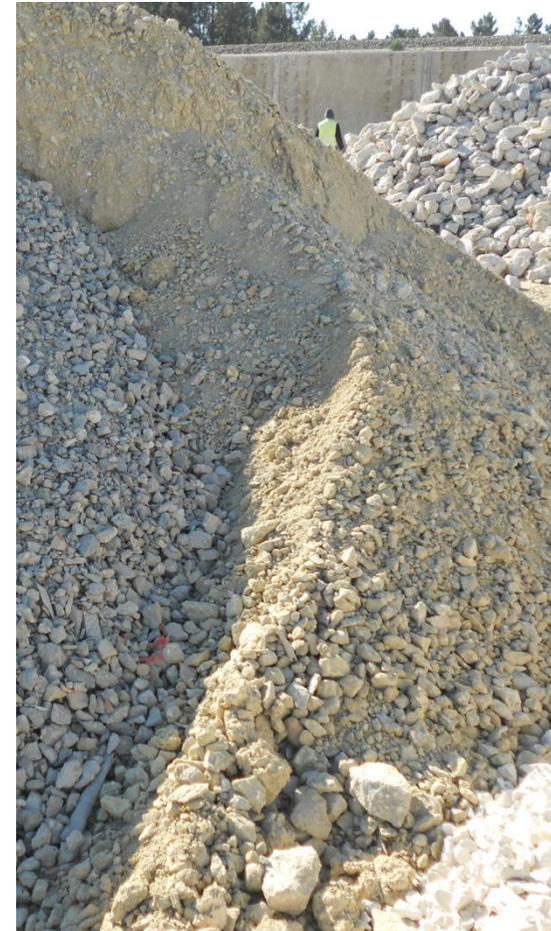


Enquadramento

- ✓ Preservação dos recursos naturais e minimização dos impactes negativos sobre a saúde pública e o ambiente;
- ✓ Meta de 70% de valorização dos resíduos, a atingir em 2020 (segundo a Diretiva-Quadro “Resíduos” – 2008/98/CE transposta para o Decreto-Lei nº73/2011, de 17 de junho);
- ✓ Os RCD apresentam um elevado potencial de valorização com elevadas percentagens de frações reutilizáveis e recicláveis (em alguns Estados-Membros superiores a 80%).



Enquadramento

Aplicações de RCD:

- Material para betão
- Material para misturas betuminosas
- Material para bermas
- Material para aterros
- Material para sub-base e base não ligadas ou ligadas com ligantes hidráulicos de pavimentos rodoviários
- Material para caminhos rurais e florestais
- Material para valas



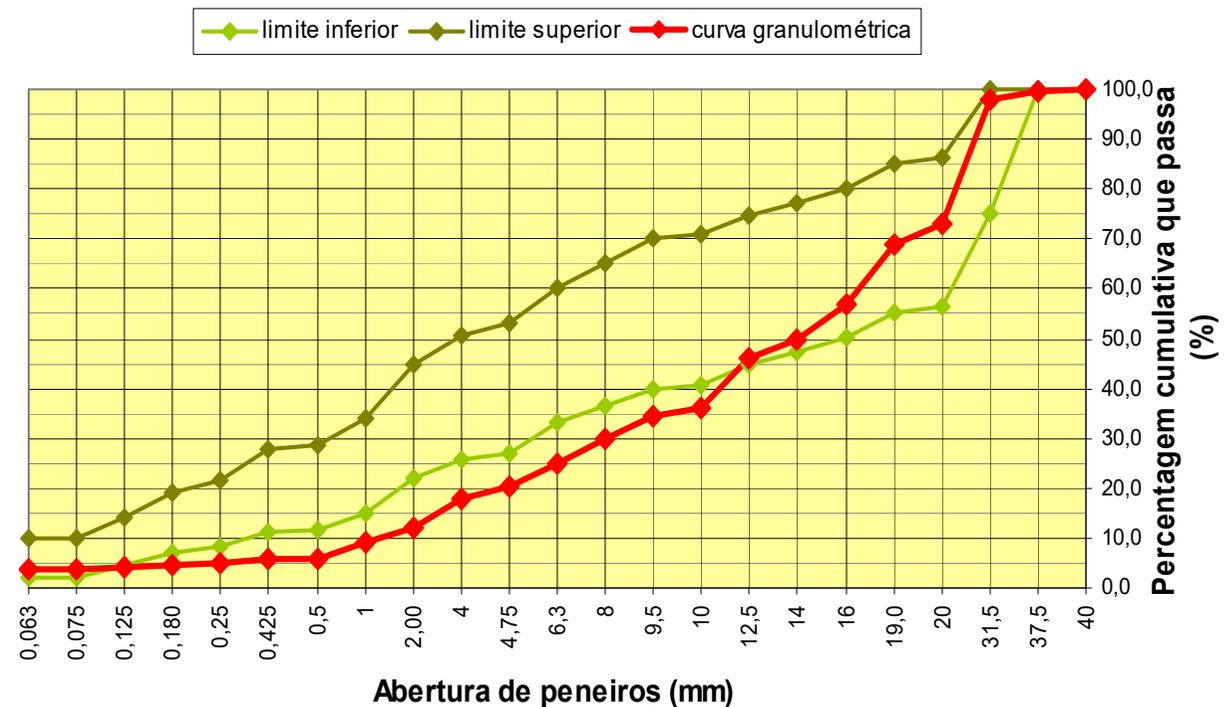
Aplicações de RCD – As especificações LNEC



