

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PRODUZIDOS EM PORTUGAL DE ACORDO COM O ACERVO NORMATIVO EUROPEU Recycled aggregates characterization according to the European Standards

FREIRE, ANA CRISTINA

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Portugal,
acfreire@lnec.pt*

ANTUNES, MARIA DE LURDES

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Portugal,
mlanunes@lnec.pt*

Resumo: Atendendo à previsível escassez dos recursos naturais, e às vantagens ambientais da reutilização de materiais, a aplicação de agregados reciclados na construção rodoviária tem vindo a suscitar um interesse crescente por parte de diversos intervenientes.

Com o objectivo de estudar a aplicabilidade das normas de ensaio existentes a agregados reciclados produzidos em Portugal, foi estabelecido um Protocolo de Cooperação entre a Estradas de Portugal, E.P., S.A. e o LNEC, no âmbito do qual se realizou um estudo laboratorial para caracterização de cinco tipos de materiais seleccionados, com a realização de ensaios de classificação dos constituintes, de avaliação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas, e a caracterização química do eluato, no contexto da sua aplicação na construção rodoviária.

Nesta comunicação apresentam-se os principais resultados obtidos e analisa-se a aplicabilidade da Norma EN 933-11 e dos restantes métodos de ensaio estudados à caracterização dos agregados reciclados. Apresenta-se ainda o enquadramento dos materiais estudados no contexto da especificação LNEC E 473, reeditada em 2009, e que constitui um guia para a aplicação de agregados reciclados em camadas não ligadas de base e de sub-base.

Abstract: Due to the anticipated shortage of natural resources, and the environmental benefits of the reuse of materials that otherwise would be taken to landfill, the application of recycled aggregates in road construction has been given an increasing interest.

A Cooperation Protocol aimed at the study of the applicability of the existing test for recycled aggregates produced in Portugal, was established between Estradas de Portugal, EP, SA and LNEC. A laboratory study to characterize five types of materials was performed and consisted in the classification of the constituents, the evaluation of geometric, mechanical and physical properties and the chemical characterization of leachate, for road construction application.

This paper presents the results obtained; and analyzes the applicability of the European standard EN 933-11 and other test methods to characterize recycled aggregates. The materials are also classified according to the specification LNEC E 473, reissued in 2009, as a guide to the application of recycled aggregates in base and sub-base layers.

1 INTRODUÇÃO

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) constituem um dos mais importantes tipos de resíduos produzidos na Europa. Estima-se que, dos cerca de 1,3 biliões de toneladas de resíduos gerados em 2002 (UE 25), 510 milhões de toneladas sejam provenientes da indústria da construção. Em média, estima-se que 30% do volume total de RCD é reciclado, com taxas de reciclagem variáveis entre os diferentes estados-membros [Gonçalves *et. al* (2007)].

Atendendo à previsível escassez dos recursos naturais, bem como às inequívocas vantagens ambientais da reutilização de materiais que, de outra forma, seriam levados a depósito, a aplicação de agregados reciclados na construção rodoviária tem vindo a suscitar um interesse cada vez maior por parte de diversos intervenientes.

Tendo em vista estudar a aplicabilidade das normas de agregados naturais a agregados reciclados produzidos em Portugal foi estabelecido um Protocolo de Cooperação entre a Estradas de Portugal, E.P., S.A. (adiante designada por EP) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito do qual se realizou um estudo laboratorial para caracterização de cinco tipos de materiais, que inclui a quantificação dos seus constituintes de acordo com o projecto de norma prEN 933-11 e a avaliação de algumas propriedades geométricas, mecânicas e físicas para a sua caracterização [Freire e Antunes (2008a)]. Refira-se que nesta data já foi editada a versão final da EN 933-11, sem que se tenham verificado alterações significativas no método de ensaio preconizado. Assim, no presente trabalho far-se-á referência simplesmente à EN 933-11:2009.

O estudo desenvolvido compreendeu a caracterização laboratorial de cinco tipos de agregados reciclados com a realização de ensaios de classificação dos constituintes de acordo com a Norma Europeia EN 933-11, de avaliação das propriedades geométricas e de determinação das propriedades mecânicas e físicas. Para cada método de ensaio e para cada tipo de agregado, foram realizadas três determinações, sendo apresentados os respectivos valores médios. Complementarmente, os materiais em estudo foram caracterizados em termos das suas propriedades químicas com a avaliação dos constituintes do eluato.

Refira-se que a caracterização química de agregados reciclados, que poderão ter diversas origens, muitas vezes imprecisas, é extremamente importante pois os resultados obtidos permitem classificá-los em materiais inertes, não perigosos ou perigosos, quando comparados com os limites apresentados na Decisão do Conselho de 19 de Dezembro de 2002 [2003/33/EC] para materiais para deposição em aterro.

Nesta comunicação apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos pelo LNEC, nomeadamente:

- Os resultados obtidos nos ensaios acima referidos, incluindo a classificação dos agregados reciclados de acordo com a EN 933-11;
- A análise da aplicabilidade da EN 933-11 e dos métodos de ensaio estudados à caracterização de agregados reciclados;
- O enquadramento dos materiais estudados no contexto da especificação LNEC E 473.

