

Instituto Politécnico de Castelo Branco

Escola Superior de Tecnologia

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COM VISTA À SUA APLICAÇÃO EM MISTURAS BETUMINOSAS

Ana Cristina Duarte Martins da Conceição

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Construção Sustentável, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Rosa Paula Conceição Luzia, Professora Adjunta e do Mestre Dinis Correia Gardete, Assistente do 2º Triénio, da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco

O júri

Presidente

Exmo Sr. Presidente 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

Prof. Doutor Luís Filipe de Carvalho Jorge
Professor Adjunto da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Prof. Doutora Rosa Paula da Conceição Luzia
Professora Adjunta da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Mestre Dinis Correia Gardete
Assistente do 2º Triénio da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Agradecimentos

Ao concluir esta dissertação desejo expressar publicamente os meus agradecimentos a algumas das pessoas que mais contribuíram para que a mesma fosse uma realidade.

À Professora Doutora Rosa Luzia, e ao Mestre Dinis Correia Gardete, da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco, orientadores do trabalho que agora se apresenta.

À Ambilei - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S. A. em especial ao Engenheiro Bruno Duarte e à Engenheira Catarina Martins pela disponibilidade para colaborar no desenvolvimento deste trabalho, fornecendo o resíduo de construção e demolição necessário à realização do estudo.

Agradeço à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, pela disponibilidade do laboratório de Geotecnia para a realização de ensaios.

À Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra, em especial ao Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil, na pessoa do Prof. Doutor Adelino Ferreira, pela disponibilidade do laboratório para a realização de ensaios.

Por fim agradeço à minha família todo o apoio, incentivo e carinho que sempre me deram.

Palavras chave

Agregado, ambiente, caracterização laboratorial, comportamento mecânico, ensaios, misturas betuminosas, pavimento rodoviário, reciclagem, resíduos de construção e demolição (RCD), sustentabilidade.

Resumo

Esta dissertação visa contribuir para o estudo da utilização de Resíduos de Construção e Demolição em camadas ligadas de pavimentos de estradas de baixo tráfego, de modo a que essa prática se torne cada vez mais corrente.

A reciclagem de agregados oferece diversas vantagens importantes do ponto de vista da proteção ambiental, ao diminuir consideravelmente a necessidade de extração de materiais granulares em pedreiras. Esta diminuição traduz-se num aumento do ciclo de vida dos resíduos, o que proporciona uma menor ocupação de vazadouros e diminui consideravelmente o consumo de energia.

O objetivo principal do presente trabalho é caracterizar em laboratório os Agregados de Resíduos de Construção e Demolição e analisar a viabilidade da sua aplicação em misturas betuminosas a aplicar em camada de base AC20.

Por forma a atingir este objetivo procedeu-se à recolha de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição constituídos pela mistura de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (17 01 07) (Portaria n.º. 209, 2004) e à caracterização em laboratório das suas propriedades geométricas e físicas.

Os resultados da caracterização realizada foram analisados à luz dos parâmetros indicados no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011) para mistura betuminosa de camada de base AC20. Os resultados obtidos foram ainda comparados com outros trabalhos científicos, desenvolvidos sobre este tipo de materiais tanto em Portugal como em alguns outros países.

Dos estudos realizados pode concluir-se que é viável a aplicação, embora parcial, Agregados de Resíduos de Construção e Demolição (17 01 07) (Portaria n.º. 209, 2004) em camadas ligadas de base em estradas de baixo tráfego.

É, no entanto, imprescindível e urgente a criação de especificações que estabeleçam requisitos mínimos e recomendações para a sua utilização em camadas ligadas de pavimentos rodoviários de baixo tráfego.

Keywords

Aggregate, environment, laboratory characterization, mechanical behavior, trials, bituminous mixtures, road pavement, recycling, construction and demolition waste (CDW), sustainability

Abstract

This dissertation aims to contribute to the study of the use of Construction and Demolition Waste in connecting layers in road pavements of low traffic, so that this practice becomes increasingly common.

The recycling of aggregates offers several important advantages from the point of view of the environmental protection, by significantly reducing the need for extraction of granular materials in quarries. This reduction leads to an increase of the waste life cycle, which reduces the use of dump sites, and allows for significantly lower power consumption.

The main aim of the present work is to characterize in laboratory recycled aggregates of construction and demolition, and analyze the viability of its applications in bituminous mixtures to be applied in the base layer AC20.

In order to achieve this goal, samples of ARCD were collected, constituted by the mixture of concrete, bricks, tiles and ceramics (17 01 07) and to the characterization in the laboratory of its geometric and physical properties.

The results of the characterization performed were compared with the parameters listed in the “Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal” (EP, 2011) for bituminous mixture of base layer AC20. The results obtained were also benchmarked with other scientific studies of this type of materials developed both in Portugal and in several foreign countries.

The studies concluded that the aggregates of Construction and Demolition Waste present feasibility of application, although partial, of aggregates of construction and demolition wastes (17 01 07) (Portaria n.º. 209, 2004) in base link layer on low traffic roads.

It is, however, essential to create specifications that establish minimum requirements and recommendations for the use of recycled aggregates in linking layers in low-traffic road pavements.

Índice geral

1. Introdução	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objetivo e metodologias	2
1.3. Organização do Trabalho.....	3
2. Breves noções sobre Pavimentos Rodoviários	5
2.1. Constituição / estrutura	5
2.2. Evolução histórica	7
2.3. Características dos constituintes das misturas betuminosas.....	9
2.3.1. Considerações iniciais	9
2.3.2. Agregados.....	10
2.3.3. Fíler.....	11
2.3.4. Betume.....	11
3. Resíduos de construção e demolição	13
3.1. Generalidades	13
3.2. Enquadramento legal	16
3.3. Especificações aplicáveis.....	17
3.3.1. NP EN.....	17
3.3.2. Especificações do LNEC	17
3.3.3. Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal	18
4. Breve apresentação dos ensaios de laboratório	19
4.1. Generalidades	19
4.2. Ensaios das propriedades geométricas.....	20
4.2.1. Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados	20
4.2.2. Análise granulométrica.....	24
4.2.3. Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento.....	27
4.2.4. Qualidade dos finos - Ensaio do equivalente de areia.....	29

4.2.5.	Qualidade dos Finos - Ensaio do azul de metileno	32
4.3.	Ensaio das propriedades físicas e mecânicas em laboratório.....	36
4.3.1.	Considerações Iniciais	36
4.3.2.	Determinação da massa volúmica e da absorção de água - Método do picnómetro 36	
4.3.3.	Determinação da resistência à fragmentação (<i>Los Angeles</i>)	40
4.3.4.	Determinação da resistência ao desgaste (<i>micro-Deval</i>)	43
5.	<i>Outros trabalhos realizados com RCD's</i>.....	49
5.1.	Considerações iniciais	49
5.2.	Estudo: "Caracterização dos agregados grossos reciclados e ensaios de provetes de betão produzidos com agregados reciclados de RCD".....	50
5.2.1.	Considerações iniciais	50
5.2.2.	Materiais utilizados	50
5.2.3.	Caracterização geométrica.....	50
5.2.4.	Caracterização mecânica	52
5.3.	Trabalho "Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego"	53
5.3.1.	Considerações iniciais	53
5.3.2.	Materiais utilizados	54
5.3.3.	Caracterização geométrica.....	54
5.3.4.	Caracterização mecânica	55
5.4.	Trabalho "Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego "	56
5.4.1.	Considerações iniciais	56
5.4.2.	Materiais utilizados	57
5.4.3.	Caracterização geométrica.....	57
5.4.4.	Caracterização física e mecânica	59
5.5.	Trabalho "Utilização de Resíduos de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza"	59
5.5.1.	Considerações iniciais	59
5.5.2.	Materiais utilizados	60
5.5.3.	Caracterização geométrica.....	62
5.5.4.	Caracterização física e mecânica	63
5.6.	Trabalho " <i>Recycling of Clay Bricks as Aggregate in Asphalt Concrete</i> "	64
5.6.1.	Considerações iniciais	64

5.6.2.	Materiais utilizados	64
5.6.3.	Caracterização geométrica	65
5.6.4.	Caracterização mecânica	65
5.7.	Trabalho “<i>The Potential Use of Construction and Demolition Waste in Road Construction in Ireland</i>”	67
5.7.1.	Considerações iniciais	67
5.7.2.	Materiais utilizados	68
5.7.3.	Caracterização geométrica	68
5.7.4.	Caracterização mecânica	69
5.8.	Trabalho “<i>Performance Evaluation of Brick Chips as Coarse Aggregate on the Properties of Bituminous Mixes</i>”	70
5.8.1.	Considerações iniciais	70
5.8.2.	Materiais Utilizados	70
5.8.3.	Caracterização geométrica	71
5.8.4.	Caracterização mecânica	71
5.9.	Trabalho “<i>Engineering Properties and Applications of Recycled Brick Rubble</i>” ..	72
5.9.1.	Considerações iniciais	72
5.9.2.	Materiais Utilizados	73
5.9.3.	Caracterização geométrica	75
5.9.3.1.	Propriedades geométricas e mecânicas do tijolo moído	75
5.9.3.2.	Propriedades geométricas e mecânicas do tijolo moído misturado com betão esmagado (classe 3)	77
5.9.3.3.	Propriedades geométricas e mecânicas do tijolo moído misturado com pedra brita (classe 3) 79	
5.9.3.4.	Comparação entre as propriedades geométricas e mecânicas das várias misturas de tijolo esmagado.....	81
6.	<i>Estudo experimental</i>	87
6.1.	Considerações iniciais	87
6.1.1.	Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados	88
6.1.2.	Análise granulométrica.....	90
6.1.3.	Forma das Partículas - Índice de achatamento	92
6.1.4.	Qualidade dos Finos - Ensaio do equivalente de areia	92
6.1.5.	Qualidade dos finos - Ensaio do azul de metileno.....	93
6.1.6.	Massa volúmica e absorção de água	94

6.1.7.	Determinação da resistência à fragmentação (<i>Los Angeles</i>)	94
6.1.8.	Determinação da resistência ao desgaste (<i>micro-Deval</i>)	95
7.	<i>Análise de resultados</i>	97
7.1.	Considerações iniciais	97
7.1.1.	Especificações do LNEC	98
7.1.2.	Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal - RCD's Camadas não ligadas	99
7.1.3.	Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal - Agregado natural AC20 101	
7.1.4.	Outos trabalhos de investigação	105
8.	<i>Conclusões finais e trabalhos futuros</i>	113
	<i>Referências Bibliográficas</i>	117

