

# IMPORTÂNCIA DA AVALIAÇÃO MECÂNICA E AMBIENTAL NA APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM INFRAESTRUTURAS RODOVIÁRIAS

Ana Cristina Freire<sup>1</sup>, José Neves<sup>2</sup>, António José Roque<sup>3</sup>, Isabel Milagre Martins<sup>4</sup> e Maria de Lurdes Antunes<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Transportes, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

email: acfreire@lnec.pt <http://www.lnec.pt>

<sup>2</sup>CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

<sup>4</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

<sup>5</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

---

## Sumário

*O objetivo do artigo é apresentar uma síntese da abordagem à avaliação mecânica e ambiental na aplicação de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em camadas não ligadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Esta metodologia foi estabelecida com base: (1) nos principais resultados do projeto SUPREMA – Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias – desenvolvido pelo LNEC e IST; (2) nas especificações LNEC aplicáveis, nomeadamente o mais recente guia para a aplicação de misturas betuminosas fresadas. São apresentadas as principais conclusões e recomendações do projeto, salientando-se a importância da avaliação ambiental.*

**Palavras-chave:** Resíduos de Construção e Demolição; Avaliação mecânica e ambiental; Infraestruturas rodoviárias.

## 1 ENQUADRAMENTO

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são o resultado das múltiplas e complexas atividades de construção, conservação e reabilitação das obras de engenharia civil, incluindo as infraestruturas de transporte. Estes resíduos são constituídos por diferentes tipos de materiais, como por exemplo betão, agregados e pedra natural, elementos de alvenaria e materiais betuminosos. Os RCD constituem um dos maiores fluxos de resíduos gerados [1]. Embora nos anos mais recentes se tenha assistido de forma positiva ao encaminhamento de RCD não perigosos para reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização, muito pela necessidade de aplicação de legislação, como é o caso da Diretiva-Quadro 2008/98/CE [2], considera-se que o potencial de reciclagem e reutilização de RCD não está ainda totalmente explorado. O aumento de confiança na qualidade e vantagens de RCD é essencial para incentivar ainda mais a sua aplicação no setor de construção, incluindo no setor das infraestruturas de transporte.

As infraestruturas de transporte assumem assim uma extrema relevância no âmbito da valorização dos RCD, não só porque são elas próprias uma importante fonte geradora dos mesmos, mas também pelas muitas oportunidades que criam para a sua aplicação através da reciclagem.

Complementarmente, dadas as políticas da EU visando a eficiência de recursos, a crescente falta de espaços para a implementação de aterros para deposição de resíduos, o agravamento de custos que advêm das exigências associadas a aterros controlados associados a maiores requisitos de proteção ambiental, torna-se claro que a

diminuição de volumes de RCD por meio da sua reutilização e reciclagem é a alternativa desejável. Acresce ainda que a Diretiva – Quadro dos Resíduos – estabeleceu como meta para a Europa, em 2020, uma taxa mínima de reciclagem de 70 % de RCD não perigosos, excluindo solos e rochas da categoria 17 05 04 da lista de resíduos.

Com a publicação do Decreto-Lei nº 46/2008 de 12 de Março, a deposição de RCD em aterro ficou condicionada a uma triagem prévia, pretendendo-se contribuir assim para um incremento da reciclagem ou de outras formas de valorização de RCD, e, conseqüentemente, para a redução das quantidades depositadas em aterro. O referido Decreto-Lei promove, para obras públicas ou particulares, a reutilização de materiais, a incorporação de materiais reciclados de RCD na obra ou, caso tal não seja possível, o seu encaminhamento para um operador de gestão de resíduos.

A aplicação de RCD como materiais granulares não ligados em camadas de pavimentos (base, sub-base e leito do pavimento) apresenta a vantagem de permitir incorporar grandes quantidades dos materiais em apreço, com diferentes origens. Um exemplo de RCD com grande potencial para o emprego em camadas de pavimentos ou da respetiva fundação é o das misturas betuminosas recuperadas (RAP – “Reclaimed Asphalt Pavement”). Embora a aplicação mais interessante deste tipo de RCD seja o fabrico de misturas betuminosas recicladas, uma parte deste tipo de materiais não obedece às exigências para este tipo de aplicação constituindo uma fonte geradora de apreciáveis quantidades de RCD.

