



**INÊS DE SOUSA  
E CASTRO  
ALMIRO**

**APLICAÇÃO DE RCD NA CONSTRUÇÃO DE  
ESTRADAS**





Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil  
Ano 2012

**INÊS DE SOUSA  
E CASTRO  
ALMIRO**

## **APLICAÇÃO DE RCD NA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



Em memória do meu avô, Lúcio Vieira Lemos.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutora Rosa Paula da Conceição Luzia**  
professora adjunta da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

**Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta**  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Ao concluir este trabalho gostaria de expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para que o mesmo fosse possível.

Ao Prof. Doutor Agostinho Benta pela disponibilidade, profissionalismo e confiança demonstrada;

À Ambilei - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S. A. (Unidade de Leiria) em especial à Engenheira Raquel Pinto e ao Engenheiro Fernando Matos Romão pela disponibilidade e pelo fornecimento das várias amostras necessárias para a realização deste trabalho;

Agradeço também à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, pelo empréstimo dos peneiros de barras para a realização do ensaio do índice de achatamento;

Ao Engenheiro Luís Barbosa, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pela disponibilidade, apoio e acompanhamento;

À Engenheira Maria Carlos e aos Técnicos do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil, em particular ao Vítor Rodrigues e ao Engenheiro João Festas pelo acompanhamento na execução dos ensaios e também pelo esclarecimento de dúvidas;

Gostaria também de agradecer a todos os meus amigos, o apoio e paciência que demonstraram para comigo;

Por fim, gostaria também de agradecer à minha família todo o apoio dado, em especial à minha avó, Alzira Ferreira de Sousa Lemos.



**palavras-chave**

Resíduos de Construção e Demolição, pavimentos rodoviários, caracterização laboratorial, construção de estradas, reciclagem, ensaios.

**resumo**

Esta tese de mestrado visa contribuir para o estudo da aplicabilidade de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na construção de estradas de modo a que a reciclagem deste tipo de materiais se torne numa prática corrente.

O uso deste tipo de materiais possibilita uma diminuição da extração de agregados naturais o que por sua vez contribui também, para que haja uma diminuição no consumo de energia. Além de se diminuir a extração de agregados naturais, o uso de agregados reciclados possibilita também a diminuição da quantidade de material a transportar para aterros.

O principal objetivo deste trabalho é caracterizar, através de ensaios laboratoriais, os Resíduos de Construção e Demolição e proceder a uma análise, baseada em valores limite do Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal, da sua aplicabilidade na construção de estradas, tanto nas camadas ligadas como nas camadas não ligadas. O estudo baseia-se na caracterização laboratorial de 8 amostras de RCD obtidas da mesma unidade de tratamento em diferentes tempos, durante o período de elaboração da pesquisa com o intuito de, tanto quanto possível, avaliar a variabilidade dos materiais produzidos na unidade e aferir da consistência das propriedades avaliadas.

As amostras 3, 6 e 8, podem ser usadas em camadas de base e de sub-base, a amostra 7 pode ser usada para a mistura AC 32 base, a amostra 2 pode ser usada para a mistura AC 16 bin e a amostra 5 pode ser utilizada em terraplenagens. Relativamente às amostras 1 e 4, poderão eventualmente ser aplicadas em camadas de aterro, faltando confirmar-se algumas propriedades importantes para esta aplicação.



**keywords**

Construction and Demolition Waste, road pavement, laboratorial characterization, road construction, recycling, assays.

**abstract**

This dissertation aims to contribute to the study of the applicability of Construction and Demolition Waste (CDW) in road construction so that the recycling of such materials becomes a common practice.

The use of such materials allows a reduction of the extraction of natural aggregates which in turn, also contributes to a decrease of energy consumption. In addition to decreasing the extraction of natural aggregate, the use of recycled aggregates also makes it possible to decrease the amount of material to be transported into landfills.

The main objective of this work is to characterize through laboratory assays, the Construction and Demolition Waste and make an analysis of its applicability in the construction of roads, for both bound and unbound layers, based on threshold values of the Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal. The study is based on the laboratory characterization of several CDW samples, obtained from the same processing unit at different times during the development of the research, aiming, as much as possible, to the evaluation of the variability of the materials produced in the unit and access the consistency of the properties.

Samples 3, 6 and 8, may be used in base and sub-base layers, sample 7 can be used for the AC 32 bin mixture, sample 2 can be used for the AC 16 bin mixture and sample 5 can be used in earthworks. As to samples 1 and 4, their application may be possible in fill layers, pending on the confirmation of some important properties for this application.



## Índice Geral:

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento .....	1
1.2.	Objetivos e metodologia .....	1
1.3.	Estrutura do trabalho .....	2
2.	Enquadramento geral de resíduos .....	5
2.1.	Enquadramento geral .....	5
2.2.	Tipologia e produção de RCD em Portugal .....	7
2.3.	Enquadramento legal e normativo de resíduos .....	10
2.3.1.	Enquadramento legal .....	10
2.3.2.	Enquadramento normativo .....	11
3.	Resíduos de Construção e Demolição .....	13
3.1.	Centrais de reciclagem e processamento de resíduos (RCD) .....	13
3.2.	Especificações de aplicação de resíduos em estradas .....	14
3.3.	Exemplos de aplicação de RCD .....	15
3.3.1.	Breve cronologia da evolução das estradas .....	15
3.3.2.	Principais tipos de pavimentos rodoviários .....	16
3.3.3.	Aplicação de RCD em camadas de pavimentos .....	18
4.	Caracterização de RCD .....	25
4.1.	Descrição visual das amostras .....	25
4.2.	Caracterização laboratorial .....	30
4.2.1.	Ensaio das propriedades geométricas dos agregados grossos reciclados .....	30
4.2.2.	Análise granulométrica .....	33
4.2.3.	Determinação da forma das partículas .....	38
4.2.4.	Determinação do teor de finos .....	41
4.2.5.	Ensaio <i>Proctor</i> e CBR .....	47
4.2.6.	Massa volúmica e Absorção de água .....	52
4.2.7.	Teor de betume .....	55
4.3.	Características mecânicas dos agregados reciclados .....	57
4.3.1.	Resistência à fragmentação .....	57
4.3.2.	Resistência ao desgaste por atrito .....	60
5.	Discussão dos resultados .....	63
5.1.	Evolução temporal das amostras .....	63
5.2.	Aplicação de RCD em infraestruturas rodoviárias .....	64
5.2.1.	Em camadas de aterro .....	64
5.2.2.	Em camadas não ligadas .....	65
5.2.3.	Em camadas ligadas .....	68
6.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....	71
	Bibliografia .....	75



## Índice de Figuras:

Figura 1.	Armazenamento das garrafas PET (Jesus, 2011).	5
Figura 2.	Fotos da central de reciclagem Ambilei	14
Figura 3.	Amostra 1	25
Figura 4.	Amostra 2	26
Figura 5.	Amostra 3	26
Figura 6.	Amostra 4	27
Figura 7.	Amostra 5	27
Figura 8.	Amostra 6	28
Figura 9.	Amostra 7	28
Figura 10.	Amostra 8	29
Figura 11.	Esquema do agrupamento das amostras conforme a sua origem e granulometria	29
Figura 12.	Foto do ensaio de classificação dos agregados reciclados grossos	32
Figura 13.	Ensaio de granulometria	34
Figura 14.	Peneiros ASTM	35
Figura 15.	Curvas granulométricas das amostras de origem não betuminosa de granulometria mais fina	36
Figura 16.	Curvas granulométricas das amostras de origem não betuminosa de granulometria mais grosseira	36
Figura 17.	Curvas granulométricas das amostras de origem betuminosa	37
Figura 18.	Peneiro de barras.	39
Figura 19.	Ensaio índice de achatamento.	40
Figura 20.	Ensaio do azul-de-metileno	43
Figura 21.	Ensaio do equivalente de areia	46
Figura 22.	Baridade seca vs Teor em água (Curva de compactação)	49
Figura 23.	Ensaio de compactação <i>Proctor</i> modificado	50
Figura 24.	Gráficos de penetração e compactação relativa (CBR)	51
Figura 25.	Ensaio do CBR	52
Figura 26.	Ensaio de massa volúmica e absorção de água.	54
Figura 27.	Coluna Extratora	56



## Índice de Tabelas:

Tabela 1.	Tipos de RCD e sua percentagem no espaço comunitário (Marques and Gonçalves, 2012) .....	8
Tabela 2.	Percentagem de RCD e a sua composição, em Portugal (Brito, 2006) .....	8
Tabela 3.	Códigos LER relativos a RCD (APA, 2011) .....	9
Tabela 4.	Resíduos setoriais por categoria de resíduos (INE, 2010) .....	10
Tabela 5.	Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al., 2005) .....	17
Tabela 6.	Propriedades e requisitos mínimos de conformidade dos materiais reciclados para aplicação em aterro e camada de leito (LNEC, 2009-a) .....	19
Tabela 7.	Classificação dos agregados reciclados grossos (LNEC, 2009-d) .....	21
Tabela 8.	Classificação dos agregados reciclados de acordo com a natureza dos constituintes da fração grosseira (EP, 2012) .....	22
Tabela 9.	Campos de aplicação dos agregados reciclados (EP, 2012) .....	22
Tabela 10.	Constituintes não flutuantes de agregados reciclados grossos (NP EN 933-11:2011) .....	31
Tabela 11.	Indicações sobre a massa necessária para 1000 partículas (NP EN 933-11:2011) .....	31
Tabela 12.	Ensaio das características geométricas dos agregados .....	32
Tabela 13.	Classificações dos agregados segundo a Norma EN 13285:2010 .....	38
Tabela 14.	Relação da fração granulométrica com os peneiros de barras (NP EN 933-3:2002) .....	39
Tabela 15.	Classificação de agregados para misturas betuminosas segundo o índice de achatamento (InIR, 2009) .....	40
Tabela 16.	Resultados do índice de achatamento para as 8 amostras .....	40
Tabela 17.	Classificação dos solos (Branco et al., 2005) .....	41
Tabela 18.	Resultados do azul de metileno para as amostras ensaiadas (Fração 0/2 mm) .....	44
Tabela 19.	Classificação dos solos (Luzia, 2008) .....	44
Tabela 20.	Resultados do equivalente de areia para as amostras ensaiadas .....	47
Tabela 21.	Quadro resumo dos diferentes ensaios <i>Proctor</i> (Santos, 2008) .....	48
Tabela 22.	Massa volúmica e absorção de água das amostras ensaiadas .....	55
Tabela 23.	Resultados do Teor de Betume para as amostras betuminosas .....	56
Tabela 24.	Categoria para os valores máximos do coeficiente de <i>Los Angeles</i> (NP EN 13043:2004) .....	58
Tabela 25.	Valores do coeficiente <i>Los Angeles</i> em vários trabalhos (Conceição, 2012) .....	59
Tabela 26.	Média dos constituintes dos diferentes grupos de RCD .....	60
Tabela 27.	Categorias para os valores máximos da resistência ao desgaste por atrito (NP EN 13043:2004) .....	61
Tabela 28.	Valores do coeficiente <i>micro-Deval</i> em vários trabalhos (Conceição, 2012) ..	62
Tabela 29.	Características mínimas dos solos a aplicar em Leitos de Pavimento (EP, 2012)	65
Tabela 30.	Camadas não ligadas – Requisito/Propriedades dos agregados reciclados (EP, 2012) .....	66
Tabela 31.	Classificações dos agregados segundo os requisitos/propriedades dos agregados reciclados do CEEP .....	67
Tabela 32.	Valores exigidos pelo InIR e valores obtidos nas amostras 2 e 7 .....	69
Tabela 33.	Requisitos do fuso granulométrico para a camada AC 32 base e para a camada AC 16 bin .....	70
Tabela 34.	Aplicabilidade de cada amostra nas diferentes camadas de uma estrada .....	73



## **Índice de Acrónimos:**

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CEEP - Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal, SA

EN - *European Norm*

EP - Estradas de Portugal

FWD - *Falling Weight Deflectometer*

INE - Instituto Nacional de Estatística

InIR - Instituto Nacional de Infraestruturas Rodoviárias

LCT - Conceito de Ciclo de Vida

LER - Lista Europeia de Resíduos

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MACOPAV - Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

NP - Norma Portuguesa

PET - Politereftalato de etileno

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

UE - União Europeia



## Lista de símbolos:

CBR - *California Bearing Ratio*

LA - *Los Angeles*

MB - Azul de metileno

$M_{DE}$  - *micro-Deval*

SE - Equivalente de Areia

WA24 - Absorção de água

$\rho_a$  - Massa volúmica do material impermeável das partículas

$\rho_{rd}$  - Massa volúmica das partículas secas em estufa

$\rho_{ssd}$  - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. Enquadramento**

Devido às recentes preocupações e exigências ambientais, o uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em obras de construção civil tem sido cada vez mais estudado como alternativa aos agregados convencionais, o que se torna vantajoso uma vez que se reutiliza materiais que se tornariam entulho e, ao mesmo tempo economiza-se também no uso de agregados naturais e no consumo de energia.

Grandes quantidades de RCD são produzidas aquando da construção, renovação e demolição de edifícios em fim de vida. A má gestão destes RCD resulta muitas vezes em grandes impactos ambientais, por isso, usar meios de gestão alternativos pode resultar em economia, tanto ambiental como de custos. (UE, 2011)

A hierarquia de resíduos, estabelecida no artigo 4 da Diretiva (2008/98/EC) do Parlamento Europeu, define a ordem de gestão jurídica vinculativa: prevenção, preparação para reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização e a eliminação, sendo esta última a opção menos desejável. Geralmente, aplicando a hierarquia de resíduos deverá levar a menos desperdício de RCD, ou seja, ao seu uso de uma forma mais eficiente. No entanto, como definido no artigo 4, da Diretiva (2008/98/EC) do Parlamento Europeu, o conceito de Ciclo de Vida (LCT), pode ser usado para criar fluxos específicos que se afastem da hierarquia, a fim de se certificar que a melhor opção ambiental é identificada. (DIRETIVAS, 2008)

Dentro das obras de Engenharia Civil, a construção de infraestruturas de transporte rodoviárias tem um grande potencial de uso de RCD, uma vez que são necessárias grandes quantidades de agregados. Por isso, tem sido cada vez mais estudada a aplicação de agregados reciclados em substituição de agregados naturais, o que oferece vantagens ambientais visto que se usam materiais considerados como resíduos e se reduz a necessidade de extração de agregados naturais, levando assim a uma poupança económica.

## **1.2. Objetivos e metodologia**

As estradas são constituídas por diferentes camadas, com materiais de características distintas, conforme a camada em questão. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo das

características de RCD em amostras recolhidas, de modo a determinar se estas poderão ou não vir a ser aplicadas na construção de estradas.

Como metodologia para a realização do presente trabalho, optou-se por dividir o mesmo em quatro tarefas. Numa primeira etapa foram realizadas pesquisas sobre o estado da arte, legislação aplicável e revisão da literatura de modo a recolher informações o mais atualizadas possível em relação ao tema proposto.

Nesta fase foram usadas as informações recolhidas das pesquisas bibliográficas, consulta de outros trabalhos relacionados com o tema, estudos, artigos científicos e fontes da internet para assim fazer o enquadramento do tema.

A segunda fase é definida pela pesquisa e contacto com empresas de recolha e separação de resíduos de construção e demolição de modo a recolher amostras variadas de materiais para a posterior análise e caracterização.

A terceira etapa é definida pela caracterização das diferentes amostras recolhidas na etapa anterior recorrendo a ensaios laboratoriais, alguns deles, específicos para resíduos de construção e demolição.

A quarta e última etapa, consiste no tratamento dos dados obtidos nos ensaios laboratoriais e avaliação dos RCD quanto à possível aplicação na construção de estradas.

### **1.3.Estrutura do trabalho**

No presente estudo, pretende-se, tal como foi referido nos objetivos, caracterizar amostras de RCD de maneira a determinar se estes materiais poderão ser aplicáveis na construção de estradas.

No primeiro capítulo é feito um pequeno enquadramento do tema bem como os objetivos do trabalho e sua metodologia.

No segundo capítulo é feito um enquadramento geral de resíduos. É também descrita a tipologia e produção de resíduos de construção e demolição em Portugal e um enquadramento normativo destes mesmos resíduos.

No terceiro capítulo apresenta-se uma central de reciclagem e processamento de resíduos (RCD), assim como as especificações de aplicação de resíduos em estradas existentes. São dados alguns exemplos de aplicação de RCD em estradas, tendo por base outros trabalhos e pesquisas feitas. São também descritos os vários tipos de pavimentos

rodoviários existentes e alguns exemplos de aplicação de RCD em camadas específicas de pavimento.

No capítulo 4 é feita uma descrição dos materiais e sua caracterização laboratorial.

No capítulo 5, é feita a discussão de resultados laboratoriais provenientes da caracterização laboratorial.

Por fim, no capítulo 6, é feita a conclusão do estudo sobre a aplicação dos materiais das amostras recolhidas em construção de estradas e, são depois dadas algumas sugestões para trabalhos futuros de pesquisa em relação a este mesmo tema.



## 2. ENQUADRAMENTO GERAL DE RESÍDUOS

### 2.1. Enquadramento geral

Hoje em dia fala-se muito em reciclagem, reaproveitamento e reutilização de materiais, objetos e/ou substâncias. O objetivo de tudo isto é basicamente reduzir os impactos ambientais negativos gerados pelos resíduos ao longo do seu ciclo de vida, desde que são produzidos, até à sua eliminação, passando pela reciclagem. Isto permite, não só, considerar cada resíduo como uma fonte de poluição a reduzir, mas também como um potencial recurso a explorar (UE, 2006) .

A palavra, resíduo ou desperdício e o ato de desperdiçar são palavras inventadas pelo homem. O resíduo não existe na natureza. Na natureza tudo tem um propósito, uma finalidade. O resíduo foi criado pelos humanos por conveniência e lucro a curto prazo. Desperdiçar resulta, a longo prazo, em graves consequências para humanos, natureza e também economia (Landes, 2011). Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de armazenamento de garrafas PET. "Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma." - Antoine Laurent de Lavoisier.



Figura 1. Armazenamento das garrafas PET (Jesus, 2011).

Uma vez que uma substância ou objeto se tornem resíduo, assim permanecem até que sejam totalmente recuperados e já não sejam considerados potenciais ameaças para o ambiente ou para a saúde humana. Daqui para a frente o resíduo deixa de ser considerado

resíduo e deixa de ser sujeito a controlo e outras medidas especiais que normalmente são requeridas.

Em suma, o resíduo é considerado resíduo até que seja totalmente recuperado. Isto é aplicável também aos resíduos usados como agregados e/ou materiais de construção usados em Engenharia Civil. A recuperação total pode ser obtida quando tais agregados e/ou materiais de construção são incorporados em construção de estradas ou edifícios.

Até à recuperação total, o transporte, tratamento, gestão e uso destes resíduos deve ser efetuado segundo a legislação e documentação normativa em vigor (AggRegain, 2010).

Existem portanto vários tipos de resíduos. Estes são divididos em diversos grupos, dependendo da sua proveniência.

De acordo com o D.L. n.º 178/2006, de 5 de Setembro, as principais tipologias de resíduos são:

**Resíduo urbano:** “o resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações”;

**Resíduo industrial:** “o resíduo gerado em processos produtivos industriais, bem como o que resulte das atividades de produção e distribuição de eletricidade, gás e água”;

**Resíduo hospitalar:** “o resíduo resultante de atividades médicas desenvolvidas em unidades de prestação de cuidados de saúde, em atividades de prevenção, diagnóstico, tratamento, reabilitação e investigação, relacionada com seres humanos ou animais, em farmácias, em atividades médico-legais, de ensino e em quaisquer outras que envolvam procedimentos evasivos, tais como acupuntura, *piercings* e tatuagens”;

**Resíduo agrícola:** “o resíduo proveniente de exploração agrícola e/ou pecuária ou similar.”

Podem ainda distinguir-se quanto às características físicas e químicas:

**Resíduos Perigosos** - “o resíduo que apresente, pelo menos, uma característica de perigosidade para a saúde ou para o ambiente, nomeadamente os identificados como tal, na Lista Europeia de Resíduos.”

**Resíduos Inertes** - “o resíduo que não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não pode ser solúvel nem inflamável, nem ter qualquer outro tipo de reação física ou química, e não pode ser biodegradável, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entre em contacto de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana e, cuja lixiviabilidade total, conteúdo poluente e

ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e/ou subterrâneas.”

**Resíduos de construção e demolição** - “o resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações.”

**Resíduos agrícolas** - “o resíduo proveniente de exploração agrícola e ou pecuária ou similar.”

**Resíduos Biodegradáveis** - De acordo com o Decreto-Lei n.º 152/2002 de 23 de Maio são considerados biodegradáveis “os resíduos que podem ser sujeitos a decomposição anaeróbia ou aeróbia, como por exemplo, os resíduos alimentares e de jardim, o papel e o cartão.”

**Resíduos líquidos** - De acordo com o Decreto-Lei n.º 152/2002 de 23 de Maio, são considerados resíduos líquidos “os resíduos em forma líquida, incluindo os resíduos aquosos constantes da lista de resíduos da União Europeia, mas excluindo as lamas” (Nordeste, 2011).

## 2.2. Tipologia e produção de RCD em Portugal

Um RCD, segundo o Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho é “todo o resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações.”

Então, pode dizer-se que RCD são quaisquer resíduos que provenham das obras acima descritas, onde se incluem também os fluxos específicos neles contidos, excluindo resíduos urbanos ou a mistura de resíduos de obra com outros resíduos de diferente origem (APA, 2011).

Todos estes tipos de resíduos, no fundo, podem ser divididos em 3 grupos principais, sendo eles; resíduos de construção; resíduos de remodelação, renovação e reabilitação e, resíduos de demolição.

Os resíduos de construção são sobretudo resultado de estimativas efetuadas por excesso, dos materiais necessários à construção, bem como de materiais danificados durante a própria construção.

Os resíduos de remodelação, renovação e reabilitação são resíduos de variada composição, uma vez que dependem da área a renovar/reabilitar e são mais semelhantes aos resíduos de demolição do que propriamente aos resíduos de construção.

Por último, os resíduos de demolição são os mais abundantes e mais variados a nível de composição, pois dependem da construção a ser demolida e também da seleção efetuada a nível das técnicas de demolição.

Na Tabela 1, apresentam-se as percentagens de cada tipo de RCD existentes na Comunidade Europeia.

Tabela 1. Tipos de RCD e sua percentagem no espaço comunitário (Marques and Gonçalves, 2012)

Tipo	Percentagem (%)
Resíduos de Construção	10 a 20
Resíduos de Remodelação, Reabilitação e Renovação	30 a 40
Resíduos de Demolição	40 a 50

Os RCD são constituídos por vários tipos de materiais. Estes materiais, de grosso modo podem dividir-se em 3 grupos; orgânicos, inertes e materiais compósitos.

São considerados materiais orgânicos o papel, o cartão, a madeira e os plásticos. Como materiais inertes são considerados, terra, asfalto, pedra, vidro, telhas, tijolos, azulejos, betão, porcelanas e metais ferrosos e não ferrosos. Os tapetes, madeira prensada e envernizada, material elétrico e revestimentos de paredes de gesso são considerados materiais compósitos (Ferreira, 2009).

Na Tabela 2 apresenta-se a percentagem de RCD (em % de peso total) e a sua composição.

Tabela 2. Percentagem de RCD e a sua composição, em Portugal (Brito, 2006)

Materiais	% do peso total
Betão, alvenaria e argamassa	50
Madeira	5
Papel, cartão e outros combustíveis	1-2
Plásticos	1-2
Metais (aço incluído)	5
Solos de escavação, brita de restauração de pavimentos	20-25
Asfalto	5-10
Lamas de dragagem e perfuração	5-10

Até Março de 2008, data em que entrou em vigor a legislação relativa aos RCD, não havia grande controlo quanto à deposição e/ou armazenagem dos mesmos. A deposição desordenada dos RCD era, e ainda é, um problema para o meio ambiente. Com a entrada em vigor desta legislação, começou a haver um maior controlo na deposição dos RCD. Deste modo, segundo a legislação, os RCD devem ser recolhidos por empresas devidamente licenciadas e autorizadas e, devem fazer-se acompanhar de guias próprias para o efeito. Estas empresas ficam então responsáveis pelo tratamento, separação e disposição dos mesmos, sendo que alguns destes RCD serão reciclados e novamente usados em certas obras, enquanto que outros, que não têm utilidade, seguirão outras vias, nomeadamente a deposição em aterros próprios.

As guias atrás referidas devem descrever os resíduos tendo em conta os códigos LER (Lista Europeia de Resíduos) apropriados. Os códigos correspondentes aos resíduos de construção e demolição estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Códigos LER relativos a RCD (APA, 2011)

Código	Descrição
17 01	Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos
17 02	Madeira, vidro e plástico
17 03	Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão
17 04	Metais (incluindo ligas)
17 05	Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem
17 06	Materiais de isolamento e materiais de construção, contendo amianto
17 08	Materiais de construção à base de gesso
17 09	Outros resíduos de construção e demolição

No entanto, quando se fala em reciclagem de RCD, a parte mais importante a referir é a dos inertes, pois é esta que representa a maior percentagem de RCD. Tendo isto em conta, a reciclagem consiste então, numa triagem, trituração e crivagem de modo a produzir agregados que se possam aplicar na construção civil.