Índice de figuras

Figura 1 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (InIR, sd)	6
Figura 2 - Zonas climáticas de Portugal onde o comportamento em termos de dano em pavimento flexíveis é semelhante, no que depende da “temperatura de serviço”(Batista, 1999)	12
Figura 3 - Resíduos gerados pela atividade económica em 2006, em percentagem do total de resíduos gerados, adaptado (Kloek & Blumenthal, 2009).....	14
Figura 4 - Geração total de resíduos na União Europeia dos 27 por atividade económica em 2008, adaptado (Eurostat, 2011)	15
Figura 5 - Produção total de resíduos na União Europeia dos 27 por categoria de resíduos em 2008, adaptado (Eurostat, 2011).....	15
Figura 6 - Geração de resíduos não minerais nos países da União Europeia dos 27 de 2004 a 2008 [kg/cap] (Eurostat, 2011)	16
Figura 7 - Determinação do volume das partículas flutuantes, VFL	21
Figura 8 - Lavagem do provete de ensaio.....	24
Figura 9 - Separação para pesagem do material retido em cada peneiro - Fração grossa	25
Figura 10 - Separação para pesagem do material retido em cada peneiro - Fração fina	26
Figura 11 - Peneiro de barras	27
Figura 12 - Distância entre a altura da camada superior do floculado até à base da proveta cilíndrica (h1)	31
Figura 13 - Altura de sedimentação (h2).....	31
Figura 14 - Papel de filtro usado na realização do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, sobre as 30g de caulinite	33
Figura 15 - Adição inicial ao preparado, da solução de azul de metileno adsorvida pela caulinite	34
Figura 16 - Picnómetro com o agregado de fração granulométrica 4 mm a 20 mm, cheio de água e sem ar (M2)	37
Figura 17 - Agregado de fração granulométrica 0,063 mm a 4 mm, no fim de passar 24 horas em Banho-maria	38
Figura 18 - Agregado de fração granulométrica 0,063 mm a 4 mm saturado com superfície seca, colapso quase total mas com cume bem definido e superfícies planas.....	39
Figura 19 - Máquina de <i>Los Angeles</i>	41
Figura 20 - Interior do tambor da máquina de Los Angeles com o provete e esferas.....	41

Figura 21 - Agregado antes e depois das 500 voltas na máquina de <i>Los Angeles</i>	42
Figura 22 - Lavagem do provete que passa pelo peneiro de #1,6 mm depois da conclusão do ensaio de <i>Los Angeles</i>	42
Figura 23 - Esferas - Carga abrasiva	43
Figura 24 - Máquina do ensaio <i>micro-Deval</i> , com os 4 cilindros rotativo	44
Figura 25 - Esquema de um equipamento de <i>micro-Deval</i> típico (IPQ, 2002j).....	44
Figura 26 - Agregado com as esferas e água	45
Figura 27 - Aspeto após o ensaio, com a extração da maior parte da água e esferas.....	46
Figura 28 - Curva granulométrica dos agregados grossos reciclados de betão (IST, 2006).....	51
Figura 29 - Curva granulométrica dos agregados grossos reciclados mistos (IST, 2006).....	52
Figura 30 - Curva granulométrica do betão britado (Pestana, 2008)	55
Figura 31 - Curvas granulométricas dos materiais RCD-CB e RCD-BDem (Ferreira, 2009)	59
Figura 32 - Agregados RCD misto (Lima, 2008)	61
Figura 33 - Agregados RCD puro (Lima, 2008)	61
Figura 34 - Curva Granulométrica do Agregado Reciclado “misto” (Lima, 2008)	62
Figura 35 - Curva Granulométrica da brita de Itaitinga (Lima, 2008)	63
Figura 36 - Análise granulométrica (Rasel et al., 2011).....	71
Figura 37 - Agregados de resíduo de tijolo moído (20 mm), centro de reciclagem <i>Alex Fraser em Laverton</i> (Aatheesan, 2011)	73
Figura 38 - Agregado de resíduo de betão esmagado (CC3), (20 mm), centro de reciclagem <i>Alex Fraser em Laverton</i> (Aatheesan, 2011)	74
Figura 39 - Agregado de resíduo de pedra basáltica britada (Classe 3), (20 mm), centro de reciclagem <i>Alex Fraser em Laverton</i> (Aatheesan, 2011)	74
Figura 40 - Agregado de resíduo de tijolo moído (20 mm), <i>Delta em Sunshine</i> (Aatheesan, 2011)	75
Figura 41 - Comparação das curvas granulométricas da amostra de resíduo de tijolo moído antes e depois da compactação - Local 1 e Local 2 (Aatheesan, 2011)	76
Figura 42 - Curvas granulométricas de tijolo misturado com betão, série 1, adaptado (Aatheesan, 2011)	78
Figura 43 - Curvas granulométricas de tijolo misturado com pedra britada, série 1, adaptado (Aatheesan, 2011)	80
Figura 44 - Densidade das partículas grossas (4,75/19 mm), CC/CB e CR/CB	82
Figura 45 - Densidade das partículas finas (0/4,75 mm), CC/CB e CR/CB.....	82
Figura 46 - Absorção de água das partículas grossas (4,75/19 mm), CC/CB e CR/CB	83
Figura 47 - Absorção de água das partículas finas (0/4,75 mm), CC/CB e CR/CB.....	84
Figura 48 - Índice de achatamento, CC/CB e CR/CB	84

Figura 49 - Los Angeles, CC/CB e CR/CB	85
Figura 50 - Gráfico correspondente aos constituintes do agregado grosso reciclado	90
Figura 51 - Curva granulométrica do ARCD	92

Índice de Quadros

Quadro 1 - Função da fundação de um pavimento (InIR, sd)	6
Quadro 2 - Função das camadas de um pavimento (InIR, sd)	7
Quadro 3 - Propriedades dos agregados que afetam o comportamento das misturas betuminosas (Freire, 2004)	10
Quadro 4 - Recomendações sobre a massa dos provetes (IPQ, 2011a)	20
Quadro 5 - Constituintes não flutuantes de agregados reciclados grossos (IPQ, 2011a).....	22
Quadro 6 - Indicações sobre a massa necessária para 1000 partículas (IPQ, 2011a).....	22
Quadro 7 - Massa dos provetes de ensaio para agregados de peso corrente(IPQ, 2000)	24
Quadro 8 - Relação da fração granulométrica com os peneiros de barras (IPQ, 2002e).....	28
Quadro 9 - Categorias para os valores máximos do Índice de achatamento (IPQ, 2004).....	29
Quadro 10 - Categoria para os valores mínimos de equivalente de areia dos agregados finos (InIR, 2009)	32
Quadro 11 - Categorias para os valores máximos de azul de metileno da fração 0/2 mm (InIR, 2009)	35
Quadro 12 - Categorias para os valores máximos de azul de metileno <i>MBF</i> da fração 0/0,125 mm (IPQ, 2004)	36
Quadro 13 - Massa mínima dos provetes de ensaio (IPQ, 2003).....	37
Quadro 14 - Categoria para os valores máximos do coeficiente <i>Los Angeles</i> (IPQ, 2004).....	43
Quadro 15 - Categorias para os valores máximos da resistência ao desgaste por atrito (IPQ, 2004)	47
Quadro 16 - Composição granulométrica dos agregados grossos reciclados de betão e mistos...	51
Quadro 17 - Absorção e massa volúmica dos agregados grossos reciclados de betão e mistos (4,72/19 mm).....	52
Quadro 18 - Resultados do ensaio de análise granulométrica, adaptado (Pestana, 2008).....	54
Quadro 19 - Classificação das amostras em estudo de acordo com a natureza dos constituintes da fração grossa (Ferreira, 2009)	57
Quadro 20 - Valores obtidos para Análise Granulométrica (Ferreira, 2009).....	58
Quadro 21 - Tipos de tijolo de argila utilizadas no estudo (Khalaf, Fouad M., 2004).....	65
Quadro 22 - Valores da densidade relativa e porosidade (Khalaf, Fouad M., 2004)	66
Quadro 23 - Tipos de tijolo de cerâmica mais comum em Portugal (Preceram, 2012).....	67

Quadro 24 - Análise Granulométrica (CEN, 2006)	68
Quadro 25 - Detalhes das misturas, molde de 100 mm de diâmetro (Woodside, Woodward, & J.McElhinney, 2011)	69
Quadro 26 - Detalhes das misturas, molde 150 mm de diâmetro (Woodside, Woodward, & J.McElhinney, 2011)	69
Quadro 27 - Propriedades dos agregados grossos, adaptado (Rasel et al., 2011)	71
Quadro 28 - Distribuição granulométrica do resíduo tijolo (antes da compactação) - Local 1 e Local 2	76
Quadro 29 - Propriedades mecânicas das amostras de tijolo moído - Local 1 e Local 2	77
Quadro 30 - Distribuição granulométrica do tijolo misturado com betão, série 1 (Aatheesan, 2011)	78
Quadro 31 - Propriedades mecânicas das amostras de tijolo misturado com betão (Aatheesan, 2011)	79
Quadro 32 - Distribuição granulométrica do tijolo misturado com pedra britada, série 1 (Aatheesan, 2011)	80
Quadro 33 - Propriedades mecânicas das amostras de tijolo misturado com pedra britada (Aatheesan, 2011)	81
Quadro 34 - Comparação da densidade das partículas (4,75/19 mm e 0/4,75 mm) para CC/CB e CR/CB (Aatheesan, 2011)	82
Quadro 35 - Comparação da absorção de água (4,75/19 mm e 0/4,75 mm) para CC/CB e CR/CB	83
Quadro 36 - Comparação do índice de achatamento entre CC/CB e CR/CB	84
Quadro 37 - Comparação do <i>Los Angeles</i> entre CC/CB e CR/CB	85
Quadro 38 - Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados	88
Quadro 39 - Composição granulométrica do ARCD's	91
Quadro 40 - Massa volúmica e absorção de água (IPQ, 2003)	94
Quadro 41 - Classificação de agregados reciclados grossos para fabrico de betão (LNEC, 2009a) 98	
Quadro 42 - Classificação dos agregados reciclados de acordo com a natureza dos constituintes da fração grossa, (EP, 2011)	99
Quadro 43 - Campos de aplicação dos agregados (EP, 2011)	100
Quadro 44 - Comparação da classe C de classificação dos agregados reciclados de acordo com a natureza dos constituintes da fração grossa do Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal e o ARCD	100
Quadro 45 - Comparação valores obtidos no ARCD com o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal	102
Quadro 46 - Índice de achatamento	105
Quadro 47 - Equivalente de areia	106
Quadro 48 - Azul de Metileno	106

Quadro 49 - Massa volúmica do material impermeável das partículas [ρ_a]	107
Quadro 50 - Massa volúmica das partículas secas em estufa [ρ_d].....	107
Quadro 51 - Massa volúmica das partículas saturada com superfície seca [ρ_{ssd}].....	107
Quadro 52 - Absorção de Água.....	108
Quadro 53 - <i>Los Angeles</i>	110
Quadro 54 - micro-Deval.....	111

Lista de abreviaturas

ABGE	Agregado britado de granulometria extensa
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC 20	“Asphalt Concrete”, betão betuminoso, com agregado com abertura do peneiro superior igual a 20 mm
APA	Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.
ARCD	Agregado constituído por resíduo de construção e demolição
CT	Comissão Técnica
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (Brasil)
EP	Estradas de Portugal, S.A.
InIR	Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, IP
IPQ	Instituto Português da Qualidade
JAE	Junta Autónoma de Estradas
LER	Lista Europeia de resíduos
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
Nº	Número
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCD-CB	Resíduo resultante da britagem de cubos de betão, semelhante a elementos estruturais (vigas, lajes e pilares).
RCD-BDem	Resíduo resultante da britagem em obra dos materiais de demolição de edifícios, mistura de betão com elementos de recobrimentos e acabamentos, tais como, tijolo, azulejo, e telha.
Rpm	Rotações por minuto
UE	União Europeia
BE	Bélgica
BG	Bulgária
CZ	República Checa
DK	Dinamarca
DE	Alemanha
EE	Estónia
EL	Grécia
ES	Espanha

InIR	Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP
IT	Itália
CY	Chipre
LV	Letónia
LT	Lituânia
LU	Luxemburgo
HU	Hungria
MB	Macadame Betuminoso
MT	Malta
NL	Holanda
AT	Áustria
PT	Portugal
RO	Roménia
SI	Eslovénia
SK	Eslováquia
FI	Finlândia
SE	Suécia
Uni.	Unidades
UK	Reino Unido
NO	Noruega

1. Introdução

1.1. Considerações Iniciais

O presente trabalho aborda a análise de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição (ARCD) e a viabilidade da sua utilização em misturas betuminosas a quente a aplicar em camada de base de Pavimentos Rodoviários.

