

APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

APPLICATION FOR CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE (C&DRM) IN ROAD PAVEMENTS

Freire, Ana Cristina; *LNEC, Lisboa, Portugal, acfreire@lnec.pt*
Neves, José; *IST-CESUR; Lisboa, Portugal, neves@civil.ist.utl.pt*
Roque, António José; *LNEC, Lisboa, Portugal, aroque@lnec.pt*
Martins, Isabel Maria; *LNEC; Lisboa, Portugal, imartins@lnec.pt*
Antunes, Maria de Lurdes; *LNEC, Lisboa, Portugal, mlantunes@lnec.pt*
Faria, Gonçalo; *LNEC, Lisboa, Portugal, gfaria@lnec.pt*

RESUMO

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto Superior Técnico (IST) estão a desenvolver desde 2010 o projeto de investigação SUPREMA – *Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infra-estruturas Rodoviárias* – a concretizar ao longo de 3 anos. Com este projeto, pretende-se contribuir para a aplicação sustentável de RCD como agregados em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários, através da melhoria do conhecimento relativo ao desempenho do seu comportamento mecânico e ambiental. Para além da descrição geral do projecto no que diz respeito aos seus objectivos, âmbito e metodologia, o presente artigo apresenta os resultados laboratoriais da caracterização de três agregados reciclados: Betão britado misto (alvenaria e betão), Mistura betuminosa fresada, Mistura betuminosa britada e de um Agregado natural (calcário). Esta caracterização inclui a avaliação geométrica, física, mecânica e ambiental dos materiais.

ABSTRACT

A research project, SUPREMA, aiming to contribute to the sustainable implementation of C&DRM in road pavements, by improving the knowledge concerning the mechanical and environmental behaviour of these materials when placed as aggregates in unbound granular pavement layers, is being developed by the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), in cooperation with Technical University of Lisbon (IST), over three years. In addition to the overall presentation of the project in relation to its objectives, scope and methodology, this paper presents the results of laboratory characterization of recycled aggregates from mixed waste (brick and concrete) and asphalt waste, specifically crushed reclaimed asphalt and milled reclaimed asphalt. This characterization includes geometrical, physical, mechanical and environmental evaluation of materials.

1 - INTRODUÇÃO

A construção civil é uma indústria geradora de grandes quantidades de resíduos, estimando-se uma produção anual nos Estados-Membros da União Europeia em 850 milhões de toneladas (ETC/SCP, 2009). Diversos processos contribuem para a sua formação, indo desde a limpeza do local de obras e movimentação de terras, até sobras, materiais inutilizados e desperdícios ocorridos durante a construção e ainda demolições e operações de manutenção, conservação e reabilitação de construções existentes.

O facto do volume de produção deste fluxo específico de resíduos, designados por Resíduos de Construção e Demolição (RCD), ser muito elevado, associado ao seu potencial de valorização, que em alguns Estados-Membros atinge níveis superiores a 80% e a necessidade de prolongar o tempo de vida útil dos aterros de resíduos, dados a crescente falta de espaços para a sua implementação e os custos elevados da sua construção, exploração e monitorização pós-encerramento, tornam evidente que a diminuição dos volumes existentes destes materiais através da sua reutilização e reciclagem é uma alternativa não só possível, como motora de um desenvolvimento mais sustentável.

Em termos legislativos, a publicação do Decreto-Lei nº 46/2008, de 12 de Março, veio condicionar a deposição dos RCD em aterros de resíduos a uma triagem prévia, contribuindo para uma redução das quantidades depositadas em aterro e promovendo a reutilização dos RCD, ou a incorporação dos RCD em 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 pavimento (base, sub-base e leito de pavimento) é uma solução viável tecnicamente, com evidentes vantagens ambientais e económicas, designadamente por permitir a incorporação de grandes quantidades dos materiais em apreço, mesmo que de diferentes origens. Contudo, em particular no país, existem ainda importantes

lacunas técnico-científicas nos conhecimentos e experiências adquiridos que limitam esta aplicação generalizada dos RCD.

Embora nos anos mais recentes, importantes trabalhos de investigação sobre esta matéria tenham sido desenvolvidos, quer a nível nacional quer internacional, considera-se que é necessário continuar a aprofundar ainda mais o conhecimento a vários níveis: dos materiais, contemplando-se mais a diversidade de resíduos que estão disponíveis; nos ensaios, quer em laboratório quer "in situ", que sustentem o melhor conhecimento sobre o desempenho mecânico e ambiental dos materiais; nas especificações técnicas, que apoiem adequadamente todos os intervenientes no processo; nas aplicações em obra, de forma a alargar o âmbito de utilização dos resíduos, não só ao nível rodoviário mas também a outras infraestruturas de transporte.

Com este propósito, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto Superior Técnico (IST) estão a desenvolver o projecto SUPREMA – *Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infra-estruturas Rodoviárias*, iniciado em 2010 e que terá a duração de 3 anos. Este projeto tem os seguintes objectivos principais:

- Avaliação das características geomecânicas e geoambientais de diferentes tipos de RCD, função da origem, metodologia de triagem e composição final.
- Análise do comportamento dos RCD enquanto materiais granulares não ligados e sua comparação com o comportamento apresentado pelos materiais granulares naturais.
- Determinação dos parâmetros a utilizar no dimensionamento de pavimentos, considerando a aplicação dos RCD.
- Estudo dos aspectos construtivos a desenvolver e aplicar, função do tipo dos RCD, para camadas não ligadas de base e de sub-base e de leito de pavimento.

Para atingir estes objectivos, destaca-se, dentre as várias tarefas que estão propostas para o desenvolvimento do projeto, um conjunto extenso de actividades experimentais a desenvolver quer em laboratório quer "in situ":

- Selecção dos materiais (RCD e materiais naturais) a serem usados no estudo, em função da origem com a definição das metodologias de selecção a adotar e do método de classificação, bem como da caracterização laboratorial a ser realizada, tendo em conta as normas europeias aplicáveis.
- Realização de ensaios de caracterização geométrica, física, mecânica e ambiental dos RCD e dos agregados naturais, previamente seleccionados (como a maioria dos métodos de ensaio têm sido desenvolvidos para materiais naturais, será necessário fazer adaptações de metodologias ou equipamentos de ensaio, de modo a permitir a caracterização dos RCD).
- Realização de ensaios triaxiais cíclicos sobre amostras seleccionadas dos RCD e dos agregados naturais.
- Construção de trechos experimentais à escala real (durante a construção dos pavimentos será efectuado um controle sistemático da qualidade de construção) e sua instrumentação com extensómetros, células de carga e lisímetros.

