

INOVAÇÃO EM BIOLIGANTES PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

José Neves¹, Margarida Sá da Costa², Rui Galhano³, João Bordado³, Luís de Picado Santos¹, Ana Cristina Freire², Simona Fontul², Carlos Alpiarça⁴, José Freitas⁵ e Vinicius Cordeiro²

¹ CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

email: jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

³ CERENA, Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

⁴ LUSASFAL, Derivados Asfálticos de Portugal, S.A., 7080-341 Vendas Novas, Portugal

⁵ Construções JJR & Filhos, S.A., 2495-185 Santa Catarina da Serra, Portugal

Sumário

O artigo apresenta o projeto BioRoadPAV® a decorrer em Portugal sobre novos bioligantes provenientes de bio-óleo obtido de biomassa florestal por processo inovador – liquefação termoquímica – destinado à substituição do betume resultante do petróleo em pavimentos rodoviário em misturas e emulsões betuminosas. São descritos os objetivos e as principais atividades do projeto: investigação e desenvolvimento dos novos bioligantes; validação em laboratório e em trecho piloto construído à escala real; avaliação dos impactos ambientais e análise de custos de ciclo de vida. O artigo apresenta ainda parte dos resultados preliminares da caracterização laboratorial em curso, não só da fração pesada resultante da destilação do bio-óleo, mas também do biobetume.

Palavras-chave: Bioligante; bio-óleo; emulsão betuminosa; mistura betuminosa; pavimento rodoviário.

1 INTRODUÇÃO

Na Europa (EU 27 e UK), a produção anual de betume para o setor da construção é aproximadamente de 15 milhões de toneladas. A maior parte do betume produzido (85 a 90%) é utilizada na pavimentação rodoviária, nomeadamente na produção de misturas betuminosas [1]. Em Portugal, o consumo total de betume, em 2020, foi de 170 mil toneladas [2]. A indústria das misturas betuminosas tem introduzido novos produtos e processos numa perspetiva de sustentabilidade, com claros benefícios económicos, sociais e ambientais, e em sintonia com o modelo de economia circular. A inovação em misturas betuminosas tem-se baseado, sobretudo, na reciclagem de materiais, na reutilização de subprodutos e na redução do consumo de energia e de emissões prejudiciais ao ambiente [3].

O ligante é um componente essencial da mistura betuminosa na medida em que, sendo o responsável pela ligação das partículas de agregado, confere a coesão e a estabilidade necessárias à mistura. Embora existam diversos tipos e origens, os ligantes têm como base os betumes provenientes da refinação do crude. Contudo, este é um processo com elevado impacto ambiental, pelo que se torna cada vez mais premente a mudança para novas tecnologias baseadas em matérias-primas de fontes alternativas, ecológicas e renováveis. Uma das tendências atuais da investigação e desenvolvimento em ligantes está relacionada com a substituição do betume por ligantes alternativos ecológicos e mais sustentáveis [4]. Em particular, os bioligantes são reconhecidos como tendo um grande potencial de contribuição para os objetivos do desenvolvimento sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) [5].

Está em curso em Portugal (2021-2023) o projeto BioRoadPAV® – Novos Bioligantes para Aplicação em Pavimentos Rodoviários – com o propósito de investigar novos bioligantes produzidos a partir de bio-óleos obtidos

de biomassa florestal pelo processo de liquefação. Estes bioligantes inovadores destinam-se à substituição do betume convencional extraído do petróleo bruto (recurso fóssil e não renovável), para utilização na produção de misturas e emulsões betuminosas – biomisturas e bioemulsões – a aplicar em obras de pavimentação rodoviária [6]. Os objetivos do artigo são: 1) apresentação do projeto, nomeadamente a descrição dos objetivos e das principais atividades; 2) análise e discussão dos resultados preliminares da caracterização laboratorial do bioligante resultante da incorporação da fração pesada do bio-óleo em betume convencional de pavimentação: biobetume.

2 BIOLIGANTES EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

O interesse na investigação e desenvolvimento de biomateriais para pavimentação rodoviária é cada vez maior sobretudo por razões ambientais e económicas. Se por um lado muitas das indústrias transformadoras necessitam de dar aos seus bioresíduos um destino final que passa pela valorização ou reciclagem também, por outro lado, a indústria de pavimentação carece de adotar produtos e processos cada vez mais ecológicos. Assim, os biomateriais são atualmente uma das principais áreas de investigação na pavimentação na medida em que estes materiais se baseiam em recursos renováveis, podem ter um custo mais competitivo sobretudo quando produzidos localmente, têm uma conceção ecologicamente mais adequada e podem corresponder na sua produção a menos consumo de energia e emissão de gases nocivos para o ambiente, quando em comparação com outros materiais não renováveis, como é o caso dos materiais petrolíferos [7].