Os ARCD utilizados no presente trabalho são resíduos que não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não podem ser solúveis, inflamáveis, biodegradáveis, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entrem em contato de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana. O conteúdo poluente e ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e ou subterrâneas (Decreto-Lei n.º 73, 2011).

A produção de Resíduos de Construção e Demolição (RCD's) está principalmente concentrada no setor da construção civil, designadamente em obras de construção, demolição e operações de manutenção e reabilitação.

A reciclagem de RCD's resulta numa importante poupança de recursos primários ou naturais, que, quando substituídos por materiais ditos secundários, para além da redução do impacto ambiental, evidenciam também vantagens para o processo construtivo, por reduzirem a dependência dos materiais primários e diminui o volume de resíduos produzidos e, consequentemente a ocupação desnecessária de aterros.

O aumento das preocupações com o destino dos RCD's, através de uma consciência ambiental e das políticas do planeamento e gestão de resíduos, tem como principal objetivo a preservação dos recursos naturais.

A criação de legislação específica com particular atenção à gestão de resíduos, por parte dos intervenientes durante o seu ciclo de vida, provocou um despertar para a viabilidade e a oportunidade de utilização dos RCD's em substituição de recursos naturais.

Em termos económicos, a utilização dos RCD's no seu local de origem torna-se cada vez mais interessante, pela redução de custos na aquisição de matéria prima, no encaminhamento do resíduo para locais licenciados, taxas de receção para a realização de operações de gestão de resíduos, assim como pelo cumprimento à utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados, previsto no Decreto-Lei nº73/2011 (Decreto-Lei n.º 73, 2011).

Tendo em consideração que a indústria de construção rodoviária pode ser considerada das que mais agregados naturais consomem, tornou-se oportuno a tentativa de reutilizar RCD's em misturas betuminosas.

Desenvolveu-se o trabalho que agora se apresenta, tendo como principal objetivo a caracterização geométrica e física ou mecânica de agregado constituído por RCD, mais adiante designado por agregados de resíduos de construção e demolição (ARCD), proveniente de obras do distrito de Castelo Branco, sendo disponibilizados pela empresa Ambilei - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S. A., unidade de Castelo Branco.

1.2. Objetivo e metodologias

As vantagens da reciclagem do ponto de vista da proteção do meio ambiente em virtude de uma menor necessidade de extração de materiais granulares em pedreiras, sendo que a atividade extrativa tem um forte impacto visual e de destruição de ecossistemas envolventes, e consequente aumento do ciclo de vidas dos resíduos, proporcionando uma menor ocupação de vazadouros e menor consumo de energia, entre outras, são a base para definir os objetivos deste trabalho.

O objetivo principal é o de contribuir para um melhor conhecimento das características dos ARCD, na perspetiva de analisar a viabilidade da sua aplicação em misturas betuminosas,

camada de base AC20, com suporte no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011).

A escolha do RCD identificado na lista europeia de resíduos (LER) de acordo com a (Portaria nº. 209, 2004), prendeu-se inicialmente com a identificação dos centros licenciados para a realização de operações de gestão de resíduos do distrito de Castelo Branco, sendo que numa primeira abordagem tinha-se a intenção de estudar o RCD betão (LER-17 01 01).

Verificou-se que os centros de operações de gestão de resíduos do distrito de Castelo Branco recebem RCD de resíduo de betão (LER-17 01 01) em pequenas quantidades, ao contrário do resíduo de misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (LER-17 01 07).

Constatou-se também que, embora já haja vários estudos de incorporação de resíduo de misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos em misturas betuminosas em países como a Escócia, Irlanda do Norte ou Bangladesh, de acordo com o que se apresenta no capítulo 5, não é ainda, uma alternativa em Portugal. Deste modo, optou-se por alterar o resíduo de betão (LER-17 01 01), para misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (LER-17 01 07).

Procedeu-se à recolha de amostra de misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (LER-17 01 07) e à sua caracterização em laboratório, no que respeita às propriedades geométricas e físicas.

Os resultados dos ensaios realizados foram comparados com as características exigidas ao agregado a utilizar em mistura betuminosa de camada de base AC20, indicadas no Caderno de Encargos Tipo de Obra de Estradas de Portuga (EP, 2011), bem como com os obtidos em outros trabalhos de investigação realizados quer em Portugal per noutros países, Europeus e não Europeus.

1.3. Organização do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido em 8 capítulos, cujos conteúdos se apresentam seguidamente.

No Capítulo 1 faz-se uma breve introdução com a definição dos objetivos e organização do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se uma breve noção sobre Pavimentos Rodoviários no que respeita à sua constituição, enquadramento histórico e caracterização dos constituintes das misturas betuminosas que influenciam o seu comportamento.

O Capítulo 3 refere-se aos resíduos de construção e demolição e o seu enquadramento legal através de legislação, normas, especificações e Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal.

No capítulo 4 faz-se uma breve apresentação dos ensaios de laboratório, relativos às propriedades geométricas, físicas e mecânicas utilizados para caracterização do agregado de resíduos de construção e demolição em estudo.

No capítulo 5 são apresentados alguns trabalhos científicos sobre aplicação de resíduos de construção e demolição em pavimentos rodoviários. Desenvolvidos quer em Portugal quer noutros países Europeus e não Europeus.

No capítulo 6 são apresentados os resultados do estudo experimental realizado sobre os resíduos de construção e demolição do presente trabalho.

No capítulo 7 são analisados os resultados obtidos no presente trabalho em comparação com as especificações do laboratório Nacional de Engenharia Civil, Caderno de Encargos da Estradas de Portugal e Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias.

Neste mesmo capítulo os valores obtidos nos ensaios realizados no presente trabalho são comparados com os valores obtidos nos trabalhos científicos apresentados no capítulo 5.

Por último, no capítulo 8 apresentam-se as conclusões gerais e algumas recomendações com vista ao prosseguimento dos estudos iniciados com este trabalho.

2. Breves noções sobre Pavimentos Rodoviários

2.1. Constituição / estrutura

De acordo com a definição estabelecida na Especificação 1 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC (LNEC, 1962) um pavimento é a “parte da estrada, rua ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respetivas solicitações à infra-estrutura: terreno, obras de arte, etc. Pode ser constituído por uma ou mais camadas tendo, no caso geral, uma camada de desgaste e camada de fundação. Cada uma destas camadas pode ser composta e constituída por camadas elementares”.

De um modo mais lato pode dizer-se que um pavimento é uma estrutura constituída por um conjunto de camadas colocadas sobre uma plataforma de suporte, como apresentado na Figura 1.

Abaixo da plataforma, sobre a qual assenta o pavimento, está a fundação geralmente constituída pelo solo de fundação e pelo leito do pavimento, com as funções apresentadas no Quadro 1.

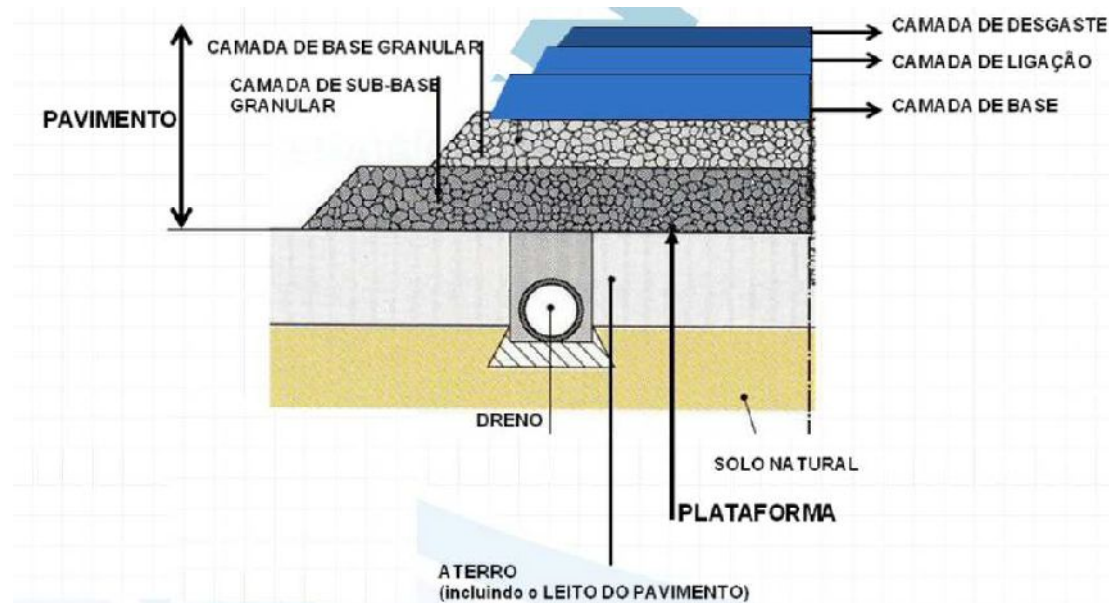


Figura 1 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (InIR, sd)

Quadro 1 - Função da fundação de um pavimento (InIR, sd)

Fundação do pavimento	Função
Terreno da fundação	- Suporte do pavimento; São as suas características que condicionam o dimensionamento.
Leito do pavimento	- Evitar deformações do solo; - Homogeneidade das características mecânicas da fundação; - Plataforma construtiva; - Possibilidade de compactação das camadas sobrejacentes em adequadas condições.

O leito do pavimento é a camada de transição entre o solo de fundação e o corpo do pavimento e tem objetivos distintos na fase de construção e durante a exploração.

Durante a fase construtiva o leito do pavimento tem como função proteger o solo de fundação, estabelecer uma adequada qualidade de nivelamento e permitir a traficabilidade dos equipamentos de obra.

Durante a fase de exploração o leito do pavimento, tem por objetivo tornar homogêneo ou melhorar o comportamento da fundação e, se necessário, proteger da ação do gelo.

As camadas de sub-base e de base dotam o pavimento da resistência mecânica necessária para suportar as cargas verticais induzidas pelo tráfego. Os materiais utilizados nestas camadas distribuem as pressões sobre a plataforma de forma a manter as deformações ao nível dos limites admissíveis.

O tipo de materiais e espessuras das camadas de base e de ligação, subjacentes à camada de desgaste, depende do nível de tráfego e das ações climáticas, bem como da qualidade da fundação.

A camada de desgaste é a camada superior da estrutura do pavimento, sobre a qual são diretamente exercidas as agressões conjuntas do tráfego e do clima. Esta camada contribui ainda, para a durabilidade da estrutura do pavimento, nomeadamente por desempenhar a função de estanquidade das águas pluviais.

No Quadro 2 apresentam-se as funções das camadas de um pavimento.