CASO DE ESTUDO 1

Material ensaiado

- ✓ Cubos de betão britados – RCD - **Betão Britado**;
- ✓ Britagem em britadeira laboratorial de mandíbulas;
- ✓ Regulada para uma abertura máxima de 31,5 mm.



Local de aplicação - Fossa de Ensaio



Boa aproximação às condições verificadas *in situ*;

Possibilita a avaliação do comportamento estrutural;

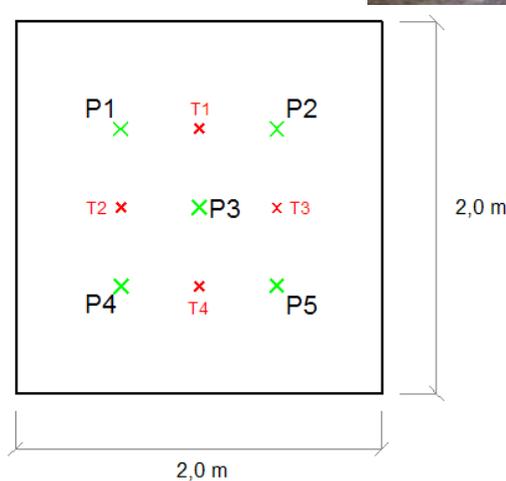


✓ Construção de 2 camadas

✓ Dimensões da camada: **2,0 x 2,0 x 0,3 m³**;

✓ **4 pontos de ensaio** do teor em água e do estado de compactação;

✓ **5 pontos de ensaio** com os equipamentos LFWD e Geogauge.



Caracterização estrutural da camada de base granular com agregados reciclados de RCD

- ✓ Ensaio com Geogauge
- ✓ Ensaio com Deflectómetro de impacto portátil (LFWD)
- ✓ Ensaio com deflectómetro de impacto (FWD)



- Mede a rigidez da camada – cálculo do módulo de deformabilidade equivalente;
- Cinco pontos de ensaio: P1, P2, P3, P4 e P5;
- Colocação de uma camada fina de areia húmida;
- 3 medições em cada local.

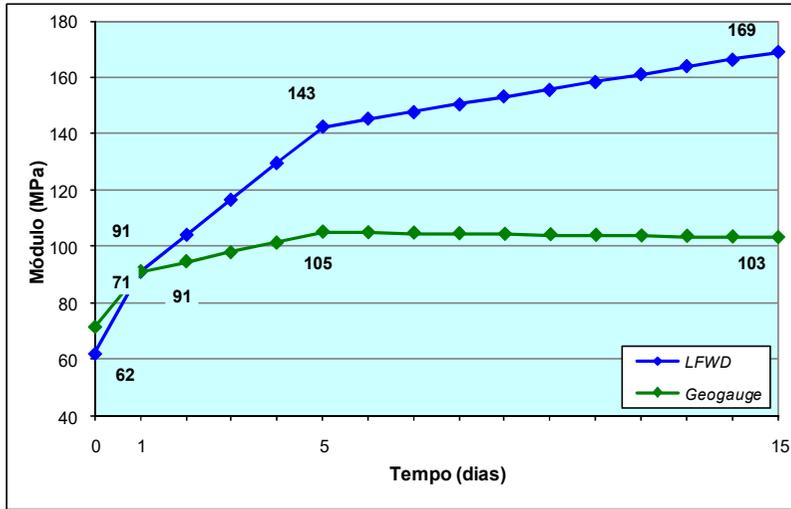
- Placa: 300 mm de diâmetro;
- Medições com os geofones a 0 cm (centro da placa), 30 cm, 45 cm e 60 cm;
- Placa posicionada no ponto P3;
- Forças aplicadas: entre 30 e 70 kN.