De qualquer modo, os outros materiais presentes em menores quantidades, como o plástico, madeira, metais e vidro também são sujeitos a tratamento adequado. Tal como os inertes, também estes materiais têm de obedecer a critérios de qualidade para poderem ser aceites no mercado (Ruivo and Veiga, 2004).

Na Tabela 4 apresenta-se ainda um estudo estatístico efetuado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) que mostra as quantidades de resíduos setoriais por categoria de resíduos.

Tabela 4. Resíduos setoriais por categoria de resíduos (INE, 2010)

Resíduos setoriais por categoria de resíduos			
Unidades: toneladas (t)			
Ano	2008	2009	2010
Resíduos minerais de construção e demolição (não perigosos)	2,967,039	2,600,205	9,965,065
Resíduos minerais de construção e demolição (perigosos)	27,772	22,711	26,506
Solos (não perigosos)	430,045	323,107	488,404
Solos (perigosos)	359,354	42,205	20,148
Resíduos setoriais por categoria de resíduo segundo as principais operações de gestão			
Ano	2008	2009	2010
Resíduos minerais de construção e demolição (não perigosos)	1,125,155	1,608,654	2,882,575
Resíduos minerais de construção e demolição (perigosos)	1,525	730	1,244
Solos (não perigosos)	71,025	172,206	386,559
Solos (perigosos)	388	3,498	6,573

Perspetivas diferentes acerca dos RCD implicam gestões de resíduos, também elas diferentes. Por exemplo, no Japão os RCD não são considerados como resíduos, mas antes como um subproduto da construção e por isso mesmo, foram feitos esforços consideráveis para que estes materiais fossem reciclados e reutilizados. Cada estudo tende a definir os RCD baseando-se nas características da sua pesquisa. Apenas definindo os RCD especificamente, pode o estudo ser significativo para diferentes práticas. (Hongping and Weisheng, 2011)

## 2.3. Enquadramento legal e normativo de resíduos

### 2.3.1. Enquadramento legal

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), a legislação e especificações em vigor relativa aos RCD é a seguinte:

- Decreto-Lei n.º 46/2008, de 11.03.2008 - estabelece o regime das operações de gestão de RCD alterado por Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, que também altera o regime geral de gestão de resíduos.
- Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho - procede à terceira alteração ao Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro e altera outros diplomas, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março.

- Portaria n.º 417/2008, de 11.06.2008 - define as guias específicas de acompanhamento do transporte de RCD.
- Despacho n.º 4015/2007, de 02.03.2007 - estabelece a utilização de borrachas, provenientes da reciclagem de pneus em fim de vida, em pavimentos. (APA, 2011)

### 2.3.2. Enquadramento normativo

Segundo o Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal (CEEP) (EP, 2012) a documentação normativa e especificações em vigor relativa aos RCD é a seguinte:

- *EN 933-11 Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*, no entanto já existe uma versão portuguesa desta norma, a NP EN 933-11:2011 (Ed. 1) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 11: Ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados) (NP EN 933-11:2011)
- *EN 12457-4 Characterization of waste. Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with high solid content and with particle size below 10mm (without or with size reduction);*
- *EN 13242 + A1 Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*, da qual também já existe uma versão portuguesa, a NP EN 13242:2002+A1:2010 (Ed.2) - Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. (NP EN 13242:2010)
- NP EN 933-1 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração.
- NP EN 933-5 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 5: Determinação da percentagem de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos;
- NP EN 933-9 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 9: Determinação do teor de finos – Ensaio do azul-de-metileno;

- NP EN 1097-1 Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (*micro-Deval*);
- NP EN1097-2 Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação
- NP EN 1744-1 Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas químicas dos agregados. Parte 1: Análise química.
- NP EN 13285 Misturas não ligadas. Especificações;
- LNEC E 471 – Guia para a utilização de agregados reciclados em betões de ligantes hidráulicos;
- LNEC E 472 - Guia para a reciclagem de misturas betuminosas em central;
- LNEC E 473 - Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos;
- LNEC E 474 - Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e em camada de leito de infraestruturas de transporte.

### **3. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

#### **3.1. Centrais de reciclagem e processamento de resíduos (RCD)**

Das várias centrais de reciclagem presentes em Portugal, vai-se neste ponto descrever a central de reciclagem da Ambilei, pois foi a empresa que mais colaborou na realização deste trabalho. A Ambilei é uma empresa com sede em Leiria mas que possui também uma unidade em Castelo Branco. É uma empresa especializada na gestão de RCD que conta com uma unidade de triagem e valorização de resíduos.

Dos vários serviços disponibilizados por este tipo de empresas os que mais importa referir são os seguintes:

- Triagem e Valorização de RCD;
- Britagem em obra;
- Execução de Planos de Gestão de RCD;
- Fornecimento de Agregados Reciclados.

Os RCD são sujeitos a uma triagem visual antes de darem entrada no recinto da empresa, de modo a verificar previamente se existem ou não resíduos perigosos. De acordo com a tipologia dos resíduos, os mesmos poderão ser sujeitos a diferentes operações de tratamento, entre elas:

- Reciclagem (Britagem e Crivagem);
- Triagem (separação de resíduos);
- Fragmentação (redução de dimensões e remoção de armadura de metal);
- Crivagem;
- Armazenamento temporário.

Certos resíduos, como por exemplo, betão, tijolos, telhas e ladrilhos entre outros, desde que não misturados com outros resíduos não inertes, são apenas sujeitos a britagem e crivagem. Quando estes mesmos resíduos se apresentam misturados com outros resíduos não inertes, têm de ser também sujeitos a um processo de triagem. Quando os resíduos apresentam dimensões superiores a 50 cm ou armadura de metal têm de ser sujeitos a fragmentação. Resíduos misturados com solos, areias ou argilas em quantidades superiores a 5% são sujeitos

a crivagem. Resíduos não inertes e resultantes da triagem são armazenados temporariamente e, posteriormente encaminhados para destino especializado. (Ambilei, 2011)

Na Figura 2 apresentam-se algumas imagens da central de reciclagem Ambilei.



Figura 2. Fotos da central de reciclagem Ambilei: a) RCD betuminoso; b) RCD armazenado; c) Crivo; d) RCD crivado; e) Separadora magnética; f) Pormenor dos tapetes da separadora magnética

### 3.2. Especificações de aplicação de resíduos em estradas

Para que os RCD possam ser usados na construção de estradas, após a sua reciclagem e tratamento, têm de ser avaliadas certas propriedades. Estas propriedades variam consoante a aplicação que se pretende dar aos RCD. No entanto, em geral, deverão considerar-se as seguintes:

- Granulometria
- Forma das partículas
- Dureza
- Durabilidade
- Plasticidade dos finos
- Limpeza do material
- Resistência mecânica ao choque

Cada uma destas propriedades pode ser estudada recorrendo a um ou mais ensaios. A granulometria, pode ser estudada recorrendo a ensaios de peneiração e/ou ensaios de sedimentação. A forma das partículas pode ser estudada recorrendo a ensaios de lamelação e/ou alongamento. A plasticidade dos finos é obtida com base no ensaio de limites de consistência. Para a resistência mecânica ao choque, recorre-se ao ensaio de desgaste de *Los Angeles* para assim avaliar a resistência mecânica das partículas. A durabilidade tem como objetivo a verificação da inalteração das partículas e pode ser efetuada através do ensaio de sulfato de sódio e/ou pelo ensaio de sulfato de magnésio. A dureza, em certo ponto é semelhante à resistência mecânica ao choque, isto é, visa avaliar a resistência das partículas. Esta resistência pode ser avaliada pelo ensaio de esmagamento e/ou pelo ensaio de *micro-Deval*. Por fim, a limpeza do material, não é mais que uma avaliação do material a nível de possíveis contaminações por finos nocivos. Pode ser avaliada pelo ensaio de azul-de-metileno e/ou pelo ensaio do equivalente de areia (Ferreira, 2009).

### **3.3.Exemplos de aplicação de RCD**

#### **3.3.1. Breve cronologia da evolução das estradas**

A mais antiga estrada pavimentada, do mundo, foi colocada no Egito algures entre 2600 e 2200 aC. (Wilford, 1994).

Ruas de pedra, pavimentadas em Ur, no atual Iraque e estradas de madeira preservadas num pântano em Glastonbury, Inglaterra datam de 4000 aC.

Com o aparecimento do Império Romano, houve a necessidade de os exércitos viajarem rapidamente de uma área para outra, e as estradas que existiam eram muitas vezes barrentas, o que atrasou bastante o movimento de grandes massas de tropas. Para resolver esse problema, os romanos construíram grandes estradas.

Estas “estradas romanas” tinham leito de pavimento em brita, como camada subjacente para garantir que se mantinham secas, pois a água escoava para fora através da pedra esmagada, em vez de se tornar lama em solos argilosos. (Forbes, 1993)

Os construtores de estradas de final de 1800 dependiam apenas do cascalho, pedra e areia para construção. A água poderia ser utilizada como um ligante para dar alguma uniformidade à superfície da estrada.

John Metcalfe, um escocês nascido em 1717, construiu cerca de 180 quilómetros de estradas em Yorkshire, Inglaterra (mesmo sendo cego). As suas estradas bem drenadas foram

construídas com três camadas: pedras grandes; materiais escavados de empréstimo e uma camada de cascalho (Bellis, 2008).

Entre 1725 e 1737 o general George Wade construiu 250 milhas (400 km) de estrada e 40 pontes para melhorar o controlo da Grã-Bretanha sobre as Terras Altas da Escócia, usando os desenhos das estradas romanas, com grandes pedras no fundo e cascalho em cima, com uma profundidade total típica de dois metros. (Lay, 1992)

Estradas modernas asfaltadas foram o resultado do trabalho de dois engenheiros escoceses, Thomas Telford e John Loudon McAdam. Telford projetou o sistema de levantamento da fundação no centro da estrada de modo a atuar como um dreno para água. Thomas Telford (nascido em 1757) melhorou o método de construção de estradas com pedras partidas através da análise da espessura da pedra, o tráfego rodoviário, o alinhamento da estrada e declives das encostas. Eventualmente, o seu projeto tornou-se norma para todas as estradas em toda parte. John Loudon McAdam (nascido em 1756) desenhou vias usando pedras partidas colocadas em padrões simétricos, comprimidos e cobertos com pedras pequenas para criar uma superfície dura. O *design* de McAdam, chamado "estradas de macadame," revelou ser um dos maiores avanços na construção de estradas. (Bellis, 2008)

### 3.3.2. Principais tipos de pavimentos rodoviários

“A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período (a vida do pavimento), sob a acção das acções do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram.

Assim, a um pavimento devem exigir-se dois tipos de qualidades: a qualidade funcional e a qualidade estrutural. A primeira relacionada com as exigências dos utentes - conforto e segurança de circulação - e a segunda relacionada com a capacidade do pavimento para suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além de determinados valores limites.

Nas camadas de um pavimento podem distinguir-se, pelas funções que desempenham, a camada superficial (“camada de desgaste”), e o corpo do pavimento.

A camada de desgaste tem a função de assegurar as características funcionais atrás referidas, de modo a contribuir para uma circulação com conforto e com segurança.

O corpo do pavimento, o principal responsável pela capacidade do pavimento em suportar as cargas do tráfego, pode compreender camadas estabilizadas com ligantes (betuminosos ou hidráulicos) e também camadas granulares.

Da associação de camadas constituídas por diferentes materiais resultam diferentes tipos de pavimentos, a que correspondem comportamentos diferentes quando solicitados pelas cargas dos veículos em combinação com determinadas condições climáticas.

De acordo com os dois critérios de classificação dos pavimentos rodoviários (Tabela 5), o tipo de materiais e a deformabilidade, podem distinguir-se os seguintes tipos de pavimentos: flexíveis, rígidos e semi-rígidos.” (Branco et al., 2005)

Tabela 5. Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al., 2005)

Tipo de Pavimento	Materiais (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	E levada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito Reduzida
Semirrígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

“Os pavimentos flexíveis apresentam as camadas superiores formadas por misturas betuminosas ou seja por materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, geralmente o betume asfáltico, seguidas inferiormente de uma ou duas camadas constituídas por material granular.

Os pavimentos rígidos têm uma camada superior constituída por betão de cimento, ou seja por material granular estabilizado com ligantes hidráulicos, geralmente o cimento *portland*, seguida de uma ou duas camadas inferiores constituídas também por material granular estabilizado com ligante hidráulico e/ou apenas constituídas por material granular.

Os pavimentos semi-rígidos, quanto à sua constituição, apresentam características comuns aos dois tipos de pavimentos anteriores: com uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada constituída por agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo ainda dispor de uma camada granular na sub-base.

Nos pavimentos semi-rígidos podem distinguir-se estruturas “directas” e estruturas “inversas”. Nas primeiras, as camadas betuminosas apoiam-se directamente sobre a base estabilizada com ligante hidráulico. Nas estruturas “inversas” existe a interposição de uma camada granular, não ligada, com a espessura de cerca de 12 cm, entre as camadas

betuminosas e a camada de betão pobre, o que constitui uma forma para contrariar a propagação das fendas da base às camadas betuminosas.” (Branco et al., 2005)

### 3.3.3. Aplicação de RCD em camadas de pavimentos

#### 3.3.3.1. Camadas de aterro e leito de pavimento

No que se refere à aplicação de RCD em camadas de aterro e leito de pavimento, existe já uma especificação do LNEC, a Especificação LNEC E 474-2009. Esta especificação fornece recomendações e estabelece requisitos mínimos para a utilização de materiais reciclados, provenientes de RCD, em aterro e camada de leito de pavimento de infraestruturas de transporte. Entre outras coisas, esta especificação diz que os RCD não devem ser utilizados em locais onde possa ocorrer contacto direto com águas subterrâneas, locais inundados com frequência e também na realização de sistemas drenantes.

Os RCD muitas vezes contêm poluentes na sua composição e como tal poderão levar à corrosão de certo tipo de materiais, como por exemplo, tubagens de alumínio. Daí não ser aconselhável a sua aplicação junto deste tipo de materiais.

A Especificação LNEC E 474-2009 estabelece ainda as propriedades e requisitos mínimos dos materiais reciclados para aplicação em aterro e leito de pavimento, que são apresentados na Tabela 6 (LNEC, 2009-a)).

Tabela 6. Propriedades e requisitos mínimos de conformidade dos materiais reciclados para aplicação em aterro e camada de leito (LNEC, 2009-a))

Requisitos de Conformidade			Categoria		
Parâmetros	Propriedade	Norma de Ensaio	MAT1	MAT2	
			B, MB e C	C	MB
Geométricos e de Natureza	Dimensão máxima das partículas (D <sub>max</sub> )	-	D <sub>max</sub> ≤ 150 mm	D <sub>max</sub> ≤ 80 mm	
	Conteúdo máximo em finos (passado no peneiro 80 µm)	LNEC E 196	10%	10%	
	Qualidade dos finos*	EN 933-9	MB <sub>0/D</sub> < 2	MB <sub>0/D</sub> < 1	
Comportamento Mecânico	Resistência à desfragmentação Resistência ao Desgaste	EN 1097-2+A1 EN 1097-1+A2	-	LA ≤ 45 MDE ≤ 45	-
Químicos	Teor de sulfatos solúveis em água**	EN 1744-1	0.7%	0.7%	
	Libertação de substâncias perigosas***	EN 12457-4	Classificação como resíduos para deposição em aterro para resíduos inertes		

\*MB<sub>0/D</sub> é o valor de azul de metileno (MB) expresso em g/kg segundo a norma de ensaio EN 933-9, multiplicado pela percentagem da fracção passada no peneiro 2 mm.

\*\* Para teores de sulfatos superiores a 0,2%, estes materiais deverão ser colocados a uma distância não inferior a 0,50m 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.

Como se pode ver na Tabela 6, os materiais encontram-se separados em duas categorias, MAT1 e MAT2. Segundo a especificação, os materiais pertencentes à categoria MAT1 são aplicáveis em aterro, enquanto que os materiais pertencentes à categoria MAT2 podem ser aplicados tanto em aterros como em leito de pavimento, com exceção dos da classe MB. No entanto, a aplicação destes materiais na camada de leito, poderá exigir uma correção da sua granulometria de modo a evitar problemas de segregação e dificuldades na regularização da camada.

No estudo realizado por Vegas e Ibañez em 2007, foram usados vários tipos de resíduos, entre eles, RCD. Estes foram sujeitos a vários ensaios, entre eles, granulometria, caracterização mineralógica, ensaio de Desgaste de *Los Angeles*, plasticidade, equivalente de areia, CBR (*California Bearing Ratio*) e coeficiente de forma tendo-se chegado à conclusão que os RCD estudados, são materiais aptos para serem usados como material granular em leitos de pavimento visto que se comparam a qualquer tipo de solo (Vegas et al., 2007).

### 3.3.3.2. Pavimentos

#### **Camadas granulares (bases e sub-bases)**

A Especificação LNEC E 473-2009 fornece recomendações e estabelece requisitos para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas, de base e de sub-base de pavimentos rodoviários. A sua classificação quanto à proporção de cada um dos constituintes dos agregados grossos é realizada de acordo com o estabelecido na norma EN 933-11:2009.

Para efeitos de utilização em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários, os materiais reciclados podem ser classificados em três categorias – AGER1; AGER2 e AGER3 – e em duas classes – B ou C, sendo que a classe é definida em função da composição da fração grossa (LNEC, 2009-b)).

Segundo o trabalho realizado por João Ferreira (2009), os RCD constituem cada vez mais uma alternativa viável aos materiais naturais a aplicar em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários.

Considerando que a produção de RCD está sobretudo centralizada no sector da construção civil, referindo-se obras de construção, demolição, bem como operações de manutenção, restauro, remodelação e reabilitação de construções existentes, estes constituem uma fonte contínua de “matéria-prima” que deverá ser caracterizada, avaliada e reutilizada (Ferreira, 2009).

Segundo um estudo realizado no Brasil por Wilson Silva et al. (2010), a reciclagem de RCD e sua utilização em obras de pavimentação são tecnicamente viáveis. Sendo utilizados, para estabilizar solos, componentes das camadas do pavimento ou aplicados diretamente nessas camadas.

A utilização de RCD resolve, em parte, o problema de disposição ilegal desses resíduos, reduzindo a poluição e conseqüente diminuição dos impactos ambientais como cheias e assoreamento de rios. É necessário que haja um esforço coletivo na área de pavimentação urbana para aumentar o conhecimento do comportamento dos agregados reciclados de RCD para melhor permitir a sua utilização de forma tecnicamente correta e explorar as suas potencialidades, visto que este material apresenta ótimas condições de utilização (Silva et al., 2010).

## Camadas ligadas

### Hidráulicas (cimento)

Para camadas hidraulicamente ligadas pode considerar-se a aplicação da Especificação LNEC E 471-2009, que se refere à utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. Esta Especificação não é exclusiva para aplicação em pavimentos, mas também os engloba e classifica os agregados em 3 classes diferentes segundo a EN 12620:2002/A1:2008 - *Aggregates for concrete* (existe já, esta mesma norma em versão portuguesa: NP EN 12620:2002+A1:2010 (Ed.2) - Agregados para betão); ARB1, ARB2 e ARC, dependendo da sua constituição como indica a Tabela 7.

Então, tendo em conta alguns pontos desta norma, tem de ter-se em conta que este tipo de agregados não pode ser usado em betões que estejam em contacto com água para consumo humano (LNEC, 2009-d)).

Tabela 7. Classificação dos agregados reciclados grossos (LNEC, 2009-d))

Classe	Proporção dos constituintes (EN 12620:2002/A1:2008)					
	R <sub>c</sub> (%)	R <sub>c</sub> + R <sub>u</sub> (%)	R <sub>b</sub> (%)	R <sub>a</sub> (%)	X + R <sub>g</sub> (%)	FL (%)
ARB 1	≤ 90		≥ 10	≥ 5	≥ 0,5	≥ 2
ARB 2	≤ 70		≥ 30	≥ 5	≥ 1	≥ 2
ARC	≤ 90			≥ 10	≥ 2	≥ 2

CONSTITUINTES (EN 933-11):

R<sub>c</sub> - betão, produtos de betão e argamassas;

R<sub>u</sub> - agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos;

R<sub>a</sub> - materiais betuminosos;

R<sub>b</sub> - elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante;

R<sub>g</sub> - vidro;

FL - material flutuante em volume;

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

No entanto, existe também no CEEP uma outra tabela, também para classificação de agregados grossos reciclados, que usa como referência para a classificação, a norma europeia EN 13242:2002+A1:2007 (Ed.1) - *Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*, da qual também já existe uma versão portuguesa (NP EN 13242:2002+A1:2010 (Ed.2) - Agregados para materiais não

ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária). Segundo esta tabela, os agregados reciclados são classificados em três categorias: AGER1, AGER2 e AGER3 e por uma classe: B ou C, em função da sua composição, para efeitos de utilização em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários. Esta classificação encontra-se representada na Tabela 8. (EP, 2012)

Tabela 8. Classificação dos agregados reciclados de acordo com a natureza dos constituintes da fração grosseira (EP, 2012)

Classe	Categoria dos constituintes (EN 13242 + A1)					
	$R_c + R_u + R_G$ (%)	$R_g$ (%)	$R_b$ (%)	$R_a$ (%)	FL (%)	X (%)
B	$\geq 90$	$\leq 5$	$\leq 10$	$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 1$
C	$\geq 50$	$\leq 5$	$\leq 10$	$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 1$

CONSTITUINTES (EN 933-11):

$R_c$  - betão, produtos de betão e argamassas;

$R_u$  - agregados não ligados, pedra natural e 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 - outro: materiais coesivos (p.ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos), madeira não flutuante e estuque.

Ainda no caderno de encargos, existe um outro quadro que, mediante o tipo de agregado reciclado, ou seja, AGER1, AGER2 ou AGER3, indica o campo de aplicação para esses agregados. Esse quadro encontra-se representado na Tabela 9.

Tabela 9. Campos de aplicação dos agregados reciclados (EP, 2012)

Campos de aplicação dos agregados reciclados					
Categoria	AGER1		AGER2		AGER3
Natureza dos constituintes	C	B	C	B	B
Aplicação em camada de sub-base TMDp	$\leq 50$	$\leq 150$	$\leq 150$	$\leq 300$	$\leq 300$
Aplicação em camada de base TMDp	NR	$\leq 150$	$\leq 150$	$\leq 150$	$\leq 300$

TMDp - Tráfego Médio Diário de Pesados por Via

NR - Não Recomendado

## Camadas Betuminosas

No que toca ao uso de RCD em misturas betuminosas, existe apenas a Especificação LNEC E 472-2009, que se refere à reciclagem de misturas betuminosas a quente em central, ou seja, não engloba o estudo da aplicação de RCD em geral, apenas engloba os RCD provenientes de misturas betuminosas. No entanto, esta especificação refere alguns cuidados a ter na aplicação destes materiais, isto é, caso haja presença de alcatrão, estes materiais não poderão ser aplicados uma vez que poderão contaminar solos e linhas de água (LNEC, 2009-c)).

Em Junho de 2011, foi feito um estudo na Irlanda sobre a aplicação de RCD em misturas betuminosas (Woodside et al., 2011). Os RCD recolhidos e tratados foram analisados e sujeitos a ensaios para determinar as suas propriedades, para assim poderem ser aplicados na construção de pavimentos betuminosos. Foram feitos ensaios de *Los Angeles* e *micro-Deval* que mostraram uma boa resistência à abrasão e rigidez, no entanto, um outro ensaio mostrou que o material possuía um valor muito grande de absorção de água.

Foram realizados provetes com diferentes percentagens de RCD e, ao serem testados, ficou evidente, no estudo em questão, que quanto maior a percentagem de RCD na mistura, maior a resistência do provete, inclusivamente depois de submersos em água durante 3 a 7 dias.

Segundo este estudo, o uso de RCD em misturas betuminosas pode ser usado como agregado secundário em construção de estradas (Woodside et al., 2011).

Na China é produzida anualmente uma grande quantidade de RCD. Em 2010 foi realizado nesse país um estudo sobre o uso de pó de agregados finos reciclados como substituto do *filler* em misturas betuminosas. Foram realizados vários ensaios de caracterização e, de acordo com estes, chegou-se à conclusão que a superfície das partículas do pó de agregados finos reciclados é mais áspera do que a do calcário em pó. Concluiu-se também que o uso do pó de agregados finos reciclados pode diminuir a sensibilidade à água, as propriedades a elevadas temperaturas e a fadiga da mistura betuminosa. Contudo, o uso do pó de agregado fino reciclado, pode diminuir a resistência da mistura betuminosa a temperaturas baixas, mas ainda assim, o desempenho a temperaturas baixas da mistura, está dentro dos requisitos pedidos pelas especificações para construção de pavimentos na China (Meizhu et al., 2011).