Quadro 2 - Função das camadas de um pavimento (InIR, sd)

Fundação do pavimento	Função
Sub-base	<ul style="list-style-type: none">- Proteger durante a fase de construção as camadas inferiores;- Proteger a base da subida de água capilar;- Drenagem interna do pavimento;- Camada estrutural;- Resistência à erosão.
Base	<ul style="list-style-type: none">- Camada estrutural;- Degradação das cargas induzidas pelo tráfego.
Desgaste	<ul style="list-style-type: none">- Adequada circulação do tráfego com conforto e segurança;- Drenagem ou impermeabilização;- Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego.

2.2. Evolução histórica

No desenvolvimento dos pavimentos destinados à circulação de veículos de transporte rodoviário, podem-se identificar dois fatores que impulsionaram o seu progresso.

O primeiro coincidiu com o grande aumento de circulação de carros de tração animal e carruagens nos finais do século XVIII. Os técnicos responsáveis pela construção e conservação das vias introduziam as bases granulares pouco sensíveis à água, estabelecendo novas especificações sobre materiais e processos construtivos, com o intuito de dispor de pavimentos não deformáveis e resistentes à ação do tráfego e da água.

Estes técnicos e construtores de pavimentos como Mc Adam e Telford, introduziram conceitos e materiais que ainda hoje são utilizados, tais como:

- Sendo a parte superior da terraplenagem a camada que suporta as ações do tráfego, se se mantiver seca pode suportar cargas consideráveis, sem se deformar.
- Devem utilizar-se pedras partidas na construção do pavimento, de forma a aumentar a estabilidade das camadas granulares, através do aumento do atrito entre as partículas.

O segundo marco surgiu com o aparecimento do automóvel, que pôs em evidência as novas exigências colocadas aos pavimentos pelos veículos motorizados, ou seja, a necessidade de dispor de uma superfície para a circulação dos veículos mais cómoda e segura. Nessa altura, as poeiras constituíam um dos principais incómodos, quer para os utilizadores das vias, quer para as populações que viviam nas suas imediações (Jiménez & Sánchez, 2006).

O Dr. Ernest Guglielminetti, Suíço, conhecido posteriormente pelos técnicos de estradas como “Dr. Alcatrão”, propôs ao Príncipe Alberto I, no ano de 1902, a realização de uma rega com alcatrão da superfície da estrada onde se iria disputar o prémio automobilístico do Mónaco, para evitar o levantamento de poeira à passagem dos veículos.

Esta proposta tinha como base a experiência adquirida pelo Dr. Guglielminetti em Java, onde nos hospitais se aplicava uma rega com alcatrão como tratamento anti poeira (Jiménez & Sánchez, 2006).

Os fatores acima citados são os primeiros passos dos objetivos da conceção de pavimentos, que têm vindo a evoluir, sendo cada vez mais exigentes relativamente à resistência, à degradação e deformação sob a passagem de veículos.

É igualmente importante que os pavimentos proporcionem uma superfície cómoda e segura com resistência à derrapagem, projeção de água, maior visibilidade, suporte regular, conforto ótico e acústico.

Pode-se afirmar que a contribuição do emprego dos ligantes betuminosos e seu desenvolvimento, na construção rodoviária foi determinante para a continuação desses objetivos, por um lado, dando coesão e resistência às camadas de materiais granulares e, por outro, proporcionando camadas e superfícies de circulação cada vez mais seguras e confortáveis, (Jiménez & Sánchez, 2006).

A reciclagem de pavimentos surge na década de setenta do séc. XX, principalmente nos EUA, durante a crise petrolífera e conseqüente aumento do preço do crude de petróleo, e também um pouco pelo interesse na conservação de energia (Azevedo et al., 2003).

A palavra reciclagem difundiu-se nos meios de comunicação social, a partir do final da década de oitenta do séc. xx, quando foi constatado que as fontes de petróleo e de outras matérias-primas não renováveis estavam a esgotar-se rapidamente e que havia falta de espaço

para os aterros na natureza. A expressão vem do inglês recycle (re = repetir, e cycle = ciclo) (Lima, 2008).

As técnicas da reciclagem de pavimentos têm sido desenvolvidas até aos nossos dias, tendo-se assistido nos últimos anos a um progressivo desenvolvimento teórico e tecnológico.

Ao longo das duas últimas décadas o Homem tornou-se mais interessado na defesa do meio ambiente e mais consciente de que os recursos naturais são limitados.

Sendo a indústria de construção rodoviária uma das que mais agregados naturais consomem, tanto na construção, como na reabilitação e reconstrução torna-se, sem dúvida, numa indústria bastante desfavorável do ponto de vista ambiental e económico.

Como a grande maioria dos materiais dos pavimentos rodoviários são agregados, provenientes de pedreiras, 100% em camadas não ligadas e 95% em misturas betuminosas, com fortes impactos ambientais associados à sua exploração, o desafio é então a construção de pavimentos com camada de base com ARCD de forma a escoar os RCD's que se acumulam em vazadouros.

A reutilização de RCD's em misturas betuminosas aumenta o seu ciclo de vida de aproximadamente 20 anos, dado que é geralmente o período de vida útil de um pavimento flexível (Azevedo et al., 2003).

2.3. Características dos constituintes das misturas betuminosas

2.3.1. Considerações iniciais

A principal função de um pavimento rodoviário é a de constituir uma superfície livre, destinada à circulação de veículos em condições adequadas de segurança, conforto e economia.

Para cumprir essa função, a superfície dos pavimentos deve possuir determinadas características intrinsecamente relacionadas com as características dos seus elementos constituintes.

Sendo as camadas ligadas designadas por misturas betuminosas, constituídas por betume, agregados e fíler torna-se importante avaliar cada um dos seus constituintes, já que cada um deles tem influência no produto final.

Nos pontos seguintes faz-se uma breve apresentação das características de cada um deles.

2.3.2. Agregados

Os agregados podem ser designados por agregados grossos ou finos, em função da fração granulométrica considerada. Assim, agregados grossos correspondem à fração granulométrica (d/D) 2/45 mm e agregados finos às partículas menores que 2 mm e em que a maior percentagem fica retida no peneiro de 0,063 mm.

A resistência das misturas betuminosas deve-se à contribuição de duas componentes fundamentais, a coesão fornecida pelo betume e a fricção interna fornecida pelo agregado (Branco et al., 2011).

As propriedades dos agregados que afetam o comportamento das misturas betuminosas, na fase de construção e em serviço, são identificadas no Quadro 3 (Freire, 2004).

Quadro 3 - Propriedades dos agregados que afetam o comportamento das misturas betuminosas (Freire, 2004)

Fase	Comportamento das misturas		Propriedades dos agregados
Construção	Trabalhabilidade		Granulometria
	Manutenção das características durante o fabrico e a aplicação		Resistência à fragmentação Resistência ao Choque térmico
Em Serviço	Características estruturais: Rigidez Resistência ao fendilhamento Resistência às deformações permanentes		Granulometria/Textura/Forma Dimensão máxima do agregado Dureza das partículas Resistência à fragmentação
	Características superficiais	Coefficiente de atrito	Textura / Forma Dimensão máxima do agregado Resistência à fragmentação Resistência ao polimento
		Drenagem superficial	Dimensão máxima do agregado Granulometria
		Encandeamento e refletividade	Propriedades óticas
		Desgaste dos pneus, ruído e resistência ao rolamento	Textura / Forma das partículas Dimensão máxima do agregado
	Durabilidade		Composição química Suscetibilidade à água Resistência ao gelo/degelo Adesividade betume/agregado Alterabilidade Massa volúmica

2.3.3. Fíler

Fíler é um agregado cuja maior parte passa pelo peneiro de 0,063 mm, podendo ser acrescentado a materiais de construção para se obterem determinadas características, (IPQ, 2002a).

Os Fíleres funcionam como material de enchimento, que ao juntar-se com o betume forma um “mástique” que liga as restantes partículas, regidificando a mistura (Bardini et al., 2010).

Este material pode resultar do processo de fabrico da mistura betuminosa, por recuperação dos finos por meio de sistemas adequados - fíler recuperado, ou ser produzido em separado numa instalação industrial segundo um processo controlado - fíler comercial, ambos de origem mineral (EP, 2011).

O fíler recuperado pode ser de qualquer natureza petrográfica, pois dependerá da natureza petrográfica do agregado utilizado para o fabrico da mistura betuminosa. O fíler comercial deverá ser de natureza calcária, cimento do tipo Portland, cal hidráulica ou cinzas volantes (EP, 2011).

2.3.4. Betume

O betume asfáltico é um material obtido por processos de refinação do petróleo bruto, termoplástico cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Geralmente à temperatura ambiente apresenta-se no estado semi-sólido, sendo necessário fluidificá-lo temporariamente para ser usado na construção rodoviária (Branco et al., 2011).

As condições climáticas são um fator importante a ter em conta no dimensionamento de pavimentos, sendo o efeito da temperatura no local de aplicação um fator de influência no comportamento da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas.

Portugal encontra-se dividido em quatro zonas climáticas, como se mostra na Figura 2, as quais são delimitadas pela temperatura máxima do ar no período de verão, servindo exclusivamente de referência, já que são as temperaturas mais altas do ar no verão que mais condicionam a parte do dano nos pavimentos flexíveis que resulta do comportamento das misturas betuminosas (Batista, 1999).

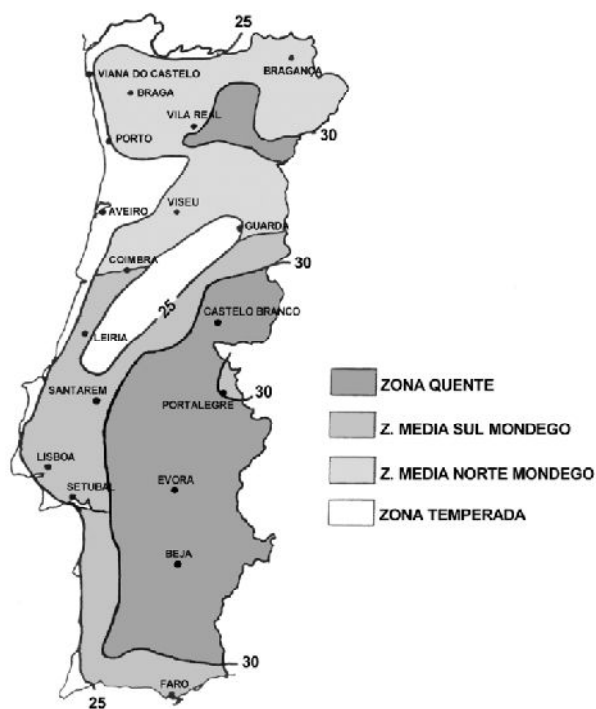


Figura 2 - Zonas climáticas de Portugal onde o comportamento em termos de dano em pavimento flexíveis é semelhante, no que depende da “temperatura de serviço”(Batista, 1999)

3. Resíduos de construção e demolição

3.1. Generalidades

Com base na publicação da Eurostat (Kloek & Blumenthal, 2009), relativa aos resíduos produzidos em 2006 na União Europeia (UE) verificou-se que:

- O volume de resíduos gerados pelas atividades económicas pode ser agrupado em quatro grandes setores económicos: agricultura, indústria, construção e serviços (Figura 3).
- Em 2006, a indústria e a construção geram o maior volume de resíduos, que juntos representam 82,7% de todos os resíduos produzidos por atividades económicas.
- Os serviços representaram 11,6% do total de resíduos e agricultura 5,8%.

