



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES
Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias
e Aeroportuárias

Proc. 0702/1/16470

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE ACORDO COM O NORMATIVO EUROPEU prEN933-11

Estradas de Portugal, E.P., S.A.

Lisboa • Abril de 2008

I&D TRANSPORTES

RELATÓRIO 227/2008 – NIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE ACORDO COM O NORMATIVO
EUROPEU prEN 933-11**

SUMÁRIO

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.

No âmbito da actividade do CEN – Comité Europeu de Normalização, em particular do Comité Técnico TC 154 – “Aggregates”, tem-se vindo a desenvolver um esforço no sentido de adaptar as normas existentes e desenvolver novas normas, quando aplicável, tendo em vista dispor de documentos adequados para a caracterização de agregados reciclados. Por forma a estudar a aplicabilidade dessas normas a agregados reciclados produzidos em Portugal foi estabelecido um Protocolo de Cooperação entre a Estradas de Portugal, E.P., S.A.¹ e o LNEC, no âmbito do qual se realizou um estudo laboratorial para caracterização de cinco tipos de materiais seleccionados pela Comissão Técnica Portuguesa de Normalização em Agregados – CT 154.

De acordo com o Plano de Trabalhos acordado, o estudo desenvolvido compreendeu a caracterização laboratorial de cinco tipos de agregados reciclados com a realização de ensaios de classificação dos constituintes, de avaliação das propriedades geométricas e de determinação das propriedades mecânicas e físicas.

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados obtidos e analisa-se a aplicabilidade do projecto de Norma Europeia prEN 933-11 “*Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*” e dos restantes métodos de ensaio estudados à caracterização dos agregados reciclados.

Este estudo é co-financiado a 75 % pelo PRIME (Programa de Incentivos à Modernização da Economia) sendo os restantes 25 % suportados pela EP, SA.

**CHARACTERIZATION OF RECYCLED AGGREGATES ACCORDING TO EUROPEAN STANDARD
PREN 933-11**

ABSTRACT

Due to the anticipated shortage of natural resources, as well as the environmental advantages of reusing materials that would otherwise be deposited in landfills, the application of recycled aggregates in road construction has been raising a growing interest.

Under the TC 154 - "Aggregates" an effort is being undertaken to adapt the existing standards and develop new standards, when applicable, in order to have appropriate documents for the characterization of recycled aggregates. With the objective of studying the applicability of these standards to recycled aggregates produced in Portugal a Cooperation Protocol between Estradas de Portugal, EP, SA .¹ and LNEC was established. In the frame of this Protocol, a laboratory study was conducted to characterize five types of materials selected by the TC 154 mirror committee.

According to the agreed work plan, the study included the laboratory characterization of five types of recycled aggregates through classification of the constituents and the evaluation of geometric and physical and mechanical properties.

This report presents the main results, and analyses the applicability of prEN 933-11 and other test methods to the characterization of recycled aggregates.

This study is co-financed at 75% by PRIME and 25% by the EP, SA.

¹ Enquanto Organismo de Normalização Sectorial (ONS-EP) / as ONS-EP.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objectivos	1
1.2	Acções desenvolvidas	1
2	SELECÇÃO DOS MATERIAIS A ENSAIAR	4
3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AGREGADOS RECICLADOS.....	5
3.1	Caracterização química.....	5
3.2	Propriedades geométricas dos agregados.....	7
	3.2.1 <i>Classificação dos agregados reciclados</i>	7
	3.2.2 <i>Granulometria</i>	10
	3.2.3 <i>Forma das partículas</i>	12
	3.2.3.1 Determinação do Índice de Achatamento	12
	3.2.3.2 Determinação do Índice de Forma	13
	3.2.4 <i>Equivalente de areia</i>	14
	3.2.5 <i>Azul de metileno</i>	15
3.3	Propriedades mecânicas e físicas dos agregados.....	16
	3.3.1 <i>Massas volúmicas e absorção de água</i>	16
	3.3.2 <i>Resistência à fragmentação</i>	18
	3.3.3 <i>Resistência ao desgaste</i>	19
4	APLICABILIDADE DO prEN 933-11 E DOS MÉTODOS DE ENSAIO USADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS.....	21
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
6	AGRADECIMENTOS	25
7	BIBLIOGRAFIA	26
	ANEXO I – Boletins de ensaio – DM/NB	29

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 Agregados reciclados caracterizados.....	4
Quadro 2 Caracterização química do eluato após lixiviação das amostras	6
Quadro 3 Constituintes das amostras de agregados reciclados	10
Quadro 4 Granulometrias dos agregados reciclados	11
Quadro 5 Índice de achatamento (FI) das amostras de agregados reciclados.....	13
Quadro 6 Índice de forma (SI) das amostras de agregados reciclados	14
Quadro 7 Valores do equivalente de areia (SE) das amostras submetidas a ensaio	15
Quadro 8 Valores do azul de metileno (MB) das amostras submetidas a ensaio.....	15
Quadro 9 Massas volúmicas e absorção de água	17
Quadro 10 Coeficiente de Los Angeles	18
Quadro 11 Coeficiente de micro-Deval.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aspecto de quatro das cinco amostras submetidas a ensaio	4
Figura 2 Curvas granulométricas das amostras de agregados reciclados	12
Figura 3 Determinação das massas volúmicas e absorção de água das amostras RCD-LEVE	17
Figura 4 Aspecto das amostras de agregados reciclados, antes e após o ensaio de resistência à fragmentação – ensaio de Los Angeles	19
Figura 5 Aspecto das amostras de agregados reciclados, antes e após o ensaio de micro-Deval ...	20

1.1 Objectivos

Os Resíduos de Construção e Demolição, usualmente designados por RCD, constituem um dos maiores e mais importantes tipos de resíduos 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 [1].