2 SELECÇÃO DOS MATERIAIS A ENSAIAR

Face à produção nacional, foram seleccionados cinco tipos de agregados reciclados, sendo todos eles RCD de diferentes proveniências. Dois dos materiais são RCD de misturas betuminosas, outros dois são RCD resultantes de demolição de edifícios e outras estruturas, e o quinto material é um RCD de material isolante aplicado em construção de edifícios,

com características particulares uma vez que apresenta uma massa volúmica inferior a 2000 kg/m³.

Na Figura 1 pode observar-se o aspecto de algumas das várias amostras de agregados reciclados submetidas a ensaio, identificando-se no Quadro 1 os fornecedores, os locais de origem e respectivos materiais caracterizados.



Figura 1 – Aspecto de quatro das cinco amostras submetidas a ensaio

Quadro 1 – Agregados reciclados caracterizados

Fornecedores	Origem	Identificação	Descrição dos materiais
AMBITRENA	Resíduos de construção e demolição – Edifício do Hotel Estoril Sol	RCD – BETÃO	Material proveniente da britagem de resíduos resultantes da demolição de betão limpo
ECOLABOR	Várias	RCD – MB	Materiais provenientes da britagem de resíduos resultantes da demolição de pavimentos betuminosos
	Várias	RCD – LEVE	Material leve resultante de resíduos de isolamento térmico
ESTRADAS DE PORTUGAL	EN 10	RCD – MBf	Materiais provenientes da fresagem de pavimentos betuminosos
TRIANOVO	Várias	RCD – VÁRIOS	Material proveniente da britagem de resíduos de construção e demolição com várias origens

3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química dos agregados reciclados adquire particular importância uma vez que estes materiais, quando aplicados na construção rodoviária, podem estar sujeitos quer à acção da água proveniente da precipitação, quer à variação dos níveis freáticos. Assim, caso os materiais aplicados na construção de camadas de pavimentos apresentem na sua constituição elementos considerados nocivos, susceptíveis à lixiviação, a água que por eles venha a percolar poderá, ao infiltrar-se nos terrenos adjacentes, contribuir para a contaminação desses mesmos terrenos ou dos aquíferos.

Na Norma Europeia EN 13242:2002+A1:2007, os requisitos de ensaio para avaliação da perigosidade, em particular no que respeita à libertação de substâncias perigosas refere apenas “quando pedido e em caso de dúvida”. No entanto, e dado que estamos a caracterizar agregados reciclados julgou-se conveniente complementar a informação obtida no estudo com as características químicas do eluato obtido em ensaios de lixiviação.

As normas de ensaio referidas na EN 13242, para a caracterização química do resíduo sólido e para a obtenção do eluato, são a EN 1744-1 e a EN 1744-3, respectivamente. Contudo, o critério para a deposição de resíduos em aterro, indicado na Decisão do Conselho da União Europeia, 2003/33/EC, tem em consideração a aplicação do procedimento da Norma Europeia EN 12457-4, para a preparação do eluato, tendo sido este o procedimento utilizado.

Nos lixiviados das amostras foi analisada por espectrometria de absorção atómica com câmara de grafite a presença dos metais cádmio, cobre, crómio, chumbo e zinco. Os cloretos foram determinados de acordo com a Norma Portuguesa NP 423 e os sulfatos segundo a Norma Portuguesa NP 413. O teor de carbono orgânico total foi determinado de acordo com a especificação LNEC E386. A presença de crómio foi determinada conforme a ASTM D1687 (Quadro 2).

Quadro 2 – Caracterização química do eluato após lixiviação das amostras

Parâmetros	RCD – BETÃO (Ambitrena)	RCD – MB (Ecolabor)	RCD – MBf (Estradas de Portugal)	RCD – VÁRIOS (Trianovo)	Decisão do Conselho 2003/33/CE	
					Resíduos inertes	Resíduos não perigosos
Carbono Orgânico Dissolvido, C (mg/kg)	320	380	250	85	500	800
Cádmio, Cd (mg/kg)	$<0,28 \times 10^{-3}$	$0,77 \times 10^{-3}$	$0,74 \times 10^{-3}$	$0,63 \times 10^{-3}$	0,04	1
Cobre, Cu (mg/kg)	$8,79 \times 10^{-2}$	$1,45 \times 10^{-2}$	$1,32 \times 10^{-2}$	$6,67 \times 10^{-2}$	2	50
Crómio Total, Cr (mg/kg)	$0,89 \times 10^{-1}$	$0,91 \times 10^{-2}$	$<0,83 \times 10^{-2}$	0,30	0,5	10
Níquel, Ni (mg/kg)	$4,16 \times 10^{-2}$	$3,60 \times 10^{-2}$	$3,84 \times 10^{-2}$	$2,86 \times 10^{-2}$	0,4	10
Chumbo, Pb (mg/kg)	$<0,77 \times 10^{-2}$	$<0,44 \times 10^{-2}$	$<0,44 \times 10^{-2}$	$<0,44 \times 10^{-2}$	0,5	10
Zinco, Zn (mg/kg)	$4,55 \times 10^{-2}$	$1,21 \times 10^{-2}$	$0,46 \times 10^{-2}$	$1,11 \times 10^{-2}$	4	50
Cloretos, Cl (mg/kg)	36	45	62	185	800	15000
Sulfatos, SO_4^{2-} (mg/l)	488	703	59	7624	1000	20000

Da análise dos valores constantes no Quadro 2 para as várias amostras ensaiadas, verifica-se que estes cumprem os limites especificados na Decisão do Conselho de 2003/33/CE para materiais para aterros de resíduos inertes. Exceptua-se o caso da amostra RCD-VÁRIOS (Trianovo) em que o valor de sulfatos se enquadra apenas nos limites de resíduos para aterros não perigosos.