Em geral, a biomassa refere-se a todos os resíduos de natureza vegetal ou animal que podem servir a uma grande variedade de processos industriais, nomeadamente de produção de energia e de obtenção de matérias-primas. A biomassa tem sido das fontes alternativas de recursos naturais renováveis objeto de mais investigação atualmente. Os materiais provenientes da biomassa podem existir em várias formas como, por exemplo, o biocarvão, a biocinza e o bio-óleo. A bioenergia é a energia extraída da biomassa, que inclui os componentes leves, como por exemplo a biogasolina e o biodiesel, e os componentes pesados principalmente o bio-óleo. O bio-óleo tem um grande potencial de aplicação na pavimentação rodoviária, nomeadamente na sua utilização como ligante – bioligante – na produção de misturas betuminosas, em alternativa ao betume proveniente da destilação do petróleo, dada a grande analogia das suas frações (saturadas, aromáticas, resinas e asfaltenos). A investigação em bioligantes provenientes de bio-óleo para a construção rodoviária tem-se repartido nas seguintes aplicações principais: modificação ou substituição do betume; produção de misturas betuminosas temperadas; regeneração de misturas betuminosas recuperadas; e auto-regeneração de misturas betuminosas com agentes encapsulados. As origens dos bio-óleos provenientes da biomassa considerados na investigação são muito diversas como, por exemplo, casca de arroz, girassol, algodão, soja, linhaça e madeiras (carvalho, pinho) [7,8]. Outras origens para além da biomassa podem ser consideradas no âmbito da modificação, regeneração e substituição do betume, como é o caso do óleo alimentar usado.

A análise da literatura sobre a utilização de bioligantes na pavimentação permite concluir que grande parte do trabalho de investigação tem sido desenvolvido mais na produção de aditivos para a modificação ou regeneração do betume e menos na produção do componente principal com vista à substituição do ligante betuminoso. Essa investigação, maioritariamente ao nível experimental e ainda com reduzida aplicação à escala industrial, tem-se centrado quase exclusivamente no betume, ou seja, existem ainda poucos estudos sobre o efeito do bio-óleo nas características da própria mistura betuminosa [8-10]. Referem-se alguns exemplos de incorporação de bio-óleo em betume que mostram que as correspondentes percentagens são ainda baixas, mas com tendência para aumentarem. Tang (2010) investigou a incorporação de três bio-óleos (palha de milho, madeira e relvado) com percentagens ponderais de 3%, 6% e 9% em betumes convencionais puros e modificados [11]. Gao et al. (2018) estudaram a incorporação de um bio-óleo (resíduos de madeira) em percentagens ponderais de 5%, 10%, 15% e 20% num betume modificado [12]. Mais recentemente, Ingrassia e Canestrari (2021) analisaram a incorporação de 10% de bio-óleo (resíduos de madeira), em peso, num betume 50/70 utilizado numa mistura betuminosa para camada de desgaste [13]. Em geral, a investigação tem incidido maioritariamente no efeito do bio-óleo nas resistências à fadiga e ao envelhecimento dos biobetumes.

O processo mais utilizado na tecnologia atual de obtenção do bio-óleo tem sido a pirólise [11, 12, 14]. Contudo, é reconhecido que este processo tem menor rendimento e origina estruturas com maior degradação térmica. Outro processo alternativo é a liquefação termoquímica da biomassa em meio ácido de processos químicos [15-17]. Trata-se dum processo com maior rendimento e estabilidade comparativamente ao processo atual de pirólise rápida, para aplicação em obras de pavimentação rodoviária. No entanto, ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens, com influência nas características finais do bio-óleo produzido. Não existe atualmente

investigação sobre a utilização de bio-óleos obtidos por liquefação da biomassa na produção de bioligantes destinados à pavimentação rodoviária, o que constitui um dos aspetos de maior inovação do projeto *BioRoadPAV*[®].

3 APRESENTAÇÃO DO PROJETO BIROADPAV[®]

3.1 Objetivos

O projeto *BioRoadPAV*[®] tem como objetivo principal a investigação e o desenvolvimento, ao nível de prontidão tecnológica TRL8, de novos bioligantes de origem vegetal provenientes de bio-óleos extraídos de resíduos de madeira das áreas florestais (processos de limpeza correntes ou em situação pós-incêndio) ou da indústria transformadora da madeira, por um processo inovador de despolimerização catalítica, em fase líquida homogénea, que é designado por “liquefação direta”. Estes bioligantes destinam-se à produção de misturas betuminosas (biomistura) e regas de colagem (bio-emulsão) a aplicar em obras de pavimentação rodoviária. No projeto será utilizada uma nova tecnologia patenteada que consiste em despolimerizar a lenhina, a celulose e a hemicelulose, permitindo a transformação dos resíduos de madeira numa mistura oligomérica a partir da qual se pode obter por síntese uma mistura de polímeros ramificados que é um bioligante com teores de PAHs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) sempre centenas a milhares de vezes mais baixos que os do betume proveniente do petróleo bruto. O processo de liquefação de madeira permite obter bio-óleos que, após a extração dos açúcares e destilação das frações leves, poderá conduzir a um resíduo (bio-óleo pesado) com características físicas e mecânicas idênticas às de um betume. Este processo inovador tem vindo a ser estudado intensamente no Instituto Superior Técnico (IST) [15-17].

Com o projeto *BioRoadPAV*[®] pretende-se um avanço técnico-científico essencialmente a três níveis de investigação e desenvolvimento:

- 1) Seleção de novos bioligantes provenientes de um tipo de bio-óleo resultante da liquefação termoquímica de biomassa em meio ácido. A validação destes novos bioligantes, num comportamento reológico análogo ao do betume tradicional utilizado em pavimentação rodoviária, será realizada através de um extenso programa laboratorial, contemplando os aspetos de formulação e desempenho, incluindo o envelhecimento.
- 2) Formulação e avaliação do desempenho dos materiais de pavimentação com os novos bioligantes, considerando a sua durabilidade e conseqüente previsão do desempenho a longo prazo, através da análise do fenómeno do envelhecimento em laboratório, ao nível quer do betume quer da mistura betuminosa.
- 3) Produção dos novos bioligantes e aplicação em misturas e emulsões utilizadas na construção de trecho piloto construído à escala real, permitindo consubstanciar análises do ciclo de vida do material, numa perspetiva ambiental e económica, que permitirão uma melhor validação da técnica tendo em vista o seu futuro licenciamento industrial.