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.

Assim, no âmbito da actividade do CEN – Comité Europeu de Normalização, em particular do Comité Técnico TC 154 – “Aggregates”, tem-se vindo a desenvolver um esforço no sentido de adaptar as normas existentes e desenvolver novas normas, quando aplicável, com o objectivo de dispor de normas adequadas para agregados reciclados.

Tendo em vista estudar a aplicabilidade dessas normas a agregados reciclados produzidos em Portugal foi estabelecido um Protocolo de Cooperação entre a Estradas de Portugal, E.P., S.A.² (adiante designada por EP) e o 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 prEN 933-11 e a avaliação de algumas propriedades geométricas, mecânicas e físicas para a sua caracterização.

Esta caracterização foi efectuada em cinco tipos de agregados reciclados seleccionados pela Comissão Técnica Portuguesa de Normalização em *Agregados* – CT 154, cujas amostras para ensaio, provenientes de diversos produtores, foram entregues no LNEC.

1.2 Acções desenvolvidas

De acordo com o Plano de Trabalhos acordado entre a EP e o LNEC, 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 o projecto de Norma Europeia – prEN 933-11 “*Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents*”

² Enquanto Organismo de Normalização Sectorial (ONS-EP).

of coarse recycled aggregate”, de avaliação das propriedades geométricas e de determinação das propriedades mecânicas e físicas. Foram realizadas três determinações, sendo apresentados os respectivos valores médios.

Complementarmente, e embora não tivesse sido considerado no Plano de Trabalhos acordado, os materiais em estudo foram caracterizados em termos das suas propriedades químicas com a avaliação dos constituintes do eluato, tendo igualmente sido avaliado o índice de forma segundo a NP EN 933-4:2000 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma”.

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) [2].

A preparação do eluato foi realizada de acordo com a seguinte norma:

- EN 12457-4: “*Characterization of waste – Leaching – compliance test for leaching of granular waste materials and sludges*” (preparação do eluato)

Os métodos de ensaio aplicados neste trabalho, conforme acordado com a EP, são os que a seguir se apresentam:

- prEN 933-11 (29 de Fevereiro de 2008) – “Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate”
- NP EN 933-1:2000 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”
- NP EN 933-3:2000 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento”
- NP EN 933-8:2002 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do equivalente de areia”
- NP EN 933-9:2002 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do azul de metileno”
- NP EN 1097-1:2002 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval)”
- NP EN 1097-2:2000 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Método de determinação da resistência à fragmentação”
- NP EN 1097-6:2003 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”

A determinação dos teores de água das amostras ensaiadas foi realizada, sempre que necessária, conforme preconizado na NP EN 1097-5:2002 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 5: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada”.

Neste relatório apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos pelo LNEC, nomeadamente:

1. Os resultados obtidos nos ensaios acima referidos, incluindo a classificação dos agregados reciclados de acordo com o prEN 933-11;
2. A análise da aplicabilidade do prEN 933-11 e dos métodos de ensaio estudados à caracterização de agregados reciclados.

Apresenta-se igualmente uma descrição sumária do procedimento de ensaio preconizado no projecto de Norma Europeia prEN 933-11 (29 de Fevereiro de 2008). Refira-se que esta descrição tem como objectivo principal facilitar uma primeira abordagem ao procedimento de ensaio discriminado no projecto de norma, não substituindo a consulta do respectivo documento.

Anotar-se que, durante o período de tempo em que decorreu o presente trabalho, o prEN 933-11 apresentou duas versões distintas, datadas de 14 de Maio de 2007 (versão 4) e de 29 de Fevereiro de 2008 (versão 5), tendo sido aplicada na caracterização efectuada a versão do projecto de norma mais recente, que no presente relatório será referida simplesmente por prEN 933-11.

2 | SELECÇÃO DOS MATERIAIS A ENSAIAR

Os vários tipos de agregados reciclados a caracterizar no âmbito deste estudo foram definidos no seio da CT 154, tendo em atenção os diversos tipos de materiais produzidos em Portugal.

Assim, face à produção nacional, foram seleccionados cinco tipos de agregados reciclados, sendo todos eles resíduos de construção e demolição (RCD). 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 produtores, os locais de origem e respectivos materiais caracterizados no âmbito deste Protocolo.



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

Quadro 1 | Agregados reciclados caracterizados

Produtores	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	Recta do Cabo – 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 DAS AMOSTRAS DE AGREGADOS RECICLADOS

3.1 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 NP EN 13242:2005 “Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária”, a frequência mínima de ensaio para substâncias perigosas, em particular no que respeita à libertação de metais pesados 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.

A caracterização química apresentada no presente estudo foi realizada no Núcleo de Betões do Departamento de Materiais (DM) do LNEC. Apresenta-se em anexo cópia dos Boletins de Ensaio respectivos (Anexo I).