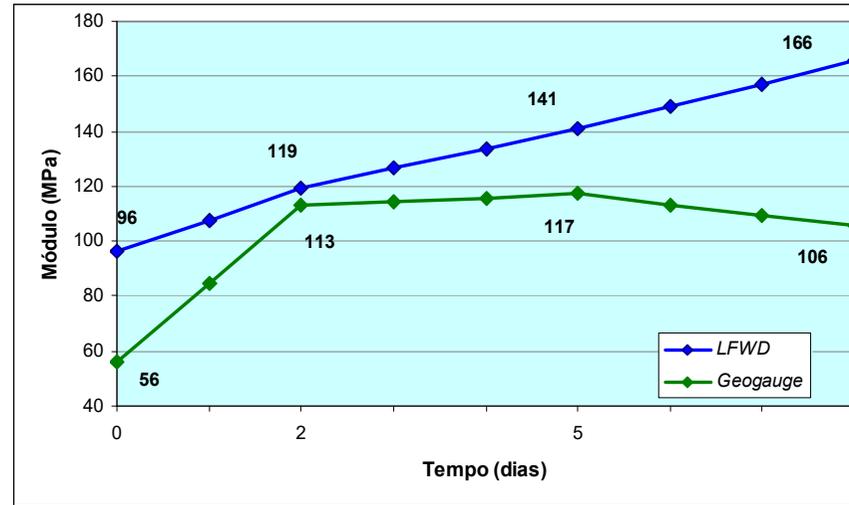
- Pontos de ensaio: P1, P2, P3, P4 e P5;
 - Massa: 15 kg;
 - Altura de queda: 0,80 m;
 - Placa: 300 mm de diâmetro;
 - Medições com o geofone central;
- Cerca de 10 medições em cada local;
 - Força aplicada: cerca de 16 kN.

Análise comparativa de resultados – Geogauge vs. LFWD vs. FWD

1ª camada



2ª camada



Apreciação final do Caso de Estudo 1

- Módulos de deformabilidade equivalente entre 100 e 170 MPa - **Geogauge e LFWD;**
- Módulos de deformabilidade entre 195 e 235 MPa - **FWD;**
- Módulos obtidos com Geogauge e LFWD inferiores aos usualmente obtidos em camadas granulares não ligadas construídas com agregados naturais;
- Módulos obtidos com FWD da mesma ordem de grandeza dos usualmente obtidos em camadas granulares não ligadas de agregados naturais;
- A fossa de ensaios constitui um valioso equipamento;

- **Módulos aumentam com a diminuição do teor em água – efeito de autocimentação;**
- **Viabilização da aplicação dos RCD em camadas de base e sub-base de estradas de baixo tráfego.**

CASO DE ESTUDO 2

Principais objetivos

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



CASO DE ESTUDO 2

Tarefas realizadas

1. Seleção dos materiais (RCD e materiais naturais), função da origem, com a definição das metodologias de seleção a adotar e do método de classificação, bem como da caracterização laboratorial a ser realizada, tendo em conta as normas europeias aplicáveis;
2. Realização de ensaios de caracterização geométrica, física, mecânica e ambiental dos RCD e dos agregados naturais, previamente selecionados;
3. Construção de trecho experimental à escala real, com instrumentação (extensómetros, células de carga e lisímetros).