Os quatro agregados reciclados de RCD e o agregado natural seleccionados para o projeto são os seguintes:

- Resíduos da britagem de betão.
- Resíduos mistos (alvenaria e betão).
- Resíduos de misturas betuminosas fresadas.
- Resíduos de misturas betuminosas britadas.
- Agregado natural (calcário) britado de granulometria extensa.

Tendo em conta o estado actual do desenvolvimento do projeto, no presente artigo divulgam-se os resultados experimentais já alcançados no âmbito da caracterização em laboratório do desempenho mecânico e ambiental dos quatro últimos materiais.

No caso dos resíduos de misturas betuminosas, provenientes de britagem e fresagem de pavimentos das camadas betuminosas dos pavimentos, trata-se de materiais ainda muito pouco estudados e divulgados

na bibliografia, mas para os quais se reconhece uma maior complexidade de abordagem, sendo necessário por isso uma aproximação à metodologia mais adequada à sua caracterização.

Embora a aplicação mais usual das misturas betuminosas recuperadas de pavimentos existentes, por meio da sua fresagem, seja o fabrico de misturas betuminosas recicladas, existe uma quantidade significativa deste tipo de materiais que não obedecem às exigências para este tipo de utilização, constituindo deste modo uma fonte geradora de apreciáveis quantidades de RCD com grande potencial para aplicação em camadas de leito de pavimento e de sub-base, enquanto materiais não ligados.

O agregado natural calcário britado de granulometria extensa (adiante designado por ABGE), por um lado, constituirá por si só o material natural de referência e, por outro, será utilizado na preparação de misturas com os resíduos provenientes de misturas betuminosas fresadas, segundo diferentes composições. No artigo apresentam-se resultados para a composição: 70% de ABGE e 30% de Mistura betuminosa fresada.

O artigo apresenta a metodologia de caracterização laboratorial dos materiais em apreço, adoptada no projeto e divulga os principais resultados dos ensaios de laboratório relacionados com a caracterização dos constituintes dos resíduos, com o desempenho mecânico (ensaios de determinação das principais características dos agregados relativas às propriedades geométricas, físicas e mecânicas) e com o desempenho ambiental (ensaios de lixiviação). Tendo em conta os resultados experimentais obtidos, são sintetizadas as principais considerações finais relacionadas com as propriedades avaliadas que, de um modo geral, encorajam ao desenvolvimento do projeto segundo a metodologia proposta e valorizam as etapas seguintes, nomeadamente a realização dos ensaios triaxiais cíclicos e a construção dos trechos experimentais à escala real com a correspondente instrumentação e observação.

Os principais resultados esperados com o desenvolvimento deste projeto são: i) contribuir para o estudo de RCD com maior potencial de aplicação em camadas não ligadas de pavimentos, incluindo o leito de pavimento, e também com maior disponibilidade, em função daquilo que é o panorama nacional de produção de resíduos; ii) elaborar recomendações práticas para o projecto e a construção de pavimentos rodoviários com a utilização de RCD, incluindo um guia para a aplicação de misturas betuminosas fresadas como materiais granulares não ligados em camadas de sub-base e de leito de pavimento, à semelhança dos já produzidos nas especificações do LNEC E 473 - 2009 e LNEC E 474 - 2009.

2 - METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DOS MATERIAIS

Os constituintes dos agregados grossos presentes em cada RCD foram identificados e classificados de acordo com a metodologia da norma EN 933-11:2009, através da separação manual dos diferentes componentes, com excepção feita às partículas flutuantes.

As principais propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos RCD foram avaliadas através de ensaios realizados segundo as normas aplicáveis a misturas não ligadas e tendo em consideração as especificações portuguesas LNEC para a utilização de agregados reciclados: LNEC E 473 - 2009, relativa à aplicação em camadas granulares não ligadas de pavimentos e LNEC E 474 - 2009, para aplicações em aterro e camada de leito do pavimento. Em termos genéricos, a metodologia seguida para cada material foi a seguinte:

- Selecção das amostras representativas de cada material (NP EN 13286-1:2009).
- Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas através de ensaios, incluindo as características de compactação de referência – teor em água e baridade seca.

Na determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas foram realizados os seguintes ensaios, seguindo as normas referidas:

- a) A análise granulométrica de cada material foi realizada de acordo com as normas NP EN 933-1:2000 e EN 933-1:1997/A 1:2005, pelo método de peneiração com lavagem do agregado para remover as partículas de argila e outras partículas mais finas do agregado, com excepção da Mistura betuminosa fresada que foi analisada sem lavagem do agregado.
- b) A forma das partículas foi avaliada através do índice de achatamento, conforme preconizado na norma NP EN 933-3:2011 e do índice de forma, conforme a norma EN 933-4:2008. Estes procedimentos aplicaram-se à fracção d/D dos agregados em que $D \leq 63$ mm e $d \geq 4$ mm.
- c) A qualidade dos finos das amostras em estudo foi avaliada pela determinação do equivalente de areia, conforme a norma NP EN 933-8:2002, e o valor do azul de metileno, de acordo com a norma EN 933-9:2009.

- d) Na determinação das massas volúmicas e da absorção de água foi utilizada a norma NP EN 1097-6:2003/A1:2010, tendo-se ensaiado a fracção d/D das amostras de dimensões máxima inferior ou igual a 31,5 mm (D) e mínima superior ou igual a 0,063 mm (d).
- e) A avaliação da resistência à fragmentação das partículas de agregado grosso baseou-se no coeficiente de Los Angeles conforme preconizado na norma EN 1097-2:2010. A resistência ao desgaste das partículas de agregado grosso foi avaliada pelo coeficiente micro-Deval, determinado conforme o procedimento da norma EN 1097-1:2011.

A compactação dos materiais foi estudada em ensaios de compactação Proctor (EN 13286-2:2010).

Sabendo que na aplicação de RCD em infraestruturas rodoviárias não é suficiente exigir apenas um desempenho mecânico adequado, também a preocupação ambiental relativa a uma possível contaminação das águas superficiais e subterrâneas obriga à avaliação da libertação de substâncias perigosas, com o estudo da lixiviação destas substâncias a partir dos materiais em estudo, através da realização de um conjunto de ensaios laboratoriais e "in situ".