Na análise da Figura 3, que reflete a quantidade de resíduos gerados por atividade económica em 2006 em percentagem do total de resíduos gerados, verifica-se que Portugal produziu aproximadamente 57% de resíduos no setor da indústria, 33% de resíduos no setor dos serviços e 10% de resíduos no setor da construção, no entanto, os resíduos produzidos pelo setor

de agricultura não têm representatividade. Já na UE, os resíduos do setor da construção representam mais de 30% do total de resíduos produzidos pelas atividades económicas.

Malta obteve 90,3% de seus resíduos no setor da construção, sendo o país com maior quantidade de resíduos neste setor.

As diferenças da quantidade e tipos de resíduos gerados por atividade económica entre os diferentes países podem ser parcialmente explicadas pelas diferenças na estrutura das suas economias.

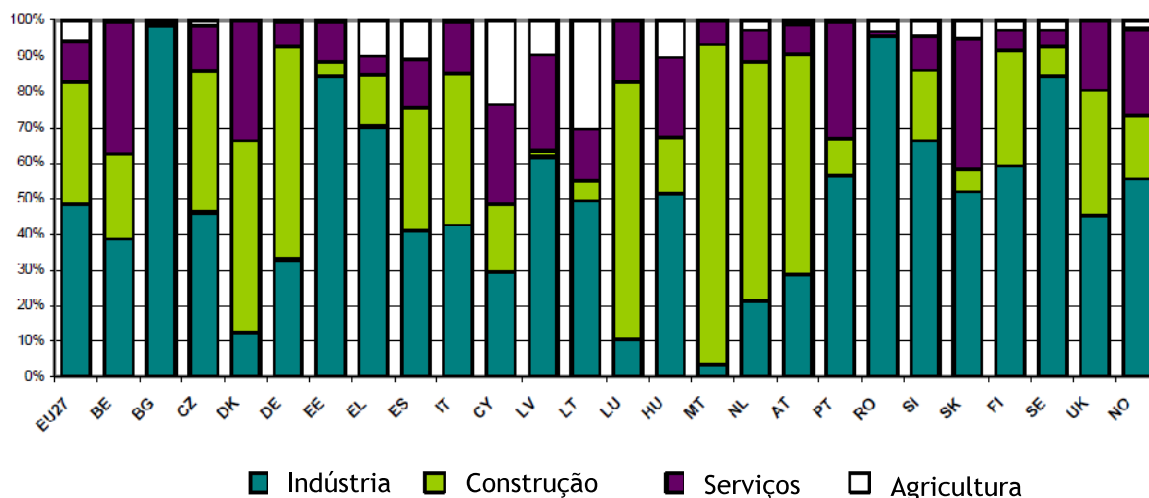


Figura 3 - Resíduos gerados pela atividade económica em 2006, em percentagem do total de resíduos gerados, adaptado (Kloek & Blumenthal, 2009)

Em 2008, a geração total de resíduos na União Europeia dos 27 (EU-27) foi de 2,62 bilhões de toneladas, sendo um pouco menor do que em 2004 e 2006, anos em que os países da União Europeia totalizaram 2,68 bilhões de toneladas e 2,73 bilhões de toneladas, respetivamente.

A Figura 4 representa a geração total de resíduos na União Europeia dos 27 por atividade económica em 2008.

Por ordem decrescente relativamente à maior quantidade de resíduos produzida por setores temos:

- A construção, com 859 milhões de toneladas ou 32,9%;
- A indústria de extração de minerais com 727 milhões de toneladas ou 27,8%;
- A indústria de transformação com 343 milhões de toneladas ou 13,1%;
- As famílias com 221 milhões de toneladas ou 8,5%.

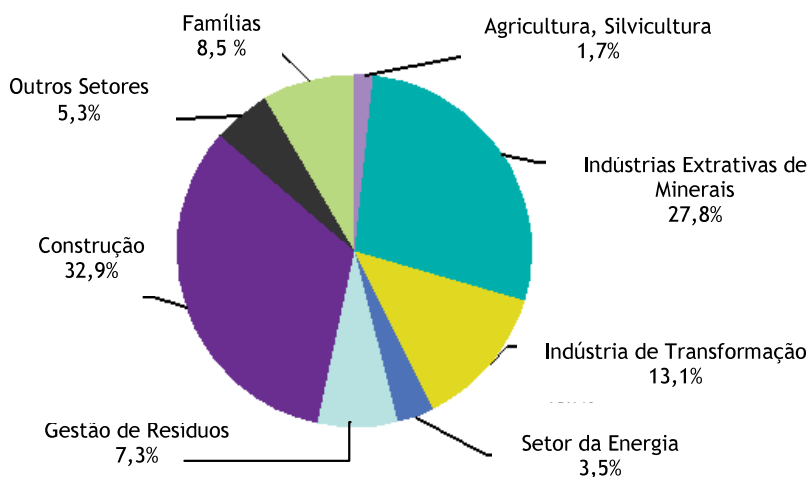


Figura 4 - Geração total de resíduos na União Europeia dos 27 por atividade económica em 2008, adaptado (Eurostat, 2011)

Na Figura 5 está ilustrada a produção total de resíduos na União Europeia dos 27 por categoria de resíduos em 2008 (Eurostat, 2011).

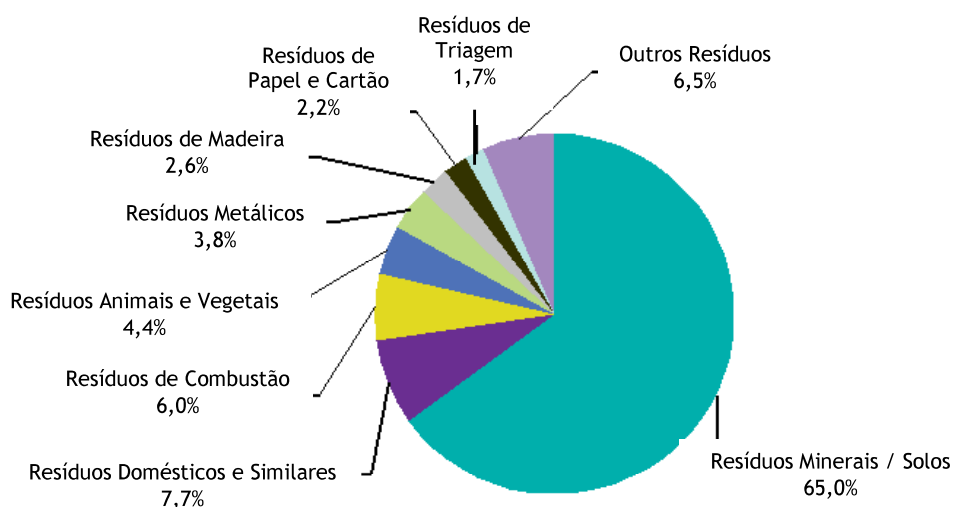


Figura 5 - Produção total de resíduos na União Europeia dos 27 por categoria de resíduos em 2008, adaptado (Eurostat, 2011)

Como se pode verificar na Figura 5 a maior quantidade de resíduos produzidos na União Europeia dos 27 em 2008 foi de minerais e solos com 65%, seguido da categoria de resíduos domésticos e similares com 202 milhões de toneladas correspondentes a 7,7% do total gerado.

Na categoria de resíduos domésticos a maior quantidade foi gerado pelas famílias (72%) e pelo setor de serviços (19%), esta categoria inclui misturas de resíduos urbanos, resíduos volumosos e resíduos de limpeza de rua.

Os montantes específicos de cada país por cidadão para os anos de 2004, 2006 e 2008 são mostrados na Figura 6, ordenados por valores decrescentes de 2008.

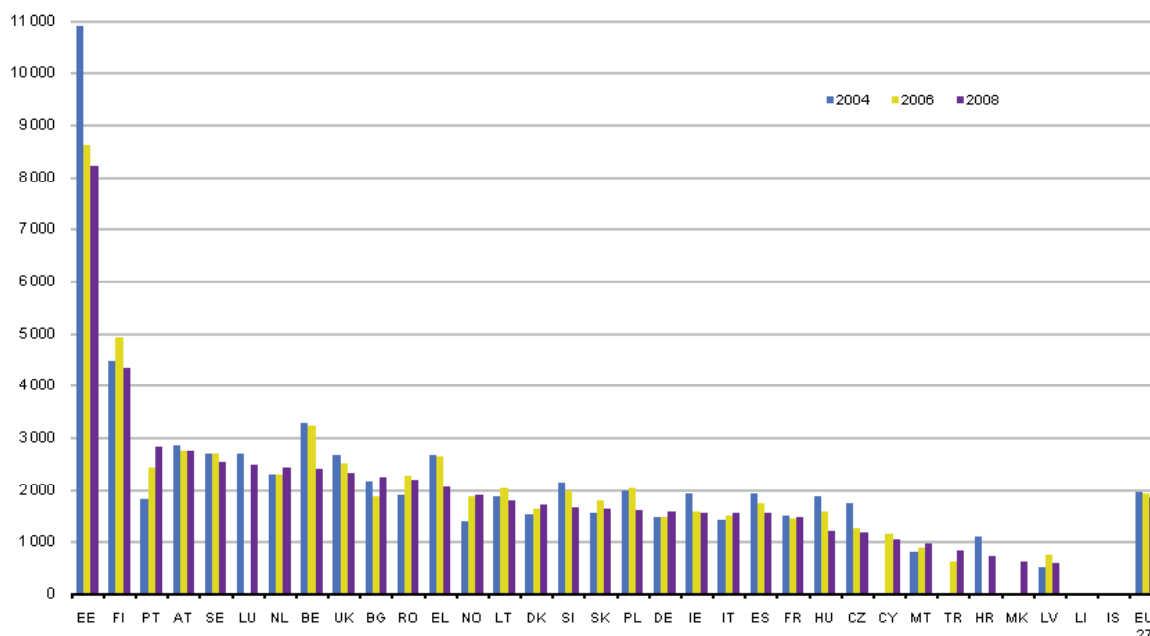


Figura 6 - Geração de resíduos não minerais nos países da União Europeia dos 27 de 2004 a 2008 [kg/cap] (Eurostat, 2011)

Os valores dos indicadores para 2008 variam entre 606 kg/cap na Letónia e 8 216 kg/cap na Estónia.

3.2. Enquadramento legal

O Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, aborda a prevenção da produção de resíduos e fomenta a sua reutilização e reciclagem, como forma de consolidar a valorização dos mesmos, com vantagens para os agentes económicos, bem como estimula o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização, incentiva à reciclagem e preservação dos recursos naturais, prevê a utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados em empreitadas de obras públicas e define os requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos (APA, 2011).

A Portaria nº 209 de 2004 faz a descrição de todos os resíduos publicando a Lista Europeia de Resíduos, em que a cada resíduo é atribuído um código de seis dígitos. O resíduo de

construção e demolição de mistura de betão, tijolo, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos tem o código 17 01 07. A operação de valorização de resíduo corresponde à R5 - Reciclagem/recuperação de outras matérias inorgânicas (Portaria nº. 209, 2004).

A grande variabilidade dos resíduos condiciona a sua valorização, pelo que, uma adequada triagem e uma adequada seleção no processo de preparação são requisitos básicos na produção de agregados reciclados de qualidade.