Considera-se que a avaliação ambiental dos materiais reciclados a aplicar em camadas de pavimentos deverá incluir, não só a caracterização química do resíduo sólido, mas também do eluato, tendo em conta as condições da sua aplicação – em camadas ligadas ou não ligadas, camadas de base ou sub-base, com revestimento impermeável ou não – e as condições hidro-geológicas do local – com ou sem nível freático elevado [OBRV (2007)].

4 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS AGREGADOS

4.1 Classificação dos agregados reciclados

A identificação e classificação dos constituintes das amostras de agregados reciclados ensaiados foi efectuada com base na metodologia expressa na EN 933-11:2009 – *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*.

Esta norma especifica o procedimento a adoptar para a classificação dos agregados grossos reciclados com vista à identificação e estimativa das proporções relativas dos materiais constituintes. Este método de ensaio aplica-se às partículas com dimensões entre 4 mm e 63 mm, não sendo adequado a agregados reciclados leves abrangidos pelas Normas Europeias da série EN 13055, como é o caso da amostra RCD – LEVE (Ecolabor).

O ensaio consiste na separação manual das partículas de uma amostra de agregado reciclado, de acordo com o tipo de material constituinte. A proporção de cada constituinte da amostra de ensaio é determinada e expressa em termos de percentagem de massa, com excepção das partículas flutuantes cujas proporções são expressas em termos volumétricos.

No Quadro 3 apresentam-se os resultados obtidos na identificação dos materiais constituintes das amostras de agregados reciclados em estudo.

Quadro 3 – Constituintes das amostras de agregados reciclados

Agregados reciclados	Constituintes						
	V _{FL} (cm ³)	R _c (%)	R _u (%)	R _b (%)	R _a (%)	R _g (%)	X (%)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	0,0	92	7,7	0,0	0,0	0,0	0,3
RCD – MB (Ecolabor)	0,0	0,3	0,7	0,9	98	0,1	0,0
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não aplicável						
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	2,5	43	24	19	11	0,0	3,0

LEGENDA:

V_{FL} – Volume de material flutuante

R_c - Betão e produtos de betão e argamassas

R_u – Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos

R_b – Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolos, ladrilhos, telhas), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio, betão celular não-flutuante;

R_a - Materiais betuminosos

R_g - Vidro

X – Materiais coesivos (p.ex. solos argilosos), madeira não flutuante, metais (ferrosos e não ferrosos), borrachas e plásticos, gessos

4.2 Granulometria

Por forma a efectuar a identificação dos agregados ensaiados procedeu-se à sua análise granulométrica de acordo com a NP EN 933-1.

No que se refere à amostra de RCD – LEVE (Ecolabor) a realização da análise granulométrica revestiu-se de alguma dificuldade devido às características das partículas, com uma massa volúmica muito baixa. Foi aplicado o procedimento referido na Nota 3 do ponto 6 – Preparação dos provetes de ensaio, da norma NP EN 933-1:2000, dado que este agregado reciclado apresenta uma massa volúmica inferior a 2000 kg/m³, sendo conveniente aplicar uma correcção apropriada às massas dos provetes a considerar para ensaio e apresentadas no Quadro 1 da referida norma europeia. Assim, para a amostra RCD – LEVE o provete ensaiado apresentava um volume aproximadamente igual ao dos agregados tradicionais com massas volúmicas correntes.

Quanto às amostras contendo misturas betuminosas (RCD-MB e RCD-MBf), teve-se o cuidado de utilizar temperaturas inferiores a 40°C na sua secagem, de modo a não aglutinar as partículas constituintes. Na Figura 2 apresentam-se as curvas granulométricas obtidas para as várias amostras em estudo.