Segundo as especificações LNEC E 473-2009 e LNEC E 474-2009, a libertação de substâncias perigosas é avaliada através da norma EN 12457-4:2002 e os limites de lixiviação devem cumprir a Decisão do Conselho sobre a admissão de resíduos em aterros, 2003/33/CE (transposta para a legislação nacional pelo DL 183/2009, de 10 Agosto) relativamente aos resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes. Os mesmos critérios são também adoptados noutros países Europeus (Böhmer, S. *et al.*, 2008). Já no âmbito da norma NP EN 13242:2002+A1:2010, os ensaios de lixiviação são realizados de acordo com a norma NP EN 1744-3:2005. Para este ensaio não há critérios definidos para avaliar os resultados de lixiviação, sendo a comparação directa com resultados obtidos em agregados naturais uma abordagem possível.

Desta forma, a fase inicial do projecto contemplou a realização de ensaios de lixiviação de acordo com as normas EN 12457-4:2002 e NP EN 1744-3:2005 para avaliar a libertação de contaminantes a curto prazo. Em ambos os ensaios foi considerada uma relação líquido/sólido de 10:1 e um tempo de lixiviação de 24 horas. Os métodos de ensaio diferem, no essencial no modo de preparação da amostra, na granulometria do material e no tipo de agitação. Em ambos os ensaios pressupõe-se que são atingidas condições de equilíbrio, ou quase-equilíbrio, entre as fases líquida e sólida ao longo do ensaio, contudo existe alguma controvérsia sobre este assunto (van der Sloot, H.A. *et al.*, 2002). Os ensaios de lixiviação foram realizados em duas réplicas de amostras representativas dos diferentes materiais. Os eluatos foram filtrados por filtro de 0,45 µm e foram medidos o pH e a condutividade. Posteriormente foram acidificados com ácido nítrico ultra-puro antes de avaliar a concentração de metais pesados através da espectrofotometria de absorção atómica em forno de grafite. Os cloretos e sulfatos foram quantificados, respectivamente, por titulação e gravimetria e o Carbono Orgânico Dissolvido (COD) foi avaliado por oxidação por via húmida.

Numa fase mais adiantada do projeto pretende-se realizar ensaios de percolação em coluna com fluxo ascendente, de acordo com a especificação CEN/TS 14405:2004, e ensaios "in situ" utilizando lisímetros. Estes ensaios permitirão medir a libertação de poluentes em condições reais ou quase reais e compará-los com os resultados dos ensaios de lixiviação requeridos na legislação. De salientar que os resultados destes ensaios de lixiviação são habitualmente considerados conservadores (ALT-MAT, 2001), podendo com isso inviabilizar a reciclagem de alguns resíduos, pelo que se entendeu necessário proceder à comparação entre os resultados dos ensaios de lixiviação em laboratório conduzidos de acordo com a norma EN 12457-4:2002 e os resultados dos ensaios em coluna (laboratório) e em lisímetros ("in situ"). Pretende-se que os resultados globais do projeto em curso, no que diz respeito a esta questão, constituam uma contribuição importante para avaliar a actual classificação do risco ambiental de alguns fluxos de RCD baseados nos ensaios de lixiviação requeridos pela legislação.

3 - ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 - Materiais estudados

Os RCD considerados no estudo experimental apresentado neste artigo têm as seguintes proveniências:

- a) Resíduos mistos (alvenaria e betão).
- b) Resíduos de misturas betuminosas britadas.
- c) Resíduos de misturas betuminosas recuperadas (misturas betuminosas fresadas em obra).

Na Figura 1 são apresentadas amostras dos materiais estudados: Betão britado misto (Figura 1a)), Mistura betuminosa britada (Figura 1b)) e Mistura betuminosa fresada (Figura 1c)).



a) b) c)

Figura 1 – Materiais estudados: a) Betão britado misto, b) Mistura betuminosa britada, c) Mistura betuminosa fresada

Como referido, para além dos RCD também foi estudado um agregado natural britado de granulometria extensa (ABGE), de natureza calcária, com as características dos materiais correntemente utilizados nas camadas granulares não ligadas de sub-base e base dos pavimentos rodoviários, conforme as especificações técnicas do Caderno de Encargos-tipo Obra da Estradas de Portugal (CETO) (EP, 2009). Este material serviu de referência para a comparação dos resultados experimentais e também para ser incorporado em misturas com os RCD, como foi o caso da Mistura betuminosa fresada.

As amostras ensaiadas foram secas em estufa até massa constante, a uma temperatura de secagem inferior ou igual a 40°C. A adoção deste limite deveu-se à presença de material betuminoso nas amostras em ensaio, pelo que se considerou recomendável que os materiais não fossem submetidos às temperaturas superiores que usualmente são utilizadas nas misturas de agregados naturais, da ordem dos 105°C.

No caso da Mistura betuminosa fresada, esta foi incorporada numa mistura com o ABGE. A composição estudada compreendeu uma taxa de incorporação de 30% da Mistura betuminosa fresada. Este valor teve em atenção o limite máximo apresentado na especificação LNEC E 473-2009.

3.2 - Constituintes dos RCD

Os constituintes dos agregados reciclados estudados estão listados no Quadro 1. De acordo com as proporções dos constituintes, conclui-se que o RCD Betão britado misto pertence à classe C de agregados reciclados abrangidos pela especificação LNEC E 473-2009. Para a Mistura betuminosa britada e para a Mistura betuminosa fresada não é possível aplicar o critério de classificação preconizado nesta especificação, uma vez que estas misturas apresentam como limite máximo o valor de 30% de incorporação de materiais betuminosos.

Quadro 1 – Classificação dos constituintes dos RCD

Constituintes	Betão britado misto	Mistura betuminosa britada	Mistura betuminosa fresada
Rc [%]	60	6,2	0,0
Ru [%]	24	29	0,0
Ra [%]	12	64	98
Rb [%]	3,7	0,9	0,0
Rg [%]	0,0	0,0	0,0
X [%]	0,1	0,0	0,8
FL [cm ³ /kg]	0,0	0,0	0,0

LEGENDA:

FL - Volume de material flutuante

Rc - Betão; Argamassas

Ru - Agregados não ligados; Pedra natural; Agregados tratados com ligantes hidráulicos

Ra - Materiais betuminosos

Rb - Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolos, ladrilhos, telhas); Elementos de alvenaria de silicatos de cálcio; Betão celular não flutuante

Rg - Vidro

X - Madeira; Metal ferroso e não ferroso; Borracha; Gesso; Partículas de argila e solo

3.3 - Resultados dos ensaios das propriedades geométricas, físicas e mecânicas

Para os materiais em estudo foram realizados os ensaios de caracterização das propriedades geométricas, físicas e mecânicas de acordo com a metodologia apresentada anteriormente, após a selecção das amostras representativas de cada material a ensaiar, segundo a norma NP EN 13286-1:2009.