Atendendo a esta realidade foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pelo Instituto Superior Técnico (IST) um projeto de investigação, apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), intitulado SUPREMA – Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias. Com este projeto pretendeu-se contribuir para a generalização da aplicação sustentável de RCD em pavimentos rodoviários, através da melhoria do conhecimento relativo ao desempenho do comportamento mecânico e ambiental destes materiais, quando colocados como agregados em camadas não ligadas de pavimentos [3]. O desenvolvimento do projeto prolongou-se até 2017 com a realização dos ensaios de campo com os lisímetros tendo em vista a caracterização ambiental dos materiais reciclados estudados, uma vez que a recolha dos lixiviados está dependente da pluviosidade.

Com a concretização das ações previstas, foram sendo disponibilizados ao longo do desenvolvimento do projeto, ao meio técnico nacional e internacional, as principais conclusões alcançadas, através da elaboração de artigos e da apresentação de comunicações em seminários e congressos, nacionais e internacionais. Os resultados obtidos permitiram ainda contribuir para a elaboração de recomendações práticas para projeto e construção de pavimentos rodoviários com a utilização de RCD. Adicionalmente, e com base nos vários resultados alcançados no projeto SUPREMA, foi possível posteriormente contribuir para duas concretizações em particular: (1) a elaboração de um catálogo de pavimentos com agregados reciclados em camadas não ligadas para estradas e arruamentos de baixo tráfego, no âmbito de uma dissertação de mestrado do Instituto Superior Técnico; (2) a publicação de um guia pelo LNEC para a aplicação de misturas betuminosas fresadas como materiais granulares não ligados em camadas de base e de sub-base.

Com o presente artigo pretende-se salientar a importância da avaliação mecânica e ambiental da aplicação de agregados reciclados em pavimentos rodoviários nas camadas não ligadas, tendo por base os principais resultados do projeto SUPREMA. Se por um lado interessa assegurar sempre o melhor desempenho mecânico possível, por outro lado, no caso particular dos materiais reciclados, a avaliação ambiental assume um papel ainda mais fundamental pois o incumprimento da legislação aplicável inviabiliza logo à partida a sua aplicação. Em geral, a avaliação da libertação de substâncias perigosas nestes materiais é efetuada em ensaios de lixiviação realizado em laboratório segundo a norma EN 12457-4, e tendo por referência os valores limite de lixiviação previstos na legislação em vigor para a deposição de resíduos em aterros de resíduos inertes.

O artigo apresenta não só uma breve descrição do projeto SUPREMA, mas também aborda o enquadramento das especificações LNEC na aplicação de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos. É referida a publicação de um guia para a aplicação de misturas betuminosas fresadas em camadas não ligadas, bem como a de um catálogo de soluções de pavimentação com RCD nas camadas não ligadas. Com base em toda a informação dos resultados obtidos no projeto SUPREMA e salientando a importância da avaliação mecânica e ambiental, neste artigo são apresentadas algumas orientações gerais para a aplicação de agregados reciclados, com utilidade para as fases de projeto e de construção. No âmbito destas orientações, destacam-se em particular os ensaios necessários à avaliação ambiental.

## 2 PROJETO SUPREMA

### 2.1 Objetivos e metodologia

O principal objetivo do projeto SUPREMA foi contribuir para a aplicação sustentável de RCD em infraestruturas rodoviárias, através da viabilização mecânica e ambiental da sua utilização em camadas granulares não ligadas de base, sub-base e de leito do pavimento. Mais especificamente e pretendendo-se dar resposta às principais questões colocadas pelo meio técnico nacional e internacional sobre a reciclagem de RCD nestas aplicações, foram desenvolvidas as seguintes linhas de investigação:

- 1) Avaliação das características geomecânicas e geoambientais de diferentes tipos de RCD, função da origem, metodologia de processamento e composição final.
- 2) Avaliação do comportamento de RCD enquanto misturas não ligadas de materiais granulares e sua comparação com os materiais naturais.
- 3) Avaliação dos parâmetros a utilizar no dimensionamento de estruturas de pavimento, considerando a aplicação de RCD nas camadas não ligadas.
- 4) Estudo dos aspetos construtivos a desenvolver e aplicar, função do tipo de RCD, para a utilização destes materiais em camadas não ligadas de base, sub-base e leito do pavimento.