CASO DE ESTUDO 2

Materiais estudados

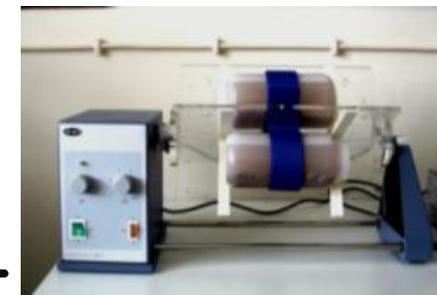
- ✓ Resíduos mistos (alvenaria e betão)
- ✓ Resíduos de misturas betuminosas britadas
- ✓ Resíduos de misturas betuminosas recuperadas (misturas betuminosas fresadas em obra)
- ✓ ABGE calcário
- ✓ Mistura: 70% ABGE + 30% Resíduos de misturas betuminosas recuperadas (fresadas em obra)



CASO DE ESTUDO 2

Ensaio de lixiviação

Parâmetros [mg/kg, matéria seca]	Betão britado misto	Mistura betuminosa britada	Mistura betuminosa fresada	ABGE	Valor limite para deposição em aterros para resíduos inertes (2003/33/EC)
pH	11,29	10,95	9,67	7,90	-
Cádmio, Cd	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,04
Crómio, Cr	0,126	0,046	<0,010	<0,010	0,5
Chumbo, Pb	<0,024	<0,024	<0,024	<0,024	0,5
Zinco, Zn	0,010	<0,006	<0,006	0,035	4
Cobre, Cu	0,045	0,030	<0,014	<0,014	2
Níquel, Ni	<0,026	<0,026	<0,026	<0,026	0,4
Cloreto, Cl ⁻	44	35	35	44	800
Sulfato, SO ₄ ²⁻	267	124	13	145	1000
Carbono Orgânico Dissolvido, COD	46	71	94	71	500



EN 12457-4

Classificação como resíduos para deposição em aterro de resíduos inertes (LNEC E473 e E474)



NP EN 1744-3 (NP 13242:2002+A1:2004)

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

CASO DE ESTUDO 2

Constituintes dos RCD



LEGENDA:

FL - Volume de material flutuante

Rc - Betão; Argamassas

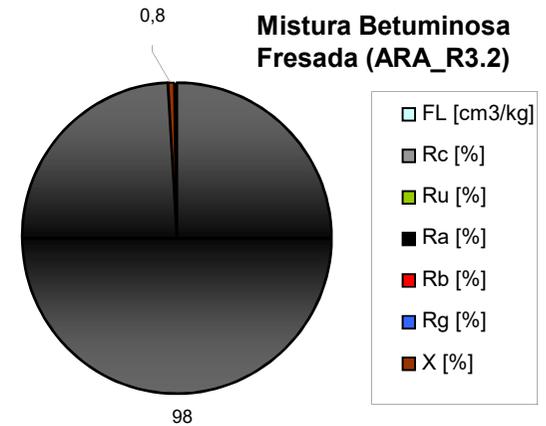
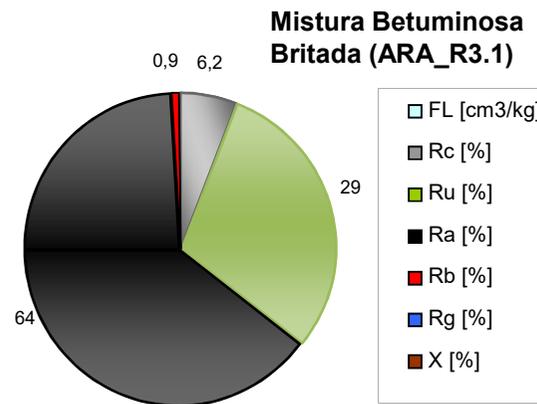
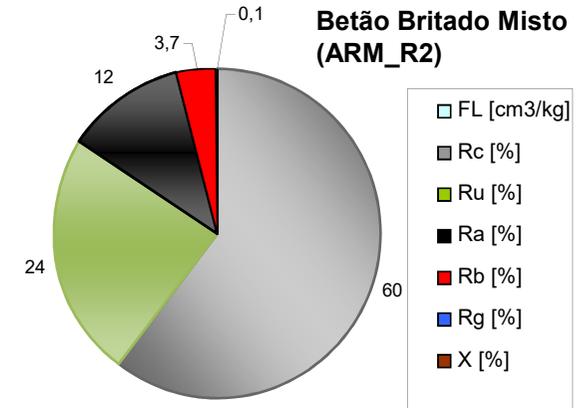
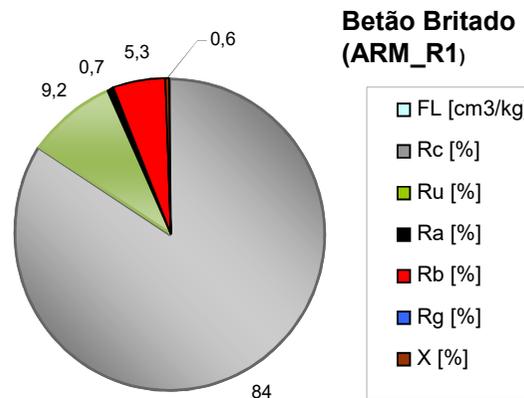
Ru - Agregados não ligados; Pedra natural; Agregados trata