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas dos RCD estudados, bem como do ABGE e do fuso granulométrico definido no CETO (EP, 2009), para agregados reciclados a aplicar em camadas granulares não ligadas.

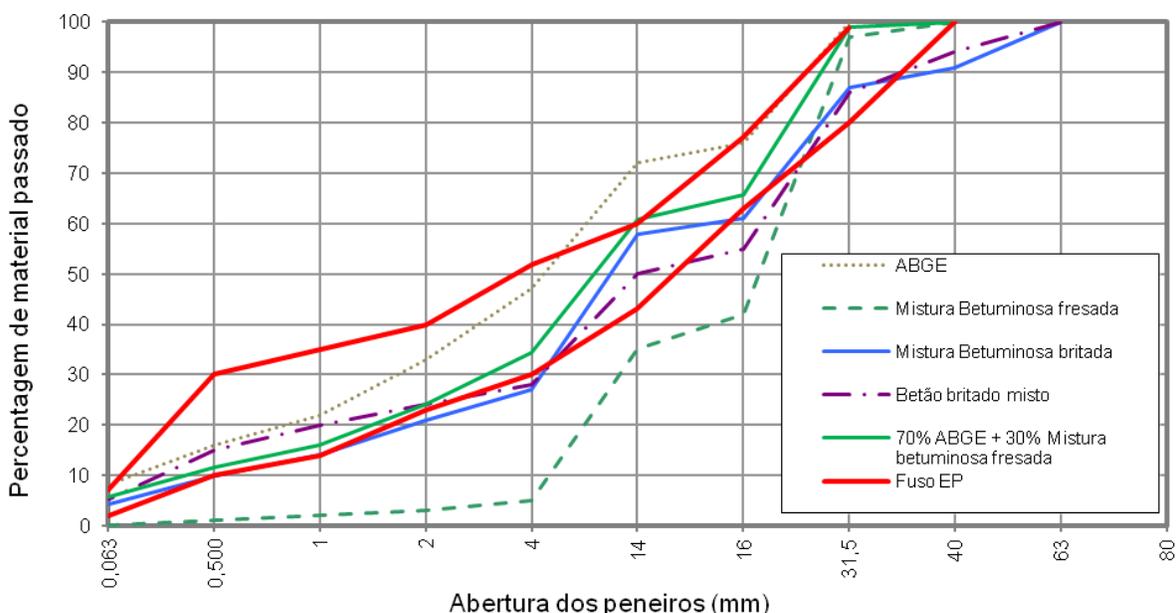


Figura 2 – Curvas granulométricas dos materiais estudados e fuso granulométrico do CETO

Da análise da Figura 2 constata-se que nem todos os materiais cumprem o fuso granulométrico especificado. Verifica-se que a Mistura betuminosa fresada e o Betão britado misto possuem partículas grossas para além do estipulado no fuso granulométrico apresentado. A Mistura betuminosa fresada apresenta uma falta de fracção fina importante, o que justificou claramente a sua mistura com o ABGE.

No Quadro 2 apresentam-se os resultados obtidos na caracterização geométrica, física e mecânica dos materiais em estudo.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios das propriedades geométricas, físicas e mecânicas

Propriedade	Método de ensaio	Betão britado misto	Mistura betuminosa britada	Mistura betuminosa fresada
Índice de achatamento	NP EN 933-3	8	9	17
Índice de forma	EN 933-4	14	8	21
Equivalente de areia	NP EN 933-8	23	41	73
Azul de metileno*	EN 933-9	1,4	1,0	0,3
Resistência ao desgaste (coeficiente micro-Deval)	EN 1097-1	31	25	14
Resistência à fragmentação (coeficiente de Los Angeles)	EN 1097-2	38	25	22

* $MB_{0/D}$ – Valor do azul de metileno expresso em g/kg segundo a norma de ensaio EN 933-9:2009 multiplicado pela percentagem da fracção passada no peneiro de 2 mm.

Na Figuras 3 a 5 é possível analisar comparativamente os valores obtidos na caracterização laboratorial dos materiais estudados no que respeita às características geométricas, de qualidade dos finos e mecânicas.