De modo a atingir todos estes objetivos foi desenvolvido um conjunto alargado de atividades em laboratório e “in situ” que consistiu na:

- Seleção dos materiais (RCD e agregados naturais) a serem incluídos no estudo, em função da origem, com a definição das metodologias dessa seleção e do método de classificação, bem como da caracterização laboratorial a ser realizada, tendo em conta as normas aplicáveis.
- Caracterização geométrica, física, mecânica e ambiental dos RCD e dos agregados naturais, previamente selecionados (como a maioria dos métodos de ensaio foram desenvolvidos para materiais naturais, foi necessário fazer adaptações de metodologias ou equipamentos de ensaio, de modo a permitir a caracterização dos RCD).
- Realização de ensaios triaxiais cíclicos sobre amostras selecionadas dos RCD e dos agregados naturais, com vista a uma caracterização macromecânica da deformabilidade dos materiais reciclados.
- Construção de trecho experimental à escala real, com controlo sistemático da qualidade durante a construção, e sua instrumentação com extensómetros, células de carga e termopares. Neste trecho experimental foram realizados ensaios de carga com placa (Defletómetro de Impacto) para avaliação do comportamento estrutural das estruturas de pavimento construídas.
- Realização de ensaios de lixiviação em laboratório e no campo com lisímetros para avaliação da perigosidade ambiental dos agregados reciclados.

Para além destes trabalhos experimentais, foi ainda realizada a modelação numérica do comportamento do trecho experimental durante os ensaios de carga, com medição simultânea da instrumentação, para avaliação do comportamento estrutural das camadas constituídas com os agregados reciclados.

### 2.2 Materiais

No Projeto SUPREMA foram selecionados e estudados quatro tipos de RCD: resíduos da britagem de betão; resíduos mistos (alvenaria e betão); resíduos de misturas betuminosas fresadas; e resíduos de misturas betuminosas britadas. A Figura 1 mostra as quatro misturas de agregados reciclados compostas com estes resíduos e também com agregado calcário britado de granulometria extensa (ABGE) como referência:

- Mistura de agregado reciclado de betão britado misto (Fig. 1a).
- Mistura de agregado reciclado proveniente de mistura betuminosa britada (Fig. 1b).
- Mistura de ABGE (70 %) e agregado reciclado proveniente de mistura betuminosa fresada (Fig. 1c).
- Mistura de ABGE (mistura de referência) (Fig. 1d).



(a) Betão Britado Misto



(b) Mistura Betuminosa Britada



(c) Mistura de 70 % de ABGE e  
30 % de Mistura Betuminosa Fresada



(d) ABGE calcário

**Fig. 1. Agregados reciclados e natural**

Todos estes materiais foram submetidos a ensaios laboratoriais de identificação e caracterização geométrica, física, mecânica, química e ambiental das suas principais propriedades, segundo as normas aplicáveis a misturas não ligadas e tendo em consideração as especificações LNEC para a utilização de agregados reciclados: LNEC E 473 [4], relativa à aplicação em camadas granulares não ligadas de pavimentos; e LNEC E 474 [5], para aplicações em aterro e camada de leito do pavimento [6,7].

### 2.3 Principais atividades

Para além da primeira fase do projeto que consistiu na seleção e execução de todos os ensaios de identificação e caracterização dos vários materiais, seguiu-se a fase de construção do trecho experimental à escala real com aplicação dos vários agregados reciclados. A obra foi realizada no Seixal, contemplando a aplicação de diferentes RCD na camada de sub-base não ligada (construída em duas camadas, 0,15+0,15 m), com camadas superiores em misturas betuminosas (0,07 m) (Figura 2a). Este trecho experimental foi constituído por quatro secções e durante a construção foi instrumentado de forma a observar o seu comportamento ao longo do tempo: extensómetros elétricos de resistência e células de carga (Figura 2b) [8-11].