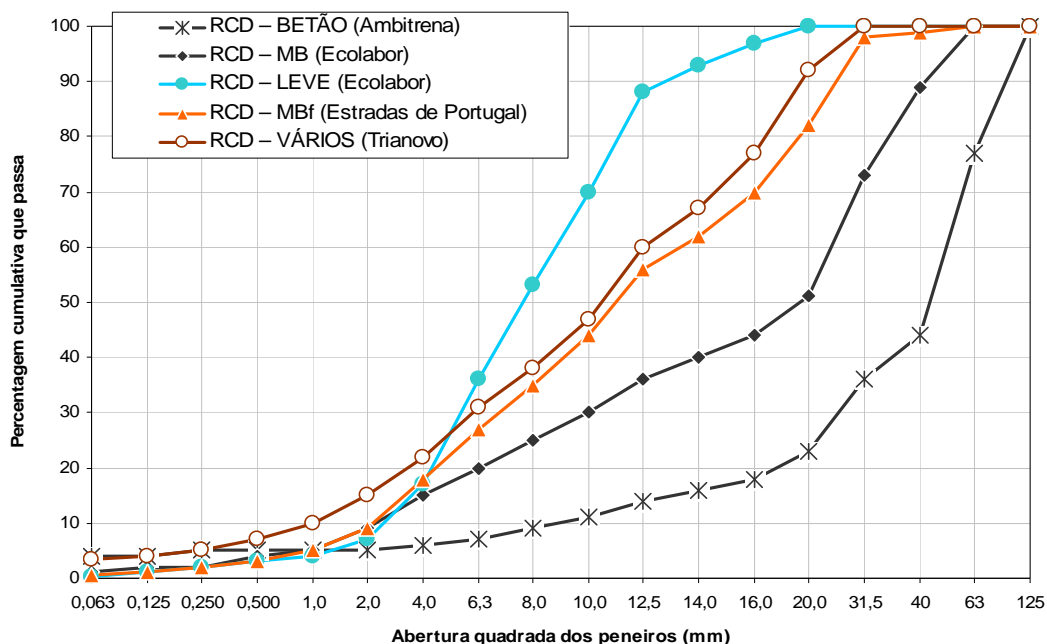


Figura 2 – Curvas granulométricas das amostras de agregados reciclados

Da análise das curvas granulométricas apresentadas observa-se que as amostras de RCD – LEVE (Ecolabor) e RCD – BETÃO (Ambitrena) apresentam andamentos extremos quando comparados com os restantes materiais, correspondendo as primeiras a um material com menor dimensão máxima das partículas e as segundas a materiais com maior dimensão máxima.

No peneiro de 0,063 mm, cuja percentagem cumulativa passada permite identificar o teor de finos de cada amostra, observa-se que é a amostra RCD – BETÃO (Ambitrena) que apresenta o maior valor – 3,9%. As restantes amostras apresentam valores entre 3,3% e 0,3% para a percentagem cumulativa passada no peneiro de 0,063 mm.

4.3 Forma das partículas

4.3.1 Determinação do Índice de Achatamento e do Índice de Forma

A forma das partículas foi avaliada com a determinação do índice de achatamento conforme preconizado na norma NP EN 933-3 e com a determinação do índice de forma conforme a NP EN 933-4. No Quadro 4 apresentam-se os resultados obtidos.

Da análise do conjunto de valores apresentados quer para o índice de achatamento, quer para o índice de forma, verifica-se que estes se distribuem numa gama de valores, função do tipo de agregado reciclado, bem como do tipo de processamento dado a cada material.

Quadro 4 – Índice de achatamento (FI) e índice de forma (SI) das amostras de agregados reciclados

Agregado reciclado	Índice de achatamento (FI)	Índice de forma (SI)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	5	12
RCD – MB (Ecolabor)	5	8
RCD – LEVE (Ecolabor)	20	Não exequível
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	12	21
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	19	16

Os materiais com menor valor do índice de achatamento e índice de forma, RCD-BETÃO e RCD-MB, resultam de materiais que após demolição foram sujeitos a um processo de britagem o que, função da natureza dos materiais constituintes, permitiu conferir-lhes a forma final das partículas constituintes. Os RCD-MBf, RCD-VÁRIOS e RCD-LEVE apresentam valores de índice de achatamento superiores, sendo no entanto da ordem de grandeza de valores obtidos para agregados naturais aplicados em camadas de base não ligadas [Freire e Antunes (2008)].

Os RCD-MBf, RCD-VÁRIOS apresentam valores de índice de forma superiores aos valores obtidos num estudo efectuado anteriormente para agregados naturais empregues na construção rodoviária, [Freire e Antunes (2006)].

No que se refere à amostra de RCD – LEVE (Ecolabor) não foi possível realizar a determinação do índice de forma, devido às características das partículas, muito leves e deformáveis impossibilitando a medição das dimensões das partículas com o equipamento de ensaio preconizado na norma.

A caracterização da forma das partículas, através do índice de forma e do índice de achatamento, permite assegurar uma estabilidade interna adequada das camadas granulares não ligadas favorecendo a distribuição das tensões aplicadas e minimizando a ocorrência de deformações [Barksdale (1991)], considerando-se adequado o estabelecimento de valores limites de aceitação/rejeição que permitam avaliar a forma das partículas, no que concerne à sua aplicação em camadas não ligadas de base e de sub-base.

4.4 Limpeza

4.4.1 Determinação do equivalente de areia e do azul de metileno

O valor do equivalente de areia foi determinado de acordo com a Norma Portuguesa NP EN 933-8. Para a determinação do valor do azul de metileno foram submetidas a ensaio todas as amostras em estudo, com teor em água inferior ou igual a 0,1% após secagem ao ar, de acordo com a metodologia da NP EN 933-9.