## 4. CARACTERIZAÇÃO DE RCD

### 4.1. Descrição visual das amostras

À medida que as amostras de RCD foram sendo recebidas, efetuou-se a caracterização visual das mesmas, de modo ter uma ideia do tipo de material existente nas várias amostras.

Na amostra 1, recebida a 16 de Fevereiro de 2012, observa-se a existência de variados materiais, entre eles, betão, ladrilhos cerâmicos, vidro, tijolo e pedacinhos de plástico, provavelmente proveniente de toldos. De entre todos estes materiais, verifica-se a existência de maior percentagem de betão, tijolo e vidro por esta ordem. Os materiais desta amostra são de granulometria mais fina quando comparados com outras amostras recolhidas. Na Figura 3 está representada uma foto da amostra 1.



Figura 3. Amostra 1

A amostra 2, também recebida a 16 de Fevereiro de 2012, é um RCD com origem numa camada betuminosa. Observa-se a existência de material aparentemente de origem calcária, pedaços de tijolo, provavelmente resíduos de outras amostras de RCD e, em bastante maior percentagem, material ainda envolto em betume. Na Figura 4 apresenta-se uma foto da amostra 2.



Figura 4. Amostra 2

Na amostra 3, recebida a 16 de Março de 2012, encontra-se presente betão, ladrilhos cerâmicos, vidro, tijolo, pedaços de gesso e bocados de mármore. Em maior quantidade, o material existente é o betão. Ao contrário da amostra 1, esta amostra contém material que apresenta uma granulometria mais grosseira, como se pode observar na Figura 5.



Figura 5. Amostra 3

Na amostra 4, também recebida a 16 de Março de 2012, observa-se a existência de materiais como, betão, tijolo, calcário, e gesso. Em maior quantidade, como se pode ver na Figura 6, observa-se betão, e tal como no caso da amostra 3, também este de granulometria grosseira.



Figura 6. Amostra 4

Já na amostra 5, recebida a 18 de Julho de 2012, verifica-se a existência de tijolo, betão, gesso, vidro, pedacinhos de cartão, provavelmente provenientes de sacos de cimento e pedaços de fio elétrico. Esta amostra, quando comparada com todas as outras, é a que apresenta a granulometria mais fina, como se pode verificar na Figura 7.



Figura 7. Amostra 5

Na amostra seguinte, ou seja, na amostra 6, recebida a 18 de Julho de 2012, verifica-se a existência de betão, tijolo, vidro, mármore e ladrilhos cerâmicos. A nível de quantidade, o que mais se observa é sem dúvida o betão e o tijolo, como se pode ver na Figura 8.



Figura 8. Amostra 6

Na amostra 7, também ela recebida a 18 de Julho de 2012, e cuja foto se encontra na Figura 9, verifica-se a existência de material calcário e material ainda envolto em betume. Esta amostra, quando comparada com a amostra 2, também ela de material betuminoso, apresenta materiais de maior granulometria. No entanto, apresenta também maior quantidade de material fino.



Figura 9. Amostra 7

Por fim, na amostra 8, recebida a 18 de Setembro de 2012, observam-se materiais como, betão, tijolo, pedaços de tubo de PVC, gesso, cartão, e pedaços de plástico. Em maior quantidade, como se pode verificar na Figura 10, está presente o betão e o tijolo. Esta

amostra, tal como as amostras 3 e 4, tem materiais de granulometria mais grosseira quando comparada com as restantes amostras.



Figura 10. Amostra 8

Pela descrição visual efetuada, optou-se por agrupar as amostras com características previsivelmente semelhantes em três grupos distintos, conforme se mostra na Figura 11.

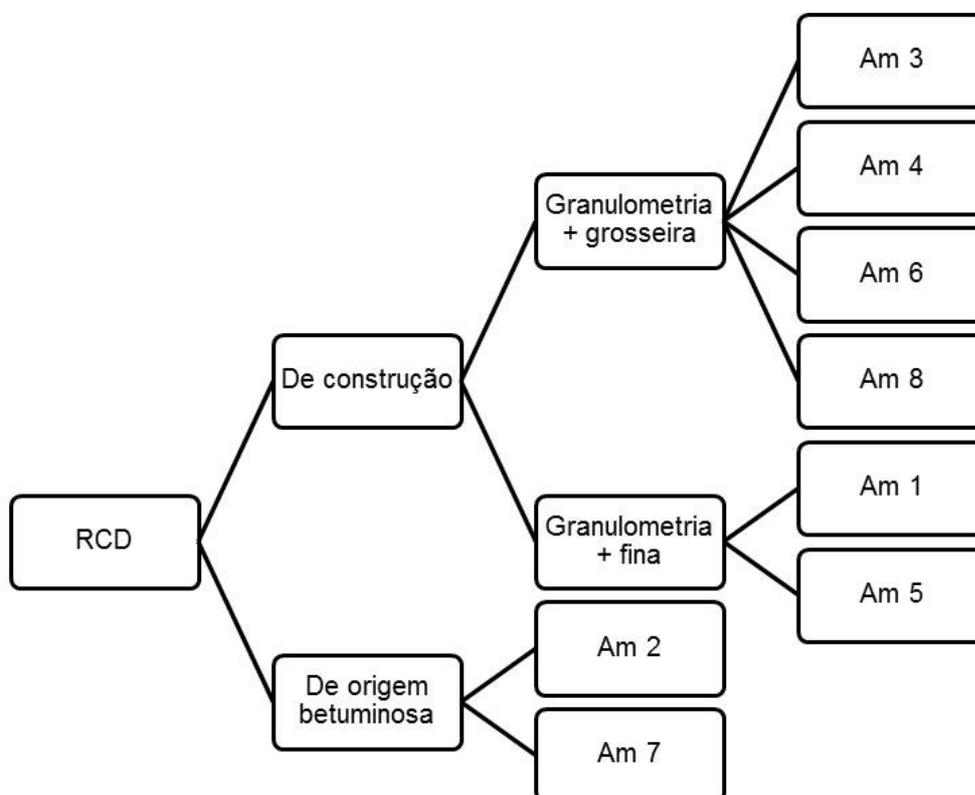


Figura 11. Esquema do agrupamento das amostras conforme a sua origem e granulometria

## 4.2. Caracterização laboratorial

As oito amostras de RCD recolhidas foram sujeitas a uma caracterização laboratorial, de acordo com as normas em vigor para agregados reciclados, com o intuito de determinar se a sua aplicação na construção de estradas será ou não possível.

Foram realizados alguns ensaios para avaliar as propriedades dos materiais constituintes de cada amostra - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados grossos reciclados, análise granulométrica, ensaio de achatamento, teor de finos (através do ensaio do azul de metileno e do equivalente de areia), ensaio *Proctor* e CBR, absorção de água e teor de betume.

### 4.2.1. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados grossos reciclados

Para complementar a descrição visual foi executado, para cada amostra recolhida, o ensaio da classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados segundo a NP EN 933-11:2011 - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 11: Ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados.”

Cada uma das amostras foi recolhida conforme descrito na norma NP EN 933-11:2011 e devidamente reduzida de acordo com a norma NP EN 932-2, para deste modo se obter provetes com a massa mínima referenciada na norma NP EN 933-11:2011.

Os provetes foram secos a uma temperatura de  $(40 \pm 5)$  °C e as suas temperaturas (T) e as suas massas iniciais ( $M_0$ ) foram registadas.

As amostras foram depois passadas entre os peneiros de 63mm e 4mm. As massas retidas no peneiro 63mm foram registadas como  $M_{63}$  e, as massas passadas no peneiro 4mm foram registadas como  $M_4$ .

A massa das amostras que ficou retida entre os peneiros referidos acima foi colocada em recipientes de modo a submergir todo o provete. Agitaram-se os recipientes de modo a libertar as partículas flutuantes que aí se encontrassem. De seguida procedeu-se à recolha dessas mesmas partículas para assim se poder determinar o seu volume ( $V_{FL}$ ), em  $cm^3$ .

As partículas não flutuantes foram secas e posteriormente pesadas. Esta massa foi registada como  $M_2$ . Para se caracterizar as amostras, procedeu-se à divisão dos materiais das mesmas como se mostra na Tabela 10.

Tabela 10. Constituintes não flutuantes de agregados reciclados grossos (NP EN 933-11:2011)

Constituinte	Descrição
R <sub>c</sub>	Betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria.
R <sub>u</sub>	Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos.
R <sub>b</sub>	Elementos cerâmicos de alvenaria (ex. tijolo e telhas), blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante.
R <sub>a</sub>	Materiais betuminosos.
R <sub>g</sub>	Vidros
X	Outros: Materiais coesivos (isto é, argila e solos). Diversos: Metais (ferrosos e não ferrosos), madeira não flutuante, plástico e borracha, estuque.

É possível reduzir o número de partículas a um mínimo de 1000 partículas segundo a norma NP EN 932-2, de modo a facilitar a divisão dos provetes.

A Tabela 11 fornece as indicações acerca da massa mínima necessária para essas 1000 partículas. Regista-se a massa das partículas separadas como M<sub>3</sub>. (NP EN 933-11:2011)

Tabela 11. Indicações sobre a massa necessária para 1000 partículas (NP EN 933-11:2011)

Dimensão máxima do agregado D (mm)	Massa mínima (kg)
63	50
32	10
20	4
16	2
14	1
8	0,5

Na Figura 12 ilustram-se os constituintes de uma das amostras



Figura 12. Foto do ensaio de classificação dos agregados reciclados grossos

Os resultados obtidos através deste ensaio encontram-se na Tabela 12. Nesta Tabela enquadram-se também as amostras relativamente às classes definidas no CEEP.

Tabela 12. Ensaio das características geométricas dos agregados

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
$R_c + R_u + R_g$	80,66	21,52	86,43	95,17	81,39	81,63	12,62	83,66
$R_b$	16,62	0,15	9,56	3,58	14,90	16,97	0,11	13,59
$R_g$	1,82	0,00	0,18	0,15	0,22	0,07	0,00	0,21
$R_a$	1,08	77,74	3,29	0,37	2,76	0,14	87,01	1,90
X	0,01	0,00	0,27	0,06	0,37	0,10	0,00	0,22
Proporção FL (cm <sup>3</sup> /kg)	3,50	2,20	0,80	0,40	3,90	3,30	0,90	0,90
Classe	C	-	C	B	C	C	-	C

As amostras de resíduos de construção, de granulometria mais fina, são os que apresentam um volume de partículas flutuantes maior (que na maioria das amostras se resumiam a pedaços de madeira e papel), enquanto que o resto das amostras apresentam valores muito mais baixos.

Relativamente à constituição das amostras, todas as de origem em resíduos de construção, de origem não betuminosa, apresentam uma % de betão, agregados e cerâmicos inferiores a 90%, com exceção da amostra 4, que apresenta uma percentagem de cerca de 95%. No entanto, as amostras, apresentam uma % de cerâmicos, um pouco elevado, na ordem dos 15% exceto a amostra 4 que apresenta 4% de cerâmicos e a amostra 3, que apresenta uma percentagem de cerca de 10%. A amostra 4 cumpre todos os requisitos da classe C e a amostra 3 todos os requisitos da classe B. Quanto às restantes amostras, optou-se por classificá-las como sendo de classe C, uma vez que os valores obtidos se aproximam mais dos

valores desta classe, não cumprindo na totalidade os requisitos, apenas pela percentagem de cerâmicos, que ultrapassa os 10%.

Quanto às amostras de origem betuminosa optou-se por não atribuir qualquer uma das duas classes existentes, uma vez que esta divisão não foi pensada em resíduos deste tipo, não se enquadrando minimamente os valores do ensaio.

#### 4.2.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica das amostras foi feita por peneiração com lavagem de acordo com a norma portuguesa NP EN 933-1:2000 - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise Granulométrica”.

Quanto às amostras 3 e 4, por aparentarem ter material mais grosseiro, foi necessário proceder ao seu esquarteamento, de modo a recolher uma maior quantidade de material, não necessário para as restantes amostras. Na Figura 13 mostram-se algumas imagens dessa operação.



Figura 13. Ensaio de granulometria. a) e b) Esquartelamento da amostra (processo efetuado apenas para as amostras 3 e 4); c) Pesagem do material mais grosseiro de uma amostra de RCD; d) Pesagem do material mais fino de uma amostra de RCD; e) Pesagem do material mais grosseiro de uma amostra de RCD betuminoso; f) Pesagem do material mais fino de uma amostra de RCD betuminoso

Após a lavagem do material e respetiva secagem até massa constante, as amostras foram passadas por uma série de peneiros cujas aberturas são progressivamente decrescentes (NP EN 933-1:2000). O material que ficou retido em cada um dos peneiros foi então pesado e

relacionado com a massa inicial da amostra de modo a obter as percentagens de material cumulativamente passado em cada um dos peneiros para então se construir a sua curva granulométrica. Na Figura 14 estão representados os peneiros usados neste ensaio.



Figura 14. Peneiros ASTM

Para que a perda de material durante o ensaio não seja significativa, a diferença entre a massa seca da amostra após lavagem e a massa total da amostra após peneiração não deve ser superior a 1%.

Na Figura 15, Figura 16 e Figura 17 apresentam-se as curvas granulométricas das diferentes amostras ensaiadas.

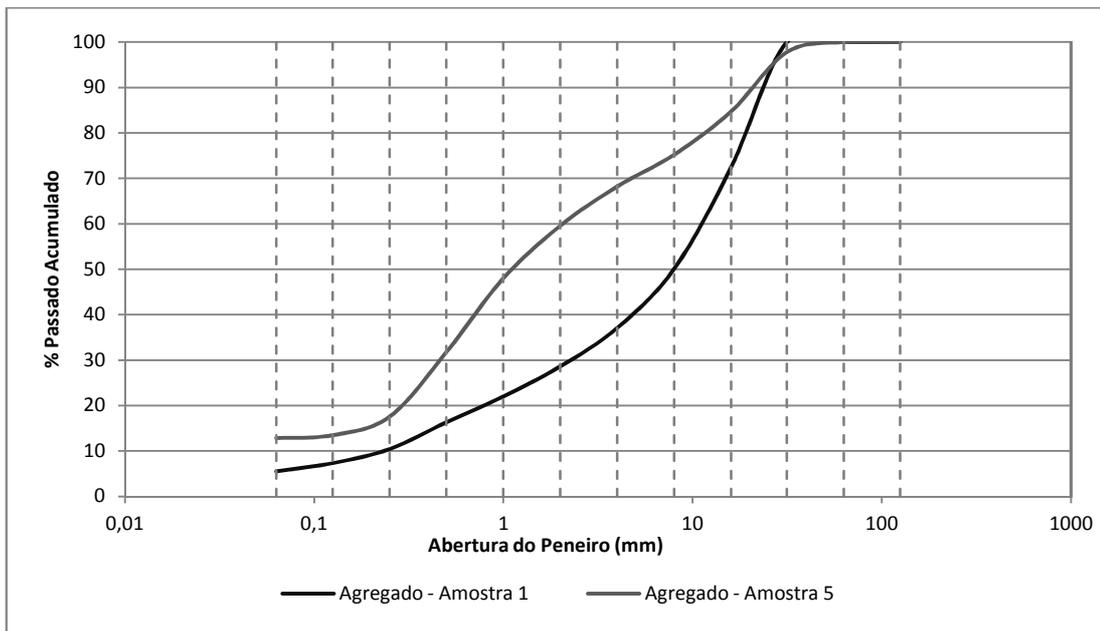


Figura 15. Curvas granulométricas das amostras de origem não betuminosa de granulometria mais fina

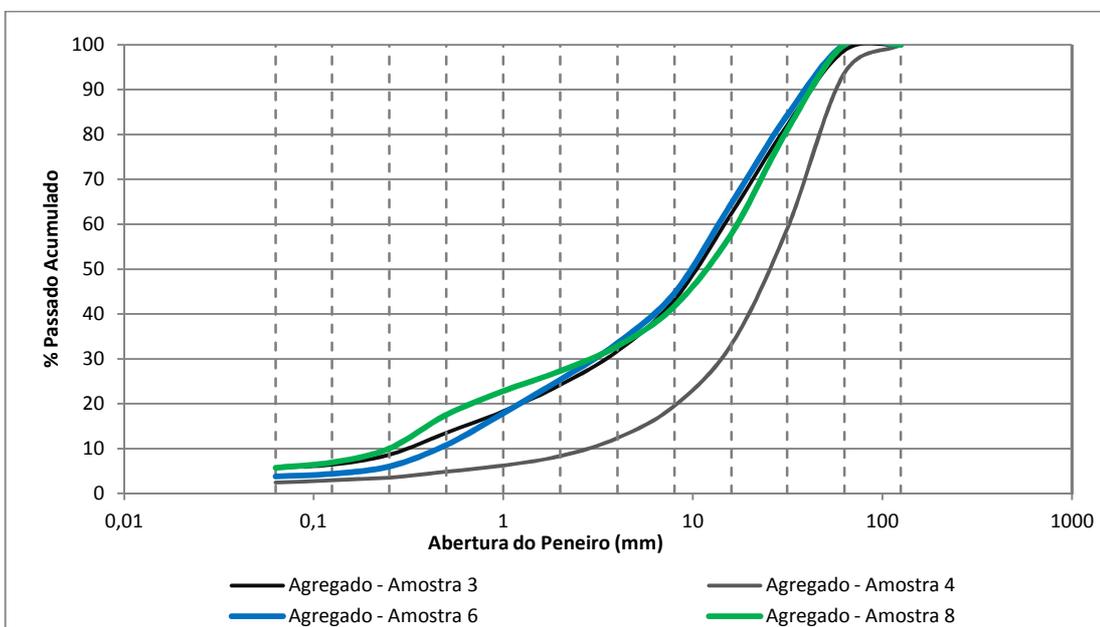


Figura 16. Curvas granulométricas das amostras de origem não betuminosa de granulometria mais grosseira

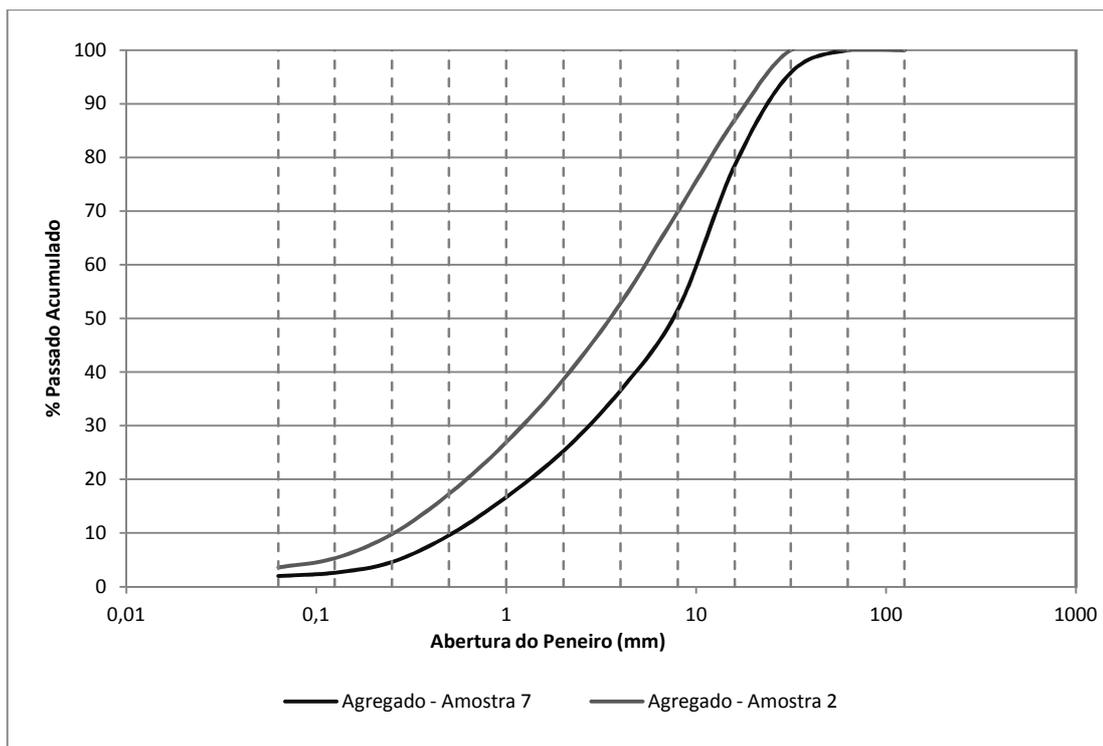


Figura 17. Curvas granulométricas das amostras de origem betuminosa

Da análise dos três gráficos, é possível verificar que as amostras 3, 6 e 8 apresentam uma granulometria muito semelhante, enquanto que a amostra 4 é a que apresenta a granulometria mais grosseira. A amostra 5 é a que apresenta granulometria mais fina, com uma percentagem significativa de finos (12,8%). As amostras de origem betuminosa apresentam uma granulometria extensa, o que seria de esperar, uma vez que os agregados para o fabrico das misturas terão sido seleccionados.

A norma EN 13285:2010 “*Unbound mixtures. Specifications*”, define alguns parâmetros como, a dimensão, o sobretamanho, a classe de granulometria e o teor em finos dos agregados. Todos os agregados reciclados são de granulometria extensa, logo com dimensão 0/D. Na Tabela 13 são apresentadas as diferentes classificações dos agregados. Nesta Tabela serão apenas classificados os resíduos de construção, de origem não betuminosa, uma vez que as amostras de origem betuminosas serão estudadas apenas para camadas ligadas.

Tabela 13. Classificações dos agregados segundo a Norma EN 13285:2010

	Amos tra 1	Amos tra 3	Amos tra 4	Amos tra 5	Amos tra 6	Amos tra 8
Dimensão	0/16	0/31,5	0/63	0/31,5	0/31,5	0/31,5
S obretamanhos	OC <sub>75</sub>	OC <sub>85</sub>	OC <sub>90</sub>	OC <sub>90</sub>	OC <sub>80</sub>	OC <sub>90</sub>
Classe de granulometria	G <sub>C</sub>	G <sub>A</sub>	G <sub>O</sub>	G <sub>U</sub>	G <sub>A</sub>	G <sub>A</sub>
Teor de finos	UF <sub>7</sub> LF <sub>4</sub>	UF <sub>7</sub> LF <sub>4</sub>	UF <sub>3</sub> LF <sub>2</sub>	UF <sub>15</sub> LF <sub>8</sub>	UF <sub>5</sub> LF <sub>2</sub>	UF <sub>7</sub> LF <sub>4</sub>
Qualidade dos finos (g/kg)	MB <sub>0/16</sub> = 0,36	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,36	MB <sub>0/63</sub> = 0,10	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,75	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,32	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,34

#### 4.2.3. Determinação da forma das partículas

De acordo com a norma portuguesa NP EN 933-3:2002 - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 3: Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento”, procedeu-se à determinação deste índice para as amostras recolhidas.

Apesar de se poder determinar a forma das partículas dos agregados através de dois ensaios (índice de achatamento e índice de forma), escolheu executar-se esta caracterização pela determinação do índice de achatamento, uma vez que é este ensaio que se encontra referenciado no CEEP.

Para utilização em pavimentos rodoviários, devem usar-se agregados com partículas cúbicas, uma vez que as partículas achatadas se tornam mais frágeis.

O ensaio do índice de achatamento compreende a passagem das partículas das amostras por peneiros de barras, como mostra a Figura 18, retirando e pesando as partículas que passam nestes peneiros, cuja massa é registada como  $m_i$ . A soma das massas  $m_i$  é registada como  $M_1$  e dividida pela massa  $M_2$  (que é a soma das massas retidas nos peneiros ASTM correspondentes ( $R_i$ )) para assim se determinar o índice de achatamento das amostras (NP EN 933-3:2002).



Figura 18. Peneiro de barras.

Na Tabela 14 encontram-se as correspondências entre os peneiros ASTM e os peneiros de barras.

Tabela 14. Relação da fração granulométrica com os peneiros de barras (NP EN 933-3:2002)

Fração granulométrica $d_i/D_i$ (mm)	Largura de ranhura do peneiro de barras (mm)
63/80	40
50/63	31,5
40/50	25
31,5/40	20
25/31,5	16
20/25	12,5
16/20	10
12,5/16	8
10/12,5	6,3
8/10	5
6,3/8	4
5/6,3	3,15
4/5	2,5



Figura 19. **a)** Ensaio índice de achatamento. a) RCD betuminoso; b) RCD.

Esta norma classifica também os agregados (para aplicação em misturas betuminosas) em função do valor do índice de achatamento.

Tabela 15. Classificação de agregados para misturas betuminosas segundo o índice de achatamento (InIR, 2009)

Índice de achatamento	Agregados para misturas betuminosas
≤ 10	FI <sub>10</sub>
≤ 15	FI <sub>15</sub>
≤ 20	FI <sub>20</sub>
≤ 25	FI <sub>25</sub>
≤ 30	FI <sub>30</sub>
≤ 35	FI <sub>35</sub>
≤ 50	FI <sub>50</sub>
> 50	FI <sub>Declarado</sub>
Não requerido	FI <sub>NR</sub>

Da execução do ensaio obtiveram-se os seguintes valores para o índice de achatamento (Tabela 16).