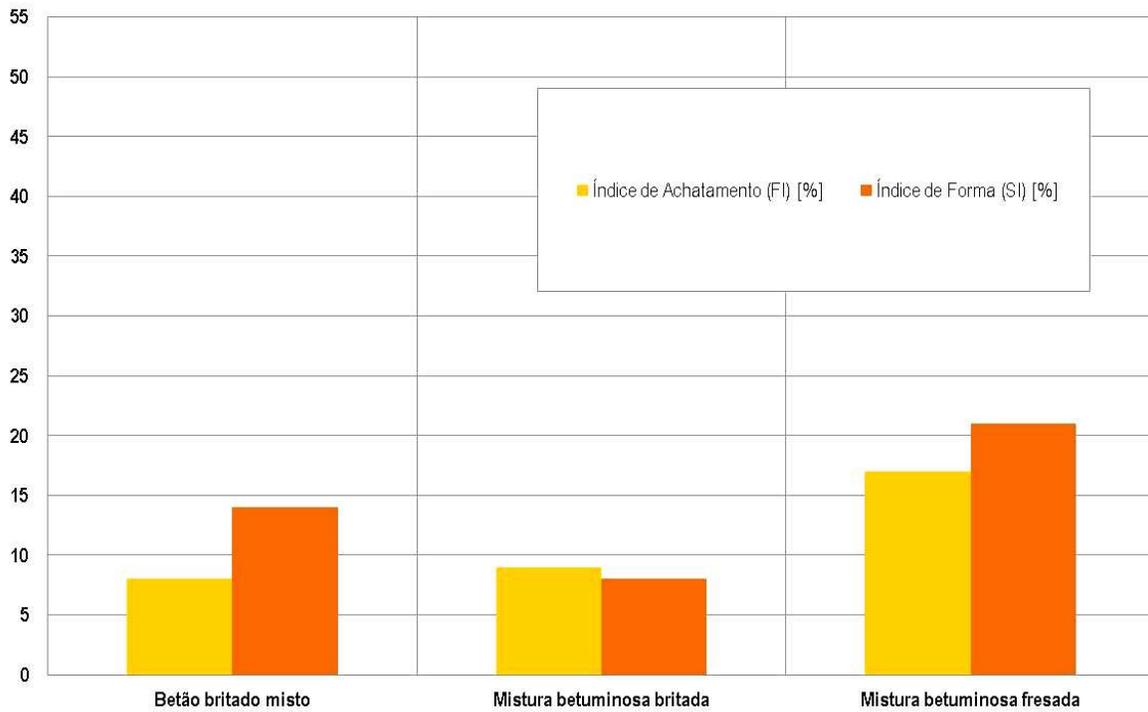


Figura 3 – Análise comparativa da forma das partículas dos materiais estudados

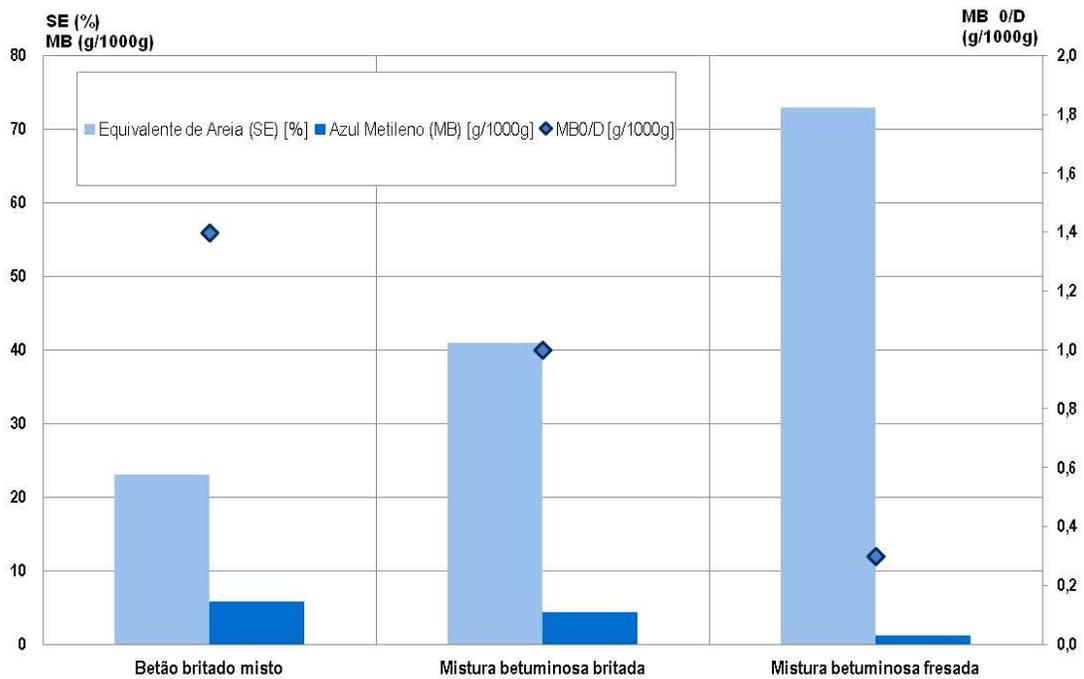


Figura 4 – Análise comparativa da avaliação da qualidade dos finos dos materiais estudados

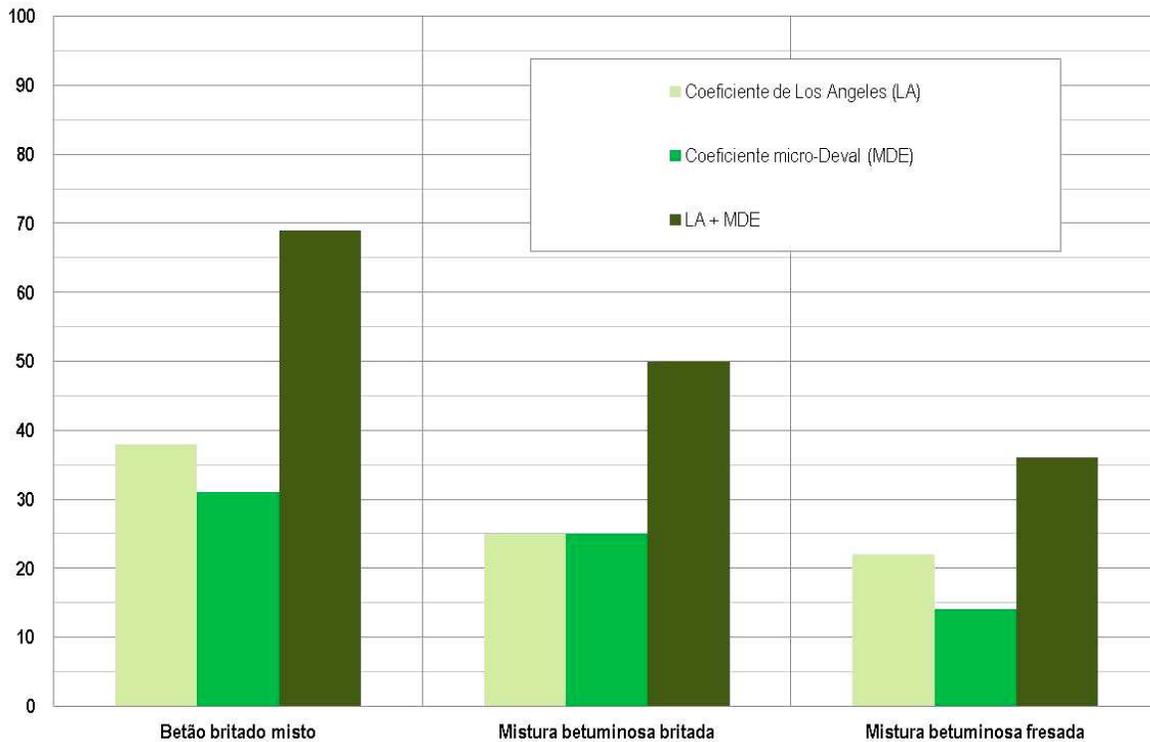


Figura 5 – Análise comparativa das características mecânicas dos materiais estudados

Da análise dos resultados apresentados no Quadro 2 bem como na Figura 3 observa-se que os valores obtidos para os índices de achatamento e de forma para o RCD Mistura betuminosa fresada são superiores aos apresentados para os outros dois materiais estudados, cumprindo, no entanto os requisitos apresentados no Caderno de Encargos da EP (EP, 2009) especificados para materiais naturais.