No projeto participam as empresas LUSASFAL, Derivados Asfálticos de Portugal, S.A. (líder do projeto) e Construções JJR & Filhos, S.A., bem como as entidades do sistema científico e tecnológico: IST e LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

3.2 Principais atividades

O projeto apresenta uma grande transversalidade ao nível das várias atividades que lhe estão associadas, desde a formulação inicial dos bioligantes (biobetumes e bio-emulsões), abrangendo a análise química, estrutural e reológica, até à caracterização final das biomisturas quando aplicadas em trecho piloto construído à escala real, com particular destaque para os comportamentos estrutural e funcional.

O projeto iniciou-se pelas atividades de formulação, caracterização e validação dos novos bioligantes, a realizar em laboratório, e que pretendem estabelecer, em primeiro lugar, todo o processo completo de transformação química do bio-óleo e, em segundo lugar, proceder à caracterização físico-química e mecânica do produto resultante para avaliação da potencialidade da sua utilização em substituição dos betumes oriundos do petróleo bruto. Como parte fundamental desta atividade, inclui-se também a avaliação da resistência ao envelhecimento dos bioligantes e do seu desempenho. Este fenómeno será avaliado no projeto através de métodos laboratoriais que têm sido utilizados para simular o envelhecimento a dois níveis: 1) ao nível dos novos bio-ligantes, através de processos de envelhecimento do tipo RTFOT (“Rolling Thin Film Oven Test”) e PAV (“Pressure Ageing Vessel”) considerando os períodos construtivo (fabrico, espalhamento e compactação) e de serviço; 2) ao nível das misturas betuminosas

já compactadas, procurando simular de forma mais realista o envelhecimento quando o pavimento estiver em serviço. No final destas atividades, é esperado ter a seleção dos bioligantes com potencial de utilização em misturas e emulsões betuminosas.

As atividades seguintes serão dedicadas à validação em laboratório da aplicação dos biobetumes em misturas betuminosas através da formulação e caracterização do comportamento mecânico. Pretende-se investigar a utilização do biobetume num betão betuminoso para camada de desgaste – AC 14 surf 35/50 – de grande aplicação no âmbito da construção e conservação da rede rodoviária nacional. Inicialmente, serão estudadas e otimizadas, numa base iterativa, as formulações das misturas betuminosas com biobetumes. Na sequência desse processo, as misturas betuminosas com incorporação dos biobetumes serão caracterizados do ponto de vista mecânico. Neste âmbito, será ainda investigada a durabilidade das misturas betuminosas através da avaliação do seu comportamento mecânico após submissão a processo de envelhecimento acelerado por aplicação de radiação ultravioleta e humidade, a realizar em protótipo desenvolvido no IST: *TEAGE – Técnico Accelerated aGEing* [18].

Posteriormente, serão realizados os ensaios de aplicação experimental em trecho piloto construído à escala real, de forma a validar a tecnologia de produção do bioligante e da sua aplicação em misturas e emulsões betuminosas em níveis de maturidade mais elevados, mais próximos da escala industrial. Nesta atividade será realizado o acompanhamento da produção-piloto de misturas e emulsões com os bioligantes, e será realizada a avaliação de desempenho estrutural e funcional dos pavimentos desse mesmo trecho piloto. A avaliação estrutural será baseada na realização de ensaios com o defletómetro de impacto (“Falling Weight Deflectometer”, FWD), complementados com o radar de prospeção (Georadar). Complementarmente aos ensaios de carga, serão realizados ensaios para avaliação das características de superfície da camada de desgaste. Serão realizados ensaios de avaliação em contínuo com o equipamento Grip-tester (avaliação do atrito) e Perfilómetro Laser (avaliação da textura e avaliação das irregularidades longitudinal e transversal).

Por fim, será efetuada a avaliação dos impactos ambientais e a análise dos custos no ciclo de vida, atendendo a todos os resultados obtidos nas atividades anteriores. Em particular, será realizada a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), ou seja, proceder-se-á à compilação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais do sistema de produção dos materiais com bioligantes a aplicar nos pavimentos, bem como da sua aplicação em camadas de pavimentos rodoviários, ao longo do seu ciclo de vida. Ter-se-á como referência para esta análise todo o desenvolvimento do projeto: produção dos bioligantes e construção do trecho piloto. Esta aplicação permitirá comparar o impacto ambiental dos novos bioligantes com as técnicas atualmente existentes na produção de misturas betuminosas e emulsões betuminosas (baseadas na utilização de betume proveniente da destilação do petróleo bruto). A análise será baseada na série de normas ISO 14040 e será utilizado o programa SimaPro, bem como a correspondente base de dados Ecoinvent.