(a) Fase construtiva



(b) Instrumentação

**Fig. 2. Trecho experimental**

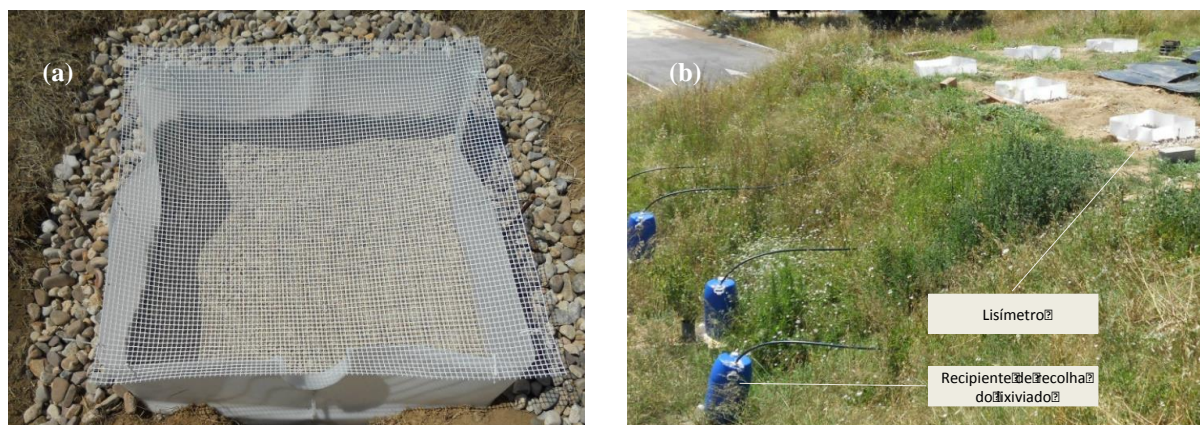
Durante a construção e no período de duração do projeto, nestas secções foram realizadas várias campanhas de ensaios de carga com o defletómetro de impacto para avaliação das características mecânicas das camadas. Durante a realização dos ensaios de carga procedeu-se a leituras da instrumentação (extensómetros e células de carga), o que permitiu um melhor conhecimento dos estados de tensão e deformação gerados nas camadas dos pavimentos das várias secções devido à aplicação da carga do ensaio. A instalação de termopares nas camadas betuminosas permitiu incluir a temperatura na análise. Toda esta informação permitiu uma melhor interpretação dos resultados dos ensaios de carga com vista à estimativa dos módulos de deformabilidade das camadas com agregados reciclados.

Em geral, a investigação associada ao trecho experimental permitiu concluir que as camadas de agregados reciclados evidenciaram um desempenho adequado para camada de sub-base. Em determinadas condições, estas camadas apresentaram mesmo um comportamento mais favorável quando em comparação com a camada constituída por agregados naturais (ABGE) [12].

No caso particular da mistura de agregados com mistura betuminosa fresada (30 %) foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas com estudo da influência da temperatura. Estes ensaios permitiram concluir que a deformabilidade destas misturas pode ser afetada da temperatura, sobretudo para valores mais elevados da temperatura e do estado de tensão aplicado [13].

Foi também avaliada, em termos ambientais, a aplicabilidade dos agregados reciclados em camadas granulares não ligadas de pavimentos rodoviários e em camadas de aterros, de acordo com o previsto nas especificações LNEC E 473 [4] e LNEC E 474 [5]. A avaliação da libertação de substâncias perigosas destes materiais foi efetuada com base em ensaio de lixiviação realizado em laboratório segundo a norma EN 12457-4, e tendo por referência os valores limite de lixiviação previstos na legislação em vigor para a deposição de resíduos em aterros de resíduos inertes. Considerando que as condições de realização destes ensaios, classificados na categoria dos ensaios de conformidade, podem não ser as mais representativas das que existem nos pavimentos e nos aterros, procedeu-se ainda à realização de ensaios de lixiviação no campo, em lisímetros, onde as condições se aproximam das existentes em obra. Os ensaios de campo realizados nos lisímetros seguiram um procedimento interno do LNEC. A Figura 3 mostra o pormenor de um dos lisímetros (Figura 3a) inserido no campo experimental que foi construído no *campus* do LNEC (Figura 3b), com ligação por gravidade ao respetivo recipiente de polietileno, de capacidade 65 litros, de recolha do lixiviado. As sucessivas amostras dos lixiviados foram recolhidas desde 2012 a 2017 e submetidas a análise dos seus componentes químicos conforme preconizado no Decreto-Lei n.º. 183/2009 [14-16].

Em geral, o conjunto de resultados obtidos neste estudo de avaliação ambiental não permitiu afirmar que o ensaio laboratorial seja conservativo relativamente ao ensaio de campo. Esta conclusão ficou, no entanto, prejudicada pela existência de um grande número de teores nos metais pesados que se situaram abaixo do limite de quantificação do método utilizado nas suas dosagens, para os materiais selecionados. Atendendo às diferenças observadas nos resultados obtidos e às incertezas associadas aos métodos de análise química utilizados na sua obtenção, pode apenas dizer-se que os ensaios realizados em laboratório e no campo permitiram chegar a conclusões semelhantes [17, 18].