Ra - Materiais betuminosos

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

Rg - Vidro

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



CASO DE ESTUDO 2

Primeiros resultados

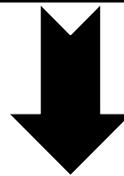
- **Identificação dos constituintes dos RCD (EN 933-11)**
- Análise granulométrica - nem sempre é possível cumprir o fuso granulométrico (CE EP (2009)) para a aplicação de agregados reciclados em camadas do pavimento – **CORREÇÃO GRANULOMÉTRICA**
- Outras propriedades dos materiais avaliadas: índice de forma, índice de achatamento, equivalente de areia, azul de metileno, resistência ao desgaste (MDA) e resistência à fragmentação (LA) – **REQUISITOS DA LNEC E 473 E DA LNEC E 474**
- Ensaio de compactação Proctor Modificado - **RCD ENSAIADOS APRESENTAM VALORES DISTINTOS DOS USUALMENTE OBSERVADOS PARA MATERIAIS NATURAIS**
- **Ensaio de lixiviação**
 - Primeiros resultados apontam para a possível utilização dos RCD - teores dos contaminantes analisados são inferiores aos valores limite para deposição de resíduos em aterros para resíduos inertes, cumprindo os requisitos estabelecidos nos documentos de referência;
 - Conclusão final sobre o risco ambiental associado à utilização destes resíduos só será tomada quando estiverem concluídos todos os ensaios de lixiviação preconizados neste projeto de investigação.

CASO DE ESTUDO 2

Avaliação ambiental

Os ENSAIOS de LIXIVIAÇÃO em LABORATÓRIO sobrestimam a lixiviabilidade real do material.

A COMPARAÇÃO de resultados de ensaios em laboratório com ensaios no campo (lisímetros) indica que os ENSAIOS DE COLUNA são os que melhor simulam a real lixiviabilidade do material em condições normais.



In: ALT-MAT, Alternative materials in road construction. Project Funded by European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, 1998/1999.



CASO DE ESTUDO 2

Avaliação ambiental – construção de lisímetros



Materiais aplicados:

1. Mistura de resíduos de misturas betuminosas britadas
2. Resíduos mistos (alvenaria e betão)
3. ABGE calcário
4. Mistura de 70% de ABGE calcário + 30% de mistura betuminosa fresada
5. Seixo (lisímetro branco)