Tabela 16. Resultados do índice de achatamento para as 8 amostras

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Índice de Achatamento FI (%)	22	5	14	11	21	17	5	21
Classe	FI <sub>25</sub>	FI <sub>10</sub>	FI <sub>15</sub>	FI <sub>15</sub>	FI <sub>25</sub>	FI <sub>20</sub>	FI <sub>10</sub>	FI <sub>25</sub>

Da análise dos resultados é possível verificar que as amostras de origem betuminosa são as que apresentam um índice de achatamento mais baixo, o que seria expectável uma vez que

os agregados usados no fabrico de misturas betuminosas são tendencialmente cúbicos, logo com um baixo índice de achatamento. Em relação às amostras de construção, o valor do índice de achatamento não depende da granulometria mas, consegue-se sim encontrar uma relação entre o valor do ensaio e a quantidade de elementos cerâmicos das amostras (Forbes, 1993). Este facto deve-se aos elementos cerâmicos serem em grande parte constituídos por fragmentos de tijolos cerâmicos que são elementos alongados, logo com elevado índice de achatamento, portanto o índice de achatamento é, neste caso, diretamente proporcional à proporção de elementos cerâmicos presentes nos RCD.

#### 4.2.4. Determinação do teor de finos

##### 4.2.4.1. Azul-de-metileno

De acordo com a norma portuguesa NP EN 933-9:2002 - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 9: Determinação do teor de finos - Ensaio do azul de metileno”, foi feita a determinação do azul de metileno para as amostras recolhidas.

Tendo em conta os resultados do ensaio do azul-de-metileno, os solos podem ser classificados de acordo com a Tabela 17. Estes resultados correspondem ao ensaio do azul de metileno efetuado sobre a fração fina do agregado, ou seja, a fração passada no peneiro 200 ASTM, e depois atribuído por proporção direta à totalidade do solo. (Branco et al., 2005)

Tabela 17. Classificação dos solos (Branco et al., 2005)

MB (g/kg)	Classificação
$MB \leq 1$	Solo insensível à água
$1 \leq MB \leq 2$	Solo muito pouco sensível à água
$2 < MB < 15$	Solo com sensibilidade à água
MB = 15	Valor que distingue o solo arenoso-siltoso do arenoso-argiloso
MB = 25	Valor que distingue o solo siltoso pouco plástico do medianamente plástico
MB = 60	Valor que distingue o solo siltoso do argiloso
MB = 80	Valor que distingue o solo argiloso do solo muito argiloso

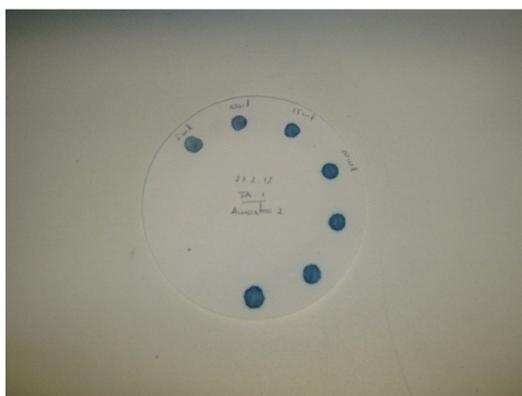
As amostras foram peneiradas utilizando o peneiro 2 mm, de modo a recolher 200 gramas desta fração para o ensaio. Estes 200 gramas foram colocados num copo com 500 ml de água destilada e foram agitadas durante cerca de 5 minutos com uma velocidade de cerca de 600 rot/min. Após este período, reduziram-se as rotações para cerca de 400 rot/min e adicionaram-se 5 ml de azul de metileno, que foi agitado durante um minuto, após o qual se retirou uma gota da solução e se colocou num papel de filtro. Este processo foi repetido até se verificar o aparecimento de uma auréola em torno da gota no papel e com a mesma quantidade de azul de metileno, foram retiradas mais 4 gotas, para garantir que a auréola se manteve (NP EN 933-3:2002). Todo este processo foi efetuado duas vezes para assim garantir a veracidade dos resultados. Na Figura 20 mostra-se o material usado no ensaio bem como o filtro de duas das amostras ensaiadas.



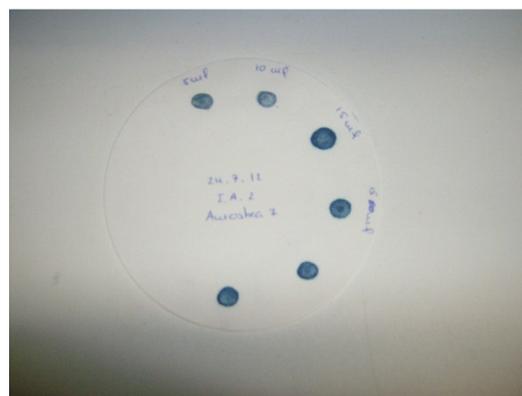
a)



b)



c)



d)

Figura 20. Ensaio do azul-de-metileno. a) Início do ensaio; b) Após colocar o azul-de-metileno; c) Papel de filtro da amostra 2; d) Papel de filtro da amostra 7

A este processo, segundo a norma mencionada acima, dá-se o nome de deteção da presença de corante livre. Quando esta presença é detetada, determina-se o valor de azul de metileno expresso em gramas de corante adsorvido por quilograma da fração granulométrica ensaiada. O resultado deste ensaio está representado na Tabela 18 e os boletins de ensaio para cada uma das amostras encontram-se no Anexo 1.

Tabela 18. Resultados do azul de metileno para as amostras ensaiadas (Fração 0/2 mm)

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Azul de Metileno (MB) (g/kg)	1,25	1,125	1,25	1,25	1,25	1,25	0,75	1,25

É possível verificar pela Tabela 18 apresentada que as amostras de origem em resíduos de construção, de origem não betuminosa, apresentam todas o mesmo valor de azul de metileno para a fração estudada, sendo agregados pouco sensíveis à água. As amostras de origem betuminosa apresentam valores de azul de metileno mais baixo, o que mais uma vez seria expectável pela origem destas amostras.

#### 4.2.4.2. Equivalente de Areia

Tendo em conta 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”, procedeu-se à determinação desta propriedade para todas as amostras recolhidas. Na Tabela 19, através do trabalho de Luzia (2008), é definida a plasticidade do solo em função do valor do equivalente de areia.

Tabela 19. Classificação dos solos (Luzia, 2008)

SE (%)	Classificação
SE < 20	Solo plástico
20 < SE < 30	Não conclusivo
SE > 30	Solo não plástico

As amostras foram peneiradas usando o peneiro de 2 mm, para assim recolher o material de interesse para este ensaio. Numa proveta colocou-se solução flocculante até à marca inicial e de seguida colocaram-se 120 g da amostra previamente pesada. Para que se libertassem as bolhas de ar presentes na proveta, deram-se umas leves pancadas no fundo da proveta e deixou-se repousar durante aproximadamente 10 minutos. Após estes 10 minutos, colocou-se uma tampa na proveta e agitou-se durante mais ou menos 30 segundos de modo a garantir a libertação das bolhas de ar. Seguidamente colocou-se mais solução flocculante na proveta até à marca final com o especial cuidado de colocar a agulha da solução flocculante no

fundo da proveta para que mais partículas de argilas se libertassem e deixou-se repousar durante mais 20 minutos. Em seguida mediu-se a altura  $h_1$  da proveta correspondente ao ponto onde se encontrava o final da camada mais fina e mediu-se também a altura  $h_2$  após colocar o êmbolo na proveta (NP EN 933-8:2002). A Figura 21 ilustra os vários estádios do ensaio.

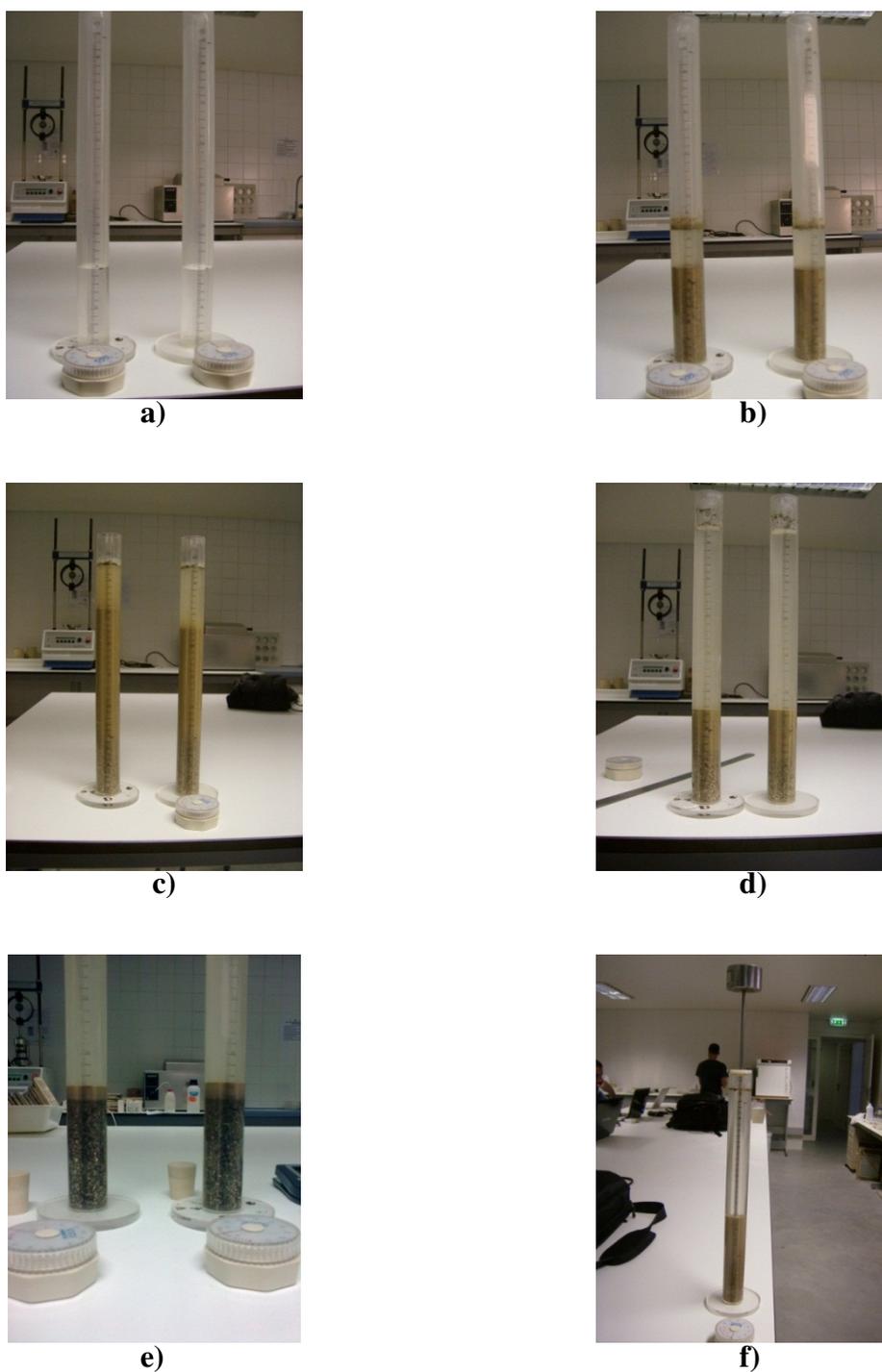


Figura 21. Ensaio do equivalente de areia. a) Provetas com solução floculante até à 1ª marca; b) Provetas com solução floculante e amostra (fase inicial); c) Provetas com amostra e solução floculante até à 2ª marca; d) Provetas com amostra (RCD) e solução floculante após repousar 20 minutos; e) Provetas com amostra (betuminoso) e solução floculante após repousar 20 minutos; f) Provetas com amostra e solução floculante e êmbolo

Este procedimento foi efetuado duas vezes para cada amostra. Após a medição destas duas alturas efetuaram-se os cálculos necessários à obtenção dos valores de equivalente de areia das amostras, os quais estão representados na Tabela 20.

Tabela 20. Resultados do equivalente de areia para as amostras ensaiadas

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Equivalente de Areia (S E)	72	83	67	60	55	69	84	81

Da análise da Tabela 20 é possível verificar que todas as amostras são não plásticas, dispensando-se para isso a execução do ensaio para a determinação dos Limites de *Atterberg*. Os resíduos de construção de granulometria mais fina (Amostras 1 e 5) apresentam um valor mais baixo de equivalente de areia em relação às amostras com granulometria mais grosseira (Amostras 3, 4, 6 e 8). No entanto e como seria de esperar as amostras que apresentam um valor mais elevado de equivalente de areia são as amostras de origem betuminosa. Ao contrário do que seria esperado, os valores do azul de metileno e do equivalente de areia não apresentam uma relação definida.

#### 4.2.5. Ensaio *Proctor* e CBR

##### 4.2.5.1. *Proctor*

Tendo em conta a especificação LNEC E 197-1966 - “Ensaio de compactação”, procedeu-se à determinação desta propriedade para a Amostra 5.

Este ensaio consiste basicamente na compactação de uma amostra de solo num molde, de modo a determinar o teor em água e o peso volúmico seco. Repetindo este procedimento para diferentes quantidades de água adicionadas ao solo, consegue-se obter a curva de compactação.

Existem quatro tipos de ensaios de compactação:

- Compactação leve em molde pequeno (*Proctor* normal);
- Compactação leve em molde grande (*Proctor* normal);
- Compactação pesada em molde pequeno (*Proctor* modificado);

- Compactação pesada em molde grande (*Proctor* modificado).

A compactação, seja ela leve ou pesada, traduz a energia de compactação, sendo esta energia aplicada através de um determinado número de pancadas com um pilão de um dado peso caindo de uma altura especificada sobre cada uma das camadas de solo como mostra a Tabela 21. (Santos, 2008).

Tabela 21. Quadro resumo dos diferentes ensaios *Proctor* (Santos, 2008)

		Tipos de Compactação			
		Leve ( <i>Proctor</i> normal)		Pesada ( <i>Proctor</i> modificado)	
Molde	diâmetro (mm)	102	152	102	152
	altura (mm)	117	114	117	114
Pilão		2,49 kg	2,49 kg	4,54 kg	4,54 kg
Altura de queda		30,5 cm	30,5 cm	47,5 cm	47,5 cm
Número de camadas		3	3	5	5
Número de pancadas por camada		25	55	25	55

O ensaio foi realizado na amostra 5 pois é a que apresenta a granulometria mais fina, razoavelmente próximo dos “tout-venants” naturais usados na construção de infraestruturas rodoviárias. Nesta amostra foi executado então o ensaio de compactação pesada em molde grande, ou seja, ensaio de compactação *Proctor* modificado. É um ensaio em que se aplica uma maior energia de compactação por unidade de volume, obtendo-se densidades secas máximas mais elevadas e humidades ótimas menores do que com o ensaio *Proctor* normal. Foi realizada esta versão do ensaio pois segundo a especificação LNEC E197, é a que se aplica a solos com percentagem de massa retida acumulada superior a 20%, no peneiro nº4 da ASTM.

Assim, seguindo as instruções da norma, a amostra 5 foi separada utilizando o peneiro de ¾”, de modo a recolher todo o material passado neste peneiro. Após a separação, foram efetuadas as misturas de amostra com diferentes percentagens de água e colocadas em sacos devidamente selados.

Seguidamente, procedeu-se ao ensaio, compactando a amostra em 5 camadas dentro do molde, cada uma delas com 55 pancadas. De seguida, procedeu-se à recolha de algum material para colocar em estufa, de modo a determinar o teor em água. Este procedimento foi efetuado para a amostra com as diversas percentagens de água.

Depois de compactada toda a amostra, contendo as 4 diferentes percentagens de água e, feitas as devidas pesagens, procedeu-se à determinação do teor ótimo em água e determinação

da baridade seca máxima (LNEC E 197-1966). No gráfico da Figura 22 ilustra-se a curva de compactação da amostra 5.

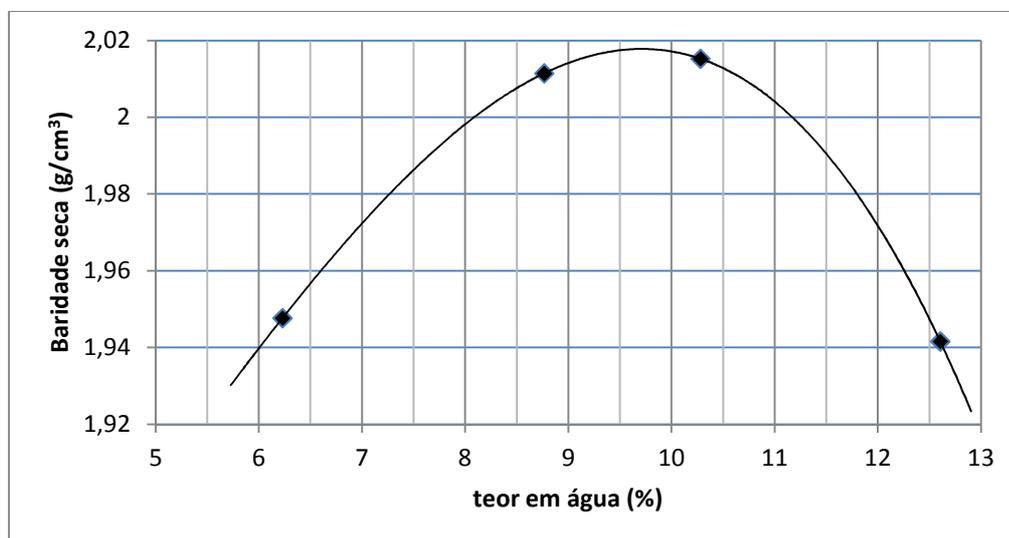


Figura 22. Baridade seca vs Teor em água (Curva de compactação)

Através da análise do gráfico da Figura 22 verifica-se que a baridade seca máxima para a amostra 5 é 2,02, para um teor ótimo em água de 9,7%. O boletim de ensaios com os resultados encontra-se no anexo I.

Na Figura 23 ilustram-se algumas fases do ensaio de compactação de *Proctor*.

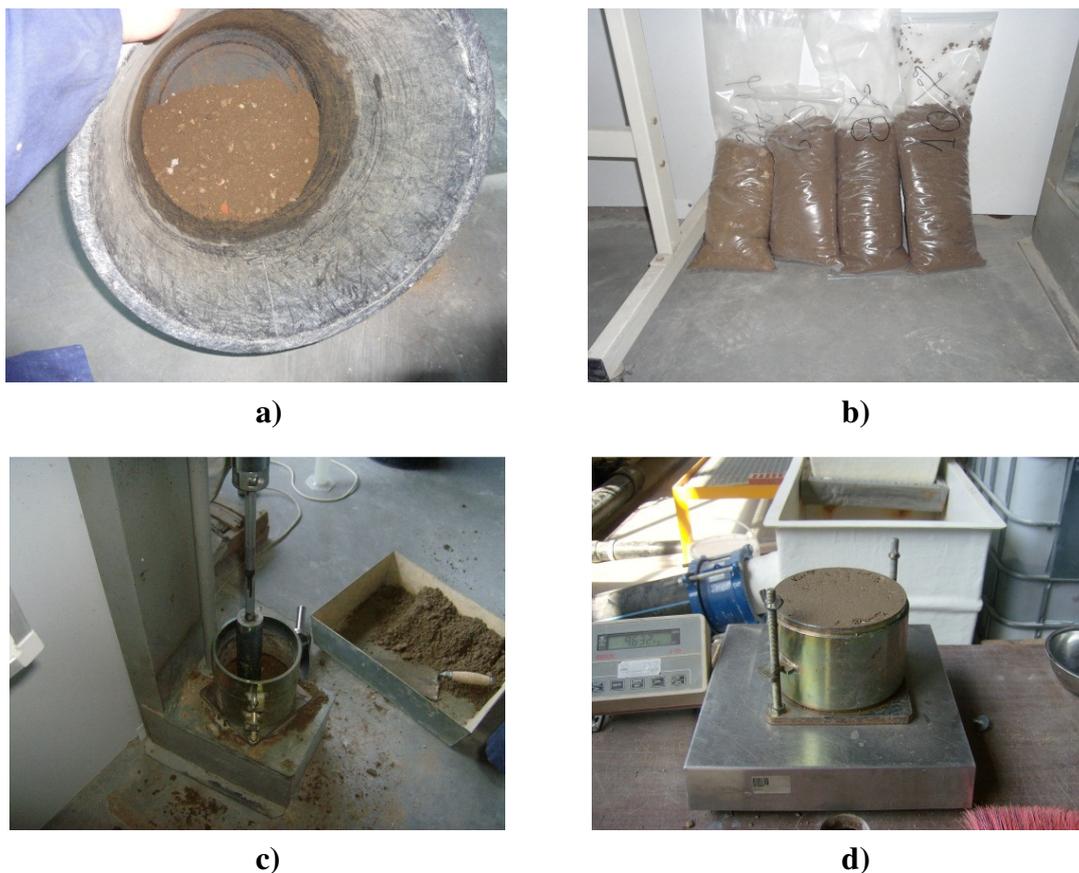


Figura 23. Ensaio de compactação *Proctor* modificado. a) Balde com amostra a ser preparada; b) Sacos preparados com amostra a 4%, 6%, 8% e 10%; c) Amostra a ser compactada; d) Amostra após compactação

#### 4.2.5.2. CBR

Tendo em conta a especificação LNEC E198-1967 - “Determinação do CBR”, procedeu-se à determinação desta propriedade para a amostra 5.

Conforme a especificação, para este ensaio foram usados 3 provetes da amostra 5, realizados com a percentagem de água ótima determinada pelo ensaio de *Proctor* descrito no ponto 4.2.5.1.

Procedeu-se à mistura de 5,5 kg da amostra com 9,7% de água. Compactaram-se os 3 moldes necessários ao ensaio, com 5 camadas cada um mas agora com número diferente de pancadas, representando diferentes compactações relativas (C.R). Um dos moldes foi

compactado com 55 pancadas (100% de C.R), outro com 25 (95% de C.R) e outro com 12 (90% de C.R).

Após compactado o solo dentro dos moldes, pesaram-se os mesmos e recolheu-se parte da amostra não compactada, para determinar o teor em água.

Colocaram-se os moldes em recipientes para que ficassem imersos em água de modo a saturar a amostra, colocando neles, previamente, os contrapesos apresentados na Figura 25 d). Ainda no molde, foi colocado um anel, ao qual se juntou um defletómetro. Registou-se o valor inicial exibido pelo defletómetro e deixou-se a amostra submersa em água até se obter um valor constante no defletómetro, durante 2 leituras consecutivas (LNEC E 198-1967). Depois de estabilizar o valor lido pelo defletómetro, retiraram-se os provetes da água e usando o equipamento que se encontra na Figura 25 e), procedeu-se ao registo dos valores de compressão dados pelo anel de 50 KN.

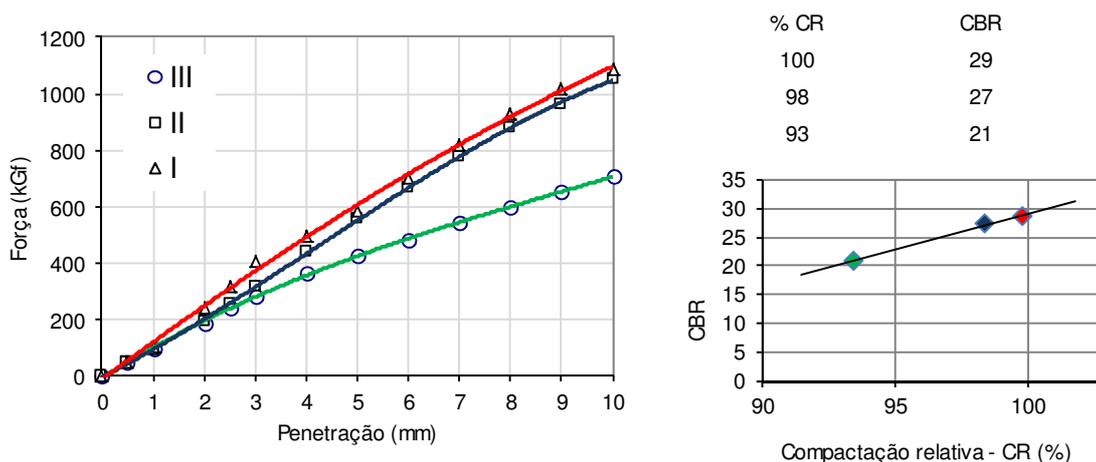


Figura 24. Gráficos de penetração e compactação relativa (CBR)

Pela realização do ensaio chegou-se a um valor de CBR a 95% de C.R igual a 23% e uma expansão relativa de 0,1%. Pela análise do Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV), o solo que constitui a amostra 5 tem uma classe de fundação S4, sendo por este parâmetro um excelente material para a execução de por exemplo leitos de pavimento (JAE, 1995). O boletim de ensaio correspondente ao CBR encontra-se no anexo I.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 25. Ensaio do CBR. a) Provete após compactação; b) Molde; c) Provete submerso em água com defletómetro; d) Sobrepesos usados no ensaio; e) Máquina de ensaio CBR; f) Provete após o ensaio

#### 4.2.6. Massa volúmica e Absorção de água

De acordo com a norma portuguesa NP EN 1097-6:2002 - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”, procedeu-se à determinação destas mesmas propriedades para todas as amostras recolhidas.