Assim, procedeu-se à caracterização química do eluato após lixiviação (Quadro 2) das amostras de agregados reciclados em estudo, com excepção da amostra RCD – LEVE que, quando sujeita ao processo de lixiviação não promoveu o arrastamento de qualquer tipo de partículas. O ensaio de lixiviação foi realizado de acordo com o procedimento da Norma Europeia EN 12457-4 “*Characterization of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges*”, tendo a análise de resultados sido baseada nos critérios para a deposição de resíduos em aterro indicados na Decisão do Conselho da União Europeia [2].

Nos lixiviados das amostras foi analisada por espectrometria de absorção atómica com câmara de grafite (GFAAS) a presença dos metais cádmio, cobre, crómio, chumbo e zinco. Os cloretos foram determinados de acordo com a Norma Portuguesa NP 423:1966 “Água – Determinação do teor de cloretos” e os sulfatos segundo a Norma Portuguesa NP 413:1966 “Água – Determinação do teor de sulfatos”. O teor de carbono orgânico total foi determinado de acordo com a especificação LNEC E386:1993 “Fíler calcário para betões – Determinação do teor de carbono orgânico total”. A presença de crómio foi determinada conforme a ASTM D1687:2002 “*Standard Test Methods for Chromium in Water*”.

Refira-se que os valores obtidos na realização dos ensaios são apresentados, nos Boletins de Ensaio, em µg/l (microgramas por litro). No entanto por forma a poderem comparar-se os resultados obtidos com os preconizados na Decisão do Conselho 2003/33/CE foi efectuada uma conversão dos valores obtidos em µg/l para mg/kg, tendo em consideração que o procedimento de ensaio é efectuado sobre uma amostra de 100g para 1 l de solução.

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)	<0,28x10 ⁻³	0,77x10 ⁻³	0,74x10 ⁻³	0,63x10 ⁻³	0,04	1
Cobre, Cu (mg/kg)	8,79x10 ⁻²	1,45x10 ⁻²	1,32x10 ⁻²	6,67x10 ⁻²	2	50
Crómio Total, Cr (mg/kg)	0,89x10 ⁻¹	0,91x10 ⁻²	<0,83x10 ⁻²	0,30	0,5	10
Níquel, Ni (mg/kg)	4,16x10 ⁻²	3,60x10 ⁻²	3,84x10 ⁻²	2,86x10 ⁻²	0,4	10
Chumbo, Pb (mg/kg)	<0,77x10 ⁻²	<0,44x10 ⁻²	<0,44x10 ⁻²	<0,44x10 ⁻²	0,5	10
Zinco, Zn (mg/kg)	4,55x10 ⁻²	1,21x10 ⁻²	0,46x10 ⁻²	1,11x10 ⁻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.

3.2 Propriedades geométricas dos agregados

3.2.1 Classificação dos agregados reciclados

Por forma a efectuar a identificação e classificação dos constituintes das amostras de agregados reciclados ensaiados procedeu-se à aplicação da metodologia expressa na última versão do prEN 933-11 de 29/02/2008 (versão 5) – “*Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*”.

Objectivos e campo de aplicação

O prEN 933-11 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.

Princípio e método de ensaio

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 de volume percentual.

Os principais passos a seguir para a realização do ensaio descrevem-se em seguida:

- Preparar a amostra de acordo com a EN 932-1 (NP EN 932-1:2002 “Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 1: Métodos de amostragem”) e redução conforme a EN 932-2 (NP EN 932-2:2002 “Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais”).
- Secar a amostra a (40 ± 5) °C até massa constante. Pesar e registar o valor obtido da massa seca da amostra como M_0 .
- Peneirar a amostra manualmente por forma a assegurar a completa separação das partículas com dimensão superior a 4 mm.

- Pesar e registar a massa das partículas retidas no peneiro de 63 mm como M_{63} . Rejeitar o material retido. Pesar e registar a massa das partículas passadas no peneiro de 4 mm como M_4 e rejeitar. Registar a massa do material restante como M_1 .
- Separar e retirar quaisquer partículas de argila ou solo e reservar.
- Imergir em água a amostra em água por forma a recolher as partículas flutuantes.
- Determinar o volume das partículas flutuantes, V_{FI} em cm^3 .
- Recolher as partículas não flutuantes, e secá-las até massa constante.
- Espalhar estas partículas numa superfície plana e, manualmente separar as partículas pertencentes ao tipo X (Materiais coesivos – e.g. solos argilosos, madeira não flutuante, metais - ferrosos e não ferrosos, borrachas e plásticos, gessos), colocando-os num tabuleiro em conjunto com o solo e a argila. Pesar e registar o conjunto como M_x .
- Pesar e registar a massas das restantes partículas não flutuantes como M_2 .
- Por forma a facilitar a separação, o número das partículas pode ser reduzido para um mínimo de 1000 partículas de acordo com a EN 932-2.
- Pesar e registar a massa das partículas não flutuantes restantes como M_3 .
- Separar os seus constituintes apresentados no Quadro 2 do prEN 933-11 a seguir identificados:
 - Rc - Betão e produtos de betão e argamassas
 - Ru – Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos
 - Rb – Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolos, ladrilhos, telhas), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio, betão celular não-flutuante;
 - Ra - Materiais betuminosos
 - Rg - Vidro
 - X – Materiais coesivos (p.ex. solos argilosos), madeira não flutuante, metais (ferrosos e não ferrosos), borrachas e plásticos, gessos
- Registar a massa dos diversos constituintes como M_{Rc} , M_{Ru} , M_{Rb} , M_{Ra} e M_{Rg} .