CASO DE ESTUDO 2

Avaliação ambiental – construção de lisímetros

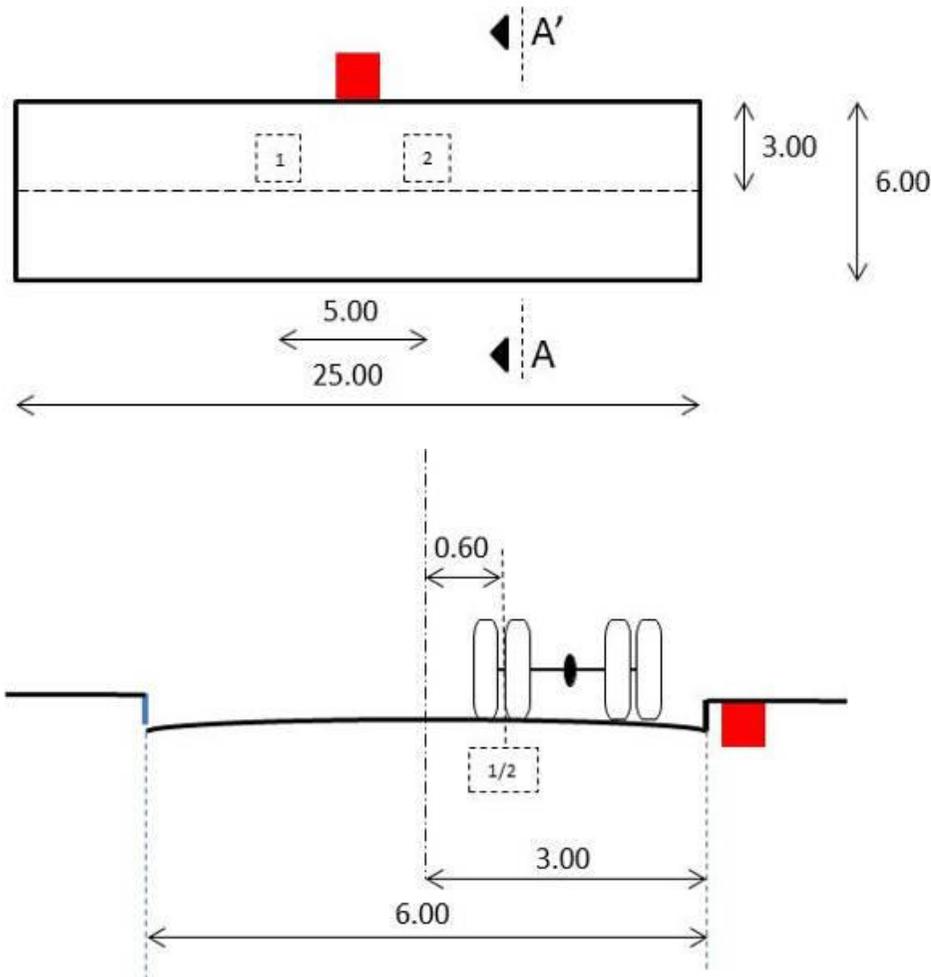
Componente (mg/kg de matéria seca)	B	BM	BET-B	30BET-F +70ABGE	ABGE	Limite para resíduos inertes
Cádmio, Cd	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,04
Crómio, Cr	0,114	0,083	0,03	0,03	0,03	0,5
Chumbo, Pb	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,5
Zinco, Zn	0,011	0,011	0,010	0,011	0,018	4
Cobre, Cu	0,007	0,007	0,009	0,005	0,005	2
Níquel, Ni	0,015	0,016	0,015	0,015	0,016	0,4
Cloretos, Cl ⁻	64,63	58,43	46,91	32,45	37,27	800
Sulfatos, SO ₄ ²⁻	603,83	626,59	294,71	57,32	271,79	1000
Carbono Orgânico Dissolvido, DOC	13,37	21,04	36,74	14,31	6,75	500
pH (-) (valores mín. e máx.)	7,23-8,13	7,20-7,63	7,35-7,66	7,33-7,74	7,27-7,76	—
CE (µS/cm) (valores inicial e final)	1540-302-	1374-266	858-186	247-147	721-180	—

- Os ensaios começaram em junho de 2011(L/S = 5,0 L/kg de matéria seca)
- A precipitação ainda não foi suficiente para a recolha da última fração (L/S = 10,0 L/kg de matéria seca)

- Os teores dos metais pesados ocorrem em concentrações muito baixas, algumas vezes abaixo do limite de deteção do método utilizado.
- **Admite-se que os valores limites de lixiviação requeridos para a admissão de resíduos em aterros de resíduos inertes não sejam alcançados com a recolha da última fração (L/S = 10,0 L/kg)**