A massa volúmica das partículas é calculada a partir da relação “entre a massa e o volume. A massa é determinada pela pesagem do provete com as partículas saturadas com superfície seca e a partir de outra pesagem do mesmo provete após secagem em estufa. O volume é determinado a partir da massa da água deslocada, quer pela redução de massa no método do cesto de rede metálica, quer por pesagens no método do picnómetro”.(NP EN 1097-6:2002)

Para a determinação da massa volúmica das amostras, foi utilizado o método do cesto de rede metálica para as partículas cujas dimensões se encontravam entre 35,1 mm e 4 mm. Para as partículas cujas dimensões se encontravam entre 4 mm e 0,063 mm, foram usados picnómetros de 500 ml e, para as partículas de dimensão abaixo de 0,063 mm foram usados picnómetros de 100 ml.

As amostras foram separadas segundo a granulometria acima descrita. O cesto metálico foi colocado em água e pesado de modo a obter a massa aparente do cesto. As partículas de dimensões entre 35,1 mm e 4 mm foram então colocadas no cesto e submersas em água, onde ficaram aproximadamente 24 horas, antes de serem pesadas. Após as 24 horas registou-se o valor da massa que corresponde à massa aparente do cesto contendo a massa das partículas saturadas e mediu-se também a temperatura da água para se poder usar o valor da sua massa volúmica correspondente à temperatura em causa. Seguidamente retirou-se o cesto da água e depois de maior parte da água ter saído, colocou-se a amostra num tabuleiro de modo a que esta pudesse secar ao ar. Registou-se o valor da massa da amostra com superfície seca ao ar e colocou-se o tabuleiro na estufa de modo a conseguir o valor da massa das partículas secas em estufa. Após este procedimento, procedeu-se à determinação da massa volúmica da amostra bem como da sua absorção de água.

Para as restantes duas granulometrias, pesaram-se os picnómetros e colocou-se a amostra dentro dos mesmos, colocando-lhes seguidamente água, sem encher, de modo a saturar as amostras. Com uma vareta agitaram-se as amostras dentro dos picnómetros de modo a retirar as bolhas de ar e deixaram-se ficar as amostras nos picnómetros durante aproximadamente 24 horas em repouso, para que as amostras ficassem completamente saturadas. Após este período, agitaram-se novamente as amostras para libertar bolhas de ar que possam ainda ter ficado retidas e encheram-se os picnómetros até à marca superior. Pesaram-se os picnómetros e registou-se o valor. Na Figura 26 mostram-se alguns passos do ensaio.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 26. Ensaio de massa volúmica e absorção de água. a) Picnómetro vazio; b) Picnómetro com amostra (RCD) cheio de água; c) Picnómetro com amostra (RCD) em repouso; d) Picnómetro com amostra (betuminoso) em repouso; e) Picnómetro com amostra (RCD) cheio de água; f) Picnómetro com amostra (betuminoso) cheio de água

Em seguida colocaram-se as amostras em tabuleiros e a partir deste ponto o procedimento foi feito tal como no método do cesto metálico (NP EN 1097-6:2002). Pesaram-se também os picnómetros apenas cheios de água e de seguida foram feitos os cálculos

necessários de modo a determinar a absorção de água e a massa volúmica, como se pode ver na Tabela 22.

Tabela 22. Massa volúmica e absorção de água das amostras ensaiadas

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Absorção de água $WA_{24}$ (%)	7,63	3,61	6,98	6,85	10,42	10,93	4,78	12,83
Massa volúmica do material impermeável das partículas $\rho_a$ ( $g/cm^3$ )	2,61	2,46	2,62	2,56	2,69	1,82	2,11	2,02
Massa volúmica das partículas secas em estufa $\rho_{rd}$ ( $g/cm^3$ )	2,33	2,48	2,39	2,37	2,52	1,83	2,09	1,86
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ao ar $\rho_{ssd}$ ( $g/cm^3$ )	2,42	2,43	2,44	2,41	2,50	1,78	2,07	1,90

#### 4.2.7. Teor de betume

De acordo com a norma ASTM D 2172 - Extração Quantitativa de Betume de Misturas Betuminosas, procedeu-se à determinação desta mesma propriedade para as amostras 2 e 7 recolhidas.

A percentagem de betume é calculada pela diferença da massa extraída do agregado, teor de humidade e quantidade de matéria mineral do extrato.

Para determinar a percentagem de betume das amostras referidas, recolheu-se cerca de um quilograma de amostra. Pesaram-se dois filtros e, sem tarar a balança, colocou-se uma parte da amostra em cada um dos filtros (previamente dobrados de modo a formar um cone) e registou-se esse valor. Seguidamente colocaram-se os filtros nos cones dentro da coluna extratora, onde antes tinha sido colocada uma certa quantidade de tricloroetileno. No topo da coluna extratora foi colocada uma tampa com ligação de duas pequenas mangueiras de modo a fazer circular água para refrigeração e condensação. A coluna extratora foi então colocada sobre uma manta de aquecimento de modo a fazer ferver o tricloroetileno, como mostra a Figura 27.



Figura 27. Coluna Extratora

Após fervura do tricloroetileno, a temperatura da manta foi reduzida de modo a que este continuasse a ferver de modo constante. Deixou-se a mistura a destilar até que o líquido que saía dos cones se apresentasse transparente. Deixou-se arrefecer o reagente e a mistura e depois retirou-se da coluna extratora e colocou-se num tabuleiro dentro de uma estufa a 100°C durante aproximadamente 24 horas. Após este período de tempo na estufa, pesaram-se novamente os cones com a mistura e registou-se o valor (ASTM D 2172:2011). A partir destes dados procedeu-se ao cálculo da percentagem de betume presente nas amostras. Os resultados apresentam-se na Tabela 23.

Tabela 23. Resultados do Teor de Betume para as amostras betuminosas

	Amos tra 2	Amos tra 7
Teor de Betume (TB) (%)	3,3	3,4

### 4.3. Características mecânicas dos agregados reciclados

As características mecânicas dos agregados são obtidas pelos ensaios da resistência à fragmentação (Ensaio de *Los Angeles*), pela resistência ao desgaste por atrito (Ensaio *micro-Deval*) e pela resistência ao Polimento (coeficiente PSV) (InIR, 2009)

Por limitação de tempo, não foi possível realizar estes ensaios, no entanto através de alguns estudos já realizados sobre agregados reciclados tentar-se-á prever um valor razoável para o ensaio de *Los Angeles* e *micro-Deval*. A previsão da resistência ao Polimento não será prevista uma vez que o CEEP não prevê a realização deste ensaio.

#### 4.3.1. Resistência à fragmentação

A resistência à fragmentação é efetuada de acordo com a norma portuguesa NP EN 1097-2:2011 - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação”.

O ensaio de *Los Angeles* consiste em fazer rodar, num tambor rotativo (500 rotações a 33 rpm), uma amostra com uma carga de onze esferas de aço normalizadas, quantificando no final o material retido no peneiro de 1,6 mm.

O ensaio é realizado sobre o agregado grosso, passado no peneiro de 14 mm e retido no peneiro de 10 mm, com uma massa inicial de 15 kg desta fração granulométrica. A distribuição granulométrica da amostra deve cumprir um dos dois requisitos:

- a) 60 % a 70 % passado no peneiro de 12,5 mm, ou;
- b) 30 % a 40 % passado no peneiro de 11,2 mm.

O coeficiente de *Los Angeles* LA é dado pela seguinte equação:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

Onde:

*m* - Massa retida no peneiro de 1,6 mm, em g (NP EN 1097-2:2011)

A resistência à fragmentação é declarada pela correspondente categoria especificada, presente na NP EN 13043:2004 (Tabela 24).

Tabela 24. Categoria para os valores máximos do coeficiente de *Los Angeles* (NP EN 13043:2004)

Coeficiente LA	Categorias LA
$\leq 15$	LA <sub>15</sub>
$\leq 20$	LA <sub>20</sub>
$\leq 25$	LA <sub>25</sub>
$\leq 30$	LA <sub>30</sub>
$\leq 40$	LA <sub>40</sub>
$\leq 50$	LA <sub>50</sub>
$> 50$	LA <sub>Declarado</sub>
Não requerido	LA <sub>NR</sub>

Como neste trabalho não houve possibilidade de realizar este ensaio, vai tentar prever-se um valor que seja considerado razoável. No trabalho desenvolvido por Conceição (2012), no Instituto Superior de Castelo Branco, foram reunidos valores de coeficientes de *Los Angeles* de vários trabalhos (Tabela 25).

Tabela 25. Valores do coeficiente *Los Angeles* em vários trabalhos (Conceição, 2012)

Autor	Norma	Material	Valor (%)
(EST IPCB, 2012)	NP EN 1097-2	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	58
(IST, 2006)	E 237	Agregados grossos reciclados de betão	41
		Agregados grossos reciclados mistos (56% betão e argamassa, 22% pedra, 18% de materiais cerâmicos e outros)	47
(Pestana, 2008)	NP EN 1097-2	RCD - Cubos de betão britado (elementos estruturais tais como vigas, lajes e pilares)	44
(Ferreira, 2009)	NP EN 1097-2	RCD - Cubos de cubos betão britado (vigas, lajes e pilares)	49
		RCD - Tijolo, azulejo e telha	50
(Lima, 2008)	DNER-ME 035/98	RCD misto - Betão/argamassa (43%), materiais finos (26%), brita (22%) e outros	49
		Brita Itaitinga/CE	46
(Woodside et al., 2011)	NR	RCD - Betão, tijolo e pedra	28
(Rasel et Al., 2011)	NR	RCD de tijolo, Rajshahi, Bangladesh	45
		Tijolo novo (recolhido no fabricante)	38
		Agregado natural	26
(Aathesan, 2011)	AS 1141.23	tijolo moído - Local 1_Laverton	36
		Agregado natural britado	21
		50% Betão esmagado + 50% Tijolo moído	33
		60% Betão esmagado + 40% Tijolo moído	32
		70% Betão esmagado + 30% Tijolo moído	30
		75% Betão esmagado + 25% Tijolo moído	28
		80% Betão esmagado + 20% Tijolo moído	30
		85% Betão esmagado + 15% Tijolo moído	30
		90% Betão esmagado + 10% Tijolo moído	32
		100% Betão esmagado	28
		50% Pedra britada + 50% Tijolo moído	29
		60% Pedra britada + 40% Tijolo moído	29
		70% Pedra britada + 30% Tijolo moído	27
		75% Pedra britada + 25% Tijolo moído	23
		80% Pedra britada + 20% Tijolo moído	21
		85% Pedra britada + 15% Tijolo moído	22
90% Pedra britada + 10% Tijolo moído	22		
100% Pedra britada	21		

Fazendo a média dos valores dos constituintes de cada grupo de resíduos, de granulometria mais grossa e mais fina, temos os valores da Tabela 26.

Tabela 26. Média dos constituintes dos diferentes grupos de RCD

	Resíduos de Construção		Resíduos de Materiais Betuminosos
	Granulometria mais Grossa	Granulometria mais Fina	
Betão	53,7%	34,7%	2,5%
Cerâmicos	10,9%	15,8%	0,1%
Agregados	32,8%	45,2%	14,6%
Vidros	0,2%	1,0%	0,0%
Materiais Betuminosos	1,4%	1,9%	82,4%

A constituição dos agregados é substancialmente diferente do RCD estudado por Conceição (2012), uma vez que este RCD tem cerca de 52% de material de alvenaria, um material que há partida tem uma menor resistência à fragmentação em relação ao betão ou pedra por exemplo. Dos trabalhos realizados em Portugal em que foi executado o ensaio *Los Angeles* em agregados reciclados mistos, o valor do coeficiente de *Los Angeles* é de 47, embora o valor de cerâmicos seja de 22%, bastante superior aos verificados neste trabalho. Sendo assim vai-se considerar uma classe LA<sub>40</sub> para os resíduos de construção de granulometria mais grossa, LA<sub>45</sub> para os resíduos de construção de granulometria mais fina, por ter uma % superior de material cerâmico e, uma classe LA<sub>30</sub> para os resíduos de materiais betuminosos, uma vez que estes são constituídos por material britado que normalmente tem um valor de LA na ordem dos 20. Mais uma vez se refere que estes valores são de referência para o desenvolvimento deste trabalho, não sendo este valor só dependente da constituição dos diferentes materiais, mas também porque estes apresentam resistências bastante distintas.

#### 4.3.2. Resistência ao desgaste por atrito

A resistência ao desgaste por atrito é efetuada de acordo com a norma portuguesa NP EN 1097-1:2012 - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (*micro-Deval*)”.

O ensaio consiste em medir o desgaste por fricção de amostras elementares de 500 g de agregados (com granulometria 10/14 mm) e uma carga abrasiva (5 kg), num cilindro rotativo (12000 voltas e 100 rpm). A distribuição granulométrica deve cumprir um dos requisitos:

- a) Entre 30 % e 40 % passando no peneiro de 11,2 mm, ou

b) Entre 60 % e 70 % passando no peneiro de 12,5 mm.

O coeficiente *micro-Deval* é a percentagem da amostra original com dimensão inferior a 1,6 mm, após rotação dos cilindros. Quanto menor for o coeficiente *micro-Deval*, maior será a resistência ao desgaste do agregado e, em princípio, maior será a sua resistência mecânica (Conceição, 2012).

Para cada amostra elementar é calculado o coeficiente *micro-Deval* ( $M_{DE}$ ), pela seguinte expressão:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5}$$

$M_{DE}$  - Coeficiente *micro-Deval* (com agregado húmido);

$m$  - Massa das partículas de dimensão superior a 1,6 mm, em g. (NP EN 1097-1:2012)

O valor declarado, é o valor médio dos dois ensaios, arredondados à unidade. O coeficiente *micro-Deval* deve ser declarado pela correspondente categoria (Tabela 27).

Tabela 27. Categorias para os valores máximos da resistência ao desgaste por atrito (NP EN 13043:2004)

Coeficiente <i>micro-Deval</i>	Categorias $M_{DE}$
$\leq 10$	10
$\leq 15$	15
$\leq 20$	20
$\leq 25$	25
$\leq 35$	35
$> 35$	$M_{DE}$ -Declarado
Não requerido	$MDE_{NR}$

Como neste trabalho não houve possibilidade de realizar este ensaio, vai tentar prever-se um valor que seja considerado razoável. Tal como no coeficiente de *Los Angeles*, Conceição (2012), foram reunidos valores de coeficientes de *micro-Deval* de vários trabalhos (Tabela 28).

Tabela 28. Valores do coeficiente *micro-Deval* em vários trabalhos (Conceição, 2012)

Autor	Norma	Material	Valor (%)
(EST IPCB, 2012)	NP EN 1097-1	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	55
(Pestana, 2008)	NP EN 1097-1	RCD - Cubos de betão britado (elementos estruturais tais como vigas, lajes e pilares)	48
(Ferreira, 2009)	NP EN 1097-1	RCD - Britagem de cubos de cubos betão ( vigas, lajes e pilares)	40
		RCD - Tijolo, azulejo e telha	37
(Woodside et al., 2011)	NR	RCD - Betão, tijolo e pedra	17,5

NR - Não referido

Pela junção da Tabela 28 e Tabela 27 vai considerar-se uma classe  $M_{DE\ 35}$  para os resíduos de construção de granulometria mais grossa,  $M_{DE\ 45}$  para os resíduos de construção de granulometria mais fina e, uma classe  $M_{DE\ 20}$  para os resíduos de materiais betuminosos, uma vez que estes são constituídos por material britado que normalmente tem um valor de  $M_{DE\ 20}$ .

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo da aplicabilidade dos resíduos estudados no presente trabalho, foi baseado em normas e especificações do LNEC, Instituto Nacional das Infraestruturas Rodoviárias (InIR), no CEEP e também em Normas Europeias.

### 5.1. Evolução temporal das amostras

Em primeiro lugar, é de bastante interesse fazer uma comparação a nível temporal entre todas as amostras recolhidas, isto é, comparar os resultados obtidos entre as próprias amostras uma vez que foram recolhidas em datas diferentes.

As amostras 1 e 2 foram recolhidas em Fevereiro de 2012, as amostras 3 e 4 foram recolhidas em Março de 2012, as amostras 5, 6 e 7 foram recolhidas em Julho de 2012 e a amostra 8 foi recolhida em Setembro de 2012.

A nível de granulometria, a amostra 4, foi a única que apresentou material retido no peneiro de 63 mm, ou seja, de todas as amostras, foi a que apresentou uma composição mais grosseira. As amostras 6 e 8, apresentaram uma curva granulométrica relativamente parecida, o que quer dizer que os seus materiais constituintes apresentam semelhanças a nível de tamanhos. As amostras 1 e 8, apresentaram também algumas semelhanças a nível granulométrico, especialmente nos agregados mais finos, nomeadamente a partir do peneiro de 4 mm até ao de 0,063 mm. A amostra 5 foi a amostra que se apresentou com mais percentagem de material fino na sua constituição, podendo ser comparada diretamente com a amostra 1 quanto à composição granulométrica. As amostras 3, 4 e 8, apresentaram uma percentagem de finos, também muito semelhante (correspondente ao peneiro de 0,063 mm e ao material recolhido no fundo da torre de peneiros). Por fim, entre as amostras 2 e 7, ambas de RCD betuminoso, pode verificar-se que a amostra 7 apresentava material mais grosseiro do que a amostra 2. Isto resultou possivelmente de uma de duas hipóteses, ou o material das amostras proveio de camadas betuminosas diferentes ou, poderá ter sido passado pelo crivo na empresa de reciclagem, ficando assim com partículas de diferentes tamanhos.

Observando os resultados obtidos no ensaio do azul de metileno, foi verificado que as amostras 1, 3, 4, 5, 6 e 8, apresentaram resultados iguais, isto é 1,25 g/kg. A amostra 2, de

RCD betuminoso, apresentou um resultado ligeiramente inferior, o qual foi obtido pela média de dois ensaios realizados, tendo um valor médio de 1,125 g/kg. A amostra 7, também de RCD betuminoso, foi a única em que se obteve um resultado bastante diferente, de apenas 0,75 g/kg. A partir destes resultados, pode dizer-se que as amostras 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8 são constituídas por materiais pouco sensíveis à água e a amostra 7 é constituída por materiais insensíveis à água.

Analisando os resultados obtidos através do ensaio do equivalente de areia, pode verificar-se que as amostras 2, 7 e 8, todas recolhidas em datas diferentes, apresentaram resultados semelhantes de valor 83, 84 e 81 respetivamente. Sendo que as amostras 2 e 7 são de RCD betuminoso e a amostra 8 não. As amostras 1, 3 e 6, apesar de também terem sido todas recolhidas em datas diferentes, apresentaram resultados semelhantes entre si de 72, 67 e 69 respetivamente. As amostras 4 e 5 apresentaram valores de SE de 60 e 55. Tendo em conta estes valores, pode afirmar-se que todas as amostras são constituídas por materiais maioritariamente não plásticos.

Comparando agora as amostras quanto à absorção de água e massa volúmica, pode ver-se que os valores obtidos, em relação à massa volúmica, para as amostras 1, 2, 3, 4 e 5 são bastante próximos entre si. Os valores das amostras 6, 7 e 8 são também próximos entre si. Se se tentar comparar os valores das amostras 2 e 7, ambas de RCD betuminoso, nota-se que existe alguma diferença entre elas, embora não muito significativa. Quanto à absorção de água, os valores obtidos variam um pouco mais entre amostras, sendo que os valores mais semelhantes são entre as amostras 1, 3 e 4, por outro lado, entre as amostras 2 e 7 e também entre as amostras 5, 6 e 8. A amostra 2 apresenta um valor ligeiramente mais baixo que todas as outras e por sua vez a amostra 8, apresenta um valor bem mais elevado.

## **5.2. Aplicação de RCD em infraestruturas rodoviárias**

### **5.2.1. Em camadas de aterro**

A aplicabilidade de RCD em camadas de aterro será apenas efetuada para a Amostra 5, uma vez que é a única amostra para a qual se tem todos os ensaios necessários para o seu estudo. O estudo será feito com recurso ao CEEP, na secção de Terraplenagens (14\_01 versão de Fevereiro de 2009).

Em primeiro lugar, deve ser definido o tipo de material (solo, solo-enrocamento ou enrocamento) a aplicar. Pela consulta do referido documento, verifica-se que a amostra é considerada como Solo, uma vez que a % de retidos no peneiro ASTM ¾’’ é inferior a 30%. De seguida, deve-se efetuar a classificação do solo, baseado na classificação unificada de solos, chegando a uma classificação de GM – Cascalho Siltoso. O valor de CBR a 95% de C.R obtido para esta amostra é de 23%. Pela análise do Quadro 1, do referido documento, é possível verificar que a amostra 5 é aplicável na Parte Inferior do Aterro, na Parte Superior do Aterro e também no Corpo do Aterro.

Para a utilização da amostra 5 em Leito de Pavimento é exigida a verificação de mais algumas características (Tabela 29).

Tabela 29. Características mínimas dos solos a aplicar em Leitos de Pavimento (EP, 2012)

Características	Requisitos mínimos	Amostra 5
Dimensão máxima	75 mm	31,5 mm
% Finos, máximo	20%	13%
w <sub>l</sub> , máximo	25%	Amostra não plástica
IP, máximo	6%	
S E, mínimo	30%	55%
CBR <sub>95%</sub> , mínimo	10%	23%
Expansibilidade (CBR), máximo	1,5%	0,1%
% de Matéria Orgânica	0%	0%

Da análise da Tabela anterior é possível verificar que a amostra 5 cumpre todos os requisitos necessários para ser aplicada em Leito de Pavimento. A dimensão máxima do agregado é de 31,5 mm, a % de finos é cerca de 13%, a amostra é não plástica, apresenta um valor de equivalente de areia de 55%. Do ensaio CBR obteve-se um valor de 23% a 95% de C.R e uma expansibilidade de 0,1%.

### 5.2.2. Em camadas não ligadas

O estudo da aplicabilidade dos RCD em camadas não ligadas (base e sub-base) é feito com base no capítulo 14.03 (versão de janeiro de 2012) do CEEP, nomeadamente pela análise do Quadro 14.03.1c (Tabela 30). Neste Quadro são definidos valores mínimos de certos parâmetros presentes nas normas EN 13285 e EN 13242 para as bases ou sub-bases granulares. A partir da definição do tipo e da classe do RCD é indicado, na Tabela 9, o campo de aplicação para esses agregados.

Tabela 30. Camadas não ligadas – Requisito/Propriedades dos agregados reciclados (EP, 2012)

Camadas não ligadas - Requisito/Propriedades dos agregados reciclados							
Propriedades / Requisitos	Refª Normativa	Camada de sub-base			Camada de base		
		AGER1 (B ou C)	AGER2 (B ou C)	AGER3 (B)	AGER1 (B ou C)	AGER2 (B ou C)	AGER3 (B)
Parâmetros geométricos e de natureza							
Dimensão	NP EN 13285	0/31.5					
Sobretamanhos (NP EN 933-1)	NP EN 13285	OC <sub>75</sub>	OC <sub>80</sub>	OC <sub>85</sub>	OC <sub>75</sub>	OC <sub>80</sub>	OC <sub>85</sub>
Classe de granulometria (NP EN 933-1)	NP EN 13285	G <sub>B</sub>		G <sub>A</sub>	G <sub>B</sub>		G <sub>A</sub>
Teor de finos (NP EN 933-1)	NP EN 13285	UF <sub>9</sub> LF <sub>2</sub>			UF <sub>9</sub> LF <sub>2</sub>		
Qualidade dos finos (NP EN 933-9) <sup>(a)</sup>	NP EN 13242+A1	MB <sub>0/D</sub> ≤ 1 g/kg	MB <sub>0/D</sub> ≤ 0,8 g/kg		MB <sub>0/D</sub> ≤ 1 g/kg	MB <sub>0/D</sub> ≤ 0,8 g/kg	
Percentagem de partículas totalmente esmagadas ou partidas e totalmente roladas em agregados grossos (NP EN 933-5)	NP EN 13242+A1	C <sub>50/30</sub>	C <sub>50/10</sub>	C <sub>90/3</sub>	C <sub>50/30</sub>	C <sub>50/10</sub>	C <sub>90/3</sub>
Parâmetros de comportamento mecânico							
Resistência à fragmentação e resistência ao desgaste (NP EN 1097-2 e NP EN 1097-1)	NP EN 13242+A1	LA <sub>45</sub> e MDE <sub>45</sub> ou LA/MDE ≤85	LA <sub>40</sub> e MDE <sub>35</sub> ou LA/MDE ≤75	LA <sub>40</sub> e MDE <sub>35</sub> ou LA/MDE ≤70	LA <sub>40</sub> e MDE <sub>35</sub> ou LA/MDE ≤85	LA <sub>40</sub> e MDE <sub>35</sub> ou LA/MDE ≤75	LA <sub>40</sub> e MDE <sub>35</sub> ou LA/MDE ≤70

(a) - MB<sub>0/D</sub> - 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.