4 RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

4.1 Enquadramento

O bio-óleo em estudo foi obtido da liquefação termoquímica de madeira de pinho de resíduos florestais (biomassa) e foi cedido pela empresa Respol Resinas S.A., sediada em Leiria [17]. Numa primeira fase, procedeu-se à extração com água dos componentes do bio-óleo com maior índice de oxigénio, maioritariamente os açúcares que resultam da despolimerização da lenhina, da celulose e da hemicelulose, designada de fração polar. A Figura 1a mostra a operação inicial de extração por lavagem com água a ser realizada em ampolas de vidro. A fração remanescente foi posteriormente sujeita à operação de destilação sob vácuo num evaporador rotativo (Figura 1b) para remoção dos compostos de baixo peso molecular, tendo resultado a fração pesada (bio-óleo pesado) a ser utilizada na formulação dos bioligantes.

O bio-óleo pesado foi analisado inicialmente para determinação dos seus grupos funcionais por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – Refletância Total Atenuada, FTIR-ATR (“Fourier Transform Infrared Spectroscopy – Attenuated Total Reflectance”), e do seu comportamento térmico por Análise Termogravimétrica, TGA (“Thermogravimetric Analysis”).

Posteriormente, foram feitas formulações dos biobetumes a partir da mistura de bio-óleo pesado com betumes de pavimentação, apresentando-se neste artigo alguns dos resultados obtidos relativamente ao efeito da presença do bio-óleo nas características do biobetume ao nível da consistência e de propriedades reológicas.



Fig.1. Etapas da produção do bio-óleo pesado: extração (esquerda); destilação (direita)

4.2 Caracterização do bio-óleo pesado

O bio-óleo pesado foi caracterizado por FTIR-ATR, com o intuito de identificar a presença de grupos funcionais. No espectro obtido (Figura 2), a banda identificada como “a”, considerando a gama de números de onda em que se encontra, $3600-3200\text{ cm}^{-1}$, é atribuída à vibração de alongamento (“stretching”) em ligações O-H de grupos hidroxilo ou álcool. As bandas “b” encontram-se a números de onda típicos de alongamento em ligações C-H, pertencentes a alcanos e alcenos. A 1727 cm^{-1} , observa-se uma distinta e forte banda, identificada como sendo alongamento de ligações C=O presente em ésteres, aldeídos e ácidos carboxílicos. A banda “d”, presente pelos 1600 cm^{-1} , é típica de vibrações de alongamento em ligações C=C presentes em anéis aromáticos. A banda “e” corresponde a deformação angular nas ligações C-H de grupos CH_3 e CH_2 . As bandas “f”, “g” e “h” são características de deformação em ligações C-H, alongamento de ligações C-O e alongamento em ligações C-H, respetivamente. A banda “i” é característica de deformações em ligações C-H fora do plano em anéis aromáticos. Em comparação com o espectro FTIR do betume de referência, observa-se que este não apresenta picos na zona das ligações C=O, evidenciando assim a ausência de aldeídos, cetonas e esteres. Interessa por isso uma análise mais detalhada para aferir quais os compostos com ligações C=O. No que diz respeito à presença de compostos aromáticos, a comparação dos dois espectros não evidencia maior concentração de compostos aromáticos no bio-óleo pesado, pico “d”. O bio-óleo apresenta ainda uma maior intensidade na zona do pico “g”, o que evidencia uma maior presença de compostos com ligações C-O, presença de éteres ou a grupos hidroxilo.

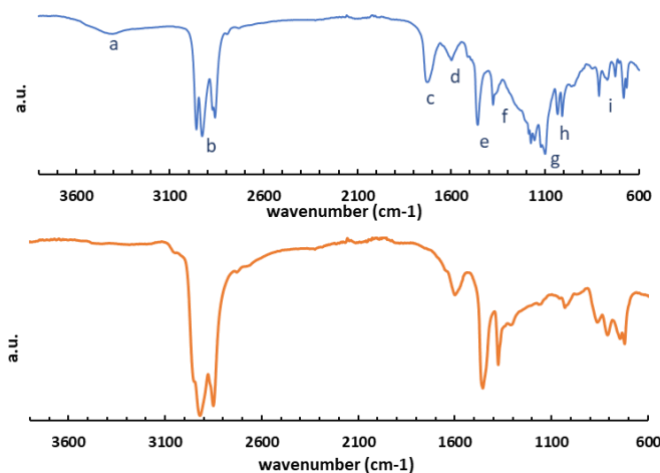


Fig.2. Espectros FTIR-ATR do bio-óleo pesado (cima) e do betume de referência (baixo)

O bio-óleo pesado foi ainda caracterizado por TGA para aferir o seu comportamento térmico em atmosfera inerte. O termograma (TGA) do bio-óleo pesado é apresentado na Figura 3. De forma geral, observou-se uma perda de massa de 80% até aos 800°C. A gama de temperaturas em que se observou perda de massa abrange a gama 100-600°C. A amostra apresentou reduzido conteúdo de humidade e/ou voláteis, uma vez que a perda de massa aos 100°C é residual. Na gama dos compostos mais pesados, >250°C, observou-se uma perda de massa de cerca de 30%. Por outro lado, na gama de 100-250°C, observou-se uma perda de massa de cerca de 50%. De forma geral, o bio-óleo pesado apresentou estabilidade térmica até cerca de 160°C, temperatura a partir da qual a perda de massa começa a ser significativa, sendo que esse fenómeno poderá dever-se à vaporização dos compostos mais leves presentes no bio-óleo pesado. Em comparação com o betume de referência, o bio-óleo pesado apresenta manifestamente uma maior volatilidade, uma vez que o betume apresenta perdas de massa na gama de temperaturas 310-510°C.