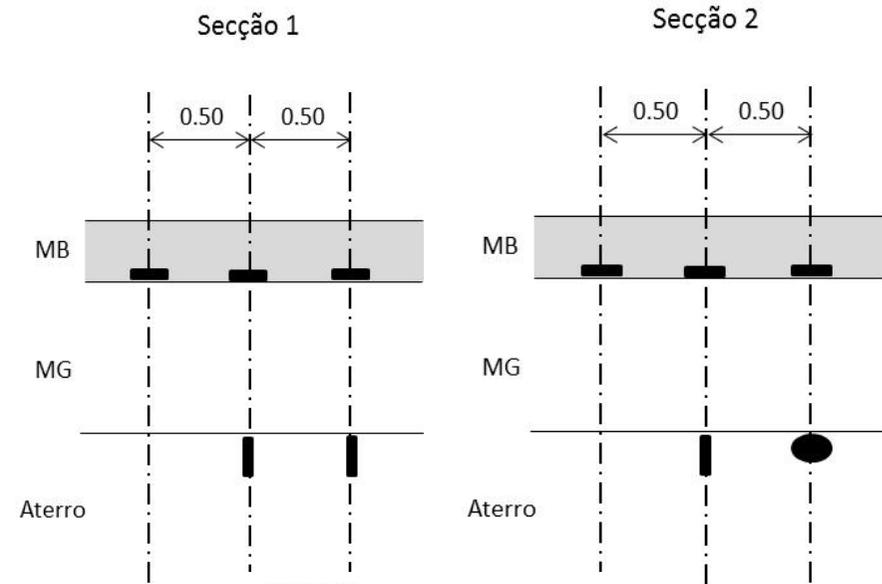
CASO DE ESTUDO 2

Construção de trecho experimental



Legenda:

- Caixa de visita (terminal da instrumentação)
- 1 Secção a instrumentar



Legenda:

- Extensómetro vertical
- Extensómetro horizontal
- Célula de carga

MB – Camadas de misturas betuminosas
MG – Camadas de materiais granulares



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



CASO DE ESTUDO 2

Construção de trecho experimental



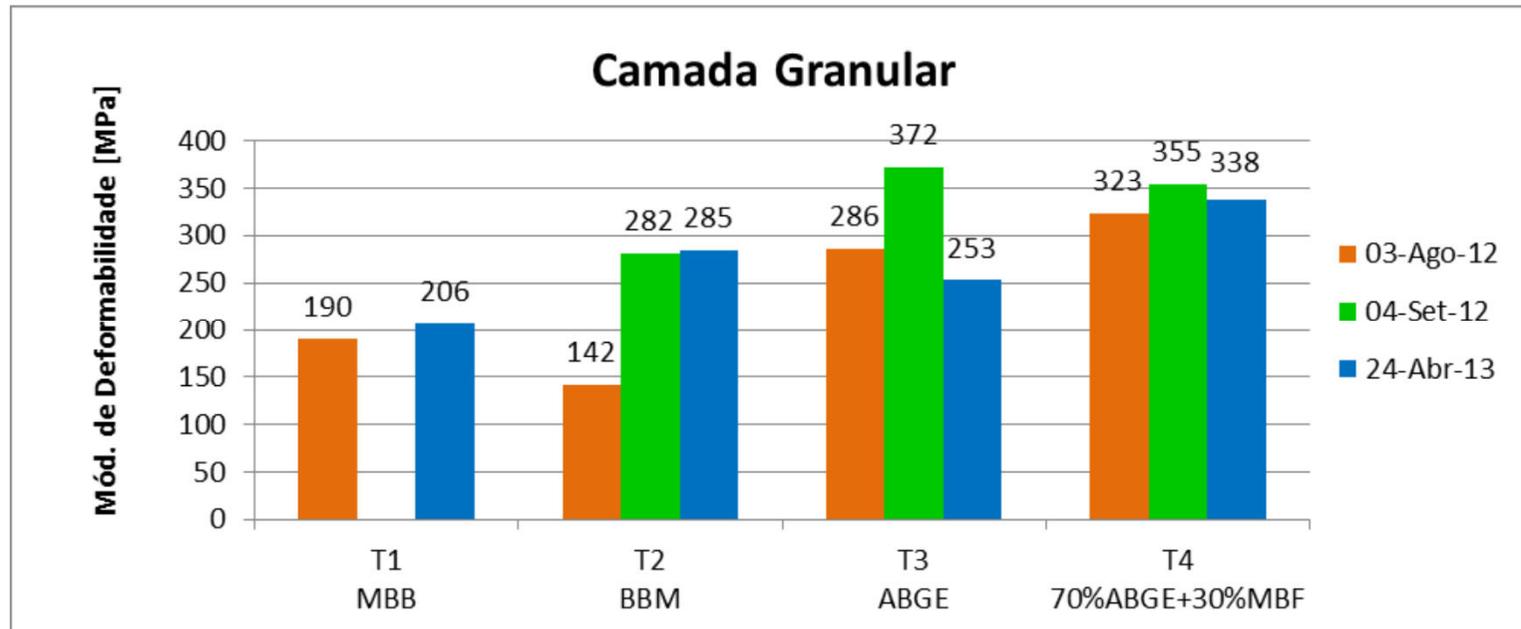
Material aplicado em cada secção do trecho experimental (camada de base granular):