No que se refere à amostra de RCD – LEVE (Ecolabor) não foi possível realizar a determinação do equivalente de areia devido à natureza das partículas constituintes da amostra. No Quadro 5 apresentam-se os resultados obtidos, apresentando-se ainda o valor do ensaio do azul de metileno “equivalente”, tendo em atenção a percentagem de material de dimensão inferior a 2 mm na amostra total ($MB_{0/D}$).

Quadro 5 – Valores do equivalente de areia (SE) e do azul de metileno (MB) das amostras submetidas a ensaio

Agregado reciclado	Equivalente de areia (SE) (%)	Azul de metileno (MB) (g/1000g)	Azul de metileno “equivalente” ($MB_{0/D}$)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	80	3,0	0,2
RCD – MB (Ecolabor)	59	2,5	0,2
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não exequível	Não exequível	---
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	82	1,2	0,1
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	68	1,0	0,2

Da análise dos resultados apresentados no Quadro 5 observa-se que a amostra RCD-BETÃO apresenta maiores valores de equivalente de areia. Aquela amostra apresenta, por outro lado, o maior valor de azul de metileno em resultado do tipo e actividade dos finos presentes. Anote-se que a amostra ensaiada tinha uma percentagem de material fino (passado no peneiro de 2 mm) baixa (5%), o que dificultou fortemente a preparação da amostra para ensaio.

Dado que os resultados obtidos com o ensaio de equivalente de areia podem apresentar uma forte influência do teor em partículas com dimensão inferior a 0,063 mm, quer se tratem de partículas argilosas ou inertes, considera-se desejável complementar a caracterização dos materiais finos através do ensaio de azul de metileno que poderá de uma forma mais adequada caracterizar o estado de limpeza dos agregados, quantificando os minerais argilosos presentes bem como a sua nocividade. No entanto, os resultados obtidos devem ser avaliados em função da representatividade do material com dimensão inferior a 2 mm presente na amostra, por exemplo através do parâmetro $MB_{0/D}$.

Finalmente, observa-se que as condições de processamento e armazenamento dos materiais podem ter uma influência preponderante nos resultados da avaliação da qualidade dos finos, como consequência da eventual contaminação com outros materiais.

4.5 Propriedades mecânicas e físicas dos agregados

4.5.1 Massas volúmicas e absorção de água

A determinação das massas volúmicas e da absorção de água foi realizada conforme preconizado na NP EN 1097-6. A amostra RCD-LEVE foi ensaiada de acordo com o preconizado no Anexo C da referida norma de ensaio, dadas as características dos agregados reciclados constituintes da amostra.

O Quadro 6 resume os valores obtidos para os diferentes tipos de agregados reciclados em estudo. Na Figura 3 ilustra-se o ensaio de determinação das massas volúmicas e absorção de água das amostras de RCD-LEVE.

Quadro 6 – Massas volúmicas e absorção de água

Agregado reciclado	Fracção ensaiada (mm)	Massa volúmica do material impermeável (Mg/m ³)	Massa volúmica das partículas saturadas (Mg/m ³)	Massa volúmica das partículas secas (Mg/m ³)	Absorção de água (%)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	31,5/63,0	2,600	2,220	2,370	6,7
	4,0/31,5	2,620	2,280	2,410	5,8
RCD – MB (Ecolabor)	31,5/63,0	2,400	2,340	2,370	1,3
	4,0/31,5	2,450	2,380	2,410	1,5
	0,063/4,0	2,220	2,170	2,190	1,0
RCD – LEVE (Ecolabor)	4,0/31,5	0,070	---	---	48,0
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	4,0/31,5	2,670	2,590	2,620	1,1
	0,063/4,0	2,600	2,530	2,560	1,0
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	4,0/31,5	2,550	2,040	2,240	9,8
	0,063/4,0	2,620	2,110	2,300	9,3



Figura 3 – Determinação das massas volúmicas e absorção de água das amostras RCD-LEVE

Os valores de absorção de água apresentados no Quadro 6 são elevados, destacando-se a amostra RCD-VÁRIOS com valores superiores a 9% e a amostra RCD-BETÃO com valores superiores a 5%. As amostras de misturas betuminosas apresentam valores de absorção entre 1% e 1,5%. Os valores obtidos para agregados naturais geralmente empregues em pavimentação são geralmente inferiores ou iguais a 1% ou 2%.

No que se refere aos valores das massas volúmicas estes são em geral inferiores aos usualmente observados para agregados naturais, como seria de esperar. Destaca-se a amostra RCD-LEVE com valores de massa volúmica impermeável inferior a 1,000 Mg/m³. O valor da absorção de água deste material é muito elevado, de 48%.

4.5.2 Resistência à fragmentação e resistência ao desgaste

A avaliação da resistência à fragmentação das partículas de agregado grosso foi efectuada através do coeficiente de Los Angeles conforme preconizado na Norma Portuguesa NP EN 1097-2. A quantificação da resistência ao desgaste foi realizada com a obtenção do coeficiente micro-Deval conforme a NP EN 1097-1.

No Quadro 7 apresentam-se os resultados obtidos para cada agregado reciclado em apreço. Na Figura 4 apresenta-se o aspecto de algumas das amostras antes e após o ensaio de Los Angeles.