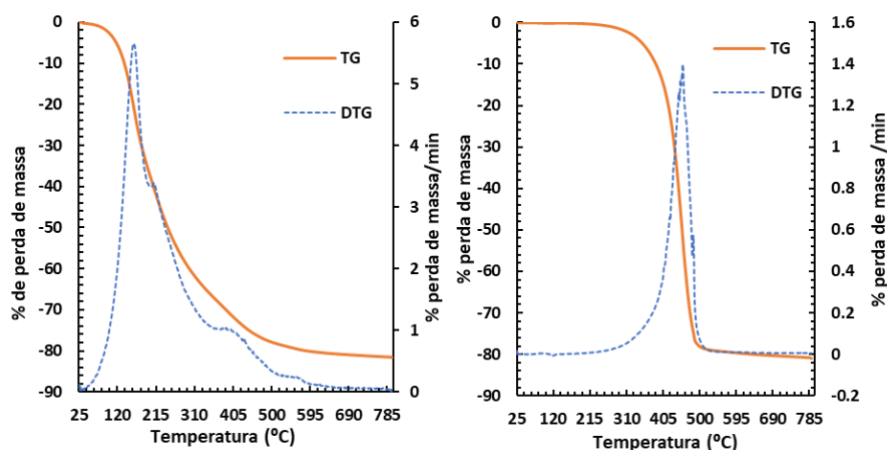


Fig.3. Termogramas (TGA) do bio-óleo pesado (esquerda) e do betume de referência (direita)

4.3 Caracterização do biobetume

As formulações de biobetume, obtidas a partir da mistura de betumes de pavimentação com o bio-óleo pesado, que já foram desenvolvidas têm uma incorporação de 15% de bio-óleo pesado, atingindo consistências, medidas através do ensaio de penetração com agulha a 25°C (EN 1426 [19]), compreendidas entre 35 × 0,1 mm e 50 × 0,1 mm, ou seja, na gama de penetração de um betume de pavimentação do tipo 35/50. A Figura 4 mostra fases do processo de fabrico do biobetume em laboratório.

As temperaturas de amolecimento dos biobetumes, determinadas pelo método do anel e bola (EN 1427 [20]), estão num patamar acima dos 75°C, podendo mesmo atingir-se valores da ordem dos 90°C, patamar este que é muito superior ao especificado para os betumes de pavimentação 35/50 (52°C a 60°C, de acordo com a EN 12591 [21]) e só comparável com o exigido para os betumes modificados com polímeros com maiores níveis de modificação.

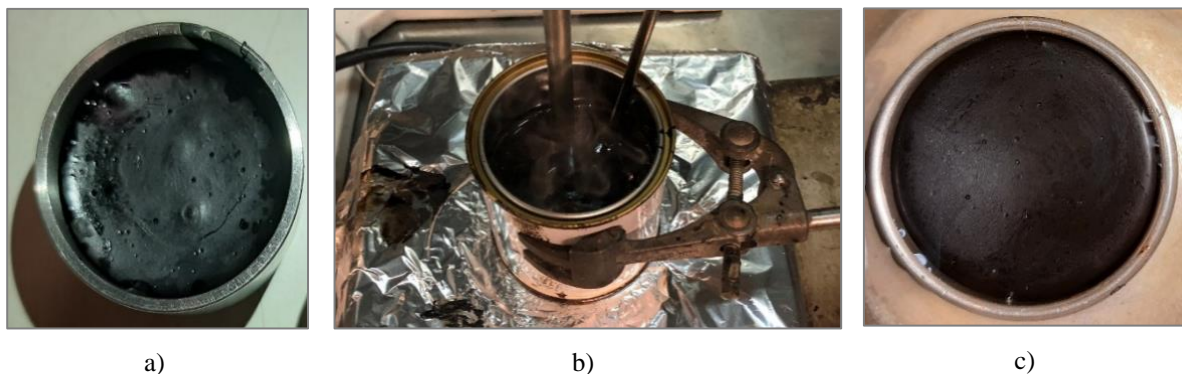


Fig.4. Fabrico do biobetume em laboratório: a) bio-óleo pesado; b) processo de mistura; c) biobetume

As propriedades melhoradas dos biobetumes, comparativamente às dos betumes de pavimentação convencionais, também dizem respeito ao seu comportamento visco-elástico, nomeadamente, no que concerne à sua capacidade de resposta a uma onda retangular de tensão, isto é, num ensaio de fluência e recuperação elástica. Esta avaliação foi realizada num reómetro rotacional equipado com geometria de pratos paralelos, com diâmetro de 25 mm, distanciados entre si de 1 mm, à temperatura de 60°C. Durante o ensaio, baseado na EN 16659 [22], o provete é submetido a uma tensão constante durante 1 s sofrendo uma deformação, seguindo-se um período de repouso, isto é, sem aplicação de carga, de 9 s para possibilitar ao provete recuperar da solitação exercida. Estes dois períodos constituem um ciclo que é realizado dez vezes consecutivas a uma tensão de 0,1 kPa e outras dez vezes consecutivas a uma tensão mais elevada de 3,2 kPa. Na Figura 5 é exemplificado uma curva correspondente a um ciclo de fluência e recuperação elástica. Este ensaio é comumente designado por MSCRT (“Multiple Stress Creep and Recovery Test”).