**Fig. 3. Campo experimental dos lisímetros**

### 3 ABORDAGEM À AVALIAÇÃO MECÂNICA E AMBIENTAL

A utilização de materiais reciclados (matéria-prima secundária) processados a partir de resíduos (como por exemplo RCD) ou de subprodutos (por exemplo, escórias da incineração dos resíduos sólidos urbanos) depende, à semelhança dos materiais naturais (matéria-prima primária), das suas características geométricas, físicas, químicas e mecânicas satisfazerem as exigências técnicas para as aplicações previstas. Para além da avaliação destas características, há a necessidade de avaliar a libertação de substâncias perigosas (por exemplo, metais pesados, hidrocarbonetos, compostos orgânicos voláteis) nos resíduos e nos subprodutos e, tendo por base os seus teores, se apresentam características de perigosidade para a saúde pública e para o ambiente. Os donos de obra, projetistas e construtores são assim confrontados com a necessidade da avaliação quer mecânica quer ambiental dos agregados reciclados.

No que diz respeito à avaliação mecânica dos agregados reciclados devem ser realizados os ensaios de natureza geométrica, física e mecânica já estabelecidos para os agregados naturais.

Relativamente à avaliação ambiental, está em curso o estabelecimento de metodologias específicas para a avaliação das características de perigosidade dos produtos de construção. Por este motivo ainda não existe regulamentação específica que estabeleça os métodos de avaliação das características de perigosidade dos materiais reciclados e que defina os requisitos mínimos a satisfazer para viabilizar a sua aplicação em obra, veem sendo considerados, por um lado, os requisitos previstos no Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto [19] para avaliar a libertação de substâncias perigosas, e, por outro, os valores limite de lixiviação previstos para a admissão de resíduos em aterro para resíduos inertes. Importa salientar que os materiais reciclados que satisfaçam estes requisitos terão que pertencer à categoria de resíduo não perigoso, cuja classificação é realizada de acordo com a Lista Europeia de Resíduos (LER), nos termos do definido na Decisão n.º 2014/955/UE, da Comissão, de 18 de dezembro [20].

A avaliação da libertação de substâncias perigosas disposta na legislação em vigor [19] baseia-se na realização de ensaios de lixiviação em laboratório de acordo com a norma EN 12457-4 e na comparação dos teores das espécies químicas presentes nos lixiviados com os valores limite de lixiviação para os resíduos admissíveis em aterros de resíduos inertes, razão pela qual pertencem à categoria dos ensaios de conformidade [19].

De entre os constituintes dos resíduos de construção e demolição que podem ser potencialmente poluentes referem-se o amianto e outras fibras minerais, os metais pesados, alguns solventes e tintas e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP). Sempre que nos resíduos das misturas betuminosas haja suspeita da presença de alcatrão deverá proceder-se à realização de ensaios com vista à despistagem da existência desta substância, uma vez que contém elevados valores de HAP. No caso do amianto, se houver a suspeita da sua presença, deve realizar-se igualmente ensaios com vista à sua despistagem. Sempre que for confirmada a presença de alcatrão ou de amianto, estes RCD são classificados como resíduos perigosos e não devem ser utilizados.

A avaliação mecânica e ambiental dos materiais deve seguir os métodos utilizados na caracterização laboratorial previstos nas especificações LNEC E 473 [4] e LNEC E 474 [5], as quais são utilizadas em Portugal como guias para a reciclagem de materiais reciclados provenientes de RCD em camadas não ligadas de base e de sub-base de pavimentos e em aterros e camadas de leito de pavimento, respetivamente.

Mais recentemente, o LNEC publicou a especificação LNEC E 483 [21] que é um guia para a utilização de agregados reciclados de misturas betuminosas recuperadas, resultantes de obras de conservação, reabilitação e demolição de pavimentos rodoviários e aeroportuários e de outras áreas pavimentadas, para camadas não ligadas de pavimentos rodoviários (camadas de base e sub-base). Estes agregados reciclados são constituídos por misturas betuminosas obtidas nas operações de britagem ou fresagem das camadas de pavimentos, podendo ser aplicados isoladamente ou combinados, com proporções superiores a 30 %, com outros agregados reciclados ou com agregados naturais.

Para além de recomendações de processamento, armazenamento e aplicação, todas estas especificações apresentam um conjunto de propriedades associadas a parâmetros geométricos, físicos e químicos, determinadas em ensaios de laboratório. O Quadro 1 apresenta uma síntese de todas estas propriedades consoante o tipo de aplicação, quer no pavimento (camadas não ligadas de base e sub-base) quer na fundação (aterro e leito do pavimento). Para cada propriedade é apresentada a correspondente norma de ensaio, tendo em consideração o estabelecido nas normas EN 13242+A1 e EN 13285.