Não foi possível realizar o ensaio de Los Angeles sobre a amostra de RCD-BETÃO devido a dificuldades de obtenção da quantidade de material necessário (15 kg) com dimensões entre 10 mm e 14 mm, devido à sua granulometria. No que se refere à amostra RCD-LEVE, por as partículas serem demasiadamente deformáveis não se verificando a sua fragmentação, não foi igualmente possível realizar os ensaios para avaliação da resistência à fragmentação e ao desgaste.

Quadro 7 – Coeficiente de Los Angeles e de micro-Deval

Agregado reciclado	Coeficiente de Los Angeles (LA)	Coeficiente de micro-Deval (MDE)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	Não foi possível obter material suficiente na fracção 10/14 mm	28
RCD – MB (Ecolabor)	30	24
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não exequível	Não exequível
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	16	13
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	44	36



Figura 4 – Aspecto das amostras de agregados reciclados, antes e após o ensaio de resistência à fragmentação – ensaio de Los Angeles

Da análise do conjunto de valores obtidos para os coeficientes de Los Angeles e de micro-Deval observa-se existir uma gama alargada de resultados, função do tipo de agregado reciclado, expresso pelos diversos constituintes. Para a amostra RCD-VÁRIOS obteve-se o maior valor do coeficiente de Los Angeles e de micro-Deval, dado que este material apresenta na sua composição diversos tipos de constituintes, referindo-se entre outros, materiais cerâmicos, que apresentam uma menor resistência à fragmentação e ao desgaste, respectivamente.

Observa-se ainda que, no caso de materiais com diferentes tipos de constituintes, como é o caso da amostra RCD-VÁRIOS, os valores obtidos para os coeficientes de Los Angeles e de micro-Deval podem não ser representativos das características da amostra integral, uma vez que estes são determinados sobre materiais de dimensões compreendidas entre 10 e 14 mm, cujas partículas podem ter constituição distinta das restantes.

Os valores obtidos para o ensaio de Los Angeles e de micro-Deval enquadram-se, de uma forma geral, nos limites preconizados para a aplicação de RCD em camadas de base e de sub-base não ligadas [Highways Agency (2009), OBRB (2007), LNEC E 473]. No caso particular das amostras constituídas por uma elevada percentagem de misturas betuminosas, RCD – MB (Ecolabor) e RCD – MBf (Estradas de Portugal), a determinação dos coeficientes de desgaste e de fragmentação ao ser efectuada sobre partículas revestidas por betume, inviabiliza a comparação dos resultados obtidos com os valores exigidos para agregados naturais. Desejável seria conhecer os valores daqueles coeficientes para a mistura de agregados utilizada no fabrico das misturas betuminosas.

5 APLICABILIDADE DA EN 933-11 E DOS MÉTODOS DE ENSAIO USADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

A aplicação da metodologia de ensaio preconizada na EN 933-11 é de uma forma geral fácil, compreendendo a quantificação dos constituintes por separação manual. Exceptua-se o caso dos materiais designados por flutuantes, que devem ser quantificados pelo seu

volume em vez da massa. Esta determinação poderá revestir-se de alguma dificuldade caso não se disponha do equipamento de ensaio adequado.

Considera-se ainda que estão contemplados na EN 933-11 os principais tipos de materiais constituintes que usualmente compõem os agregados reciclados, provenientes de resíduos de construção de demolição (RCD).

Relativamente à aplicação dos métodos de ensaio para caracterização das propriedades geométricas, mecânicas e físicas aos agregados reciclados, podem tecer-se as seguintes considerações:

- Os agregados reciclados de materiais betuminosos apresentam como principal condicionante a temperatura de secagem a adoptar – até 40°C – dada a existência de um ligante betuminoso que, a temperaturas superiores promove a aglutinação das partículas constituintes, alterando as características da amostra. A realização dos ensaios de caracterização aplicáveis a agregados reciclados de misturas betuminosas, e apresentados neste estudo, não evidenciou quaisquer dificuldades adicionais.
- As amostras de agregados reciclados provenientes da britagem de resíduos de betão, de agregados não ligados e de alvenaria, não apresentaram, de uma forma geral, qualquer dificuldade na caracterização laboratorial de acordo com as metodologias de ensaio usualmente aplicadas a agregados naturais; no entanto, observa-se que certas características que são determinadas apenas sobre uma fracção específica, como a resistência ao desgaste (micro-Deval) e a resistência à fragmentação (Los Angeles), podem não ser representativas da totalidade da mistura de agregados;
- No que concerne à amostra de agregado reciclado leve, resultante de materiais de isolamento aplicados na construção de edifícios, posteriormente britados, verificou-se uma maior dificuldade em efectuar a sua caracterização laboratorial com a aplicação dos métodos usuais, devido fundamentalmente ao facto de as partículas constituintes serem deformáveis e terem uma massa volúmica muito baixa.