Apresentação de resultados

Deve ser elaborado um relatório final contendo os seguintes dados obrigatórios:

- Referência à norma de ensaio;
- Identificação da amostra;
- Identificação do laboratório de ensaio;

- Data de recepção da amostra;
- Proporções de cada constituinte;
- Temperatura de secagem
- Data de realização do ensaio.

Caso seja considerado adequado podem ainda apresentar-se outros dados considerados significativos, como complemento à informação obrigatória.

- Nome e local de origem da amostra submetida a ensaio;
- Descrição do material e procedimento de amostragem;
- Descrição da metodologia de redução da amostra;
- Certificado de amostragem, se disponível;
- Massa da amostra, M_0 ;
- Massa do material retido no peneiro de 63 mm, M_{63} ;
- Massa do material passado no peneiro de 4 mm, M_4 ;
- Massa da amostra para ensaio, M_1 ;
- Massa M_3 , após redução da amostra.

Resultados dos ensaios realizados

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

Refira-se que, tal como consta do prEN 933-11 de 29/02/2008, este não é aplicável a agregados reciclados leves abrangidos pelas Normas Europeias da série EN 13055, como é o caso da amostra RCD – LEVE (Ecolabor).

Importa referir que, à data de selecção dos vários tipos de agregados reciclados a caracterizar no âmbito deste estudo, a versão 4 do prEN 933-11 de 14/05/2007 possibilitava a classificação de agregados leves reciclados. A classificação dos agregados leves reciclados gerou amplo debate no seio do grupo de trabalho europeu responsável pelo desenvolvimento daquele projecto de Norma Europeu (CEN/TC 154/SC 6/TG 11). Dado que um dos objectivos do presente estudo consistiu na avaliação da aplicabilidade do prEN 933-11, a selecção de um agregado leve reciclado seria premente para o cumprimento deste objectivo. Contudo, na versão mais actual deste projecto de norma (versão 5 de 29 de Fevereiro de 2008), os agregados leves reciclados foram retirados do campo de aplicação do mesmo, por decisão do grupo de trabalho europeu.

Da análise das percentagens dos vários constituintes das amostras em apreço, constata-se que as amostras RCD-MB e RCD-MBf apresentam 98% e 100% de materiais betuminosos, respectivamente, correspondendo à descrição dos materiais apresentada no Quadro 1.

A amostra RCD-BETÃO apresenta 92% de materiais descritos como betão e produtos de betão e argamassa e 7,7% de materiais designados como agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos, apresentando ainda 0,3% de outros materiais identificados como X.

A amostra RCD-VÁRIOS apresenta diversos constituintes, sendo o mais expressivo, com 43%, o constituído por betão e produtos de betão e argamassa.

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

3.2.2 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 necessário 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, por forma a não aglutinar as partículas.

No Quadro 4 e na Figura 2 apresentam-se as curvas granulométricas obtidas para as várias amostras em estudo.

Quadro 4 | Granulometrias dos agregados reciclados

Abertura da malha (mm)	Percentagem cumulativa do material passado, (%)				
	RCD – BETÃO (Ambitrena)	RCD – MB (Ecolabor)	RCD – LEVE (Ecolabor)	RCD – MBf (Estradas de Portugal)	RCD – VÁRIOS (Trianovo)
125	100,0	100,0	---	---	---
63	77	100,0	---	100,0	---
40	44	89	---	99	---
31,5	36	73	---	98	100
20,0	23	51	100	82	92
16,0	18	44	97	70	77
14,0	16	40	93	62	67
12,5	14	36	88	56	60
10,0	11	30	70	44	47
8,0	9	25	53	35	38
6,3	7	20	36	27	31
4,0	6	15	17	18	22
2,0	5	9	7	9	15
1,0	5	5	4	5	10
0,500	5	4	3	3	7
0,250	5	2	2	2	5
0,125	4	2	1	1	4
0,063	3,9	1,2	0,3	0,7	3,3