A variação das propriedades pode tornar impraticável a utilização dos resíduos de construção e demolição como agregados e obrigar a frequências de amostragem muito elevadas para o controlo da produção. Por outro lado, deve evitar-se a presença de materiais que, pela sua natureza sejam prejudiciais para o ambiente ou comprometam o desempenho do produto que irão incorporar.

3.3. Especificações aplicáveis

3.3.1. NP EN

Relativamente aos agregados naturais, existem seis Normas Europeias harmonizadas, NP EN 12620(IPQ, 2002b), NP EN 13043 (IPQ, 2004), NP EN 13055-1 (IPQ, 2005a), NP EN 13139 (IPQ, 2005b), NP EN 13242 (IPQ, 2005c) e NP EN 13450 (IPQ, 2005d), que servem de base à sua caracterização.

No presente trabalho é utilizada como referência a NP EN 13043 (IPQ, 2004), que especifica as propriedades dos agregados para utilização em misturas betuminosas e tratamentos superficiais a aplicar em estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, embora esta norma não seja aplicável à utilização de produtos de demolição em misturas betuminosas.

3.3.2. Especificações do LNEC

As Especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil que se referem ao tema de reciclagem, embora não exclusivamente de pavimentos rodoviários são:

E 471 Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos (LNEC, 2009a);

E 472 Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central (LNEC, 2009b);

E 473 Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos (LNEC, 2009c);

E 474 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, 2009d).

3.3.3. Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal

Dado que para os ARCD's a aplicar em misturas betuminosas ainda não estão estabelecidos os limites a considerar para as suas diferentes propriedades, utilizaram-se no presente trabalho, as indicações existentes no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011), para ARCD's a aplicar em camadas não ligadas e para agregados naturais a aplicar em misturas betuminosas.

4. Breve apresentação dos ensaios de laboratório

4.1. Generalidades

No presente capítulo faz-se uma breve descrição dos ensaios realizados sobre agregados com o objetivo de caracterizar as respetivas propriedades geométricas e físicas em laboratório.

Na execução dos ensaios são utilizadas as normas NP EN, de acordo com a indicação do Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011).

A avaliação da concentração dos elementos químicos constituintes do ARCD pelo ensaio da lixiviação de acordo com a EN 12457-4: *Characterisation 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 particle size below 10 mm (Without or with size reduction)* (CEN, 2002), tem alguma importância, uma vez que o material aplicado em pavimentos rodoviários está sujeito ao contacto com a água, tanto pela precipitação, como pela variação do nível freático.

Havendo material contaminado, suscetível à lixiviação, quando em contacto com a água poderá contaminá-la. A água contaminada, por sua vez ao infiltrar-se nos terrenos adjacentes, poderá dar origem à sua contaminação ou dos aquíferos.

Os ARCD's do presente trabalho passam por um rigoroso processo de triagem de forma a garantir a sua não contaminação. Como já foi referido anteriormente, os ARCD's utilizados não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não podem ser solúveis, inflamáveis, biodegradáveis, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entrem em contato de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana. O conteúdo poluente e ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e ou subterrâneas (Decreto-Lei n.º 73, 2011).

No entanto, num estudo (Ferreira, 2009) realizado sobre um agregado idêntico ao do presente trabalho e sobre um agregado constituído por cubos de betão, realizou-se este ensaio e conclui-se que as duas amostras de RCD estudadas cumpriram os limites apresentados para resíduos inertes. O mesmo resultado foi também obtido no estudo de (Pestana, 2008) para resíduos de betão estrutural.

Assim sendo, considerou-se dispensável a realização do ensaio de lixiviação para o presente trabalho.

4.2. Ensaio das propriedades geométricas

4.2.1. Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados

A identificação e estimativa das proporções relativas dos materiais constituintes dos ARCD's é realizada com base na norma NP EN 933-11 (IPQ, 2011a).

A amostra do ARCD é colhida em conformidade com a norma NP EN 932-1 (IPQ, 2002c) e reduzida em conformidade com a norma NP EN 932-2 (IPQ, 2002d), para obtenção de um provete que satisfaça a massa mínima dada no Quadro 4.

Quadro 4 - Recomendações sobre a massa dos provetes (IPQ, 2011a)

Dimensão máxima do agregado D [mm]	Massa (mínima) do provete de ensaio [kg]
63	50
32 e inferior	20

Nota: Poderá ser necessário utilizar provetes de maior massa para assegurar suficiente precisão na determinação de pequenas proporções de determinados constituintes.

Seca-se o provete à temperatura de (40 ± 5) °C, regista-se a sua temperatura (T) e a sua massa (M_0).

Peneira-se o provete nos peneiros de ensaio de 63 mm e 4 mm. A massa das partículas retidas no peneiro de 63 mm é registada como M_{63} , a massa das partículas retidas no peneiro de

4 mm é registada como M_1 e por fim a massa das partículas passadas no peneiro de 4 mm é registada como M_4 .

Separa-se a argila e o solo do provete de ensaio e coloca-se num tabuleiro, submerge-se o restante provete de ensaio num recipiente estanque, cheio de água, e agitar-se de forma a lavar as partículas e a libertar as partículas flutuantes. Recolhem-se as partículas flutuantes e determina-se o respetivo volume (V_{FL}), em cm^3 , Figura 7.



Figura 7 - Determinação do volume das partículas flutuantes, V_{FL}

Seca-se e regista-se a massa das partículas não flutuantes como M_2 e faz-se a divisão do provete pelos constituintes descritos no Quadro 5.

Quadro 5 - Constituintes não flutuantes de agregados reciclados grossos (IPQ, 2011a)

Constituinte	Descrição
R_c	Betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria.
R_u	Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos.
R_b	Elementos cerâmicos de alvenaria (ex. tijolo e telhas), blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante.
R_a	Materiais betuminosos.
R_g	Vidros
X	Outros: Materiais coesivos (isto é, argila e solo). Diversos: metais (ferrosos e não ferrosos), madeira não flutuante, plástico e borracha, estuque.

Para facilitar a divisão, é possível reduzir a número destas partículas a um mínimo de 1000 partículas, de acordo com a norma NP EN 932-2 (IPQ, 2002c). O Quadro 6 dá indicações sobre a massa mínima necessária para esse fim.

Quadro 6 - Indicações sobre a massa necessária para 1000 partículas (IPQ, 2011a)

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

A massa das partículas separadas é registada como M_3 . A massa de cada constituinte indicado no Quadro 5 é registada respetivamente como M_{Rc} , M_{Ru} , M_{Rb} , M_{Ra} e M_{Rg} .

A proporção de cada constituinte é calculada a partir das equações (4.1) a (4.7):

$$FL(cm^3/kg) = 1000 \times V_{FL}/M_1 \quad (4.1)$$

$$X(\%) = 100 \times M_x/M_1 \quad (4.2)$$

$$Rc(\%) = 100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rc}/M_3) \quad (4.3)$$

$$Ru(\%) = 100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Ru}/M_3) \quad (4.4)$$

$$Rb (\%) = 100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rb}/M_3) \quad (4.5)$$

$$Ra (\%) = 100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Ra}/M_3) \quad (4.6)$$

$$Rg (\%) = 100 \times (M_2/M_1) \times (M_{Rg}/M_3) \quad (4.7)$$

Onde:

- M_1 Massa do provete;
- M_2 Remanescente não flutuante;
- M_3 Remanescente não flutuante separado por constituintes;
- V_{FL} Volume das partículas flutuantes;
- M_x Massa do constituinte de materiais coesivos, metais, madeiras não flutuantes, plásticos, borrachas e estuque;
- M_{Rc} Massa do constituinte de betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria;
- M_{Ru} Massa do constituinte de agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- M_{Rb} Massa do constituinte de elementos cerâmicos de alvenaria, blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante;
- M_{Ra} Massa do constituinte de materiais betuminosos;
- M_{Rg} Massa do constituinte de vidros;
- FL Proporção do constituinte material flutuante;
- X Proporção do constituinte dos materiais coesivos, metais, madeiras não flutuantes, plásticos, borrachas e estuque;
- Rc Proporção do constituinte de betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria;
- Ru Proporção do constituinte de agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- Rb Proporção do constituinte de elementos cerâmicos de alvenaria, blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante;
- Ra Proporção do constituinte de materiais betuminosos;
- Rg Proporção do constituinte de vidros.

4.2.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica, método da peneiração, é realizada segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000).

A massa dos provetes de acordo com a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000), é função da dimensão máxima do agregado, como apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 - Massa dos provetes de ensaio para agregados de peso corrente(IPQ, 2000)

Máxima dimensão D [mm]	Massa do provete (mínimo) [kg]
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

Nota: Para os agregados de tamanho diferente, a massa mínima do provete de ensaio pode ser interpolada.

Os provetes são secos a uma temperatura de (110 ± 5) °C até alcançarem uma massa constante, seguindo-se a lavagem do provete de ensaio até que a água que atravessa o peneiro de 63µm seja límpida, (Figura 8).



Figura 8 - Lavagem do provete de ensaio

Após a lavagem o material com granulometria superior 63 μm é seco a uma temperatura de (110 ± 5) °C até alcançar massa constante e despejado na coluna de peneiros faseadamente para evitar a sobrecarga de cada peneiro, respeitando assim a relação (4.8):

$$\frac{A \times \sqrt{d}}{200} \quad (4.8)$$

Onde:

- A Área do peneiro em milímetros quadrados;
- d Dimensão das aberturas do peneiro em milímetros.

A série de peneiros base é constituída pelas aberturas 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,500 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 63 mm e 125 mm, (IPQ, 1999).

Pesa-se todo o material retido em cada peneiro da coluna de modo a obter as massas das diferentes frações do agregado, Figura 9 e Figura 10, obtém-se, assim, a massa retida em cada peneiro, como percentagem da massa original seca e a percentagem cumulativa da massa original seca que passa através de cada peneiro até ao peneiro de 63 μm .



Figura 9 - Separação para pesagem do material retido em cada peneiro - Fração grossa



Figura 10- Separação para pesagem do material retido em cada peneiro - Fração fina

O cálculo da percentagem de finos (f) que passa através do peneiro de $63 \mu\text{m}$ efetua-se de acordo com a expressão (4.9):

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (4.9)$$

Onde:

- M_1 Massa seca do provete de ensaio, antes da lavagem, em grama;
- M_2 Massa seca após lavagem do material com granulometria superior a $63 \mu\text{m}$, em grama;
- P Massa do material peneirado retido no recipiente do fundo, em grama.

A validação dos resultados é comprovada sempre que a soma das massas do material retido em cada peneiro e a massa do material retida no peneiro de fundo não difira mais que 1% da massa M_2 .

4.2.3. Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento

A análise quanto à forma das partículas faz-se através de um dos dois seguintes métodos:

- Índice de achatamento (FI), segundo o procedimento especificado pela norma NP EN 933-3(IPQ, 2002e)
- Índice de forma (SI), segundo o procedimento especificado pela norma NP EN 933-4 (IPQ, 2002f).

Embora estejam disponíveis estes dois métodos para avaliar a forma dos agregados considera-se como método de referência o índice de achatamento (InIR, 2009), sendo também este que está indicado no quadro de requisitos / propriedades dos agregados no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011), pelo que no presente trabalho se optou pela sua realização, em detrimento do índice de forma

O ensaio do índice de achatamento consiste em fazer passar nos peneiros de barras, Figura 11, referidos na norma NP EN 933-3 (IPQ, 2002e), o material já fracionado pela sua granulometria, de acordo com o Quadro 8.