6 ENQUADRAMENTO DOS MATERIAIS ESTUDADOS NO CONTEXTO DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 473

Por forma a efectuar o enquadramento dos materiais estudados, na especificação LNEC E 473, com base nos resultados apresentados no Quadro 3, em que são apresentados os constituintes das amostras de agregados reciclados, determinados segundo a EN 933-11, procedeu-se à sua classificação conforme se apresenta no Quadro 8.

Da análise da classificação das amostras estudadas com base nas proporções dos seus constituintes, verifica-se que apenas a amostra de RCD-Betão (Ambitrena) foi classificada na Classe B. As amostras provenientes da demolição de pavimentos RCD – MB e RCD-MBf, atendendo às elevadas quantidades de materiais betuminosos (superiores a 10%) não se enquadram em nenhuma das classes. A amostra de RCD-vários ao apresentar uma percentagem de 19% de elementos de alvenaria, ou seja superior a 10%, não foi igualmente classificada.

Quadro 8 – Classificação dos agregados

Agregados reciclados	Proporção dos constituintes EN 13242:2002+A1:2007						Classe
	$R_c + R_u + R_g$	R_g	R_b	R_a	FL	X	
RCD – BETÃO (Ambitrena)	$99,7 \geq 90$	$0,0 \leq 5$	$0,0 \leq 10$	$0,0 \leq 5$	$0,0 \leq 5$	$0,3 \leq 1$	B
RCD – MB (Ecolabor)	0,7	$0,1 \leq 5$	$0,9 \leq 10$	98	$0,0 \leq 5$	$0,0 \leq 1$	---
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	0,0	$0,0 \leq 5$	$0,0 \leq 10$	100	$0,0 \leq 5$	$0,0 \leq 1$	---
RCD – VÁRIOS (Triano)	$67 \geq 50$	$0,0 \leq 5$	19	$11 \leq 30$	$2,5 \leq 5$	3	---

CONSTITUINTES (EN 933-11):

R_c – betão, produtos de betão e argamassas;

R_u – agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos;

R_a – materiais betuminosos;

R_b – elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante;

R_g – vidro;

FL – material flutuante em volume;

X – outros: materiais coesivos (p.ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos); madeira não flutuante e estuque.

Refira-se, no entanto, que os materiais que apresentam valores limites superiores aos preconizados no Quadro 1 da especificação LNEC E 473 poderão ser utilizadas em conjunto com outros materiais, desde que cumpram os referidos limites, após correcção da sua composição.

No caso particular das amostras constituídas por misturas betuminosas, este tipo de materiais tem sido utilizado com sucesso em camadas de sub-base e de leito de pavimentos de outros países [TRL591 (2004)]. Considera-se desejável promover condições para este tipo de aplicação de misturas betuminosas recuperadas, sempre que não seja possível aplicá-las no fabrico de misturas betuminosas recicladas, estando o LNEC a realizar estudos de investigação neste domínio.

No Quadro 9 apresenta-se o resultado da aplicação das propriedades e requisitos mínimos para a amostra RCD-Betão (Ambitrena), da classe B, cujos valores foram comparados com as características da categoria AGER 3 [LNEC E 473 (2009)].

Quadro 9 – Propriedades e requisitos mínimos dos agregados reciclados para aplicação em camadas não ligadas de pavimentos, segundo a LNEC E 473 e aplicação a amostra RCD - BETÃO

Classe		AGER 3 [LNEC E 473 (2009)]	RCD – BETÃO (Ambitrena)B
Parâmetros geométricos e de natureza			
Dimensão	NP EN 13285	0/31,5	D>31,5 mm (1)
Sobretamanhos (NP EN 933-1)	NP EN 13285	OC ₈₅	(1)
Classe de granulometria (NP EN 933-1)	NP EN 13285	G _A	(1)
Teor de finos (NP EN 933-1)	NP EN 13285	UF ₉ LF ₂	√
Qualidade dos finos (NP EN 933-9) *	EN 13242+A1	MB _{0/D} ≤0,8	√
Percentagem de partículas totalmente esmagadas ou partidas e totalmente roladas em agregados grossos (NP EN 933-5)	EN 13242+A1	C _{90/3}	√
Parâmetros de comportamento mecânico			
Resistência à fragmentação e resistência ao desgaste (NP EN 1097-2 e NP EN 1097-1)	EN 13242+A1	LA ₄₀ e MDE ₃₅ ou LA+MDE≤70	LA não foi determinado MDE<35
Propriedades químicas			
Teor de sulfatos solúveis em água (EN 1744-1)**	EN 13242+A1	SS _{0,7}	Não foi determinado
Libertação de substâncias perigosas (EN 12457-4)	---	Deposição em aterro de resíduos inertes***	√

* MB_{0/D} – O valor do azul de metileno expresso em g/kg segundo a norma de ensaio (NP EN 933-9) multiplicado pela percentagem da fracção passada no peneiro de 2 mm.

** - Para teores de sulfatos superiores a 0,2%, estes agregados deverão ser colocados a uma distância não inferior a 0,50 m de elementos estruturais de betão.

*** - A classificação baseia-se apenas nos resultados do ensaio de lixiviação para L/S = 10 l/kg – Secção 2.1.2.1, da Decisão do Conselho 2003/33/CE.