A estas propriedades estão associados requisitos mínimos consoante a classificação dos agregados em classes, estabelecidas com base na proporção dos seus constituintes e avaliada segundo a EN 933-11. Por sua vez, consoante o cumprimento dos requisitos estabelecidos, os agregados reciclados são classificados em categorias.

Quadro 1. Ensaios para avaliação das propriedades dos agregados reciclados

PROPRIEDADE	NORMA	APLICAÇÃO		
		PAVIMENTO		FUNDAÇÃO
		Camadas não ligadas de base e sub-base		Aterro e camada de leito
		RCD <sup>1</sup>	RAP	RCD <sup>1</sup>
		LNEC E 473	LNEC E 483	LNEC E 474
<b>PARÂMETROS GEOMÉTRICOS</b>				
Dimensão	EN 933-1	✓	✓	-
Dimensão máxima das partículas ( $D_{max}$ )	-	-	-	✓
Conteúdo máximo em finos <sup>2</sup>	LNEC E 196	-	-	✓
Sobretamanhos	EN 933-1	✓	✓	-
Classe de granulometria	EN 933-1	✓	✓	-
Teor de finos	EN 933-1	✓	✓	-
Qualidade dos finos <sup>3</sup>	EN 933-9	✓	✓	✓
Percentagem de partículas totalmente esmagadas ou partidas e totalmente roladas em agregados grossos	EN 933-5	✓	-	-
<b>PARÂMETROS FÍSICOS</b>				
Resistência ao desgaste	EN 1097-1	✓	-	✓
Resistência à fragmentação	EN 1097-2	✓	✓	✓
<b>PARÂMETROS QUÍMICOS</b>				
Teor em betume	EN 12697-1	-	✓	-
Teor de sulfatos solúveis em água <sup>4</sup>	EN 1744-1	✓	✓	✓
Libertação de substâncias perigosas <sup>5</sup>	EN 12457-4	✓	✓	✓

<sup>1</sup> Inclui todos os agregados reciclados provenientes de RCD e constituídos por betões britados, agregados provenientes de camadas não ligadas, alvenarias e misturas betuminosas não classificadas como RAP de acordo com a LNEC E 483 [21].

<sup>2</sup> Passado no peneiro 80  $\mu$ m.

<sup>3</sup>  $MB_{0,075}$  é o valor de azul de metileno (MB) expresso em g/kg segundo a norma de ensaio EN 933-9, multiplicado pela percentagem da fração passada no peneiro 2 mm.

<sup>4</sup> Para teores de sulfatos superiores a 0,2 %, estes agregados devem ser colocados a uma distância não inferior a 0,50 m de elementos estruturais de betão.

<sup>5</sup> A classificação baseia-se apenas nos resultados do ensaio de lixiviação para  $L/S = 10$  l/kg – Tabela N.º 2 da Parte B do Anexo IV do Decreto-Lei 183/2009 (Secção 2.1.2.1, da Decisão do Conselho 2003/33/CE). De referir que, caso seja possível verificar que os agregados reciclados cumprem as condições relativas a RCD seleccionados constantes da nota à Tabela nº 1, da Parte B, do Anexo IV, do Decreto-Lei 183/2009, não é necessário avaliar a libertação de substâncias perigosas.

Os resultados alcançados no projeto SUPREMA revelaram-se muito favoráveis à aplicação dos agregados reciclados em camadas não ligadas dos pavimentos, quer relativamente ao comportamento mecânico quer do ponto de vista ambiental.

Isso transmitiu uma confiança muito favorável ao posterior desenvolvimento de um catálogo de estruturas tipo de pavimentos com aplicação de agregados reciclados RCD nas camadas não ligadas de base e de sub-base. A finalidade deste catálogo é servir de apoio e incentivo à conceção de soluções que valorizam os RCD e que possam ser adotadas em obras novas, de alargamento ou de reconstrução de pavimentos existentes de estradas e arruamentos de baixo tráfego. O catálogo não é aplicável no reforço de pavimentos existentes e na pavimentação de obras de arte. Naturalmente que, tal como qualquer catálogo, a sua aplicação passa pela validação integral dos seus pressupostos. Caso estes não se verifiquem, compete ao projetista proceder ao respetivo dimensionamento de acordo com as novas condições. O catálogo contempla não só estruturas de pavimento flexível, com camada de base granular, mas também, se as circunstâncias forem favoráveis, estradas não revestidas ou com revestimento superficial duplo. No caso de pavimentos flexíveis, são aplicadas misturas betuminosas do tipo betão betuminoso nas camadas superiores ligadas: AC 14 surf 35/50 na camada de desgaste e AC 20 bin 35/50 na camada subjacente. Nas camadas inferiores não ligadas de base e de sub-base podem ser aplicadas misturas de agregados reciclados de betão britado misto e recomposições de mistura betuminosa fresada (até 30 %), para além de ABGE [22-24].