Figura 11 - Peneiro de barras

Quadro 8 - Relação da fração granulométrica com os peneiros de barras (IPQ, 2002e)

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

Todo o material retido no peneiro de 80 mm e passado no peneiro 4 mm é rejeitado, embora a sua massa seja registada.

O índice de achatamento de cada fração granulométrica (FI_i) é calculado pela equação (4.10):

$$FI_i = (m_i/R_i) \times 100 \quad (4.10)$$

Onde:

R_i Massa, em gramas, de cada fração granulométrica (d_i/D_i);

m_i Massa, em gramas, do material em cada fração granulométrica (d_i/D_i), que passa pelo peneiro de barras correspondente, com ranhura de largura $D_i/2$.

O índice geral de achatamento (FI) é dado pela equação (4.11):

$$FI = (M_2/M_1) \times 100 \quad (4.11)$$

Onde:

- M_1 Soma das massas, em gramas, das partículas de cada uma das frações granulométricas (d_i/D_i);
- M_2 Soma das massas, em gramas, das partículas de cada uma das frações granulométricas que passa pelo peneiro de barras correspondente, com ranhura de largura $D_i/2$;

Com base nos valores do índice de achatamento descreve-se o desempenho do agregado através da escolha da categoria respetiva, nos termos apresentados no Quadro 9 (IPQ, 2004).

Quadro 9 - Categorias para os valores máximos do Índice de achatamento (IPQ, 2004)

Índice de achatamento	Agregados para misturas betuminosas
≤ 10	FI_{10}
≤ 15	FI_{15}
≤ 20	FI_{20}
≤ 25	FI_{25}
≤ 30	FI_{30}
≤ 35	FI_{35}
≤ 50	FI_{50}
>50	$FI_{Declarado}$
Não requerido	FI_{NR}

4.2.4. Qualidade dos finos - Ensaio do equivalente de areia

O ensaio do equivalente de areia não faz parte dos ensaios indicados pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011), para misturas betuminosas, mas a norma NP EN 13242- Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia e na construção rodoviária, refere que quando o teor em finos do agregado fino, for superior a 3%, em massa, e exista evidência documentada de utilização satisfatória, podem não ser necessários ensaios adicionais. No entanto, quando referida a avaliação da nocividade dos finos, os mesmos devem ser considerados não prejudiciais quando uma das quatro condições seguintes se verifique (IPQ, 2005c):

- Teor total de finos do agregado fino inferior a 3% ou a outro valor de acordo com as disposições em vigor no local de utilização do agregado;
- Valor do equivalente de areia (SE), quando determinado pela norma NP EN 933-8, superior a um limite inferior especificado;
- Valor de ensaio de azul de metileno (MB), quando determinado de acordo com a NP EN 933-9, inferior a um determinado limite especificado;
- Desempenho equivalente ao de um agregado considerado satisfatório ou quando existam provas de utilização satisfatória, sem que tenham resultado problemas.

No caso dos agregados para misturas betuminosas, a avaliação da qualidade dos finos só se realiza para agregados finos ou de granulometria extensa que tenham conteúdo de finos superior a 3%, já que até esta percentagem se considera não serem em quantidade suficiente para que possam ser prejudiciais (InIR, 2009).

O ensaio do equivalente de areia é realizado segundo a norma NP EN 933-8 (IPQ, 2002g) e tem como objetivo avaliar a limpeza do agregado e dar uma primeira indicação sobre a natureza dos finos.

O ensaio é realizado em duas provetas cilíndricas graduadas, sendo que em cada uma delas é colocada a solução de lavagem até à marca inferior.

De seguida é adicionado o material passado no peneiro de 2 mm sendo a sua massa dada em função do teor em água (4.12), que deve ser inferior a 2%.

$$\frac{120(100 + W)}{100} [g] \quad (4.12)$$

Para facilitar a molhagem do provete e soltar as bolhas de ar, dão-se leves pancadas na base da proveta com a palma da mão e deixa-se repousar durante (10±1) minutos.

Sela-se a proveta, e coloca-se durante (30±1) segundos na máquina vibratória. De seguida enxagua-se a rolha e lavam-se as paredes interiores da proveta com a solução de lavagem, assegurando-se que todo o material fica dentro da mesma.

O tubo da água de lavagem é empurrado através do sedimento até ao fundo da proveta de forma a facilitar a ascensão de finos e componentes argilosos até encher a proveta até à marca superior.

Inicia-se a contagem do período de assentamento imediatamente após a retirada do tubo de lavagem com a duração de 20,00±0,25 minutos.

Por fim, mede-se a distância entre a camada superior do floculado e a base da proveta, designada h_1 (Figura 12). Baixa-se cuidadosamente o conjunto do mergulhador na proveta, até que a base assente sobre o sedimento e determina-se a altura de sedimentação (h_2), distância entre a face inferior da cabeça do mergulhador e a face superior do anel, de acordo com a Figura 13.



Figura 12 - Distância entre a altura da camada superior do floculado até à base da proveta cilíndrica (h_1)



Figura 13 - Altura de sedimentação (h_2)

Calcula-se a razão (4.13), arredondada a uma casa decimal e repete-se o procedimento de ensaio para a segunda proveta.

$$\frac{(h_2)}{(h_1)} \times 100 \quad (4.13)$$

A fiabilidade do ensaio é comprovada sempre que a diferença entre os dois resultados for inferior a 4.

O equivalente de areia (SE) é igual à média das razões (4.13), obtidas para cada proveta.

No Quadro 10 são apresentados as categorias propostas no âmbito da CEN TC 154/SC para o equivalente de areia (InIR, 2009).

Quadro 10 - Categoria para os valores mínimos de equivalente de areia dos agregados finos (InIR, 2009)

Equivalente de areia	Categoria - SE
≥ 60	SE_{60}
≥ 50	SE_{50}
≥ 40	SE_{40}
≥ 35	SE_{35}
≥ 30	SE_{30}
< 30	$SE_{Declarado}$
Não requerido	SE_{NR}

4.2.5. Qualidade dos Finos - Ensaio do azul de metileno

O valor de adsorção de azul de metileno é um parâmetro que exprime globalmente a quantidade e qualidade ou “atividade” da argila presente num dado agregado, permitindo assim, avaliar a sua limpeza (Luzia, 2008).

O ensaio do azul de metileno inicia-se com a preparação da solução de azul de metileno, com uma concentração de 10 g/l de acordo com a norma NP EN 933-9 (IPQ, 2002h).

A amostra deve ser reduzida de acordo com a norma NP EN 932-2 (IPQ, 2002d), de modo a reduzir uma subamostra de, no mínimo, 200 gramas da fração granulométrica 0/2 mm no fim de seca, registar a massa como M_1 .

O preparado é constituído pela fração granulométrica 0/2 mm de massa M_1 , com (500±5) ml de água destilada ou desmineralizada.

Durante o ensaio o preparado é agitado durante 5 minutos a (600 ± 60) rotações por minuto e subsequentemente agitado continuamente a (400 ± 40) rotações por minuto durante o restante tempo de ensaio.

São adicionadas doses sucessivas de 5 ml de solução de azul metileno, em intervalos de 1 minuto entre a adição da solução corante e o teste da mancha e entre este e novamente a adição da solução corante, até que a superfície das partículas que têm capacidade de adsorção esteja coberta.

O teste da mancha consiste em colocar uma gota do preparado num papel de filtro normalizado e verificar se existe uma auréola azul clara no bordo da mancha, como se pode analisar na Figura 14.

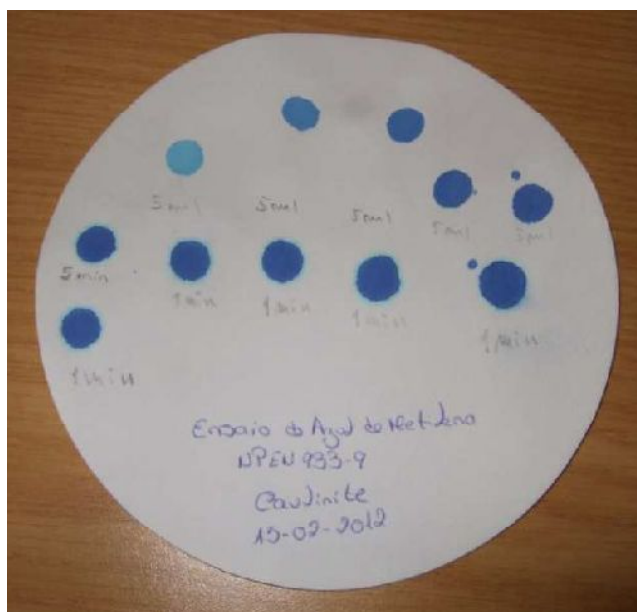


Figura 14 - Papel de filtro usado na realização do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, sobre as 30g de caulinite

Quando esta etapa for atingida, deve-se continuar a agitar sem mais adição de solução corante, efetuando ensaios da mancha em intervalos de 1 minuto.

Se a auréola desaparecer durante os primeiros 4 minutos, adicionar ainda uma dose de 5 ml de solução corante. Se a auréola desaparecer durante o quinto minuto, adicionar apenas 2 ml de solução corante. Em ambos os casos, continuar a agitação e os ensaios da mancha até que a auréola permaneça visível durante 5 minutos.

Neste momento passa a existir excesso de azul de metileno na preparação correspondente ao ponto de viragem que marca o fim do ensaio.

Se a quantidade de finos do provete for insuficiente para se formar uma auréola, deverá ser adicionada 30 gramas de caulinite juntamente com solução corante adsorvida por ela.

O volume total de solução corante adsorvida por 30 gramas de caulinite seca é dado pela equação (4.14).

$$MB_K = V'/30 \quad (4.14)$$



Figura 15 - Adição inicial ao preparado, da solução de azul de metileno adsorvida pela caulinite

O valor de azul de metileno, MB, expresso em gramas de corante por quilograma da fração 0/2 mm é dado pela equação (4.15), quando adicionada a caulinite:

$$MB = \frac{V_1 - V'}{M_1} \times 10 \quad (4.15)$$

Onde:

- V_1 Volume total de solução corante adicionada, em mililitros;
- V' Volume de solução corante adsorvida pela caulinite, em mililitros;
- M_1 Massa do provete em gramas.

A auréola à volta da mancha no papel de filtro é o fator que identifica o final do ensaio, dado que é nesta altura que as partículas finas do agregado deixam de ter a capacidade de adsorção, ou seja, deixa de haver a capacidade de permuta iónica entre os catiões (de cálcio,

sódio, magnésio ou potássio, por exemplo) existentes na superfície das partículas e os cátions resultantes da dissociação da molécula de azul de metileno (C₁₆H₁₈CIN₃S) (Pinto, 2003).

O valor de azul de metileno deve ser declarado pela correspondente categoria especificada no Quadro 11, relativa à fração de 0/2 mm (MB) proposta pela CT 154 (InIR, 2009).

Quadro 11 - Categorias para os valores máximos de azul de metileno da fração 0/2 mm (InIR, 2009)

Valor de azul de metileno da fração 0/2 mm [g/kg]	Categoria <i>MB</i>
≤ 2	<i>MB₂</i>
≤ 2,5	<i>MB_{2,5}</i>
≤ 3	<i>MB₃</i>
> 3	<i>MB_{Declarado}</i>
Não requerido	<i>MB_{NR}</i>

Se o teor de finos no agregado fino estiver compreendido entre 3 % e 10 %, em massa, a nocividade dos finos da fração 0/0,125 mm deve ser determinada em termos do valor de azul de metileno (*MB_F*), de acordo com a NP EN 933-9 (IPQ, 2004).