Como resultado do ensaio de fluência e recuperação elástica realizado, foram obtidas duas grandezas (Figura 5):

- A percentagem de recuperação, que corresponde à deformação recuperada no final do período de repouso e que é calculada para cada ciclo N através da Equação 1:

$$\%R_{0,1kPa \text{ ou } 3,2kPa}^N = \frac{(\varepsilon_c^N - \varepsilon_r^N)}{(\varepsilon_c^N - \varepsilon_0^N)} \times 100 \quad (1)$$

em que: ε_0 é a deformação no início do ciclo; ε_c é deformação no final do período de aplicação de tensão; e ε_r é a deformação no final do período de recuperação (deformação irrecuperável).

Para cada nível de tensão obteve-se a percentagem de recuperação como resultado da média dos valores obtidos nos dez ciclos ($\%R_{0,1kPa}$ e $\%R_{3,2kPa}$).

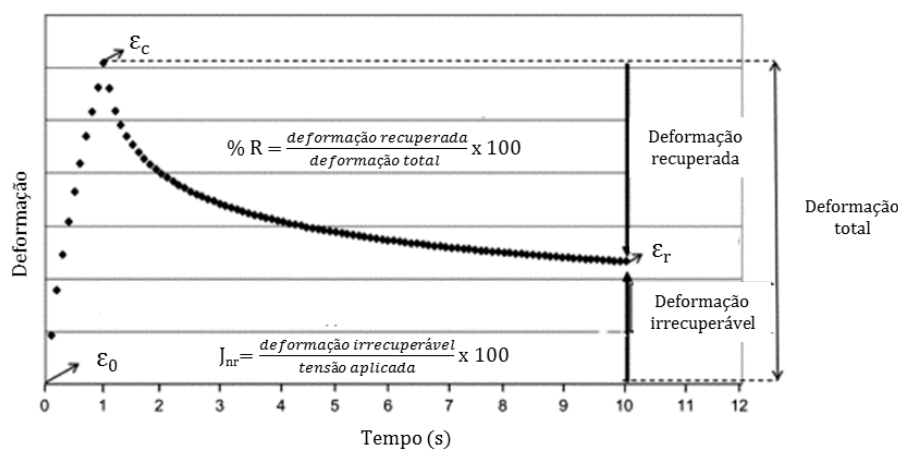


Fig.5. Resposta obtida num ciclo de fluência e recuperação elástica

- A suscetibilidade mecânica irrecuperável, que corresponde à razão entre a deformação residual, não recuperada, no final do período de repouso e a tensão aplicada (τ) e que é calculada para cada ciclo N a partir da Equação 2:

$$J_{nr}^N_{0,1kPa \text{ ou } 3,2kPa} = \frac{(\varepsilon_r^N - \varepsilon_0^N)}{\tau} \times 100 \quad (2)$$

Para cada nível de tensão foi obtida a suscetibilidade mecânica não recuperável, expressa em kPa^{-1} , como resultado da média dos valores obtidos nos dez ciclos ($J_{nr0,1kPa}$ e $J_{nr3,2kPa}$).

O Quadro 1 apresenta os resultados do ensaio de fluência e recuperação elástica de um dos biobetumes produzidos em laboratório e do seu betume base. Na Figura 6 são apresentadas as respetivas curvas de deformação respeitantes aos dez ciclos consecutivos com aplicação da tensão de 3,2 kPa.

Quadro 1. Resultados do ensaio de fluência e recuperação elástica

Ligante	%R _{0,1kPa}	%R _{3,2kPa}	R _{dif} ⁽¹⁾ (%)	J _{nr0,1kPa} (kPa ⁻¹)	J _{nr3,2kPa} (kPa ⁻¹)	J _{nr-dif} ⁽²⁾ (%)
Betume base	5	4	19	0,527	1,50	185
Biobetume	56	54	4	0,0177	0,0291	64

⁽¹⁾ Percentagem da diferença entre a recuperação a 0,1 kPa e 3,2 kPa:

$$R_{dif} = \frac{(\%R_{0,1kPa} - \%R_{3,2kPa})}{\%R_{0,1kPa}} \times 100$$

⁽²⁾ Percentagem da diferença entre da suscetibilidade mecânica irrecuperável a 3,2 kPa e a 0,1 kPa:

$$J_{nr-dif} = \frac{(J_{nr3,2kPa} - J_{nr0,1kPa})}{J_{nr0,1kPa}} \times 100$$

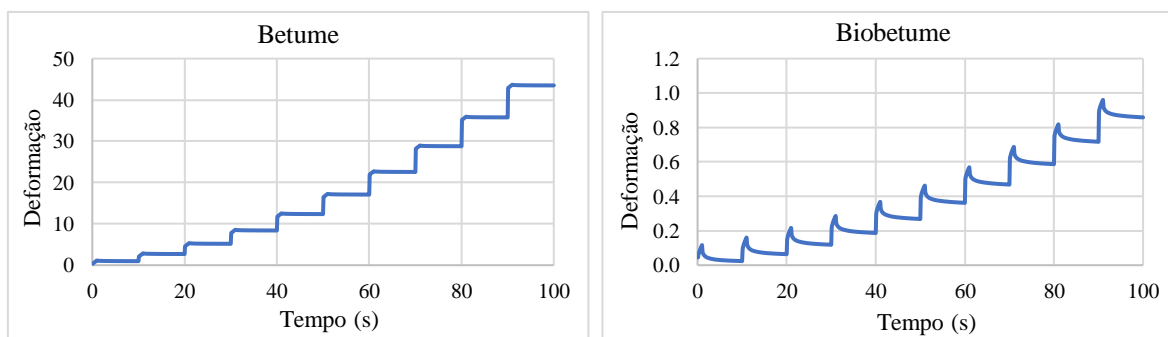


Fig.6. Curvas do ensaio de fluência e recuperação elástica com dez ciclos e nível de tensão de 3,2 kPa