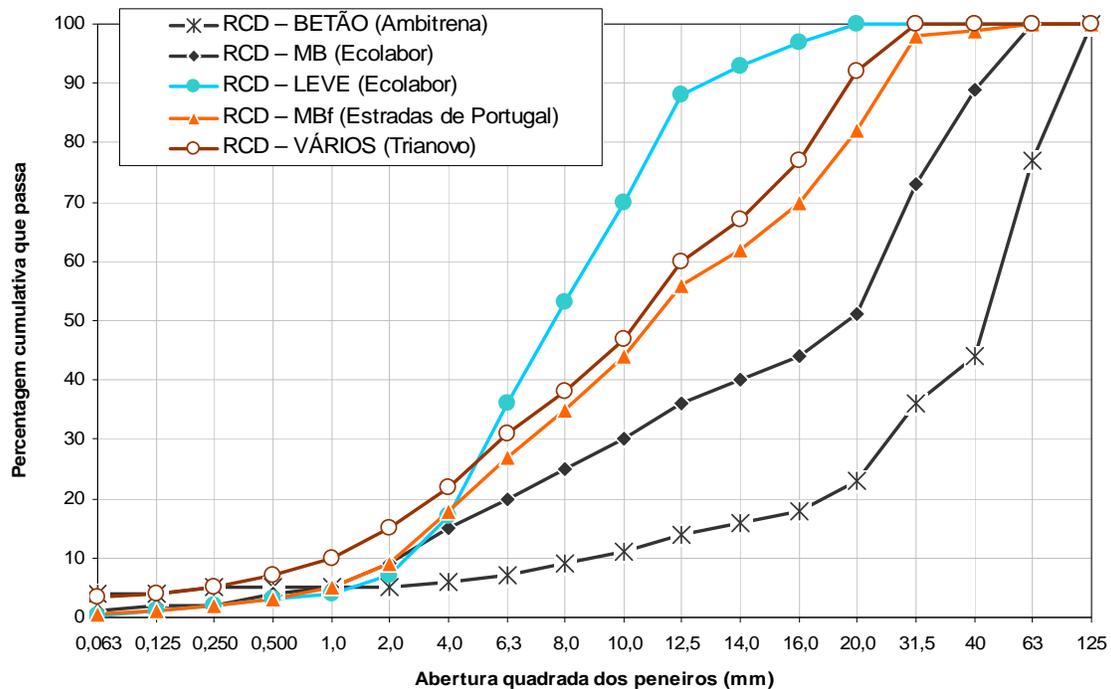


Figura 2 | Curvas granulométricas das amostras de agregados reciclados

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.

3.2.3 Forma das partículas

3.2.3.1 Determinação do Índice de Achatamento

A forma das partículas foi avaliada com a determinação do índice de achatamento conforme preconizado na norma NP EN 933-3: 2002 - "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento".

No Quadro 5 apresentam-se os resultados obtidos para o índice de achatamento (FI) dos agregados reciclados caracterizados.

Quadro 5 | Índice de achatamento (FI) das amostras de agregados reciclados

AGREGADO RECICLADO	ÍNDICE DE ACHATAMENTO (FI)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	5
RCD – MB (Ecolabor)	5
RCD – LEVE (Ecolabor)	20
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	12
RCD – VÁRIOS (Triano)vo	19

Da análise do conjunto de valores obtidos para o índice de achatamento observa-se existir alguma variabilidade dos resultados, função do tipo de agregado reciclado e bem como do tipo de processamento dado a cada material. Os materiais com menor valor do índice de achatamento, 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 a aplicar em camadas de base não ligadas [4].

3.2.3.2 Determinação do Índice de Forma

A forma das partículas foi ainda avaliada com a determinação do Índice de Forma conforme preconizado na norma NP EN 933-4: 2002 – “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de forma”.

Os ensaios foram realizados no Núcleo de Betões do Departamento de Materiais. No Quadro 6 apresentam-se os resultados obtidos para o Índice de Forma (SI) dos agregados reciclados caracterizados.

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.

Quadro 6 | Índice de forma (SI) das amostras de agregados reciclados

AGREGADO RECICLADO	ÍNDICE DE FORMA (SI)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	12
RCD – MB (Ecolabor)	8
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não exequível
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	21
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	16

À semelhança dos resultados obtidos para o índice de achatamento, os valores obtidos para o índice de forma apresentados no Quadro 6 evidenciam alguma variabilidade, função do tipo de agregado reciclado e bem como do tipo de processamento dado a cada material, sendo as amostras RCD-BETÃO e RCD-MB os que apresentam menor valor do índice de forma.

Os RCD-MBf, RCD-VÁRIOS apresentam valores de índice de forma superiores aos valores obtidos um estudo efectuado anteriormente para agregados naturais empregues na construção rodoviária [3].

3.2.4 Equivalente de areia

O valor do equivalente de areia foi determinado de acordo com a Norma Portuguesa NP EN 933-8:2002 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do equivalente de areia”. No Quadro 7 apresentam-se os resultados obtidos.

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.

Da análise dos resultados apresentados no Quadro 7 observa-se que a amostra RCD-BETÃO apresenta maiores valores de equivalente de areia em resultado do tipo e quantidade de finos presentes.

Dado que os resultados obtidos com o ensaio de equivalente de areia podem apresentar uma forte influência do teor em partículas finas ($< 0,063$ mm), quer se tratem de partículas argilosas ou inertes, considera-se que o ensaio de azul de metileno poderá de uma forma mais adequada caracterizar o estado de limpeza dos agregados, quantificando os minerais argilosos presentes bem como a sua nocividade.

Quadro 7 | Valores do equivalente de areia (SE) das amostras submetidas a ensaio

AGREGADO RECICLADO	Equivalente de areia (SE) (%)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	80
RCD – MB (Ecolabor)	59
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não exequível
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	82
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	68

3.2.5 Azul de metileno

Foram submetidas a ensaio todas as amostras de agregados em estudo, com dimensões 0/4 mm e teor em água inicial inferior ou igual a 0,1% após secagem ao ar, para determinação do valor do azul de metileno, de acordo com a metodologia da NP EN 933-9:2002 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do azul de metileno”, já anteriormente apresentada [3].

No Quadro 6 apresentam-se os resultados obtidos.

Quadro 8 | Valores do azul de metileno (MB) das amostras submetidas a ensaio

AGREGADO RECICLADO	Azul de metileno (MB) (g/1000g)
RCD – BETÃO (Ambitrena)	3,0
RCD – MB (Ecolabor)	2,5
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não exequível
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	1,2
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	1,0

Da análise dos resultados apresentados no Quadro 8 observa-se que a amostra RCD-BETÃO apresenta o maior valor de azul de metileno em resultado do tipo e actividade dos finos presentes,

embora tenha apresentado um elevado valor de equivalente de areia. No entanto, 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.