Em termos da qualidade dos finos, expresso pelo parâmetro MB 0/D, obtido a partir do valor do azul de metileno, representado graficamente na Figura 4, para a amostra de Betão britado misto o valor deste parâmetro é superior ao valor máximo preconizado na especificação LNEC E 473-2009, para aplicação em camadas não ligadas de pavimentos. No entanto, o valor está dentro dos limites da especificação LNEC E 474-2009 para aplicação em aterro e camada de leito. Os restantes RCD ensaiados apresentam valores de qualidade de finos que cumprem os limites apresentados em ambas as especificações. O valor do equivalente de areia da amostra de Mistura betuminosa fresada é o mais elevado, correspondendo ao menor valor de azul de metileno.

No que concerne às características mecânicas (Quadro 2 e Figura 5), expressas pelos coeficientes de Los Angeles e de micro-Deval, as três amostras ensaiadas cumprem os requisitos mínimos apresentados nas especificações LNEC E 473-2009 e LNEC E 474-2009, quer em termos de valores individuais, quer quando associados (LA+MDE). Para estas propriedades, é o RCD Betão britado misto que apresenta os valores mais elevados.

Os resultados dos ensaios das massas volúmicas das partículas e da absorção de água realizadas nos três agregados reciclados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de massas volúmicas e absorção de água dos RCD

Parâmetro	Fração	Betão britado misto	Mistura betuminosa britada	Mistura betuminosa fresada	
Massa volúmica Mg/m ³	Material impermeável		2,604	2,501	
	Partículas saturadas	4,0 / 31,5	2,443	2,456	
	Partículas secas		2,343	2,426	
	Material impermeável		2,496	2,324	2,403
	Partículas saturadas	0,063 / 4,0	2,396	2,272	2,344
	Partículas secas		2,329	2,234	2,303
Absorção de água (%)		31,5 / 63,0	4,3	0,8	0,9
		4,0 / 31,5	4,3	1,2	-
		0,063 / 4,0	2,9	1,7	1,8

Os valores obtidos para a massa volúmica das partículas são ligeiramente inferiores aos normalmente obtidos para materiais naturais, especialmente na fração 0,063/4,0 mm.

Em relação à absorção de água, os valores obtidos para as amostras de Mistura betuminosa britada e Mistura betuminosa fresada, estão, de um modo geral, dentro da faixa de valores normalmente observados para os materiais naturais. Os valores obtidos para o Betão britado misto são mais elevados que os usualmente obtidos para materiais naturais.

3.4 - Resultados dos ensaios de compactação

As características de compactação dos materiais em estudo foram avaliadas através do ensaio de compactação Proctor, que permite conhecer qual o teor em água que o material deve apresentar no momento da compactação (teor em água ótimo), de modo a que seja possível obter a máxima baridade seca deste, sendo realizado através da norma EN 13286-2:2010.

Às várias amostras são adicionadas diferentes quantidades de água, sendo posteriormente compactadas num molde normalizado. No caso em análise, a compactação foi efectuada mecanicamente, sendo considerada a compactação pesada (ensaio Proctor modificado) em molde grande (B). Após este processo, através de diferenças de peso e com recurso à secagem em estufa, são determinados os teores em água e as respectivas baridades secas dos vários provetes por forma a verificar qual o teor em água (teor em água ótimo) que possibilitou obter a maior baridade seca (máxima baridade seca).

Para as amostras de Betão britado misto e de Mistura Betuminosa britada, dadas as percentagens de material retido no peneiro com 31,5 mm de abertura, houve a necessidade de proceder à truncagem daquele material, tendo sido posteriormente aplicadas as correcções preconizadas no Anexo C da norma, relativamente aos valores da baridade seca máxima e do teor em água ótimo.

Na Figura 3 apresentam-se várias fases da realização do ensaio Proctor sobre as amostras de 70% ABGE + 30% Mistura betuminosa fresada, referindo-se a preparação da amostra com adição de água (Figuras 6a) e 6b)) e o aspeto de um provete após a compactação em molde Proctor (Figura 6c)).



a)

b)

c)

Figura 6 – Aspeto do material (70% ABGE + 30% Mistura betuminosa fresada), em diversas fases do ensaio de compactação Proctor

No Quadro 4 apresentam-se os valores da baridade seca máxima e do teor em água ótimo obtidos para os materiais estudados, bem como os valores corrigidos para os RCD Betão britado misto e Mistura betuminosa britada.

Quadro 4 – Resultados do ensaio de compactação Proctor

RCD	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	W _{opm} (%)	$(\rho_{d,max})_c$ (g/cm ³)	$(W_{opm})_c$ (%)
Betão britado misto	2,04	9,4	2,05	8,7
Mistura betuminosa britada	2,06	6,5	2,06	5,8
70% ABGE + 30% Mistura betuminosa fresada	2,09	3,0	-	-
ABGE	2,28	5,8	-	-

LEGENDA:

- $\rho_{d,max}$ – baridade seca máxima
- W_{opm} – teor em água ótimo
- $(\rho_{d,max})_c$ – baridade seca máxima corrigida
- $(W_{opm})_c$ – teor em água ótimo corrigido

A Figura 7 apresenta as curvas obtidas no ensaio de compactação Proctor para os RCD estudados, bem como para o ABGE.

Os resultados obtidos para o RCD Betão britado misto, quando comparados com os usualmente verificados para os agregados tradicionais, apresentam valores de teores em água bastante superiores e de baridade seca máxima inferiores aos usuais, como seria de esperar, atendendo à elevada absorção dos materiais e à menor massa volúmica das partículas.

Para os outros materiais, embora os valores do teor em água ótimo sejam inferiores, mais aproximados ao valor determinado para o material natural, os valores da baridade seca máxima são bastante inferiores aos apresentados para o ABGE.