É notória a influência que o bio-óleo pesado tem no comportamento da mistura. Perante as solicitações de tensão exercidas, quer a 0,1 kPa como a 3,2 kPa, o betume atinge níveis de deformação muito mais elevados que o biobetume, tal como é perceptível através das curvas apresentadas na Figura 6. O betume base tem uma resposta elástica residual, enquanto o biobetume tem uma recuperação acentuada, acima dos 50%, e que é menos dependente da deformação aplicada (menor R_{dif}). Deste modo, conclui-se que o bio-óleo confere elasticidade, efeito este que também é alcançado aquando da incorporação de polímeros elastoméricos nos betumes [23-25].

A suscetibilidade mecânica irrecuperável tem sido considerada como um indicador da resistência dos betumes às deformações permanentes [23,25]. Menores valores de J_{nr} significam maior resistência às deformações plásticas. Os resultados obtidos demonstram que o bio-óleo pesado é responsável pela diminuição de J_{nr} e consequentemente por uma menor suscetibilidade às deformações plásticas. Também se deteta através de J_{nr-dif} uma menor sensibilidade ao nível de tensão do biobetume comparativamente ao betume base.

Do trabalho já efetuado, pode ser concluído que a presença de bio-óleo pesado evidenciou um promissor comportamento visco-elástico no que diz respeito às temperaturas mais elevadas, que terá ainda que ser comprovado com a avaliação do efeito do envelhecimento e com a caracterização das misturas betuminosas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo teve como objetivo principal apresentar o projeto *BioRoadPAV® – Novos Bioligantes para Aplicação em Pavimentos Rodoviários* – a decorrer em Portugal sobre a investigação de novos bioligantes para pavimentação rodoviária. Os bioligantes têm como base o bio-óleo extraído de biomassa florestal, nomeadamente madeira de resíduos florestais, por processo inovador de liquefação, e destinam-se à produção de misturas e emulsões betuminosas.

O artigo descreveu os objetivos e as principais atividades a desenvolver no projeto com vista à demonstração do desempenho adequado dos produtos finais. Do estudo do bio-óleo pesado, o artigo apresentou a determinação dos grupos funcionais por espectroscopia no infravermelho e o comportamento térmico por análise termogravimétrica. Em relação aos biobetumes, foram realizadas diversas formulações a partir da mistura de bio-óleo pesado com betumes de pavimentação. O artigo apresentou alguns dos resultados do estudo do efeito da presença do bio-óleo pesado nas características do biobetume, em termos da consistência e das propriedades reológicas.

Estão em curso no projeto diversas análises complementares relacionadas não só com a caracterização do bio-óleo pesado, mas também com a formulação dos biobetumes. Por exemplo, embora não seja espetável que o biobetume tenha acidez elevada, uma vez que na produção do bio-óleo pesado se procedeu à lavagem com água o que promoveu a remoção dos iões hidrónio, no projeto pretende-se avaliar a presença de ácidos orgânicos. Em relação à formulação dos biobetumes, pretende-se no projeto aumentar não só as percentagens de incorporação de bio-óleo pesado, como também utilizar diferentes betumes de pavimentação.

Do trabalho já realizado no projeto e dos resultados preliminares apresentados e analisados neste artigo, pode concluir-se um efeito muito promissor do bio-óleo pesado no comportamento visco-elástico do biobetume, sobretudo no domínio das temperaturas mais elevadas que podem ser as temperaturas expectáveis de serviço para os pavimentos rodoviários, pelo menos em Portugal. Este efeito deverá ainda ser comprovado através da avaliação da resistência ao envelhecimento e da caracterização das misturas e emulsões betuminosas.

O projeto decorre até 2023 e continuam em curso as atividades relacionadas com os resultados apresentados no artigo. As atividades seguintes do projeto compreendem a validação da formulação das misturas e das emulsões betuminosas, em laboratório e em trecho piloto construído à escala real, e a avaliação dos impactos ambientais e análise de custos de ciclo de vida das soluções de pavimentação com aplicação dos bioligantes. Estas atividades serão essenciais para a validação completa dos bioligantes com vista à sua aplicação à escala industrial.

6 AGRADECIMENTOS

Este artigo foi desenvolvido no âmbito do Projeto N.º 047061 – BioRoadPAV – Novos Bio-ligantes para Aplicação em Pavimentos Rodoviários, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (PO CI) e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa (PO LISBOA), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Os autores agradecem o apoio do CERIS (Centro de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade), do CERENA (Centro de Recursos Naturais e Ambiente) e do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Em particular, José Neves e Luís de Picado Santos agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento UIDB/04625/2020 do CERIS.