Não será aqui discutida a percentagem de partículas totalmente esmagadas ou partidas e totalmente roladas em agregados grossos, pois não foi possível realizar esse ensaio.

Nesta análise será apenas discutida a aplicabilidade dos RCD de construção, de origem não betuminosa, pois não é possível definir uma classe (B ou C) para os resíduos de materiais betuminosos. Na Tabela 31 ilustram-se as diferentes classificações dos agregados.

Tabela 31. Classificações dos agregados segundo os requisitos/propriedades dos agregados reciclados do CEEP

	Amos tra 1	Amos tra 3	Amos tra 4	Amos tra 5	Amos tra 6	Amos tra 8
Dimensão	0/16	0/31,5	0/63	0/31,5	0/31,5	0/31,5
Classe	C	C	B	C	C	C
Sobretamanhos	OC <sub>75</sub>	OC <sub>85</sub>	OC <sub>90</sub>	OC <sub>90</sub>	OC <sub>80</sub>	OC <sub>90</sub>
Classe de granulometria	G <sub>C</sub>	G <sub>A</sub>	G <sub>O</sub>	G <sub>U</sub>	G <sub>A</sub>	G <sub>A</sub>
Teor de finos	UF <sub>7</sub> LF <sub>4</sub>	UF <sub>7</sub> LF <sub>4</sub>	UF <sub>3</sub> LF <sub>2</sub>	UF <sub>15</sub> LF <sub>8</sub>	UF <sub>5</sub> LF <sub>2</sub>	UF <sub>7</sub> LF <sub>4</sub>
Qualidade dos finos (g/kg)	MB <sub>0/16</sub> = 0,36	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,36	MB <sub>0/63</sub> = 0,10	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,75	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,32	MB <sub>0/31,5</sub> = 0,34
Resistência à Fragmentação (LA)	LA <sub>45</sub>	LA <sub>40</sub>	LA <sub>40</sub>	LA <sub>45</sub>	LA <sub>40</sub>	LA <sub>40</sub>
Resistência ao Desgaste (micro-Deval)	M <sub>DE 40</sub>	M <sub>DE 35</sub>	M <sub>DE 35</sub>	M <sub>DE 40</sub>	M <sub>DE 35</sub>	M <sub>DE 35</sub>

Segundo o CEEP a dimensão admissível dos agregados é 0/31,5. Cumprem este requisito, as amostras 3, 5, 6 e 8.

Todas as amostras discutidas neste ponto, foram classificadas como sendo de classe C, exceto a amostra 4 e o CEEP admite esta classe para AGER1, 2. Em relação ao sobretamanho, a amostra 1 pode ser usada como sendo do tipo AGER 1, a amostra 6 poderá ser do tipo AGER 1 ou AGER 2, enquanto as restantes amostras podem ser do tipo AGER 1, 2.

Pela classe de granulometria verifica-se que as amostras 1, 4 e 5 não cumprem o requisito mínimo para serem usadas neste tipo de camadas, enquanto as restantes amostras podem ser do tipo AGER 1, 2 por serem do tipo G<sub>A</sub>.

Quanto ao teor de finos admissível, máximo e mínimo, verifica-se que todas as amostras cumprem os requisitos para os 3 tipos de agregados, exceto a amostra 5 que apresenta uma classificação UF<sub>15</sub>, sendo que o CEEP apresenta para este parâmetro uma classificação máxima de UF<sub>9</sub>.

Analisando a qualidade dos finos, todas as amostras cumprem os requisitos para os 3 tipos de agregados, uma vez que apresentam todas um MB<sub>0/D</sub> < 0,8 g/kg.

Em relação às características mecânicas, as amostras 1 e 5 cumprem os requisitos para o AGER 1, enquanto as restantes amostras cumprem a classe AGER 1 e 2.

Pela análise baseada no CEEP, apesar de se ter amostras que cumprem alguns dos requisitos admissíveis, apenas as amostras 3, 6 e 8 cumprem todos os requisitos para o tipo AGER 2, tanto para as camadas de sub-base como para as camadas de base. Sendo assim, baseado na Tabela 9, podem-se usar os agregados 3, 6 e 8 em camadas de sub-base em estradas com um  $TMD_p$  inferior a 150 veículos e, em camadas de base em estradas com um  $TMD_p$  inferior a 150 veículos.

### 5.2.3. Em camadas ligadas

Em camadas ligadas, o CEEP apresenta diferentes especificidades para cada tipo de camadas existentes. Assim optou-se por fazer a discussão de resultados para estas camadas, com base no documento “Construção e reabilitação de pavimentos - Agregados” do InIR, nomeadamente o capítulo 3.1 “Requisitos dos agregados grossos, finos e de granulometria extensa para misturas betuminosas e revestimentos superficiais”.

Neste ponto será apenas discutida a aplicabilidade das amostras 2 e 7, pois são as que têm origem em camadas betuminosas logo, teoricamente, possuem um potencial de aplicação maior nesta situação. Na Tabela 32 ilustram-se os requisitos mínimos exigidos pelo InIR nos ensaios efetuados e os valores obtidos nas amostras 2 e 7.

Tabela 32. Valores exigidos pelo InIR e valores obtidos nas amostras 2 e 7

	InIR	Amos tra 2	Amos tra 7
Clas se de granulometria	NA	$G_{A 85}$	$G_{A 90}$
Conteudo de Finos	NA	$f_3$	$f_3$
E quivalente de Areia	Mínimo $S E_{55}$	$S E_{55}$	$S E_{55}$
Teor de finos	Máximo $MB_2$	$MB_2$	$MB_2$
Índice de Achatamento	Depende da camada	$FI_{10}$	$FI_{10}$
Massas Volumicas	A declarar	-	-
Absorção de água	Depende da camada	3,61%	4,78%
Resistência à fragmentação	Depende da camada	$LA_{30}$	$LA_{30}$
Resistência ao desgaste por atrito	Depende da camada	$M_{DE 20}$	$M_{DE 20}$

Em relação à qualidade dos finos, ambas as amostras são classificadas como categoria  $SE_{55}$ , uma vez que o valor do equivalente de areia é, para todas elas, igual ou superior a 55. Relativamente aos valores do azul de metileno, as 2 amostras correspondem à categoria  $MB_2$ , (pois o teor em finos é menor que 3% dispensando-se para isso o valor de MB para a fração 0/0,125 mm), sendo assim cumprido este requisito.

Quanto ao índice de achatamento, verifica-se que as categorias requeridas, variam conforme o tipo de camada a que se destina a aplicação do agregado. A amostra 2 e a amostra 7 poderiam ser aplicadas em todas as camadas, uma vez que apresentam uma classe  $FI_{10}$ .

Em relação às massas volúmicas não há qualquer valor de referência, sendo apenas necessário esse valor ser declarado. Em relação à absorção de água, o valor máximo depende da camada em que se pretende aplicar o agregado. Sendo assim, nem a amostra 2 nem a 7, poderiam ser aplicadas. No entanto, embora os valores sejam um pouco elevados ainda "são aceitáveis" tendo em vista que não se conhece o comportamento deste tipo de agregados. Como tal, considera-se que as amostras 2 e 7 poderão ser aplicadas em camadas de base, ligação e regularização.

Em relação aos parâmetros mecânicos, pelo valor da resistência à fragmentação, ambas as amostras podiam ser aplicadas em qualquer camada de pavimento, no entanto, pelo valor

da resistência ao desgaste por atrito ambas as amostras só poderiam ser aplicadas em camadas de base, ligação e regularização.

Tendo em conta que a amostra 7 apresenta uma dimensão 0/31,5, esta amostra apenas pode ser aplicada na camada AC 32 base. Quanto à amostra 2, que apresenta uma dimensão 0/16, apenas pode ser aplicada na camada AC 16 bin. Na Tabela 33 apresenta-se o fuso granulométrico dos agregados, exigido para a camada AC 32 base e a granulometria da amostra 7, bem como o fuso granulométrico dos agregados, exigido para a camada AC 16 bin e a granulometria da amostra 2.

Tabela 33. Requisitos do fuso granulométrico para a camada AC 32 base e para a camada AC 16 bin

Abertura do Peneiro (mm)	AC 32 base	Amostra 7	Abertura do Peneiro (mm)	AC 16 bin	Amostra 2
40	100	100	20	100	100
31,5	90-100	95,8	16	90-100	87
20	68-93	85	10	68-83	74,175
6,3	40-60	46	4	39-57	52,8
2	26-41	25,3	2	27-41	38,6
0,5	12-26	9,6	0,5	11-23	17,3
0,125	4-14	4,6	0,125	7-12	5,3
0,063	2-7	2	0,063	5-9	3,6

Verifica-se que a amostra 7 não cumpre o fuso granulométrico exigido nos peneiros 2 e 0,5 mm e a amostra 2 não cumpre o fuso granulométrico exigido nos peneiros 31,5, 0,125 e 0,063mm. Este facto deve-se certamente a estas camadas terem sido fabricadas ainda numa especificação anterior, com um fuso granulométrico ligeiramente diferente para as camadas equivalentes. No entanto, com uma ligeira correção granulométrica nos agregados finos, pode considerar-se que a amostra 7 pode ser aplicada na camada AC 32 base e amostra 2 na camada AC 16 bin.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo teve como principal objetivo, estudar a aplicabilidade de RCD na construção de estradas. Para isso, foram recolhidas 8 amostras de RCD (6 de construção, de origem não betuminosa e 2 de origem betuminosa). Sobre estas amostras foram realizados os seguintes ensaios, ensaio de classificação dos agregados grossos reciclados, análise granulométrica, índice de achatamento, teor de finos através dos ensaios do azul de metileno e do equivalente de areia e massa volúmica e absorção de água. Especificamente para a amostra 5, foram realizados também os ensaios *Proctor* e CBR e para as amostras 2 e 7, o ensaio para a determinação do teor em betume. Considera-se que os objetivos foram atingidos pois, foi possível com os ensaios realizados, caracterizar as diferentes amostras, e através dessa caracterização, estudar a aplicabilidade das amostras nas diferentes camadas de estradas.

Os RCD apresentam um grande potencial de uso na construção das diferentes camadas de uma estrada, com evidentes vantagens a nível económico e ambiental, reduzindo a necessidade de zonas de empréstimo/vazadouros.

Pela descrição visual efetuada, optou-se por agrupar as amostras com características previsivelmente semelhantes em três grupos distintos, resíduos de construção de granulometria mais fina (Am1 e Am5), resíduos de construção de granulometria mais grossa (Am3, Am4, Am6 e Am8) e, resíduos de origem betuminosa (Am2 e Am7).

Relativamente à constituição das amostras, todas as de origem em resíduos de construção, apresentam uma % de betão, agregados naturais e cerâmicos superiores a 90%. Todas estas amostras apresentam uma % de cerâmicos na ordem dos 15% exceto a amostra 4 que apresenta 4% de cerâmicos. As amostras de origem betuminosa apresentam, como seria de esperar, uma elevada percentagem de materiais betuminosos e de agregados não ligados, apresentando também alguns resíduos de betão. Nas amostras de origem betuminosa optou-se por não se dar qualquer uma das duas classes existentes no CEEP (B ou C), uma vez que esta divisão não foi pensada em resíduos deste tipo, não se enquadrando minimamente os valores do ensaio e por isso não se estudou estas amostras para camadas não ligadas de pavimentos.

Em relação à análise granulométrica, é possível verificar que as amostras 3, 6 e 8 apresentam uma granulometria muito semelhante, enquanto que a amostra 4 é a que apresenta a granulometria mais grosseira. A amostra 5 é a que apresenta granulometria mais fina, com

uma percentagem significativa de finos (12,8%). As amostras de origem betuminosa apresentam uma granulometria extensa, o que seria de esperar, uma vez que os agregados para o fabrico das misturas terão sido seleccionados.

Tendo em conta o índice de achatamento, foi possível verificar que as amostras de origem betuminosa são as que apresentam um índice de achatamento mais baixo, o que seria expectável uma vez que os agregados usados no fabrico de misturas betuminosas são tendencialmente cúbicos, logo com um baixo índice de achatamento. Em relação às amostras de construção, o valor do índice de achatamento não depende da granulometria mas, consegue-se sim, encontrar uma relação entre o valor do ensaio e a quantidade de elementos cerâmicos das amostras.

Em relação ao ensaio do azul de metileno, verificou-se que as amostras de origem em resíduos de construção apresentavam todas o mesmo valor de azul de metileno para a fração estudada, sendo agregados pouco sensíveis à água. As amostras de origem betuminosa apresentam valores de azul de metileno mais baixo, o que mais uma vez seria expectável pela origem destas amostras. Pelo ensaio do equivalente de areia, é possível verificar que todas as amostras são não plásticas. Os resíduos de construção de granulometria mais fina apresentam um valor mais baixo de equivalente de areia em relação às amostras com granulometria mais grosseira. No entanto e como seria de esperar as amostras que apresentam um valor mais elevado de equivalente de areia são as amostras de origem betuminosa. Ao contrário do que seria esperado, os valores do azul de metileno e do equivalente de areia não apresentam uma relação definida.

Embora não tenham sido realizados os ensaios de *Los Angeles* e *micro-Deval*, adotou-se, com os dados de ensaios disponíveis e na bibliografia consultada, uma classe para ambos os ensaios. Sendo assim considerou-se uma classe LA<sub>40</sub> e M<sub>DE 35</sub> para os resíduos de construção de granulometria mais grossa e LA<sub>45</sub> e M<sub>DE 45</sub> para os resíduos de construção de granulometria mais fina, por ter uma % superior de material cerâmico. Para os resíduos de materiais betuminosos considerou-se uma classe LA<sub>30</sub> e M<sub>DE 20</sub>.

Na posse destes dados, estudou-se a aplicabilidade das diferentes amostras para aplicação em estradas. Para a amostra 5, foi estudada a sua aplicabilidade em Terraplenagens, as amostras 3, 4, 6 e 8 foram estudadas para camadas não ligadas (base e sub-base) e finalmente, as amostras 2 e 7 foram analisadas para camadas ligadas. Na Tabela 34 está

ilustrado, em forma de esquema, a aplicabilidade de cada amostra nas diferentes camadas de uma estrada.

Tabela 34. Aplicabilidade de cada amostra nas diferentes camadas de uma estrada

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Aplicabilidade	Possível (1)	Camada ligada: AC 16 bin	Camada não ligada: sub-base e $TMD_p < 150$ base e $TMD_p < 150$	Possível (1)
	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Aplicabilidade	PIA, Corpo de Aterro, PSA e Leito de Pavimento	Camada não ligada: sub-base $TMD_p < 150$ base $TMD_p < 150$	Camada ligada: AC 32 base	Camada não ligada: sub-base e $TMD_p < 150$ base $TMD_p < 150$

Possível (1) - Aplicação possível em terraplenagens requerendo ensaios complementares

Possível (2) - Não possível para camadas ligadas; aplicação possível em terraplenagens requerendo ensaios complementares

As amostras 1 e 4 não tinham os requisitos suficientes para serem aplicadas em camadas não ligadas de pavimentos. No entanto, a amostra 4, se tivesse sido truncada na dimensão 0/31,5, poderia, possivelmente, vir a ser aplicada nestas camadas. A amostra 1 apresenta uma dimensão inferior ao exigido para camadas não ligadas em pavimentos, no entanto cumpre todos os requisitos para a aplicação em camadas de aterro, faltando apenas o valor de CBR para concretizar esta aplicação. Assim, a prévia seleção da dimensão máxima do agregado é importante para o futuro uso a dar ao resíduo. A absorção de água continua a ser uma das principais limitações no uso de RCD, pois a maioria das amostras estudadas, apresentam valores mais elevados que os permitidos, nomeadamente para a aplicação em camadas betuminosas, razão pela qual não foi estudada a aplicabilidade dos RCD de construção em camadas ligadas.

As principais dificuldades sentidas na realização deste trabalho prenderam-se com a previsão inicial da quantidade de material para os ensaios necessários à caracterização efetuada.

O estudo de RCD, tanto aplicados em camadas ligadas como não ligadas, é ainda muito reduzido em Portugal, por isso, como trabalhos futuros sugere-se a aplicação experimental de RCD em camadas ligadas realizando para isso, uma série de estudos laboratoriais para a determinação do teor ótimo de betume da mistura. Outro trabalho interessante seria a realização de vários trechos experimentais, um com pavimento com agregados naturais e outros com agregados reciclados nas diferentes camadas, efetuando de seguida o ensaio FWD *Falling Weight Deflectometer* para estudar a resposta destes. Por fim, seria também

interessante e oportuno, o estudo da minimização dos efeitos da absorção de água nos agregados reciclados para a sua mais ampla aplicação em estradas.

## BIBLIOGRAFIA

- AggRegain (2010). "Definition of waste." Retrieved 26/11, 2011, from [http://aggregain.wrap.org.uk/waste\\_management\\_regulations/background/definition\\_of.html](http://aggregain.wrap.org.uk/waste_management_regulations/background/definition_of.html).
- Ambilei (2011). "Gestão de Resíduos, Produtos para a Construção, Demolição & Reciclagem." Retrieved 13/09/2012, 2012, from <http://www.ambilei.pt/index.php>.
- APA (2011). "Resíduos da Construção e Demolição - Perguntas Frequentes." Retrieved 25/11, 2011, from <http://www.apambiente.pt/politicasambiente/Residuos/fluxresiduos/respgestresiduo/RCD/Paginas/default.aspx>.
- ASTM D 2172:2011 Extração Quantitativa de Betume de Misturas Betuminosas. **ASTM D 2172**.
- Bellis, M. (2008). "History of Roads - Inventions for Traffic Management." Retrieved 3/10/2012, 2012, from [inventors.about.com/od/rstartinventions/a/History-Of-Roads.htm](http://inventors.about.com/od/rstartinventions/a/History-Of-Roads.htm).
- Branco, F., P. Pereira and L. P. Santos (2005). Pavimentos Rodoviários. Coimbra, Almedina.
- Brito, J. d. (2006). A reciclagem na casa do futuro. AVEIRODOMUS - A reciclagem de resíduos da construção e demolição. Aveiro.
- Conceição, A. C. D. M. d. (2012). Caracterização de Resíduos de Construção e Demolição com vista à sua aplicação em misturas betuminosas. Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Castelo Branco  
Escola Superior de Tecnologia. **Mestrado**.
- DIRETIVAS (2008). "O PARLAMENTO EUROPEU E O CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA." Jornal Oficial da União Europeia.
- EP (2012). Caderno de Encargos Tipo Obra.
- Ferreira, J. F. B. (2009). Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego. Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- Forbes, R. J. (1993). Studies in Ancient Technology. New York, E.J. Brill.
- Hongping, Y. and L. Weisheng (2011). "A framework for understanding waste management studies in construction." ELSEVIER: 1252-1260.
- INE (2010). Estatísticas do Ambiente, Instituto Nacional de Resíduos.
- InIR (2009). Construção e Reabilitação de Pavimentos - AGREGADOS, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias.

JAЕ (1995). Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV). Lisboa, Junta Autónoma de Estradas.

Jesus, R. d. (2011). Armazenamento das garrafas PET, AE.

Landes, L. (2011). "What is waste?". Retrieved 26/11, 2011, from <http://www.zerowasteamerica.org/WhatIsWaste.htm>.

Lay, M. G. (1992). Ways Of The World Rutgers University Press.

LNEC (2009-a)). Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte. **LNEC E 474 - 2009**.

LNEC (2009-b)). Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos. **LNEC E 473 - 2009**.

LNEC (2009-c)). Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central. **LNEC E 472 - 2009**.

LNEC (2009-d)). Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. **LNEC E 471 - 2009**.

LNEC E 197-1966 Ensaio de compactação. Lisboa, LNEC. **LNEC E 197-1966**.

LNEC E 198-1967 Determinação do CBR. Lisboa, LNEC. **LNEC E 198-1967**.

Luzia, R. C. (2008). Camadas não ligadas em pavimentos rodoviários, Edições Almedina.

Marques, H. and H. Gonçalves (2012). GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD). II Jornadas do Curso do de Engenharia do Ambiente e Biológica "Sustentabilidade, Recursos e Resíduos". Tomar.

Meizhu, C., L. Juntao and W. Shaopeng (2011). "Potencial of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixtures." ELSEVIER: 3090-3914.

Nordeste, R. d. (2011). "Resíduos e tipos de resíduos." Retrieved 27/11, 2011, from <http://www.residuosdonordeste.pt/residuosETiposDeResiduos>.

NP EN 933-1:2000 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise Granulométrica. Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 933-1:2000**.

NP EN 933-3:2002 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento. Lisboa, Instituto Nacional da Qualidade. **NP EN 933-3:2002**.

NP EN 933-8:2002 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos - Ensaio do equivalente de areia. Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 933-8:2002**.

NP EN 933-11:2011 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. . Parte 11: Ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados. . Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 933-11:2011(Ed. 1)**

NP EN 1097-1:2012 Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. . Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval). Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 1097-1:2012.**

NP EN 1097-2:2011 Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação. Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 1097-2:2011.**

NP EN 1097-6:2002, -. E. d. p. m. e. f. d. a., Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 1097-6.**

NP EN 1097-6:2002 Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 1097-6:2002.**

NP EN 13043:2004 Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação. Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 13043:2004/AC:2010.**

NP EN 13242:2010 Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. . Lisboa, Instituto Português da Qualidade. **NP EN 13242-:2002+A1:2010 (Ed. 2)**

Ruivo, J. and J. Veiga (2004). Resíduos de Construção e Demolição: Estratégia para um Modelo de Gestão. Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico. **Licenciatura.**

Santos, J. A. (2008). Obras Geotécnicas - Compactação - Elementos Teóricos.

Silva, W. M., R. d. C. Ferreira, L. O. d. Souza and A. M. Silva (2010). Gerenciamento de resíduos da construção civil e demolição e sua utilização como base, sub-base e mistura betuminosa em pavimento urbano em Goiânia - GO. Revista Brasileira de Ciências Ambientais.

UE (2011). Supporting Environmentally Sound Decisions for Construction and Demolition (C&D) Waste Management. S. Manfredi; and R. Pant, European Commission Joint Research Centre  
Institute for Environment and Sustainability.

UE, E. S. d. l. d. (2006). "Estratégia de prevenção e reciclagem de resíduos." Retrieved 26/11, 2011, from [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/sustainable\\_development/l28168\\_pt.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/sustainable_development/l28168_pt.htm).

Vegas, Ibañez, S. José and Urzelai (2007). "Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction." ELSEVIER: 565-574.

Wilford, J. N. (1994). "World's Oldest Paved Road Found in Egypt." New York Times.

Woodside, A. R., W. D. H. Woodward and J. McElhinney (2011). THE POTENTIAL USE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE IN ROAD CONSTRUCTION IN IRELAND. 5th International Conference 'Bituminous Mixtures and Pavements'. Thessaloniki, Greece.