- **Secção 1:** Agregados reciclados de resíduos de misturas betuminosas britadas (MBB)
- **Secção 2:** Agregados reciclados de resíduos mistos (alvenaria e betão) (BBM)
- **Secção 3:** ABGE calcário
- **Secção 4:** Mistura de 70% de ABGE calcário + 30% de mistura betuminosa fresada



CASO DE ESTUDO 2

Construção de trecho experimental



Ensaio com o FWD:

- Aplicação de força de impacto de 30 kN
- Placa de 45 cm
- Medidas as deflexões verificadas a 0 cm (D0), 30 cm (D30), 45 cm (D45), 60 cm (D60), 90 cm (D90), 120 cm (D120), 150 cm (D150), 180 (D180) and 210 cm (D210), do centro da aplicação da carga



CASO DE ESTUDO 2

Considerações finais



- Analisados diversos RCD tendo em vista a sua potencial aplicação em pavimentos rodoviários
- Garantir que os agregados reciclados de RCD são materiais viáveis, garantem a qualidade estrutural do pavimento e são uma opção viável para o projeto rodoviário
- Fomentar a utilização sustentável de agregados reciclados de RCD na construção rodoviária
- Propor estruturas-tipo de pavimentos com a aplicação de agregados reciclados de RCD em camadas de base e sub-base - catálogo de pavimentos com utilização de acordo com o tipo de material, tipo de fundação e classe de tráfego
- Propor especificações e requisitos técnicos relativos à aplicação em camadas não ligadas de pavimentos

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio financeiro do projeto "PTDC/ECM/100931/2008 - SUPREMA - Aplicação Sustentável de Construção e Demolição Materiais Reciclados (RCD) em Infra-Estruturas Rodoviárias" financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), Ministério da Economia e do Emprego.

Agradece-se ainda à empresa Ambigroup, SGPS, SA, pelo fornecimento dos materiais estudados (*Betão britado misto, Mistura betuminosa britada e ABGE calcário*), e pelo apoio na construção do trecho experimental.

São igualmente devidos agradecimentos à empresa Teodoro Gomes Alho, SA pelo fornecimento do material *Mistura betuminosa fresada*.



Referências Bibliográficas

- Pestana, R. (2008). “*Contribuição para o estudo do comportamento mecânico de resíduos de construção e demolição aplicados em estradas de baixo tráfego*”, Dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia civil, IST.
- Freire, A. C., Antunes, M. L. (2008). “*Caracterização de agregados reciclados de acordo com o normativo europeu prEN 933-11*”, Relatório DT/2008.
- Neves, J.; Martins, A., Freire, A.C. (2016). Catálogos de pavimentos com Resíduos de Construção de Demolição para estradas de baixo tráfego. 8º Congresso Rodoviário Português. LNEC, Lisboa, 2016.
- Freire, A., Neves, J., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Faria, G. (2013). Use of construction and demolition recycled materials (C&DRM) in road pavements validated on experimental test sections. Proceedings of the 2nd International Conference WASTES, Guimarães, Portugal.
- Roque, A.J., Martins, I.M., Freire, A.C, Neves, J., Antunes, M.L. (2016). Assessment of environmental hazardous of construction and demolition recycled materials (C&DRM) from laboratory and field leaching tests application in road pavement layers. Procedia Engineering, Volume 143, 204-211.