(1) Dado que a dimensão máxima dos agregados é superior a 31,5 mm, este deverá ser reprocessado através de crivagem e nova britagem para satisfazer os requisitos granulométricos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos resultados apresentados nesta comunicação podem tecer-se as seguintes considerações finais:

- A caracterização do eluato das amostras de agregados reciclados em estudo permitiu verificar que estes cumprem os limites especificados na Decisão do Conselho de 2003/33/CE para aterros de resíduos inertes. Exceptua-se o caso da amostra RCD-VÁRIOS (Trianovo) em que o valor de sulfatos se enquadra nos limites de resíduos para aterros não perigosos; anota-se que a norma de ensaio aplicada na preparação do eluato, EN 12457-4, é aplicada para a classificação dos materiais para deposição em aterro, ao invés da norma referida na NP EN 13243, a EN 1744-3, para materiais a aplicar em camadas de materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados;
- A identificação dos constituintes dos agregados reciclados conforme a EN 933-11 foi aplicada a todas os materiais em apreço, com excepção da amostra RCD-LEVE por a versão final da norma não ser aplicável a agregados leves. Esta identificação revelou-se relativamente fácil de executar;
- A avaliação das características geométricas, através dos índices de achatamento e de forma, e das propriedades mecânicas e físicas, com a determinação das massas volúmicas e absorção de água, os ensaios de equivalente de areia, azul de metileno, desgaste de Los Angeles e micro-Deval, nem sempre foi exequível por razões relacionadas com a natureza dos materiais ou com a dificuldade de obter quantidade de material suficiente nas fracções de ensaio. No entanto pode dizer-se que, de uma forma geral os métodos de ensaio preconizados nas normas Europeias para agregados podem ser aplicadas aos agregados reciclados provenientes da demolição de edifícios e de pavimentos rodoviários;
- Observa-se ainda que certas propriedades, como a resistência ao desgaste ou a resistência à fragmentação, que são determinadas apenas sobre partículas com dimensões específicas, podem não ser representativas da totalidade da amostra, uma vez que as partículas sobre as quais são realizados os ensaios podem ter constituição distinta das de outras dimensões.

No que concerne ao enquadramento dos materiais estudados, no contexto da especificação LNEC E 473, verificou-se alguma dificuldade em classificá-los, dadas as percentagens dos seus constituintes. As amostras com elevada percentagem de materiais betuminosos só poderão ser incorporadas numa percentagem máxima de 30%, no contexto daquela especificação.

Considera-se, no entanto, que a aplicação em camadas não ligadas, de materiais com uma elevada percentagem de materiais betuminosos, constitui uma alternativa interessante quando se dispõe de grandes quantidades deste tipo de materiais que não podem ser aplicados no fabrico de misturas betuminosas. Desta forma estão em curso estudos de investigação no LNEC, relativos à aplicação destes materiais, enquanto RCD, em camadas

não ligadas de pavimentos, com vista à preparação de uma especificação em que serão propostas propriedades e requisitos mínimos para a sua aplicação.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar às Entidades que facultaram ao LNEC os agregados reciclados (referenciados no Quadro 1), o seu reconhecimento pelo apoio prestado à realização do presente trabalho.

Agradece-se igualmente à Dr.^a Susana Reis, da EP – Estradas de Portugal, S.A., a colaboração prestada na selecção das amostras para ensaio e o acompanhamento do trabalho realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barksdale, R. D. (1991) – “The aggregate handbook”, National Stone Association, Washington, D.C.
- Decisão do Conselho 2003/33/CE. Jornal Oficial das Comunidades Europeias L11, de 16 de Janeiro de 2003.
- Freire, A. C., Antunes, M. L. (2008a) – “Caracterização de agregados reciclados de acordo com o normativo europeu prEN 933-11”, Relatório DT/2008.
- Freire, A. C., Antunes, M. L. (2008) – “Caracterização de Agregados produzidos em Portugal de acordo com as referências normativas EN 13043 e EN 13242”, Relatório DT/2008.
- Freire, A.C., Antunes, M.L. (2006) – “Aplicação de métodos de ensaio especificados em normas europeias de agregados”, Relatório 224/06.
- Gonçalves, A., Martins, I., Antunes, M. L., Freire, A.C., Batista, F., Fortunato, E., Roque, A. (2007) – “Legislação para implementação da gestão de RCD em Portugal”, comunicação, por convite, no 1º Simpósio sobre Resíduos de Construção e Demolição, organizado pela Universidade do Minho, Guimarães, 26 de Junho.
- Highways Agency (2009) – Manual of contract documents for highway works. Volume I, Series 800, Specification for highway works. Acedido em 31 de Julho de 2009 em: http://www.standardsforhighways.co.uk/mchw/vol1/pdfs/series_0800.pdf.
- LNEC E 473 (2009) – Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos. Especificação LNEC.
- OBRV (2007) – Guideline for recycled building materials. Green guideline, 7th edition. Österreichischer Baustoff-Recycling Verband.
- TRL591 (2004) – “The use of asphalt arisings as Type 4 sub-base”, D.P.Steele, D.J. MacNeil and V. Atkinson. TRL Report TRL591, Highways Agency.