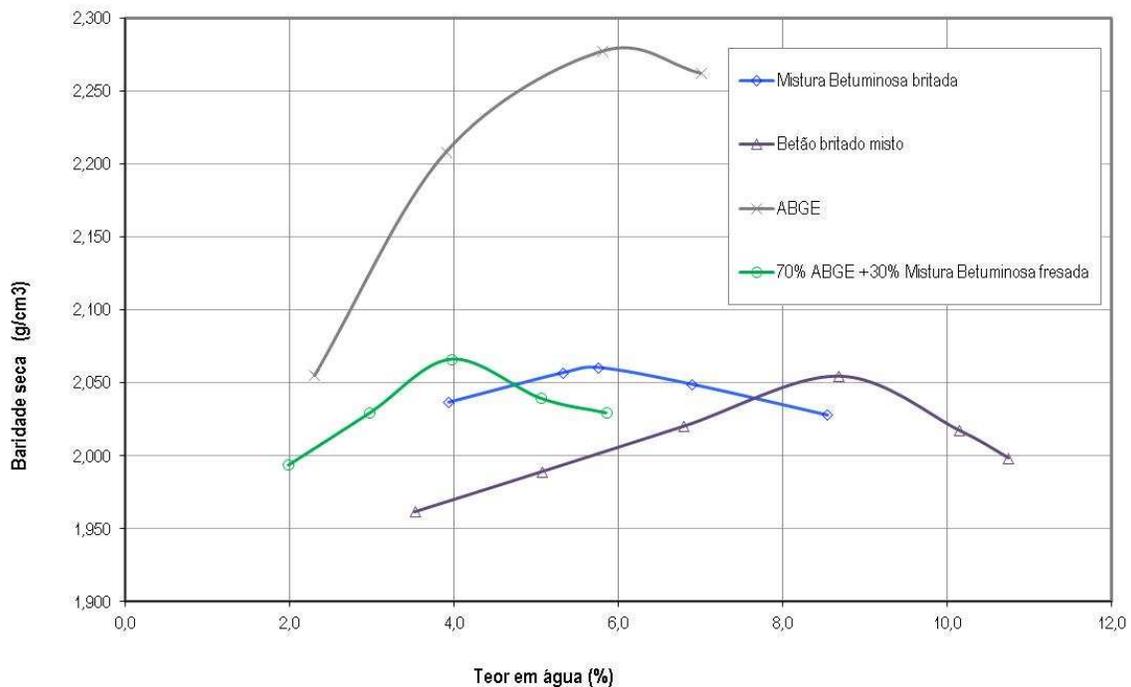


Figura 7 – Curvas de compactação Proctor dos materiais estudados

3.5 - Resultados dos ensaios de lixiviação

Os resultados dos ensaios de lixiviação realizados nos materiais estudados segundo a norma EN 12457-4:2002 são apresentados no Quadro 5, juntamente com os valores limite de lixiviação dos resíduos admissíveis em aterros de resíduos inertes do Decreto-Lei 183/2009. Nenhum dos teores em contaminantes avaliados é superior aos limites indicados. Para os metais analisados, todos pertencentes à Lista I e II de substâncias perigosas da Directiva 2006/11/CE (2006), os resultados foram muito inferiores aos limites para resíduos inertes, excepção feita ao crómio no Betão britado misto que é de aproximadamente 4 vezes inferior ao limite. De salientar que a diminuta libertação dos contaminantes no curto prazo para os diferentes RCD evidencia a viabilidade da sua utilização como materiais alternativos na construção de pavimentos.

Quadro 5 – Resultados dos ensaios de lixiviação – EN 12457-4

Parâmetros [mg/kg, matéria seca]	Betão britado misto	Mistura betuminosa britada	Mistura betuminosa fresada	ABGE	Valor limite para resíduos inertes
pH	11,29	10,95	9,67	7,90	-
Cádmio, Cd	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,04
Crómio, Cr	0,126	0,046	<0,010	<0,010	0,5
Chumbo, Pb	<0,024	<0,024	<0,024	<0,024	0,5
Zinco, Zn	0,010	<0,006	<0,006	0,035	4
Cobre, Cu	0,045	0,030	<0,014	<0,014	2
Níquel, Ni	<0,026	<0,026	<0,026	<0,026	0,4
Cloreto, Cl ⁻	44	35	35	44	800
Sulfato, SO ₄ ²⁻	267	124	13	145	1000
Carbono Orgânico Dissolvido, COD	46	71	94	71	500

O Quadro 6 lista os resultados dos parâmetros avaliados nos eluatos obtidos a partir dos quatro materiais no ensaio de lixiviação de acordo com a NP EN 1744-3:2005. A libertação do Cd, Pb e Ni está abaixo dos limites de quantificação em todos os agregados e os teores de Cr, Zn, Cu, Cl⁻ e SO₄²⁻ são mais elevados nos agregados reciclados quando comparados com o ABGE, com algumas excepções na Mistura betuminosa fresada. O pH de todos os eluatos é menor neste ensaio de lixiviação e, como se sabe, este factor é de primordial importância na libertação de espécies químicas. De um modo geral, os teores de Zn, Cl⁻ e SO₄²⁻ no ensaio de lixiviação de acordo com a NP EN 1744-3:2005 são mais elevados em relação aos libertados no ensaio de lixiviação de acordo com a EN 12457-4:2002, enquanto os teores de Cr e Cu são mais baixos.

Quadro 6 – Resultados dos ensaios de lixiviação – NP EN 1744-3

Parâmetros [mg/kg, matéria seca]	Betão britado misto	Mistura betuminosa britada	Mistura betuminosa fresada	ABGE
pH	9,96	8,12	8,14	6,86
Cádmio, Cd	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Crómio, Cr	0,103	0,022	<0,010	<0,010
Chumbo, Pb	<0,024	<0,024	<0,024	<0,024
Zinco, Zn	0,035	0,023	0,053	0,021
Cobre, Cu	0,022	0,016	<0,014	<0,014
Níquel, Ni	<0,026	<0,026	<0,026	<0,026
Cloreto, Cl ⁻	53	53	35	35
Sulfato, SO ₄ ²⁻	343	163	17,5	159

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No artigo foram apresentados os principais resultados laboratoriais de identificação e caracterização de alguns dos RCD em estudo no projeto SUPREMA, nomeadamente Betão britado misto, Mistura betuminosa britada e Mistura betuminosa fresada. Paralelamente foi também ensaiado um agregado britado de granulometria extensa (ABGE), de natureza calcária, como material de referência. A escolha destes materiais reciclados deve-se ao facto de serem ainda muito pouco conhecidas as suas propriedades e desempenho em obra, pelo que se pretende avaliar a viabilidade técnica da sua aplicação na construção de camadas granulares não ligadas de base, sub-base e leito de pavimento.