No caso da amostra RCD – MBf o valor de azul de metileno obtido é de 1,2 (g/1000g), da ordem de grandeza dos obtidos para agregados naturais.

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.

3.3 Propriedades mecânicas e físicas dos agregados

3.3.1 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: 2003 – 2 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”.

A NP EN 1097-6:2003 especifica os métodos para a determinação da massa volúmica das partículas e da absorção de água dos agregados e considera seis métodos de ensaio. Os primeiros cinco métodos são aplicáveis a agregados correntes e o sexto método aplica-se a agregados leves.

Considera assim, entre outros:

- a) O método do cesto de rede metálica para agregados que passam no peneiro de 63 mm e são retidos no peneiro de 31,5 mm;
- b) O método do picnómetro para agregados que passam pelo peneiro de 31,5 mm e são retidos no peneiro de 0,063 mm;

O método do cesto de rede metálica pode ser utilizado como uma alternativa ao método do picnómetro para agregados entre 4 mm e 31,5 mm. No entanto, em caso de litígio, o método do picnómetro descrito na secção 8 da presente norma deve ser utilizado como método de referência.

O método do cesto de rede metálica também pode ser utilizado para partículas individuais do agregado retidas no peneiro de 63 mm.

A amostra RCD-LEVE foi ensaiada de acordo com o preconizado no Anexo C da NP EN 1097-6:2003, “Determinação da massa volúmica das partículas e da absorção de água de agregados leves”, dadas as características dos agregados reciclados constituintes da amostra.

Resultados dos ensaios realizados

O Quadro 9 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 9 | 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 9 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 são geralmente inferiores ou iguais a 1% [4].

No que se refere aos valores das massas volúmicas estes são em geral inferiores aos usualmente observados para agregados naturais. Destaca-se a amostra RCD-LEVE cuja caracterização foi realizada conforme o Anexo C da NP EN 1097-6:2003, para agregados leves, 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%.

3.3.2 Resistência à fragmentação

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 1097-2:2002 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Método para a determinação da resistência à fragmentação”.

Resultados dos ensaios realizados

No Quadro 10 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 o ensaio.

Quadro 10 | Coeficiente de Los Angeles

AGREGADO RECICLADO	COEFICIENTE DE LOS ANGELES
RCD – BETÃO (Ambitrena)	Não foi possível obter material suficiente na fracção 10/14 mm
RCD – MB (Ecolabor)	30
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não exequível
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	16
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	44

Da análise do conjunto de valores obtidos para o coeficiente de Los Angeles observa-se existir uma gama alargada de resultados, função do tipo de agregado reciclado, expresso pelos diversos constituintes. Assim para a amostra RCD-VÁRIOS obteve-se o maior valor do coeficiente de Los Angeles, 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.

Observa-se ainda que, no caso de materiais com diferentes tipos de constituintes, como é o caso da amostra RCD-VÁRIOS, o valor obtido para o Coeficiente de los Angeles pode não ser representativo da totalidade da amostra, uma vez que este é determinado sobre materiais de dimensões compreendidas entre 10 e 14 mm, cujas partículas podem ter constituição distinta das restantes.



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

3.3.3 Resistência ao desgaste

A quantificação da resistência ao desgaste das partículas de agregado grosso foi realizada com a obtenção do coeficiente micro-Deval conforme preconizado na Norma Portuguesa NP EN 1097-1:2002: "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval)".

Resultados dos ensaios realizados

No Quadro 11 apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos agregados reciclados em apreço. Na Figura 5 apresenta-se o aspecto de algumas das amostras antes e após o ensaio de micro-Deval.

Tal como verificado no ensaio de resistência à fragmentação, não foi possível realizar o ensaio de micro-Deval sobre a amostra de RCD-LEVE por as partículas serem demasiadamente deformáveis não sendo possível quantificar o desgaste.

Quadro 11 | Coeficiente de micro-Deval

AGREGADO RECICLADO	COEFICIENTE DE MICRO-DEVAL
RCD – BETÃO (Ambitrena)	28
RCD – MB (Ecolabor)	24
RCD – LEVE (Ecolabor)	Não exequível
RCD – MBf (Estradas de Portugal)	13
RCD – VÁRIOS (Trianovo)	36



Figura 5 | Aspecto das amostras de agregados reciclados, antes e após o ensaio de micro-Deval

Tal como observado para o ensaio de Los Angeles verifica-se a obtenção de uma gama extensa de resultados, função do tipo de agregado reciclado, expresso pelos diversos constituintes.

A amostra RCD-VÁRIOS apresenta o maior valor do coeficiente de micro-Deval, dado que este material apresenta na sua constituição diversos tipos de constituintes, referindo-se entre outros, materiais cerâmicos, que apresentam um elevado coeficiente de resistência ao desgaste. Tal como já referido a propósito do Coeficiente de Los Angeles, o coeficiente de micro-Deval, dado que é determinado apenas sobre materiais com determinadas dimensões, pode não ser representativo do comportamento de alguns tipos de materiais reciclados cujas diferentes fracções granulométricas não possuam a mesma constituição.