# ANEXO I





Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Ensaio das propriedades geométricas dos agregados

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 1

**Data**

16 de Fevereiro de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
 M<sub>0</sub>= 26572 g  
 M<sub>1</sub>= 15256 g  
 M<sub>4</sub>= 11316 g  
 M<sub>63</sub>= 0 g  
 M<sub>2</sub>= 15034 g  
 M<sub>3</sub>= 2116 g

Constituinte	Volume , cm <sup>3</sup>	Proporção, cm <sup>3</sup> /kg
FL	V <sub>FL</sub> = 53	1000 x V <sub>FL</sub> /M <sub>1</sub> = 3.5

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	M <sub>X</sub> = 1.8	100 x M <sub>X</sub> /M <sub>1</sub> = 0.01
Rc	M <sub>Rc</sub> = 918.5	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rc</sub> /M <sub>3</sub> )= 42.79
Rb	M <sub>Rb</sub> = 356.8	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rb</sub> /M <sub>3</sub> )= 16.62
Ru	M <sub>Ru</sub> = 773.9	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ru</sub> /M <sub>3</sub> )= 36.05
Rg	M <sub>Rg</sub> = 39.1	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rg</sub> /M <sub>3</sub> )= 1.82
Ra	M <sub>Ra</sub> = 23.2	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ra</sub> /M <sub>3</sub> )= 1.08
		Σ P = 98.37



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Ensaios das propriedades geométricas dos agregados

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 2

**Data**

16 de Fevereiro de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
M<sub>0</sub>= 20890 g  
M<sub>1</sub>= 14469 g  
M<sub>4</sub>= 6418 g  
M<sub>63</sub>= 0 g  
M<sub>2</sub>= 14423 g  
M<sub>3</sub>= 2275 g

Constituinte	Volume , cm <sup>3</sup>	Proporção, cm <sup>3</sup> /kg
FL	V <sub>FL</sub> = 32	1000 x V <sub>FL</sub> /M <sub>1</sub> = 2.2

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	M <sub>X</sub> = 0.0	100 x M <sub>X</sub> /M <sub>1</sub> = 0.00
Rc	M <sub>Rc</sub> = 61.5	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rc</sub> /M <sub>3</sub> )= 2.70
Rb	M <sub>Rb</sub> = 3.5	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rb</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.15
Ru	M <sub>Ru</sub> = 429.5	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ru</sub> /M <sub>3</sub> )= 18.82
Rg	M <sub>Rg</sub> = 0.0	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rg</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.00
Ra	M <sub>Ra</sub> = 1774.0	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ra</sub> /M <sub>3</sub> )= 77.74
		Σ P = 99.41



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Ensaio das propriedades geométricas dos agregados

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 3

**Data**

16 de Março de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
 M<sub>0</sub>= 52872 g  
 M<sub>1</sub>= 38180 g  
 M<sub>4</sub>= 14692 g  
 M<sub>63</sub>= 0 g  
 M<sub>2</sub>= 37901 g  
 M<sub>3</sub>= 7393 g

Constituinte	Volume , cm <sup>3</sup>	Proporção, cm <sup>3</sup> /kg
FL	V <sub>FL</sub> = 31	1000 x V <sub>FL</sub> /M <sub>1</sub> = 0.8

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	M <sub>X</sub> = 103.0	100 x M <sub>X</sub> /M <sub>1</sub> = 0.27
Rc	M <sub>Rc</sub> = 3326.7	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rc</sub> /M <sub>3</sub> )= 44.67
Rb	M <sub>Rb</sub> = 711.6	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rb</sub> /M <sub>3</sub> )= 9.56
Ru	M <sub>Ru</sub> = 3096.3	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ru</sub> /M <sub>3</sub> )= 41.58
Rg	M <sub>Rg</sub> = 13.3	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rg</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.18
Ra	M <sub>Ra</sub> = 244.8	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ra</sub> /M <sub>3</sub> )= 3.29
		Σ P = 99.54



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Ensaio das propriedades geométricas dos agregados

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 4

**Data**

16 de Março de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
M<sub>0</sub>= 53846 g  
M<sub>1</sub>= 44342 g  
M<sub>4</sub>= 6615 g  
M<sub>63</sub>= 0 g  
M<sub>2</sub>= 43963 g  
M<sub>3</sub>= 8348 g

Constituinte	Volume , cm <sup>3</sup>	Proporção, cm <sup>3</sup> /kg
FL	V <sub>FL</sub> = 16	1000 x V <sub>FL</sub> /M <sub>1</sub> = 0.4

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	M <sub>X</sub> = 24.5	100 x M <sub>X</sub> /M <sub>1</sub> = 0.06
Rc	M <sub>Rc</sub> = 6007.5	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rc</sub> /M <sub>3</sub> )= 71.35
Rb	M <sub>Rb</sub> = 301.1	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rb</sub> /M <sub>3</sub> )= 3.58
Ru	M <sub>Ru</sub> = 1992.6	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ru</sub> /M <sub>3</sub> )= 23.67
Rg	M <sub>Rg</sub> = 12.6	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rg</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.15
Ra	M <sub>Ra</sub> = 31.4	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ra</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.37
		Σ P = 99.17



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Ensaios das propriedades geométricas dos agregados

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 5

**Data**

18 de Julho de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
 M<sub>0</sub>= 20351 g  
 M<sub>1</sub>= 10451 g  
 M<sub>4</sub>= 10363 g  
 M<sub>63</sub>= 0 g  
 M<sub>2</sub>= 10409 g  
 M<sub>3</sub>= 2697 g

Constituinte	Volume , cm <sup>3</sup>	Proporção, cm <sup>3</sup> /kg
FL	V <sub>FL</sub> = 41	1000 x V <sub>FL</sub> /M <sub>1</sub> = 3.9

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	M <sub>X</sub> = 38.8	100 x M <sub>X</sub> /M <sub>1</sub> = 0.37
Rc	M <sub>Rc</sub> = 724.5	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rc</sub> /M <sub>3</sub> )= 26.75
Rb	M <sub>Rb</sub> = 403.7	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rb</sub> /M <sub>3</sub> )= 14.90
Ru	M <sub>Ru</sub> = 1474.1	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ru</sub> /M <sub>3</sub> )= 54.43
Rg	M <sub>Rg</sub> = 5.9	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rg</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.22
Ra	M <sub>Ra</sub> = 74.9	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ra</sub> /M <sub>3</sub> )= 2.76
		Σ P = 99.43



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Ensaios das propriedades geométricas dos agregados**

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 6

**Data**

18 de Julho de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
 $M_0 = 50367$  g  
 $M_1 = 37397$  g  
 $M_4 = 12944$  g  
 $M_{63} = 0$  g  
 $M_2 = 36937$  g  
 $M_3 = 3621$  g

Constituinte	Volume , cm <sup>3</sup>	Proporção, cm <sup>3</sup> /kg
FL	$V_{FL} = 122$	$1000 \times V_{FL}/M_1 = 3.3$

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	$M_X = 38.2$	$100 \times M_X/M_1 = 0.10$
Rc	$M_{Rc} = 1618.1$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rc}/M_3) = 44.13$
Rb	$M_{Rb} = 622.1$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rb}/M_3) = 16.97$
Ru	$M_{Ru} = 1372.1$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Ru}/M_3) = 37.42$
Rg	$M_{Rg} = 2.7$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rg}/M_3) = 0.07$
Ra	$M_{Ra} = 5.1$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Ra}/M_3) = 0.14$
		$\Sigma P = 98.83$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Ensaio das propriedades geométricas dos agregados

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 7

**Data**

18 de Julho de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
 M<sub>0</sub>= 50148 g  
 M<sub>1</sub>= 37075 g  
 M<sub>4</sub>= 13063 g  
 M<sub>63</sub>= 0 g  
 M<sub>2</sub>= 37006 g  
 M<sub>3</sub>= 3387 g

Constituinte	Volume , cm <sup>3</sup>	Proporção, cm <sup>3</sup> /kg
FL	V <sub>FL</sub> = 33	1000 x V <sub>FL</sub> /M <sub>1</sub> = 0.9

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	M <sub>X</sub> = 0.0	100 x M <sub>X</sub> /M <sub>1</sub> = 0.00
Rc	M <sub>Rc</sub> = 79.1	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rc</sub> /M <sub>3</sub> )= 2.33
Rb	M <sub>Rb</sub> = 3.8	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rb</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.11
Ru	M <sub>Ru</sub> = 349.4	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ru</sub> /M <sub>3</sub> )= 10.29
Rg	M <sub>Rg</sub> = 0.0	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Rg</sub> /M <sub>3</sub> )= 0.00
Ra	M <sub>Ra</sub> = 2952.6	100 x (M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub> )*(M <sub>Ra</sub> /M <sub>3</sub> )= 87.01
		Σ P = 99.74



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Ensaio das propriedades geométricas dos agregados

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 8

**Data**

12 de Setembro de 2012

**Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados (NP EN 933-11:2011)**

T= 41 °C  
 $M_0 = 51794$  g  
 $M_1 = 37524$  g  
 $M_4 = 14256$  g  
 $M_{63} = 0$  g  
 $M_2 = 37310$  g  
 $M_3 = 6392$  g

Constituinte	Volume , $\text{cm}^3$	Proporção, $\text{cm}^3/\text{kg}$
FL	$V_{FL} = 35$	$1000 \times V_{FL}/M_1 = 0.9$

Constituintes	Masas , g	Proporções
X	$M_X = 82.9$	$100 \times M_X/M_1 = 0.22$
Rc	$M_{Rc} = 3514.2$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rc}/M_3) = 54.66$
Rb	$M_{Rb} = 873.6$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rb}/M_3) = 13.59$
Ru	$M_{Ru} = 1850.4$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Ru}/M_3) = 28.78$
Rg	$M_{Rg} = 13.6$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rg}/M_3) = 0.21$
Ra	$M_{Ra} = 122.0$	$100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Ra}/M_3) = 1.90$
		$\Sigma P = 99.36$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Análise Granulométrica

**Norma de ensaio**

NP EN 933 - 1:2002

**Data**

16 de Fevereiro de 2012

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 1

**Procedimento usado**

Lavagem e peneiração ou peneiração seca

**Lavagem no peneiro de 63 µm**

Massa seca total, $M_1$	1256.39 g
Massa seca após lavagem, $M_2$	1190.70 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$	65.69 g

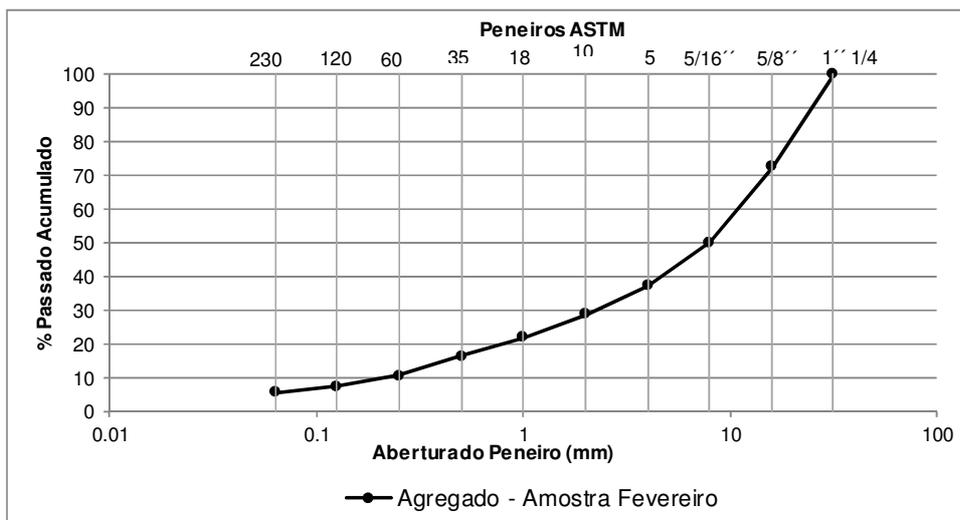
**Peneiração a seco**

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido	Percentagem cumulativa de material retido	Percentagem cumulativa de material passado
1" 1/4	31.5	0.0	0.0	0.0	100.0
5/8"	16.0	345.3	27.5	27.5	72.5
5/16"	8.0	281.5	22.4	49.9	50.1
5	4.0	163.5	13.0	62.9	37.1
10	2.0	106.7	8.5	71.4	28.6
18	1.0	83.1	6.6	78.0	22.0
35	0.500	72.1	5.7	83.7	16.3
60	0.250	73.2	5.8	89.6	10.4
120	0.125	38.8	3.1	92.7	7.3
230	0.063	23.3	1.9	94.5	5.5
Fundo		2.8	0.2	94.7	5.3
Total (T)		1190.3	94.7		

**Soma de Controlo**

$$(M_2 - T)/M_2 = 0.03\% < 1\%$$

**Curva Granulométrica**





**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Análise Granulométrica**

**Norma de ensaio**

NP EN 933 - 1:2002

**Data**

16 de Fevereiro de 2012

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 2 - Betuminoso

**Procedimento usado**

Lavagem e peneiração ou peneiração seca

**Lavagem no peneiro de 63 µm**

Massa seca total, $M_1$	1204.03 g
Massa seca após lavagem, $M_2$	1170.93 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1-M_2$	33.10 g

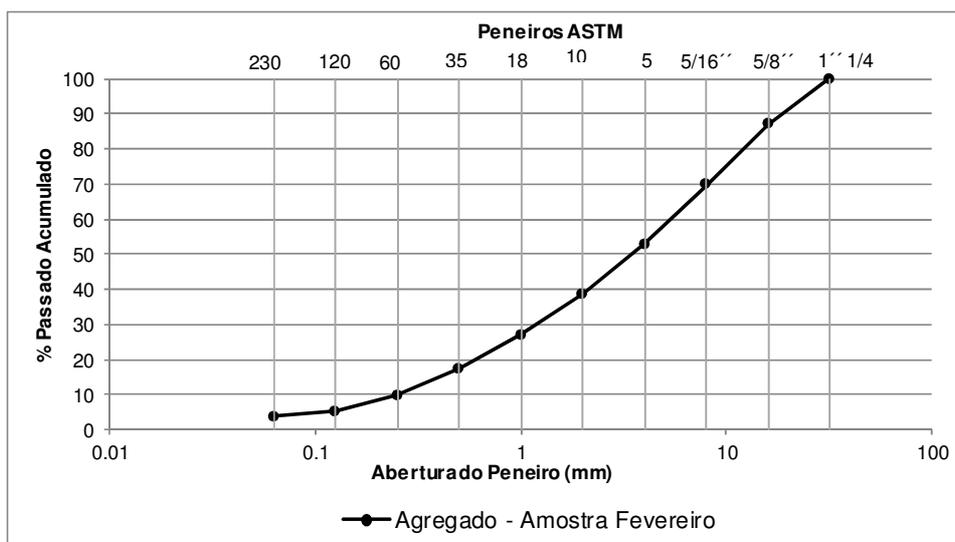
**Peneiração a seco**

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido	Percentagem cumulativa de material retido	Percentagem cumulativa de material passado
1" 1/4	31.5	0.0	0.0	0.0	100.0
5/8"	16.0	156.2	13.0	13.0	87.0
5/16"	8.0	206.3	17.1	30.1	69.9
5	4.0	205.9	17.1	47.2	52.8
10	2.0	170.3	14.1	61.4	38.6
18	1.0	141.8	11.8	73.1	26.9
35	0.500	114.8	9.5	82.7	17.3
60	0.250	90.4	7.5	90.2	9.8
120	0.125	55.0	4.6	94.7	5.3
230	0.063	19.7	1.6	96.4	3.6
Fundo		9.3	0.8	97.1	2.9
Total (T)		1169.6	97.1		

**Soma de Controlo**

$(M_2 - T)/M_2 = 0.11\% < 1\%$

**Curva Granulométrica**





Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Análise Granulométrica

**Norma de ensaio**

NP EN 933 - 1:2002

**Data**

16 de Março de 2012

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 3

**Procedimento usado**

Lavagem e peneiração ou peneiração seca

**Lavagem no peneiro de 63 µm**

Massa seca total, $M_1$	18.52 kg
Massa seca após lavagem, $M_2$	17.48 kg
Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$	1.04 kg

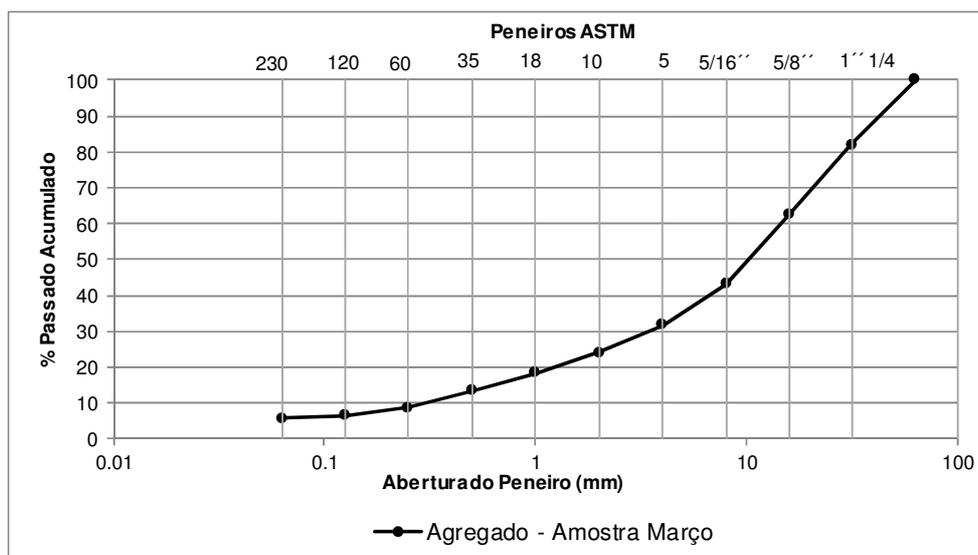
**Peneiração a seco**

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (kg)	Porcentagem de material retido	Porcentagem cumulativa de material retido	Porcentagem cumulativa de material passado
2" 1/2	63	0.00	0.0	0.0	100.0
1" 1/4	31.5	3.32	17.9	17.9	82.1
5/8"	16.0	3.65	19.7	37.6	62.4
5/16"	8.0	3.58	19.3	56.9	43.1
5	4.0	2.10	11.3	68.3	31.7
10	2.0	1.40	7.5	75.8	24.2
18	1.0	1.08	5.9	81.7	18.3
35	0.500	0.90	4.9	86.5	13.5
60	0.250	0.90	4.8	91.4	8.6
120	0.125	0.40	2.2	93.6	6.4
230	0.063	0.13	0.7	94.3	5.7
Fundo		0.02	0.1	94.4	5.6
Total (T)		17.5	94.4		

**Soma de Controlo**

$$(M_2 - T)/M_2 = 0.03\% < 1\%$$

**Curva Granulométrica**





**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Análise Granulométrica**

**Norma de ensaio**

NP EN 933 - 1:2002

**Data**

16 de Março de 2012

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 4

**Procedimento usado**

Lavagem e peneiração ou peneiração seca

**Lavagem no peneiro de 63 µm**

Massa seca total, $M_1$	12.66 kg
Massa seca após lavagem, $M_2$	12.36 kg
Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1-M_2$	0.30 kg

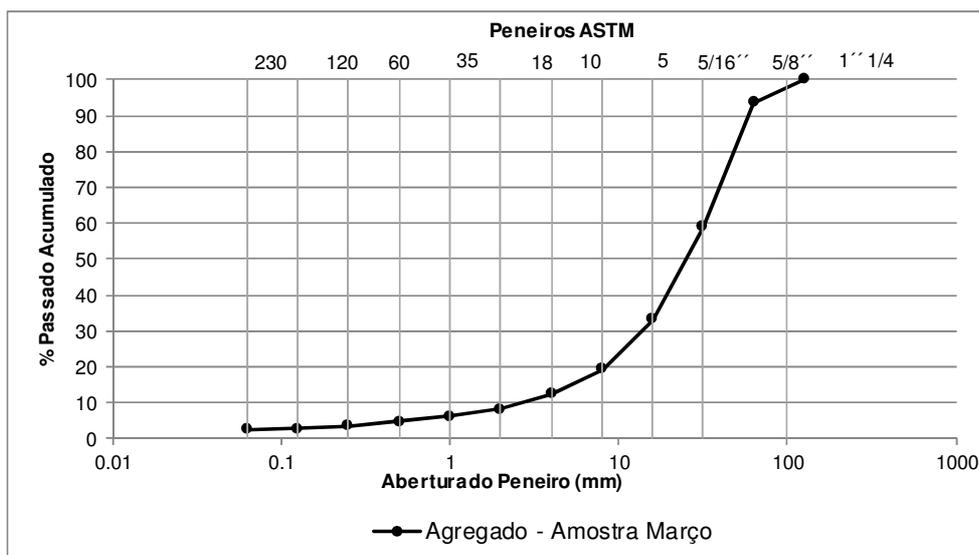
**Peneiração a seco**

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (kg)	Percentagem de material retido	Percentagem cumulativa de material retido	Percentagem cumulativa de material passado
5"	125	0	0.0	0.0	100.0
2" 1/2	63	0.793	6.3	6.3	93.7
1" 1/4	31.5	4.394	34.7	41.0	59.0
5/8"	16.0	3.267	25.8	66.8	33.2
5/16"	8.0	1.741	13.8	80.5	19.5
5	4.0	0.902	7.1	87.7	12.3
10	2.0	0.515	4.1	91.7	8.3
18	1.0	0.259	2.0	93.8	6.2
35	0.500	0.186	1.5	95.2	4.8
60	0.250	0.154	1.2	96.5	3.5
120	0.125	0.084	0.7	97.1	2.9
230	0.063	0.055	0.4	97.6	2.4
Fundo		0.007	0.1	97.6	2.4
Total (T)		12.4	97.6		

**Soma de Controlo**

$(M_2 - T)/M_2 = 0.02\% < 1\%$

**Curva Granulométrica**





Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Análise Granulométrica

**Norma de ensaio**

NP EN 933 - 1:2002

**Data**

18 de Julho de 2012

**Identificação da amostra**

RCD - Agregado - Amostra 5

**Procedimento usado**

Lavagem e peneiração ou peneiração seca

**Lavagem no peneiro de 63 µm**

Massa seca total, $M_1$	2147 g
Massa seca após lavagem, $M_2$	1873.40 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$	273.60 g

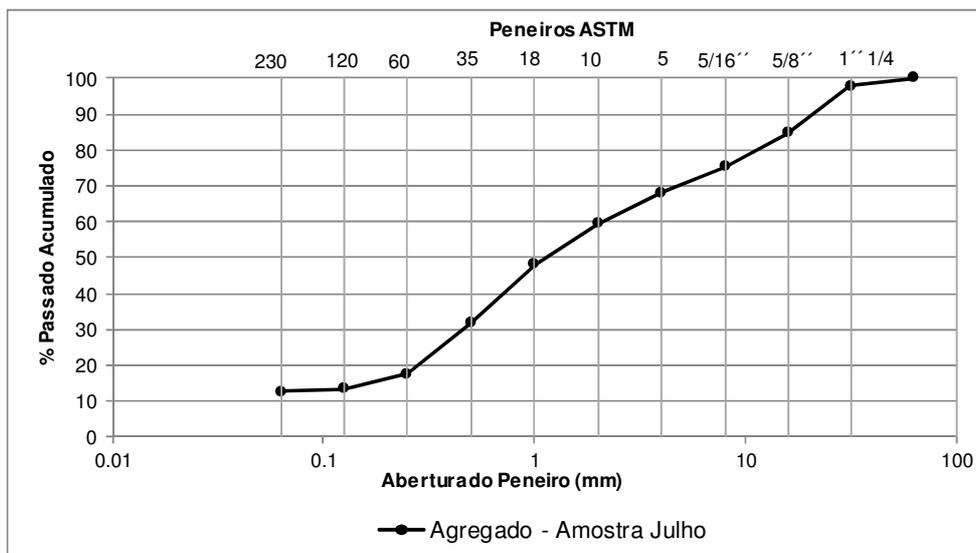
**Peneiração a seco**

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido	Percentagem cumulativa de material retido	Percentagem cumulativa de material passado
2" 1/2	63	0	0.0	0.0	100.0
1" 1/4	31.5	47.8	2.2	2.2	97.8
5/8"	16.0	280.2	13.1	15.3	84.7
5/16"	8.0	203.8	9.5	24.8	75.2
5	4.0	150.2	7.0	31.8	68.2
10	2.0	185.8	8.7	40.4	59.6
18	1.0	247.9	11.5	52.0	48.0
35	0.500	348.8	16.2	68.2	31.8
60	0.250	306.0	14.3	82.5	17.5
120	0.125	87.1	4.1	86.5	13.5
230	0.063	14.2	0.7	87.2	12.8
Fundo		0.7	0.0	87.2	12.8
Total (T)		1872.5	87.2		

**Soma de Controlo**

$$(M_2 - T)/M_2 = 0.05\% < 1\%$$

**Curva Granulométrica**





**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Análise Granulométrica**

**Norma de ensaio**

NP EN 933 - 1:2002

**Data**

18 de Julho de 2012

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 6

**Procedimento usado**

Lavagem e peneiração ou peneiração seca

**Lavagem no peneiro de 63 µm**

Massa seca total, $M_1$	2333.6 g
Massa seca após lavagem, $M_2$	2246.70 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$	86.90 g

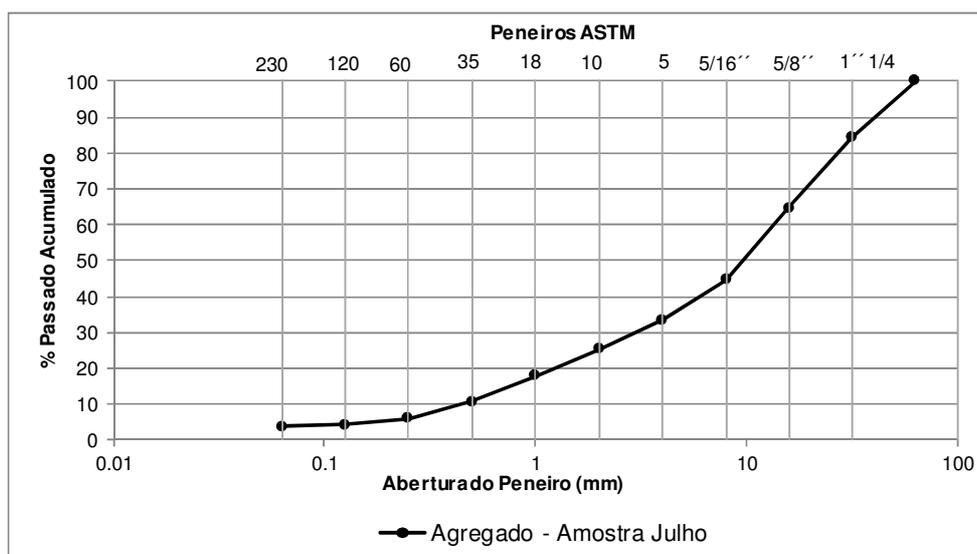
**Peneiração a seco**

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido	Percentagem cumulativa de material retido	Percentagem cumulativa de material passado
2" 1/2	63	0	0.0	0.0	100.0
1" 1/4	31.5	366.7	15.7	15.7	84.3
5/8"	16.0	457.8	19.6	35.3	64.7
5/16"	8.0	466.0	20.0	55.3	44.7
5	4.0	260.4	11.2	66.5	33.5
10	2.0	190.6	8.2	74.6	25.4
18	1.0	173.5	7.4	82.1	17.9
35	0.500	167.2	7.2	89.2	10.8
60	0.250	112.3	4.8	94.0	6.0
120	0.125	37.3	1.6	95.6	4.4
230	0.063	14.1	0.6	96.2	3.8
Fundo		0.5	0.0	96.3	3.7
Total (T)		2246.4	96.3		

