13	I-00417-13	I-00418-13	I-00419-13	I-00420-13	I-00421-13	I-00422-13
		(0-0,5 mm)	(0-0,8 mm)	(0-1 mm)	(0-0,5 mm)	(0-0,8 mm)	(0-1 mm)	(0-0,5 mm)	(0-0,8 mm)	(0-1 mm)
DSR	T G/sen(k) Original=1	73,13	73,45	71,99	72,05	72,58	72,00	72,31	71,69	72,56
	T G/sen(k) RTFOT=2,2	73,34	73,24	74,15	74,42	72,42	72,91	73,10	73,01	73,63
	T G*sen(k) PAV=5									
Original 58 °C	G (Pa)	6341,99	6394,99	5329,16	5028,86	5647,39	5028,86	5028,86	5028,86	5647,39
	k	74,19	74,50	75,33	75,62	75,112	75,95	75,95	76,17	75,05
	G/sen(k) (KPa)	6,59	6,64	5,51	5,19	5,84	5,18	5,18	5,18	5,85
RTFOT 58 °C	G (Pa)	11294,78	11969,24	11969,24	10658,32	10057,72	11294,78	11294,78	11294,78	10658,32
	k	67,89	67,98	67,00	67,67	68,94	68,60	67,67	68,32	68,19
	G/sen(k) (KPa)	12,19	12,91	13,01	11,52	10,78	12,13	12,21	12,16	11,48

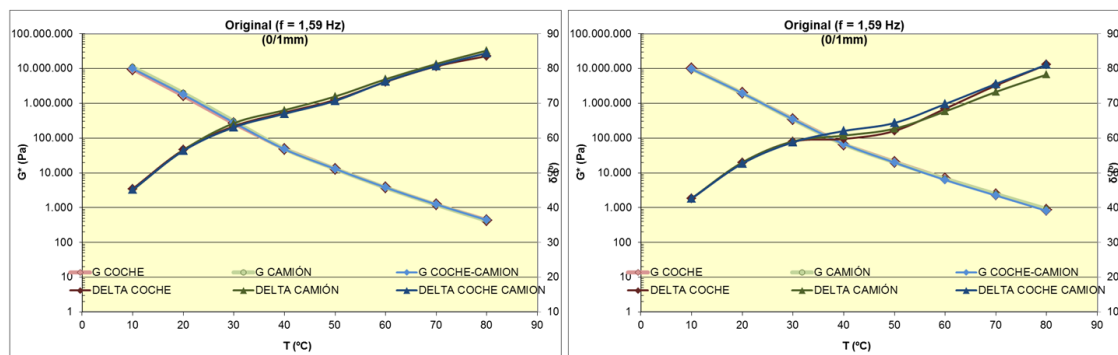
Quadro 4. Resultados dos ensaios reológicos dos betumes fabricados

		Ligeiro			Pesado			50% Ligeiro + 50% Pesado		
		I-004223-13 (0-0,5 mm)	I-004124-13 (0-0,8 mm)	I-00425-13 (0-1 mm)	I-00426-13 (0-0,5 mm)	I-00427-13 (0-0,8 mm)	I-00428-13 (0-1 mm)	I-00429-13 (0-0,5 mm)	I-00430-13 (0-0,8 mm)	I-00431-13 (0-1 mm)
9,0%										
Dados reológicos										
DSR	T G/sen(k) Original=1	76,70	78,22	78,68	78,98	77,97	78,63	78,77	78,23	77,79
	T G/sen(k) RTFOT=2.2	78,33	78,50	78,50	78,96	78,69	78,05	78,19	78,05	
	T G*sen(k) PAV=5									
Original 58 °C	G (Pa)	7614,46	9518,08	9518,08	10086,45	8981,74	8069,16	9518,08	8981,74	8475,61
	k	68,27	67,47	66,99	66,41	67,72	66,58	66,77	67,96	68,56
	G/sen(k) (KPa)	8,20	10,31	10,34	11,01	9,71	8,80	10,36	9,69	9,11
RTFOT 58 °C	G (Pa)	19036,16	17102,02		18155,61	17102,02	17102,02	17101,02	18155,61	
	k	61,29	60,59		60,79	61,02	61,08	60,62	61,06	
	G/sen(k) (KPa)	21,71	19,69		20,81	19,56	19,55	19,63	20,75	

Com este ensaio obtém-se a informação sobre o comportamento do material a temperaturas intermédias e elevadas de serviço, podendo-se avaliar a resposta das misturas fabricadas com estes materiais face a deteriorações habituais das misturas betuminosas, como sejam as deformações plásticas ou a fissuração por fadiga.

Nos Quadros 3 e 4 seguintes poder-se-á verificar os resultados obtidos.

Nos Quadros 3 e 4 evidenciaram-se os melhores resultados alcançados em cada produto, dependendo da origem do pó utilizado, não se observando, como no caso dos resultados empíricos de consistência, grandes diferenças em função da origem ou do tamanho do pó utilizado, como se observava claramente ao representar estes resultados através da variação isócrona de  $G^*$  e de  $\delta$  com a temperatura, a uma frequência de 1,59 Hz, que simula a passagem do tráfego a uma velocidade aproximada de 90 km/h.