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base nos resultados obtidos com o projeto SUPREMA desenvolvido pelo LNEC e pelo IST de 2010 a 2013, e no contexto de aplicação de agregados reciclados provenientes de RCD, pretendeu-se salientar com este artigo a importância da avaliação mecânica e ambiental.

Embora já alvo de uma ampla divulgação nacional e internacional, procedeu-se neste artigo a uma síntese do projeto SUPREMA, com maior incidência nos aspetos considerados mais relevantes relacionados com a caracterização mecânica e ambiental dos materiais, construção e observação de trecho experimental, e construção de campo experimental dos lisímetros à escala real. Mais recentemente, em 2017, foi possível concluir as análises dos lixiviados que decorreram ao longo de cerca de 5 anos, o que permitiu investigar com maior alcance os aspetos ambientais dos RCD quando aplicados em camadas não ligadas, em comparação com os ensaios de laboratório previstos na legislação nacional.

Em complemento ao projeto SUPREMA, foi possível ao LNEC publicar em 2016 a especificação LNEC E 483 [21], que é um guia para a utilização de agregados reciclados provenientes de misturas betuminosas recuperadas, britadas ou fresadas, em camadas não ligadas de pavimentos (camadas de base e sub-base). Igualmente, foi desenvolvido um catálogo de estruturas tipo de pavimentos com aplicação de agregados reciclados RCD nas camadas não ligadas, destinado à conceção de soluções que valorizam os RCD em obras novas, de alargamento ou de reconstrução de pavimentos existentes de estradas e arruamentos de baixo tráfego [23].

Todos estes resultados permitiram apresentar no artigo um resumo da metodologia de abordagem à avaliação mecânica e ambiental no âmbito da aplicação de agregados reciclados de RCD em camadas não ligadas (base e sub-base) de pavimentos de infraestruturas de transporte. Em síntese, a avaliação mecânica e ambiental dos materiais deve seguir os métodos utilizados na caracterização laboratorial previstos nas especificações LNEC E 473 [4], LNEC E 474 [5] e LNEC E 483 [21], as quais são utilizadas em Portugal como guias para a reciclagem de materiais reciclados provenientes de RCD em aterro e camada de leito, e em camadas não ligadas de base e de sub-base de pavimentos rodoviários. Foram referidos os principais ensaios destinados à avaliação de parâmetros geométricos e físicos. Foram ainda enumerados os ensaios para avaliar a presença de substâncias perigosas (por exemplo, metais pesados, hidrocarbonetos, compostos orgânicos voláteis) nos resíduos e nos subprodutos e, tendo por base os seus teores, se apresentam características de perigosidade para a saúde pública e para o ambiente. Na avaliação ambiental, procedeu-se à comparação de ensaios de lixiviação de laboratório e de obra, tendo-se concluído que os resultados podem ser considerados semelhantes.



## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, o apoio financeiro concedido ao projeto PTDC/ECM/100931/2008 – SUPREMA – Aplicação Sustentável de Construção e Demolição Materiais Reciclados (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias.