**Soma de Controlo**

$(M_2 - T)/M_2 = 0.01\% < 1\%$

**Curva Granulométrica**







**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Análise Granulométrica**

**Norma de ensaio**

NP EN 933 - 1:2002

**Data**

12 de Setembro de 2012

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 8

**Procedimento usado**

Lavagem e peneiração ou peneiração seca

**Lavagem no peneiro de 63 µm**

Massa seca total, $M_1$	11487.00 g
Massa seca após lavagem, $M_2$	10870.00 g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$	617.00 g

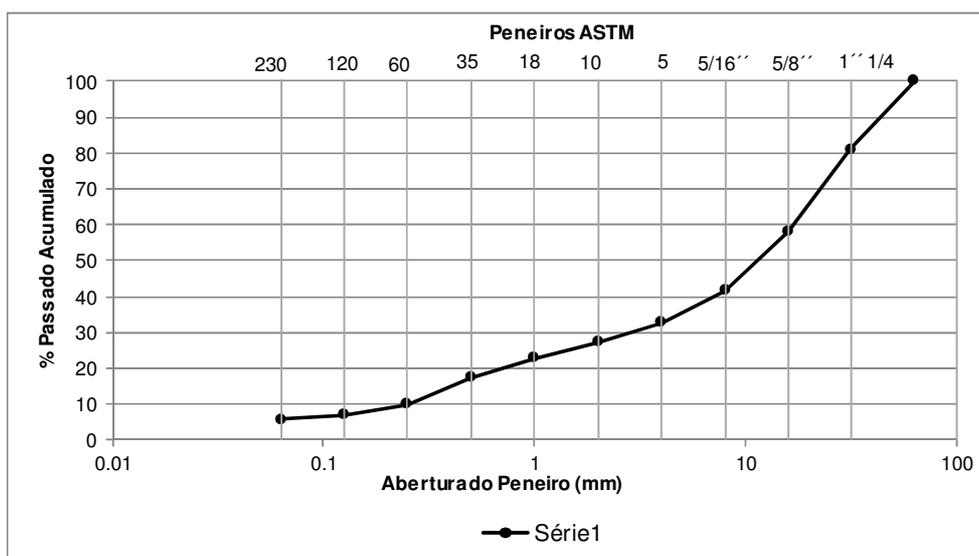
**Peneiração a seco**

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido	Percentagem cumulativa de material retido	Percentagem cumulativa de material passado
2" 1/2	63	0	0.0	0.0	100.0
1" 1/4	31.5	2179.0	19.0	19.0	81.0
5/8"	16.0	2658.0	23.1	42.1	57.9
5/16"	8.0	1862.0	16.2	58.3	41.7
5	4.0	1015.0	8.8	67.2	32.8
10	2.0	632.0	5.5	72.7	27.3
18	1.0	520.0	4.5	77.2	22.8
35	0.500	615.0	5.4	82.5	17.5
60	0.250	853.0	7.4	90.0	10.0
120	0.125	361.0	3.1	93.1	6.9
230	0.063	134.0	1.2	94.3	5.7
Fundo		24.0	0.2	94.5	5.5
Total (T)		10853.0	94.5		

**Soma de Controlo**

$(M_2 - T)/M_2 = 0.16\% < 1\%$

**Curva Granulométrica**





Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

Identificação da amostra

RCD - Amostra 1

Data

16 de Fevereiro de 2012

Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	0.00	0.00
50/63	31,5	0.00	0.00
40/50	25	0.00	0.00
31,5/40	20	0.00	0.00
25/31,5	16	92.25	14.93
20/25	12,5	78.98	26.81
16/20	10	123.64	15.49
12,5/16	8	105.16	14.40
10/12,5	6,3	156.64	38.04
8/10	5	62.73	6.83
6,3/8	4	185.32	44.10
5/6,3	3,15	26.88	4.81
4/5	2,5	41.81	6.17

$$\Sigma R_i = M_1 = 873.41 \text{ g}$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 171.58 \text{ g}$$

$$FI = 20\%$$

$$M_4 = 630.01 \text{ g}$$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 2

**Data**

16 de Fevereiro de 2012

**Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)**

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	0.00	0.00
50/63	31,5	0.00	0.00
40/50	25	0.00	0.00
31,5/40	20	0.00	0.00
25/31,5	16	83.34	0.00
20/25	12,5	52.17	0.00
16/20	10	114.34	0.00
12,5/16	8	123.05	0.00
10/12,5	6,3	198.77	7.67
8/10	5	63.29	2.42
6,3/8	4	177.15	23.74
5/6,3	3,15	73.60	10.62
4/5	2,5	54.47	3.98

$$\Sigma R_i = M_1 = 940.18 \quad g$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 48.43 \quad g$$

$$FI = 5\%$$

$$M_4 = 379.14 \quad g$$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 3

**Data**

16 de Março de 2012

**Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)**

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	0.00	0.00
50/63	31,5	344.72	167.15
40/50	25	1239.98	0.00
31,5/40	20	141.66	25.97
25/31,5	16	422.27	56.38
20/25	12,5	353.98	69.70
16/20	10	499.92	66.52
12,5/16	8	547.35	60.12
10/12,5	6,3	596.43	81.28
8/10	5	224.13	26.74
6,3/8	4	436.62	107.56
5/6,3	3,15	77.70	17.10
4/5	2,5	116.99	16.79

$$\Sigma R_i = M_1 = 5001.75 \text{ g}$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 695.31 \text{ g}$$

$$FI = 14\%$$

$$M_4 = 1885.52 \text{ g}$$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 4

**Data**

16 de Março de 2012

**Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)**

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	363.61	0.00
50/63	31,5	365.96	147.42
40/50	25	1103.83	69.23
31,5/40	20	1055.62	72.55
25/31,5	16	576.01	66.44
20/25	12,5	415.11	8.48
16/20	10	403.89	40.78
12,5/16	8	496.62	39.70
10/12,5	6,3	509.50	83.16
8/10	5	152.22	17.02
6,3/8	4	369.34	76.22
5/6,3	3,15	92.42	17.43
4/5	2,5	97.02	14.59

$$\Sigma R_i = M_1 = 6001.15 \quad g$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 653.02 \quad g$$

$$FI = 11\%$$

$$M_4 = 820.2 \quad g$$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 5

**Data**

18 de Julho de 2012

**Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)**

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	0.00	0.00
50/63	31,5	0.00	0.00
40/50	25	0.00	0.00
31,5/40	20	0.00	0.00
25/31,5	16	441.19	148.92
20/25	12,5	407.85	108.96
16/20	10	266.21	39.42
12,5/16	8	253.27	26.45
10/12,5	6,3	287.51	37.95
8/10	5	87.35	9.66
6,3/8	4	237.97	54.43
5/6,3	3,15	59.77	11.03
4/5	2,5	76.88	10.14

$$\Sigma R_i = M_1 = 2118.00 \quad g$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 446.96 \quad g$$

$$FI = 21\%$$

$$M_4 = 1538.17 \quad g$$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 6

**Data**

18 de Julho de 2012

**Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)**

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	0.00	0.00
50/63	31,5	0.00	0.00
40/50	25	380.58	0.00
31,5/40	20	235.48	67.12
25/31,5	16	462.69	96.28
20/25	12,5	128.78	32.74
16/20	10	224.79	39.49
12,5/16	8	265.38	32.22
10/12,5	6,3	235.44	30.78
8/10	5	143.68	11.86
6,3/8	4	300.11	79.73
5/6,3	3,15	54.22	15.07
4/5	2,5	54.95	9.68

$$\Sigma R_i = M_1 = 2486.10 \quad g$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 414.97 \quad g$$

$$FI = 17\%$$

$$M_4 = 809.85 \quad g$$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 7

**Data**

18 de Julho de 2012

**Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)**

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	0.00	0.00
50/63	31,5	147.84	0.00
40/50	25	486.57	0.00
31,5/40	20	0.00	0.00
25/31,5	16	147.12	0.00
20/25	12,5	100.46	0.00
16/20	10	143.09	0.00
12,5/16	8	289.32	16.80
10/12,5	6,3	294.01	19.28
8/10	5	209.51	11.76
6,3/8	4	285.45	46.98
5/6,3	3,15	46.01	5.10
4/5	2,5	145.75	12.30

$$\Sigma R_i = M_1 = 2295.13 \quad g$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 112.22 \quad g$$

$$FI = 5\%$$

$$M_4 = 767.03 \quad g$$



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação da forma das partículas

Identificação da amostra

RCD - Amostra 8

Data

12 de Setembro de 2012

Índice de Achatamento (NP EN 933-3:2002)

Fração Granulométrica ( $d_i/D_i$ ) [mm]	Largura da ranhura do peneiro de barras [mm]	$R_i$ [g]	$m_i$ [g]
63/80	40	0.00	0.00
50/63	31,5	213.24	0.00
40/50	25	569.48	239.28
31,5/40	20	402.61	81.09
25/31,5	16	386.95	38.22
20/25	12,5	374.19	99.63
16/20	10	247.81	56.06
12,5/16	8	333.73	51.77
10/12,5	6,3	251.86	34.33
8/10	5	142.02	23.97
6,3/8	4	223.44	48.43
5/6,3	3,15	52.66	8.50
4/5	2,5	84.44	11.07

$$\Sigma R_i = M_1 = 3282.43 \text{ g}$$

$$\Sigma m_i = M_2 = 692.35 \text{ g}$$

$$FI = 21\%$$

$$M_4 = 1132.68 \text{ g}$$



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação do Teor de Finos**

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 1

**Data**

16 de Fevereiro de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		126.0	133.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		93.0	94.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			74	71
Equivalente de Areia (%)	SE		72	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação do Teor de Finos**

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 2 - Betuminoso

**Data**

16 de Fevereiro de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		121.0	125.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		101.0	103.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			83	82
Equivalente de Areia (%)	SE		83	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	20.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.00



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação do Teor de Finos

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 3

**Data**

16 de Março de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		135.0	137.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		90.0	93.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			67	68
Equivalente de Areia (%)	SE		67	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação do Teor de Finos**

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 4

**Data**

16 de Março de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		142.0	141.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		85.0	86.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			60	61
Equivalente de Areia (%)	SE		60	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação do Teor de Finos**

**Identificação da amostra**

RCD - Agregado - Amostra 5

**Data**

18 de Julho de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		152.0	162.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		84.0	89.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			55	55
Equivalente de Areia (%)	SE		55	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação do Teor de Finos**

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 6

**Data**

18 de Julho de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		150.0	149.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		103.0	102.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			69	68
Equivalente de Areia (%)	SE		69	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação do Teor de Finos**

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 7 - Betuminoso

**Data**

18 de Julho de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		122.0	123.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		105.0	102.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			86	83
Equivalente de Areia (%)	SE		84	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	15.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	0.75

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	15.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	0.75



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação do Teor de Finos**

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 8

**Data**

12 de Setembro de 2012

**Equivalente de Areia (NP EN 933-8:2002)**

		Proveta n.º	1	2
Massa do provete (g)	M		120	120
Altura do Nível Sup. Do Floculado até à base da proveta (mm)	$h_1$		135.0	138.0
Altura entre a face superior da peça guia e a base do peso do pistão (mm)	$h_2$		110.0	112.0
Equivalente de Areia dos provetes (%)			81	81
Equivalente de Areia (%)	SE		81	

**Azul de Metileno (NP EN 933-9:2002)**

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25

Massa seca do provete de ensaio da fracção granulométrica 0/2 mm (g)	$M_1$	200.0
Quantidade total de solução corante adicionada (mg)	$V_1$	25.0
Valor do Azul de Metileno da fracção granulométrica 0/2 mm (g/kg)	MB	1.25



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Identificação da amostra**

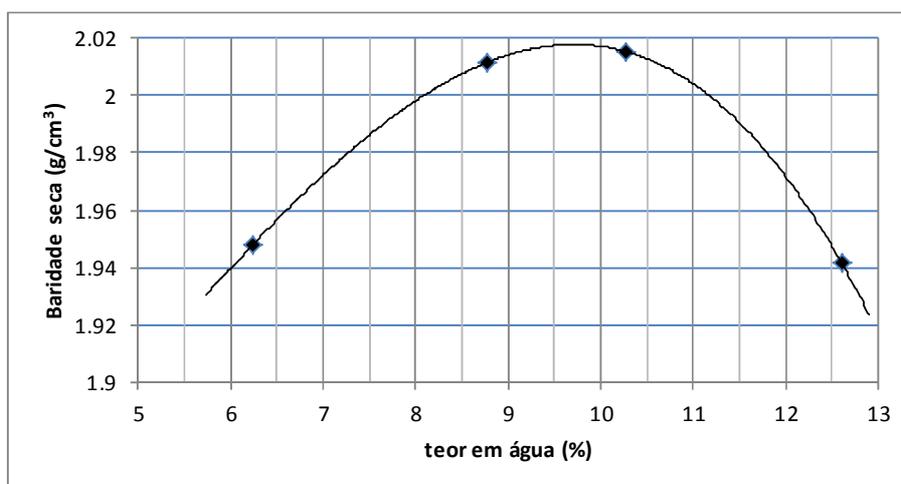
RCD - Agregado - Amostra 5

**Data**

18 de Julho de 2012

**Ensaio de Compactação (LNEC E 197)**

tipo de compactação	pesada	tipo de molde	grande	
n.º de camadas	5	massa do molde	5030 g	
n.º de pancadas/camada	55	volume do molde	2105 cm <sup>3</sup>	
massa do molde + solo húmido (g)	9385	9635	9708	9632
massa do solo húmido (g)	4355	4605	4678	4602
baridade húmida (g/cm <sup>3</sup> )	2.07	2.19	2.22	2.19
número da cápsula	II	III	IV	I
massa da cápsula (g)	166.90	163.60	166.10	163.30
massa da cápsula + solo húmido (g)	895.10	707.10	735.70	980.70
massa da cápsula + solo seco (g)	852.40	663.30	682.60	889.20
massa do solo seco (g)	685.50	499.70	516.50	725.90
massa da água (g)	42.7	43.8	53.1	91.5
teor em água (%)	6.2	8.8	10.3	12.6
baridade seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.95	2.01	2.02	1.94



**teor ótimo em água (%)**      **9.7**  
**baridade seca máx. (g/cm<sup>3</sup>)**      **2.08**

Obs:



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Identificação da amostra**

RCD - Agregado - Amostra 5

**Data**

18 de Julho de 2012

**CBR (LNEC E 198)****Ensaio de compactação**

Baridade seca máxima,  $\gamma_d$ : 2.02 g/cm<sup>3</sup>  
Teor ótimo em água, w : 9.7 %

**Moldagem dos provetes**

	Molde N.º	I	II	IV
Compactação (n.º pancadas)		55	25	12
Massa do Molde (g)		6212	6255	6498
Volume do molde (cm <sup>3</sup> )		2121	2121	2121
Massa do Molde + solo húmido (g)		10907	10878	10890
Massa do solo húmido (g)		4695	4623	4392
Baridade húmida (g/cm <sup>3</sup> )		2.21	2.18	2.07
	Cápsula n.º	I	II	IV
Massa da cápsula (g)		163.3	166.9	166.1
Massa da cápsula + solo húmido (g)		858.2	787.8	1152
Massa da cápsula + solo seco (g)		796.3	733.1	1064.9
Massa de água (g)		61.9	54.7	87.1
Teor em água (%)		9.8	9.7	9.7
Baridade seca (g/cm <sup>3</sup> )		2.02	1.99	1.89
Compactação relativa (%)		99.8	98.4	93.4
Sobrecarga (kgf)		6.81	6.81	6.81
Altura do solo no molde (mm)		116.6	116.6	116.6
Leitura inicial do defletómetro da expansão (mm)		100.0	200.0	900.0
Leitura final do defletómetro da expansão (mm)		101.0	202.0	904.0
Tempo de expansão (horas)		24.0	24.0	24.0
Tempo de saturação (horas)		24.0	24.0	24.0
Expansão relativa (%)		0.0	0.0	0.1

**Absorção de água**

	Molde N.º	I	II	III
Massa do Molde + solo saturado (g)		10942	10926	10994
Massa do solo saturado (g)		4730	4671	4496
Massa do solo seco (g)		4277	4216	4004
Absorção de água (%)		0.7	1.0	2.4

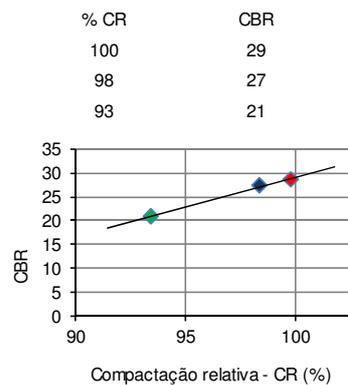
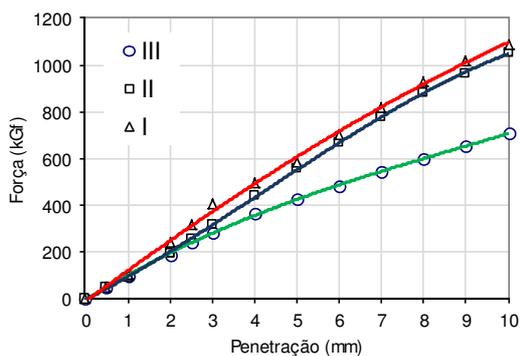


Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Fase de compressão

Provete I			Provete II		Provete IV		Força (kgf)
Penetra. (mm)	Leitura anel (mm)	Força (kgf)	Leitura anel (mm)	Força (kgf)	Leitura anel (mm)		
0.0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.021	49	0.021	49	0.021	49	49
1.0	0.044	102	0.039	90	0.041	95	95
2.0	0.104	240	0.083	192	0.081	187	187
2.5	0.137	317	0.11	254	0.104	240	240
3.0	0.176	407	0.137	317	0.123	284	284
4.0	0.214	495	0.191	442	0.157	363	363
5.0	0.252	583	0.241	557	0.184	425	425
6.0	0.305	705	0.289	668	0.21	485	485
7.0	0.355	821	0.335	774	0.235	543	543
8.0	0.403	932	0.38	878	0.258	596	596
9.0	0.44	1017	0.416	962	0.283	654	654
10.0	0.471	1089	0.456	1054	0.306	707	707

Gráficos



VI - Resultados

CR (%)	CBR
95.0	23
100.0	29



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	16 de Fevereiro de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 1	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	751.1 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	563.3 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	129.9 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	705.2 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.59 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.21 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.36 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	6.51 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	290.0 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1061.9 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	887.29 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	278.5 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.68 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.79 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.68 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	4.13 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	38.0 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	174.2 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	159.17 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	24.3 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.65 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	56.49 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	2.61 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{rd}</math></b>	2.33 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	2.42 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	7.63 %



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	16 de Fevereiro de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 2 - Betuminoso	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	1136.7 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	796.9 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	129.9 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	1124.5 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.45 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.39 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.41 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	1.08 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	401.2 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1108.1 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	889.84 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	364.3 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.49 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.74 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.49 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	10.13 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	4.0 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	149.7 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	148.34 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	2.4 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.30 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	0.91 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.51 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	66.67 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	2.46 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{rd}</math></b>	2.48 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	2.43 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	3.61 %



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	16 de Março de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 3	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	3120 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1953.6 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	129.9 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	2953 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.61 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.27 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.40 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	5.66 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	619.3 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1232.6 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	887.29 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	549.9 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.68 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	3.02 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.68 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	12.62 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	24.9 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	170.8 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	159.17 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	18.8 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.62 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.41 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.87 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	32.45 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	2.62 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{rd}</math></b>	2.39 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	2.44 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	6.98 %



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	16 de Fevereiro de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 4	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	1718.1 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1124.1 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	129.9 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	1638.1 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.54 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.26 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.37 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	4.88 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	443.3 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1142.5 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	889.84 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	404.1 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.66 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.92 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.66 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	9.70 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	46.9 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	167.2 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	148.34 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	30.9 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.56 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.10 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.67 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	51.78 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	2.56 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{rd}</math></b>	2.37 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	2.41 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	6.85 %



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	18 de Julho de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 5	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	517.1 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	422.9 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	116 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	481.6 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.75 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.29 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.45 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	7.37 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	391.0 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1107.3 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	889.84 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	350.4 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.93 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	11.59 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	32.0 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	172.4 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	159.17 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	22.0 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.50 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.17 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.70 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	45.45 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	2.69 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{rd}</math></b>	2.52 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	2.50 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	10.42 %



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	18 de Julho de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 6	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	1301.5 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	501.7 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	116 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	1210.9 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	1.46 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.42 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	7.48 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	587.6 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1198.3 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	887.29 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	506.8 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.58 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.99 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.58 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	15.94 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	29.5 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	170.1 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	159.17 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	18.1 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.52 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	0.97 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.59 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	62.98 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	1.82 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{rd}</math></b>	1.83 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	1.78 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	10.93 %



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	18 de Julho de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 7 - Betuminoso	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	1199.9 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	681.4 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	116 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	1165.1 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	1.94 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.83 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.89 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	2.99 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	537.4 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1187.4 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	887.29 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	499.6 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.50 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	2.69 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.50 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	7.57 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	6.4 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	150.0 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	148.34 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	3.1 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.15 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	0.65 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.35 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	106.45 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	2.11 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{pd}</math></b>	2.09 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	2.07 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	4.78 %



**Universidade de Aveiro**  
**LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil**

**Determinação da Massa Volúmica e da Absorção de Água**

<b>Norma de ensaio</b>	<b>Data</b>
NP EN 1097 - 6:2003	12 de Setembro de 2012
<b>Identificação da amostra</b>	
RCD - Amostra 8	
<b>Dimensão entre 31,5 mm e 4 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	1787.2 g
Massa aparente do cesto contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	872 g
Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M3	116 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	1614.1 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	1.88 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.56 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.73 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	10.72 %
<b>Dimensão entre 4 mm e 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	420.0 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	1105.3 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	889.1 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	349.0 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.62 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	3.16 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	2.62 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	20.34 %
<b>Dimensão abaixo de 0,063 mm</b>	
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M1	24.8 g
Massa do picnómetro contendo a amostra de agregado saturado, imersos em água, M2	158.7 g
Massa do picnómetro apenas cheio de água, M3	148.2 g
Massa volúmica da água à temperatura do ensaio, $\rho_w$	0.9978
Massa no ar da amostra seca em estufa, M4	18.0 g
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2.39 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas secas em estufa	1.26 g/cm <sup>3</sup>
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	1.73 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	37.78 %
<b>Massa volúmica dos material impermeável das partículas, <math>\rho_a</math></b>	2.02 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas secas em estufa, <math>\rho_{rd}</math></b>	1.86 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, <math>\rho_{ssd}</math></b>	1.90 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água WA<sub>24</sub></b>	12.83 %



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação do Teor de Betume em Misturas Betuminosas (ASTM D 2172)

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 2 - Betuminoso

**Data**

28 de Fevereiro de 2012

**Método**

Extrator de Refluxo

Filtro n.º	1	2
Peso de Filtro (g)	6.6	6.5
Peso do Filtro + Peso da Mistura (g)	290.9	317.8
Peso do Filtro + Peso do Agregado (g)	282.3	307.4
Peso da Mistura (g)	284.3	311.3
Peso do Agregado (g)	275.7	300.9
Peso do Betume (g)	8.6	10.4
Percentagem de Betume (%)	3.1%	3.5%
Percentagem de Betume Média (%)	3.3%	



Extrator de Refluxo



Universidade de Aveiro  
LabCIVIL - Laboratório de Engenharia Civil

Determinação do Teor de Betume em Misturas Betuminosas (ASTM D 2172)

**Identificação da amostra**

RCD - Amostra 7 - Betuminoso

**Data**

18 de Julho de 2012

**Método**

Extrator de Refluxo

Filtro n.º	1	2
Peso de Filtro (g)	6.5	6.4
Peso do Filtro + Peso da Mistura (g)	370.6	373.8
Peso do Filtro + Peso do Agregado (g)	358.5	362.1
Peso da Mistura (g)	364.1	367.4
Peso do Agregado (g)	352.0	355.7
Peso do Betume (g)	12.1	11.7
Percentagem de Betume (%)	3.4%	3.3%
Percentagem de Betume Média (%)	3.4%	



Extrator de Refluxo