**Fig.7. Isócrona (1,59 Hz) dos betumes fabricados com 4,5% de borracha (esquerda) e 9,0% (direita) com granulometria de 0/1 mm**

## 4 CONCLUSÕES

O processo mecânico de reativação do pó de borracha provoca alterações estruturais e morfológicas nas amostras de borracha reciclada proveniente de pneus usados de camiões e de viaturas ligeiras, no entanto afeta de forma mais significativa os segundos que poderiam passar a ser considerados como uma opção nos ligantes obtidos por via húmida.

A borracha proveniente de pneus de camiões conduz a uma melhoria nas características das formulações com maior percentagem de borracha e que habitualmente se utilizam para betumes modificados com borracha, dado o seu comportamento mais elástico.

A borracha de pneus de viaturas ligeiras demonstra ser uma opção interessante nas formulações dos betumes melhorados com borracha, especialmente se nos apoiarmos na sua melhor suscetibilidade térmica (no que diz



respeito aos betumes convencionais), na estabilidade ao armazenamento e na menor viscosidade às temperaturas da mistura, o que permitiria a sua utilização com vantagens sobre alguns produtos que se utilizam na atualidade.

Adicionalmente, as granulometrias de pó de borracha reativado 0-1 mm que se obtém no processo de trituração integral desenvolvido neste projeto, podem ser consideradas no fabrico de betumes de borracha pois, a menor densidade aparente da partícula facilita a sua dispersão no betume quando comparado com essa mesma granulometria de um pó de borracha normal e o produto final resultante pode cumprir as especificações técnicas sem que seja necessária a utilização de aditivos, o que pressupõe por um lado um custo económico inferior e por outro, produtos com menor viscosidade e com os que se pode trabalhar a temperaturas menos elevadas.

## 5 REFERÊNCIAS

1. *Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas*. CEDEX, Ministerio de Medio Ambiente, 2007.
2. *Caracterización reológica de un betún con caucho procedente de neumáticos fuera de uso*. Revista Ingeniería Civil, Nº 148, 2007.
3. *Los materiales bituminosos y el SHRP*. Revista Carreteras, nº 80 Noviembre-Diciembre, 1995.
4. *The Black Diagram, only a rheological data presentation?* 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona, 2000.
5. *Betunes modificados estables al almacenamiento mediante el empleo de polvo de caucho procedente de NFU's, para su uso en carreteras*. Comunicación libre en la XXVI SEMANA DE LA CARRETERA. Zaragoza, del 26 al 29 de septiembre de 2006.
6. *Betunes modificados con bajo contenido de caucho, para su uso en mezclas asfálticas bajo rodadura*. Comunicación libre en Jornada PAVIMENTOS RODOVIARIOS VERDES. Lisboa, 19 de octubre de 2006 y en la 2ª Jornada de ASEFMA. Madrid, 30 de noviembre 2006.
7. *Empleo de polvo de NFU en mezclas bituminosas*. INTEVÍA, Santiago de Compostela, 2008.
8. *Jornada sobre utilización de neumáticos fuera de uso en carreteras*. CEDEX y Mº de Medio Ambiente. Madrid, 2004.
9. Gallego Medina, Juan y Tomás Raz, Ramón: "Investigación sobre la reutilización de triturado de neumáticos en mezclas bituminosas". Carreteras Nº 130. Noviembre-Diciembre 2003.
10. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference*. Edited by Sousa, Jorge B. Portugal, November 2000.
11. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2012 Conference*. Munich, Octubre 2012.
12. *Comparing Effects of Crumb Rubber and Synthetic Polymers on Hot Mix Asphalt Performance*. Amir Ghalipour, MSc.
13. *Asphalt-Rubber Standard Practice Guide – An Overview*. George B. Way, Kamil Kaloush
14. *European Approach to Asphalt Rubber* Jan Kudrna, Ondřej Dašek
15. *Development of a Crumb Rubber Modified (CRM) PG binder Specification*. Gaylon Baumgardner, John A. D'Angelo
16. *Influence of processing conditions on rheology of tyre rubber modified bitumens*. D. Lo Presti, N.Memon
17. *New Bitumen Rubber Technology Improves Storage, Handling and Stability of Bitumen Rubber*. Johan Muller, Thorsten Butz.
18. *Superior aging characteristics of asphalt rubber*. Shakir Shatnawi
19. *Asphalt Rubber: how to successfully overcoming the barriers towards greater sustainability*. Ines Antunes, Daniele Fornai.

20. *Internal structure characteristics of crumb rubber modified asphalt binders: An analysis using 3D X-ray Microtomography Imaging.* M. Emin Kutay, Hande Ozturk
21. *Relationship between Crumb Rubber Morphology and Asphalt Rubber Viscosity.* Ezio Santagata, Davide Dalmazzo