Os autores agradecem ainda à empresa Respol Resinas S.A. pela cedência do bio-óleo em investigação no projeto BioRoadPAV. Um agradecimento é também devido a Diogo Gonçalves, Investigador do CERENA, pelo apoio concedido na caracterização química do bio-óleo pesado.

7 REFERÊNCIAS

1. Eurobitume@, <https://www.eurobitume.eu/bitumen/industry/>, European Association of Bitumen Producers (página internet oficial), Bélgica, 2022.
2. European Asphalt Pavement Association (EAPA), *Asphalt in Figures 2020*, 13 pages, <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>, 2020.
3. European Asphalt Pavement Association (EAPA), *The use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures. Position Paper (2020)*, 10 pages, <https://eapa.org/eapa-position-papers/>, 2020
4. L.P. Ingrassia, X Lub, G. Ferrottia, F. Canestraria, Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? *Resour. Conserv. Recycl.*, 144, 209–222, 2019.
5. J.C. Solarte-Tolo, C.A.C. Alzate, Biorefineries as the base for accomplishing the sustainable development goals (SDGs) and the transition to bioeconomy: Technical aspects, challenges and perspectives, *Bioresource Technology* 340, 125626, 2021.

6. BioRoadPAV@, <http://www.bioroadpav.pt>, Novos bioligantes para aplicação em pavimentos rodoviários (página internet oficial), Lisboa, 2022.
7. A.M. Al-Sabaei, M.B. Napiiah, M.H. Sutanto, W.S. Alaloul, A. Usman, A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions, *J. Clean. Prod.*, 249, 119357, 2020.
8. A. Weir, A. Jiménez del Barco Carrión, C. Queffélec, B. Bujoli, E. Chailleux, C.N. Uguna, C. Snape, G. Airey, Renewable binders from waste biomass for road construction: A review on thermochemical conversion technologies and current developments, *Constr. Build. Mater.*, 330, 127076, 2020.
9. H. Wang, Z. Ma, X. Chen, M.R.M. Hasan, Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: A comprehensive review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 137-151, 2020.
10. X. Zhang, K. Zhang, C. Wu, K. Liu, K. Jiang, Preparation of bio-oil and its application in asphalt modification and rejuvenation: A review of the properties, practical application and life cycle assessment. *Constr. Build. Mater.*, 262, 120528, 2020.
11. S. Tang, *Asphalt modification by utilizing bio-oil ESP and tall oil additive*, Master thesis, Iowa State University, USA, 2010.
12. J. Gao, H. Wang, Z. You, M.R.M. Hasan, Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test, *Constr. Build. Mater.*, 160, 786-793, 2018.
13. L.P. Ingrassia, F. Canestrari, VECD analysis to investigate the performance of long-term aged bio-asphalt mixtures compared to conventional asphalt mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 2021.
14. P. Li, X. Shi, X. Wang, J. Song, S. Fang, J. Bai, G. Zhang, C. Chang, S. Pang, Bio-oil from biomass fast pyrolysis: Yields, related properties and energy consumption analysis of the pyrolysis system, *J. Clean. Prod.*, 328, 129613, 2021.
15. M.M. Mateus, M. Vale, A. Rodrigues, J.C. Bordado, R.G. Santos, Is biomass liquefaction an option for the viability of poplar short rotation coppices? A preliminary experimental approach, *Energy*, 124, 40-45, 2017.
16. H. Machado, A.E. Cristino, S. Orisková, R.G. Santos, Bio-Oil: The next generation source of chemicals. *Reactions*, 3, 118-137, 2022.
17. D. Goncalves, S. Orišková, S. Matos, H. Machado, S. Vieira, D. Bastos, D. Gaspar, R. Paiva, J.C. Bordado, A. Rodrigues, Thermochemical Liquefaction as a Cleaner and Efficient Route for Valuing Pinewood Residues from Forest Fires, *Molecules*, 26, 7156, 2021.
18. J. Crucho, L. Picado-Santos, J. Neves, S. Capitão, I. Al-Qadi, Tecnico accelerated ageing (TEAGE) – A new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation, *Int. J. Pavement Eng.*, 2018.
19. IPQ, NP EN 1426 – *Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da penetração com agulha*, Instituto Português da Qualidade, Almada, 2017.
20. IPQ, NP EN 1427 – *Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da temperatura de amolecimento – Método do Anel e Bola*, Instituto Português da Qualidade, Almada, 2017.
21. IPQ, NP EN 12591 – *Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação*, Instituto Português da Qualidade, Almada, 2011.
22. IPQ, EN 16659 – *Bitumen and bituminous binders – Multiple Stress Creep and recovery Test (MSCRT)*, Instituto Português da Qualidade, Almada, 2015.
23. B. Marcant, G. Rousseau, Enhanced PmB via crosslinking, *7th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 2021.
24. J. De Visscher, A. Paez-Dueñas, P. Cabanillas, V. Carrera, R. Cerny, G. Durand, T. Hagner, I. Lancaster, European round robin tests for the Multiple Stress Creep Recovery Test and contribution to the development of the European standard test method, *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Prague, Czech Republic, 2016.
25. O.V. Laukkanen, H. Soenen, T. Pellinen, S. Heyrman, G. Lemoine, Creep-recovery behavior of bituminous binders and its relation to asphalt mixture rutting, *Materials and Structures* 48:4039–4053, 2015.