## 6 REFERÊNCIAS

1. CE, Resíduos de Construção e Demolição (RCD), *Comissão Europeia*. [http://ec.europa.eu/environment/waste/construction\\_demolition.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm) (acedido em 30/01/2019), 2018.
2. CE, Diretiva 2008/98/CE, de 19 de novembro, do Parlamento Europeu e do Conselho, *Jornal Oficial da União Europeia: L312/3, de 22 de novembro, p. 3-30*, 2018.
3. A.C. Freire, J. Neves, A.J. Roque, I.M. Martins, M.L. Antunes, G. Faria, *Aplicação sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em infraestruturas rodoviárias*, Relatório de progresso de projeto PTDC/ECM/100931/2008 - Ano 3, Relatório 159/2013 - DT/NIRA, LNEC, 2013.
4. LNEC E 473, *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.
5. LNEC E 474, *Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.
6. Freire, A.C., Neves, J., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Faria, G., Sustainable Application of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) in Road Infrastructures, *Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities*, 1<sup>st</sup> International Conference, Guimarães, Portugal, 2011.
7. Freire, A.C., Neves, J., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Faria, G., Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em pavimentos rodoviários, *12º Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, 2012.
8. Freire, A.C., Neves, J., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Faria, G., Use of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) in road pavements validated on experimental test sections. *2<sup>nd</sup> International Conference WASTES*, Guimarães, Portugal, 2013.
9. Freire, A.C., Neves, J., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Faria, G., Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em camadas granulares de Pavimentos Rodoviários validada em trecho piloto, *7º Congresso Rodoviário Português*, Lisboa, 2013.
10. Neves, J., Freire, A.C., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Faria, G., Utilization of recycled materials in unbound granular layers validated by experimental test sections, *9<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Trondheim, Norway, 2013.
11. Freire, A.C., Neves, J., Roque, A., Martins, I., Antunes, M.L., Instrumentação e observação de trechos piloto para estudo de pavimentos rodoviários com resíduos de construção e demolição, *1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil*, Lisboa, ISBN 978-972-8574-44-4, 2016.
12. Simões, R., *Estudo do comportamento de Resíduos de Construção e Demolição aplicados em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários*, Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, 2013.
13. Reis, J., *Contribution to the mechanical characterization of unbound sub-base and base road pavement layers containing reclaimed asphalt pavements*, Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, 2016.
14. Roque, A.J., Martins, I.M., Freire, A.C., Neves, J., Antunes, M.L., Faria, G., Evaluation of environmental impact of construction and demolition recycled materials (C&DRM) from laboratory and field leaching tests, *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ISSMGE, TC 202 Workshop, Paris, France (in CD-ROM), 2013
15. Martins, I.M., Roque, A.J., Freire, A.C., Neves, J.M., Antunes, M.L., Release of dangerous substances from construction and demolition recycled materials used in road pavements – Laboratory and field leaching

- tests, *Proceedings III Progress of Recycling in the Built Environment*, São Paulo, Brazil. Pags. 109-115. Edited by I. Martins, C. Ulsen and S. C. Angulo. ISBN: 978-2-35158-158-2 (in CD-ROM), 2015.
16. Roque, A.J., Martins, I.M, Freire, A.C., Neves, J., Antunes, M.L., Utilização do lisímetro na avaliação da lixiviabilidade de resíduos de construção e demolição de diferentes tipologias, *1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil*, Lisboa, ISBN 978-972-8574-44-4, 2016.
  17. Roque, A.J., Martins, I.M, Freire, A.C., Neves, J., Antunes, M.L., Assessment of environmental hazardous of construction and demolition recycled materials (C&DRM) from laboratory and field leaching tests application in road pavement layers, *Advances in Transportation Geotechnics 3*, The 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), Procedia Engineering Volume 143: 204-2011. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.026, 2016.
  18. Roque, A.J., Martins, I.M, Freire, A.C., Neves, J., Antunes, M.L., Comparação da lixiviação de diferentes tipos de RCD ensaiados em laboratório e no campo. *16º Congresso Nacional de Geotecnia*, Ponta Delgada, 2018.
  19. Regime jurídico da deposição de resíduos em aterro (Decreto-Lei n.º 183). *Diário da República*, 1.ª série - N.º 153 - 10 de agosto de 2009, pp. 5170-5198, Lisboa, 2009.
  20. JOUE, Decisão da Comissão n.º 2014/955/UE de 18 de dezembro de 2014. *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. L 370/44-L 370/86, Bruxelas, Bélgica, 2014.
  21. LNEC E 483, *Guia para a utilização de agregados reciclados provenientes de misturas betuminosas recuperadas para camadas não ligadas de pavimentos rodoviários*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2016.
  22. Martins, A., *Proposta de Catálogo de Pavimentos com Resíduos de Construção e Demolição para Estradas de Baixo Tráfego*, Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, 2015.
  23. Neves, J., Martins, A., Freire, A.C. Catálogo de pavimentos com resíduos de construção e demolição para estradas e arruamentos de baixo tráfego. *8º Congresso Rodoviário Português*, Lisboa, 2016.
  24. Neves, J., *Metodologias de aplicação e controlo da qualidade*, Capítulo 5, Materiais Tratados e Reciclados em Infraestruturas de Transporte, Editores José Neves, Ana Cristina Freire e Fátima Batista, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, ISBN 978-972-49-2293-5, pp. 73-87, 2017.