4 | APLICABILIDADE DO prEN 933-11 E DOS MÉTODOS DE ENSAIO USADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

À data da elaboração do Protocolo de Cooperação entre a EP e o LNEC e atendendo à versão do prEN 933-11 então existente, de 14 de Maio de 2007, foram seleccionados cinco tipos de agregados reciclados, a referir:

- RCD – BETÃO – Agregado proveniente da britagem de resíduos resultantes da demolição de betão limpo
- RCD – MB – Agregados provenientes da britagem de resíduos resultantes da demolição de pavimentos betuminosos
- RCD – LEVE – Agregado leve resultante de resíduos de isolamento térmico
- RCD – MBf – Agregados provenientes da fresagem de pavimentos betuminosos
- RCD – VÁRIOS – Agregado proveniente da britagem de resíduos com várias origens

Com a elaboração da versão 5, de 29 de Fevereiro de 2008, do prEN 933-11, os agregados leves, como é o caso da amostra RCD – LEVE, deixaram de ser contemplados por aquele projecto de norma. No entanto, optou-se por realizar a sua caracterização no âmbito do presente estudo, tal como previsto inicialmente.

No que concerne à aplicação da metodologia de ensaio preconizada no prEN 933-11, esta é de uma forma geral fácil de executar, 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 no prEN 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:

1. 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, inviabilizando a sua caracterização laboratorial.

A realização dos ensaios de caracterização aplicáveis a agregados reciclados de misturas betuminosas, e apresentados neste estudo, não evidenciou quaisquer dificuldades adicionais.

2. 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 dos agregados;
3. 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.

Actualmente verifica-se um interesse crescente na aplicação de agregados reciclados em infra-estruturas rodoviárias 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. No entanto, a experiência existente em Portugal com a aplicação deste tipo de materiais na construção rodoviária, é ainda limitada pelo que a caracterização destes materiais à luz do novo acervo normativo europeu se torna cada vez mais premente.

Neste contexto, 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 diferentes tipos de agregados reciclados produzidos em Portugal no âmbito das actividades de experimentação pró-normativa. Os agregados reciclados para estudo foram seleccionados pela CT 154 – *Agregados*.

De acordo com o Plano de Trabalhos acordado entre a EP e o LNEC, o estudo desenvolvido compreendeu a caracterização laboratorial de agregados reciclados com a realização de ensaios de classificação dos constituintes, de acordo com o prEN 933-11, e de avaliação das suas propriedades geométricas, mecânicas e físicas consideradas mais relevantes, utilizando normas habitualmente empregues para agregados naturais.

Complementarmente, os materiais em estudo foram caracterizados em termos das suas propriedades químicas com avaliação dos constituintes do eluato, uma vez que estas propriedades se revestem de grande importância do ponto de vista ambiental. Foi também realizada a determinação do índice de forma (NP EN 933-4), não prevista no plano de trabalhos acordado com a EP.

Dos resultados obtidos, que se apresentam neste relatório, podem tecer-se as seguintes considerações:

- 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;
- A identificação dos constituintes dos agregados reciclados conforme o prEN 933-11 foi aplicada a todas os materiais em apreço, com excepção da amostra RCD-LEVE por a versão actual do projecto de norma não ser aplicável a agregados leves;
- 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, foram realizadas sobre as cinco amostras de agregados reciclados, sempre que aplicável. No entanto, esta determinação 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.

- Observa-se ainda que certas propriedades, como a resistência ao desgaste ou a resistência á 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.
- Com excepção da amostra de agregados leves (RCD-LEVE), as amostras de agregados reciclados provenientes da britagem de resíduos de construção e demolição de várias origens não apresentaram, de uma forma geral, qualquer dificuldade na caracterização laboratorial, de acordo com as metodologias de ensaio usualmente aplicadas a agregados naturais

6 | AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar aos produtores 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.

Colaboraram na realização dos trabalhos experimentais os seguintes técnicos:

- Técnico Principal José Reimão Costa;
- Técnico Profissional Coordenador Eduardo Coimbra;
- Técnico Profissional Especialista Fernando Calado;
- Técnico Profissional 2^a Classe Nuno Nunes;
- Bolseiro de Experimentação Ricardo Melo.

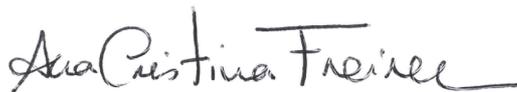
Lisboa, LNEC, Abril de 2008

VISTOS



António Lemonde de Macedo
Director do Departamento de Transportes

AUTORIAS



Ana Cristina F. O. R. Freire
Investigadora Auxiliar do LNEC



Maria de Lurdes Antunes
Investigadora Coordenadora do LNEC
Chefe do Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias
e Aeroportuárias

- [1] Gonçalves, A., Martins, I., Antunes, M. L., Freire, A.C., Batista, F., Fortunato, E., Roque, A. – “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 de 2007.
- [2] Decisão do Conselho 2003/33/CE. Jornal Oficial das Comunidades Europeias L11, de 16 de Janeiro de 2003.
- [3] Freire, A.C., Antunes, M.L. – “Aplicação de métodos de ensaio especificados em normas europeias de agregados”, Relatório 224/06, 2006.
- [4] Freire, A. C., Antunes, M. L. – “Caracterização de Agregados produzidos em Portugal de acordo com as referências normativas EN 13043 e EN 13242”, Relatório DT/2008 (em impressão).
- [5] Freire, A. C., Antunes, M. L. – “Estudo da influência do teor de água dos agregados nos resultados do equivalente de areia”, Relatório DT/2008 (em impressão).