Primeiramente procedeu-se à identificação dos constituintes dos RCD com base na metodologia da norma EN 933-11:2009. Constatou-se que o Betão britado misto pertence à classe C de agregados reciclados abrangidos pela especificação LNEC E 473-2009. No que diz respeito às Misturas betuminosas britada e fresada, não foi possível aplicar o critério de classificação preconizado nas especificações referidas, dados os limites apresentados em termos de taxas de incorporação.

A análise granulométrica evidenciou que nem sempre é possível cumprir o fuso granulométrico especificado no caderno de encargos da EP (2009) para a aplicação de agregados reciclados em camadas do pavimento. Conclui-se que para alguns materiais é necessário proceder a correcções granulométricas, nomeadamente no que respeita à fracção grossa ou à fracção fina. Este é o caso do RCD Mistura betuminosa fresada em que foi necessário corrigir a quantidade de finos por mistura com o ABGE.

Foram ainda avaliadas outras propriedades dos materiais: índice de forma, índice de achatamento, equivalente de areia, azul de metileno, resistência ao desgaste (coeficiente micro-Deval) e resistência à fragmentação (coeficiente de Los Angeles). Constata-se que, em princípio, há viabilidade na utilização destes materiais em camadas não ligadas dos pavimentos rodoviários, tendo em atenção os requisitos constantes das especificações LNEC E 473-2009 e LNEC E 474-2009.

Foi realizado o ensaio de compactação Proctor modificado tendo em vista a obtenção dos valores da baridade seca máxima e do teor em água ótimo, tendo-se verificado que os RCD ensaiados apresentam valores distintos dos usualmente observados para materiais naturais. O RCD Betão britado misto é o material que apresenta valores de teor em água ótimo superior e de baridade seca máxima inferior aos normalmente obtidos para os materiais naturais.

No que diz respeito aos ensaios de lixiviação, os primeiros resultados apontam para a possível utilização dos RCD pois os teores dos contaminantes analisados são inferiores aos valores limite para deposição de resíduos em aterros para resíduos inertes, cumprindo os requisitos estabelecidos nos documentos de referência. Contudo, uma conclusão final sobre o risco ambiental associado à utilização destes resíduos só será tomada quando estiverem concluídos todos os ensaios de lixiviação preconizados neste projeto de investigação.

Com o desenvolvimento em curso do projecto SUPREMA, espera-se reforçar as conclusões agora alcançadas, através da realização não só de mais ensaios de laboratório, quer nestes mesmos materiais estudados quer noutros tipos de RCD, mas também de ensaios "in situ" em trechos experimentais que irão ser alvo de instrumentação e observação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do projecto "PTDC/ECM/100931/2008 - SUPREMA - Aplicação Sustentável de Construção e Demolição Materiais Reciclados (RCD) em Infra-Estruturas Rodoviárias" financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior.

Também são apresentados agradecimentos à empresa Ambigroup, SGPS, SA, pelo fornecimento dos materiais estudados (Betão britado misto, Mistura betuminosa britada e ABGE), bem como também à empresa Teodoro Gomes Alho, SA pelo fornecimento da Mistura betuminosa fresada.

REFERÊNCIAS

- ALT-MAT (2001). Alternative materials in road construction. *Project Funded by European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme*, 1998/1999.
- Böhmer, S., Moser, G., Neubauer, C., Peltoniemi, M., Schachermayer, E., Tesar, M., Walter, B. e Winter, B. (2008). *Aggregates case study*, Final report, Umweltbundesamt. Disponível em <http://www.umweltbundesamt.at>. Acedido em 01/08/2011.
- CEN/TS 14405 (2004). *Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Up-flow percolation test (under specified conditions)*. European Committee for Standardization.
- Council Decision 2003/33/EC (2003) - *Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC*. Official Journal of European Union L11/27 of 16 January 2003.
- Directive 2006/11/EC (2006) - *Directive of the European Parliament and the Council of 15 February 2006 on pollution caused by certain dangerous substances discharged into the aquatic environment of the Community (Codified version)*. (Text with EEA relevance). Official Journal of European Union L64/52 of 4 March 2006.
- DL 46/2008 (2008). Regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras ou demolições de edifícios ou de derrocadas (RCD).

- DL 183/2009 (2009). Deposição de resíduos em aterros. Transposição para a ordem jurídica nacional da Directiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de Abril.
- EN 933-1:1997/A 1:2005 (1997+A1:2005). *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.* (Ed. 1).
- EN 933-4 (2008). *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 4: Determination of particle shape - Shape index.* (Ed. 2).
- EN 933-9 (2009). *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test.* (Ed. 2).
- EN 933-11 (2009). *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate.* (Ed. 1).
- EN 1097-1 (2011). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval).* (Ed. 2).
- EN 1097-2 (2010). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.* (Ed. 2).
- EN 12457-4 (2002). *Characterization of waste. Leaching. Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle sizes below 10 mm (without or with size reduction).* (Ed. 1).
- EN 13286-2 (2010). *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content - Proctor compaction.* (Ed. 2).
- EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - Pavimentação.* Estradas de Portugal S.A., Fevereiro.
- ETC/SCP (2009). Working paper 2/2009 - EU as a Recycling Society. *Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU.*
- LNEC E 473 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos.*
- LNEC E 474 (2009). *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.*
- NP EN 933-1 (2000). *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração.* (Ed. 1).
- NP EN 933-3 (2011). *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento.* (Ed. 3).
- NP EN 933-8 (2002). *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos. Ensaio do equivalente de areia.* (Ed. 1).
- NP EN 1097-6:2003/A1:2010 (2003+A1:2010). *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.* (Ed. 1).
- NP EN 13242:2002/A1:2010 (2002+A1:2010). *Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil na construção rodoviária.* (Ed. 2)
- NP EN 13286-1 (2009). *Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos. Parte 1: Métodos de ensaio para a determinação da baridade e do teor de água. Introdução, requisitos gerais e amostragem.* (Ed. 1).
- NP EN 1744-3 (2005). *Ensaios das propriedades químicas dos agregados. Parte 3: Preparação de eluatos por lixiviação dos agregados.* (Ed. 1).
- Van der Sloot, H. A. e Mulder, E. (2002). *Test methods to assess environmental properties of aggregates in different applications: The role of EN 1744-3,* Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-C-02-011.