ANEXOS

ANEXO I – Boletins de ensaio – DM/NB



Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Departamento de Materiais

Núcleo de Betões

Boletim nº	B159NB08
Pág.	1 de 2
Pedido nº	100NB08
Visto	

Data do boletim: 2008-06-05

Data do pedido: 2008-01-24

Requerente:

LNEC, I.P. – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEC, I.P. - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av. do Brasil, 101

1700-066 LISBOA

Obra: DT/NIRA – Mod. 4 n.º 234574 de 2007-12-06

RESÍDUOS ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

1 – Identificação das amostras

Foram recebidas três amostras provenientes do DT/NIRA, com as seguintes identificações:

“Trianovo (Toutvenant) Refº 1412007”;

“EN 10 (Recta do Cabo)”;

“Ecolabor (mistura betuminosa britada)”.

2 – Condições de ensaio

O ensaio de lixiviação foi realizado de acordo com o procedimento da Norma Europeia EN 12457 – 4: 2002.

Nos lixiviados foram determinados os elementos de acordo com os seguintes documentos normativos:

Cloretos.....	NP 423: 1966
Sulfatos.....	NP 413: 1966
Carbono orgânico dissolvido.....	Especificação LNEC E 386: 1993
Crómio.....	ASTM D 1687: 2002

Os metais cádmio, cobre, níquel, chumbo e zinco foram determinados por espectrometria de absorção atómica com câmara de grafite de acordo com método interno.

LNEC, I.P./DM
Av. do Brasil, 101 1700-066 LISBOA • Portugal
Tel. +351.21.844 32 21 Fax +351.21.844 30 23
Pess. Colectiva 501 389 660

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Departamento de Materiais
Núcleo de Betões

Boletim nº B159NB08

Pág. 1 de 2

Pedido nº 100NB08

Visto

3 – Resultados

Os resultados obtidos são apresentados no quadro abaixo.

Parâmetros	Amostra Trianovo	Amostra Recta do Cabo	Amostra Ecolabor
Carbono Orgânico Dissolvido, C (mg/l)	8,5	25	38
Cádmio, Cd ($\mu\text{g/l}$)	$6,38 \times 10^{-2}$	$7,50 \times 10^{-2}$	$7,75 \times 10^{-2}$
Cobre, Cu ($\mu\text{g/l}$)	6,77	1,33	1,46
Crómio, Cr ($\mu\text{g/l}$)	30	< 0,80	0,91
Níquel, Ni ($\mu\text{g/l}$)	2,91	3,87	3,62
Chumbo, Pb ($\mu\text{g/l}$)	< 0,45	< 0,45	< 0,45
Zinco, Zn ($\mu\text{g/l}$)	1,13	0,46	1,22
Cloretos, Cl (mg/l)	18,8	6,3	4,5
Sulfatos, SO_4^{2-} (mg/l)	774	6,0	71

Data do início dos ensaios: 2008-04-07

Data final dos ensaios: 2008-05-15

Ø Chefe de Núcleo

Eng. Arlindo Gonçalves

ANTÓNIO BETTENCOURT RIBEIRO

Boletim de Ensaios



Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Departamento de Materiais
Núcleo de Betões

Boletim nº B701NB08
Pág. 1 de 2
Pedido nº 675NB08

Visto

[Handwritten signature]

Data do boletim: 2008-06-16

Data do pedido: 2008-04-30

Requerente:

LNEC, I.P. – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEC, I.P. - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av. do Brasil, 101

1700-066 LISBOA

Obra: DT/NIRA – Mod. 4 n.º 237638 de 2008-04-23

RESÍDUO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

1 – Identificação da amostra

Foi recebida uma amostra proveniente do DT/NIRA, com a seguinte identificação:

“RCD – Betão (Ambitrena)”

2 – Condições de ensaio

O ensaio de lixiviação foi realizado de acordo com o procedimento da Norma Europeia EN 12457 – 4: 2002.

Nos lixiviados foram determinados os elementos de acordo com os seguintes documentos normativos:

Cloretos.....	NP 423: 1966
Sulfatos.....	NP 413: 1966
Carbono orgânico dissolvido.....	Especificação LNEC E 386: 1993
Crómio.....	ASTM D 1687: 2002

Os metais cádmio, cobre, níquel, chumbo e zinco foram determinados por espectrometria de absorção atómica com câmara de grafite de acordo com método interno.

LNEC, I.P./DM
Av. do Brasil, 101 1700-066 LISBOA • Portugal
Tel. +351.21.844 32 21 Fax +351.21.844 30 23
Pess. Colectiva 501 389 660

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

Boletim de Ensaaios

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Departamento de Materiais
Núcleo de Betões

Boletim nº B701NB08

Pág. 2 de 2

Pedido nº 675NB08

Visto

3 – Resultados

Os resultados obtidos são apresentados no quadro abaixo.

Parâmetros	Amostra “Ambitrena”
Carbono Orgânico Dissolvido, C (mg/l)	32,0
Cádmio, Cd (µg/l)	< 0,028
Cobre, Cu (µg/l)	8,79
Crómio, Cr (µg/l)	8,93
Níquel, Ni (µg/l)	4,16
Chumbo, Pb (µg/l)	< 0,77
Zinco, Zn (µg/l)	4,55
Cloretos, Cl (mg/l)	3,6
Sulfatos, SO ₄ ²⁻ (mg/l)	49

Data do início dos ensaios: 2008-05-07
Data final dos ensaios: 2008-06-05

O Chefe de Núcleo



Eng. Arlindo Gonçalves

Boletim de Ensaios