A preparação do ensaio faz-se de forma idêntica à da fração 0/2 mm, com diferença na granulometria que passa a ser de 0/0,125 mm e na massa do provete, que passa a (30,0±0,1) g.

O cálculo do valor de azul de metileno (*MB_F*) é dado pela equação (4.16):

$$MB_F = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (4.16)$$

O valor de azul de metileno deve ser declarado pela correspondente categoria especificada no Quadro 12, relativa a frações de 0/0,125 mm (*MB_F*) (IPQ, 2004).

Quadro 12 - Categorias para os valores máximos de azul de metileno MB_F da fração 0/0,125 mm (IPQ, 2004)

Valor de azul de metileno da fração 0/0,125 [g/kg] MB_F	Categoria MB_F
-	$MB_F NT^a$
≤ 10	$MB_F 10$
≤ 25	$MB_F 25$
> 25	$MB_F Declarado$
Não requerido	$MB_F NR$

a - A categoria $MB_F NT$ significa que não são necessários ensaios.

4.3. Ensaios das propriedades físicas e mecânicas em laboratório

4.3.1. Considerações Iniciais

As propriedades físicas e mecânicas pretendem avaliar os agregados quando sujeitos às ações impostas pelos processos de fabrico e/ou de aplicação, bem como, o seu contributo para o desempenho das misturas onde são aplicados.

Entre elas destacam-se a massa volúmica, a absorção de água, a resistência à fragmentação (coeficiente de *Los Angeles*, LA), a resistência ao desgaste por atrito (coeficiente *micro-Deval*, M_{DE}), e a resistência ao polimento (coeficiente PSV), (InIR, 2009).

A determinação do coeficiente de polimento PSV, não foi realizada por não ser um ensaio recomendado pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, para a mistura AC 20 base.

4.3.2. Determinação da massa volúmica e da absorção de água - Método do picnómetro

O ensaio da determinação da massa volúmica e da absorção de água encontra-se especificado na norma NP EN 1097-6 (IPQ, 2003).

O método do picnómetro aplica-se a agregados que passam pelo peneiro de 31,5 mm e são retidos no peneiro de 0,063 mm, ou seja, fração 0,063/31,5 mm.

No caso de o agregado compreender várias frações granulométricas, é necessário separar a amostra nas frações de 0,063/4 mm e 4/31,5 mm, antes de proceder à preparação do provete. A percentagem de cada fração granulométrica deve ser registada no relatório de ensaio.

O método do picnómetro para partículas de agregado de dimensões entre 4 mm e 31,5 mm, requer que a massa do provete de agregado seja superior ou igual aos valores apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 - Massa mínima dos provetes de ensaio (IPQ, 2003)

Dimensão máxima dos agregados [mm]	Massa mínima do provete [kg]
31,5	5
16	2
8	1

Lava-se o provete sobre o peneiro de 31,5 mm e sobre o peneiro 4 mm de modo a remover partículas mais finas.

O provete é imerso em água no picnómetro a (22 ± 3) °C e eliminado o ar ocluído fazendo rodar e agitando cuidadosamente o picnómetro em posição inclinada.

Após este processo é colocado o picnómetro em banho maria durante $24\pm 0,5$ horas a uma temperatura de 22 ± 3 °C. De seguida é removido todo o ar ocluído e pesado o picnómetro com a amostra (Figura 16), cheio de água e sem ar (M_2), também é registada a temperatura da água.



Figura 16 - Picnómetro com o agregado de fração granulométrica 4 mm a 20 mm, cheio de água e sem ar (M_2)

O provete é removido da água e escurrido, passando-o cuidadosamente por panos secos de forma a fazer desaparecer as películas visíveis de água, mas mantendo um aspeto húmido. A massa do provete nesta fase corresponde a (M_1).

A massa do picnómetro cheio de água equivale ao (M_3), onde também é necessário registar a temperatura da água.

Por fim seca-se o provete em estufa, sendo a massa respetiva o (M_4).

O método do picnómetro para a fração granulométrica de 0,063/4 mm é idêntico, embora com duas diferenças:

- Massa do provete, igual ou superior a 1 kg, (Figura 17);
- Processo para a determinação da massa de agregados saturados com superfície seca ao ar (M_1).

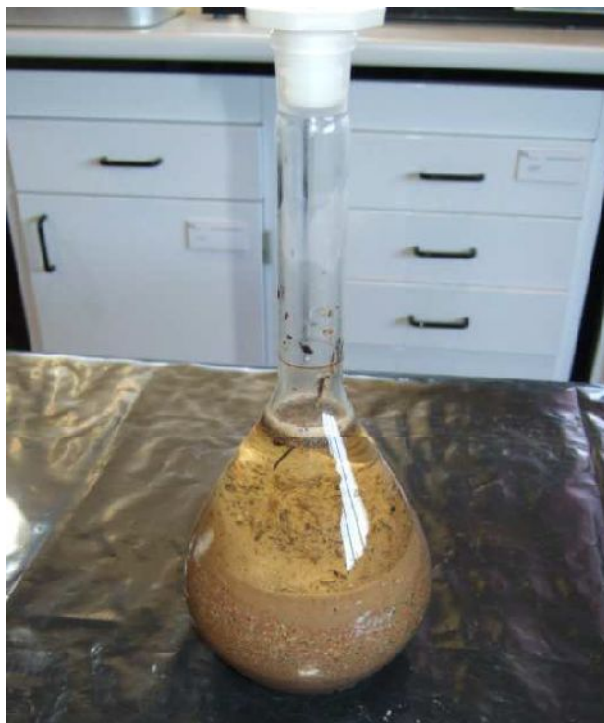


Figura 17 - Agregado de fração granulométrica 0,063 mm a 4 mm, no fim de passar 24 horas em Banho-maria

A massa de agregados saturados com superfície seca ao ar (M_1) é determinada pelo espalhamento do provete molhado numa camada uniforme sobre a base de um tabuleiro e exposto a uma leve corrente de ar morno de modo a evaporar a humidade superficial. O provete é remexido em intervalos frequentes, de modo a garantir uma secagem homogénea, até que não seja visível humidade superficial e as partículas do agregado não adiram umas às outras.

A verificação de se o estado da superfície seca foi atingido é feita através do enchimento livre do molde troncocónico e apiloamento da superfície com 25 pancadas. Este estado só é atingido quando o cone do agregado se deforma após a desmoldagem (Figura 18).



Figura 18 - Agregado de fração granulométrica 0,063 mm a 4 mm saturado com superfície seca, colapso quase total mas com cume bem definido e superfícies planas

As massas volúmicas das partículas ($\rho_a, \rho_{rd}, \rho_{ssd}$) em megagramas por metro cúbico são calculadas pelas expressões (4.17), (4.18), (4.19), para o método do picnómetro para partículas de agregados de dimensões entre 4/31,5 mm e entre 0,063/4 mm:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (4.17)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (4.18)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (4.19)$$

Onde:

- ρ_a Massa volúmica do material impermeável das partículas;
- ρ_{rd} Massa volúmica das partículas secas em estufa;
- ρ_{ssd} Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca;
- ρ_w Massa volúmica da água, (Quadro D.1 da NP EN 1097-6);
- M_1 Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, em gramas;
- M_2 Massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado, em gramas;
- M_3 Massa do picnómetro apenas cheio de água, em gramas;
- M_4 Massa do ar do provete seco em estufa, em gramas.

A absorção de água, em percentagem de massa seca, após a imersão durante 24 horas (WA_{24}) é determinada de acordo com a expressão (4.20):

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (4.20)$$

Onde:

- WA_{24} Absorção de água em percentagem de massa seca após a imersão durante 24 horas
- M_1 Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, em gramas;
- M_2 Massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado, em gramas;
- M_3 Massa do picnómetro apenas cheio de água, em gramas;
- M_4 Massa do ar do provete seco em estufa, em gramas.

O cálculo pode ser verificado a partir da seguinte expressão (4.21):

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \rho_{rd}/\rho_a \quad (4.21)$$

4.3.3. Determinação da resistência à fragmentação (*Los Angeles*)

A resistência à fragmentação (*Los Angeles*) é determinada com base na norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002i), que tem como objetivo a determinação da resistência ao choque e ao desgaste pela fragmentação de agregado grosso, de origem natural ou artificial, utilizado na construção civil e obras públicas.

O ensaio da determinação da resistência à fragmentação (*Los Angeles*), consiste em fazer rodar, num tambor rotativo, uma amostra de agregado com uma carga de esferas de aço, para no final avaliar a quantidade de 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 da referida fração granulométrica.

A distribuição granulométrica do provete deve respeitar um dos seguintes requisitos:

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

A amostra laboratorial é lavada nos peneiros de 10 mm, 11,2 mm ou (12,5 mm) e 14 mm e seca em estufa, para obtenção das frações separadas. Seguidamente a amostra é reduzida até à massa de 5000 ± 5 g.

É colocado no tambor da máquina de *Los Angeles* (Figura 19) o provete e a carga abrasiva, constituída por onze esferas de aço, (Figura 20). O Tambor dá 500 voltas a uma velocidade de 33 rpm.



Figura 19 - Máquina de *Los Angeles*



Figura 20 - Interior do tambor da máquina de *Los Angeles* com o provete e esferas

O material resultante do ensaio (Figura 21) é lavado no peneiro de 1,6 mm (Figura 22) e o material retido é seco em estufa.

O coeficiente de Los Angeles (LA) é dado pela expressão da equação (4.22).

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (4.22)$$

Onde:

m Massa retida no peneiro de 1,6 mm, [g]



Figura 21 - Agregado antes e depois das 500 voltas na máquina de Los Angeles



Figura 22 - Lavagem do provete que passa pelo peneiro de #1,6 mm depois da conclusão do ensaio de Los Angeles

O desempenho dos agregados relativamente à resistência à fragmentação pode ser declarado pela correspondente categoria especificada no Quadro 14 (IPQ, 2004).

Quadro 14 - Categoria para os valores máximos do coeficiente *Los Angeles* (IPQ, 2004)

Coeficiente <i>Los Angeles</i>	Categoria LA
≤ 15	LA_{15}
≤ 20	20
≤ 25	25
≤ 30	30
≤ 40	40
≤ 50	50
>50	$LA_{Declarado}$
Não requerido	LA_{NR}

4.3.4. Determinação da resistência ao desgaste (*micro-Deval*)

A determinação da resistência ao desgaste (*micro-Deval*) é baseada na norma NP EN 1097-1 (IPQ, 2002j), que tem como objetivo a determinação da resistência ao desgaste de uma amostra de agregado natural ou artificial usado em construção civil.

O ensaio consiste em medir o desgaste por fricção entre os agregados (10/14 mm) e uma carga abrasiva (Figura 23), num cilindro rotativo (Figura 24).



Figura 23 - Esferas - Carga abrasiva



Figura 24 - Máquina do ensaio *micro-Deval*, com os 4 cilindros rotativo

O desgaste é medido pelo coeficiente *micro-Deval*, que corresponde à percentagem da amostra original reduzida a uma dimensão inferior a 1,6 mm, após rotação dos cilindros. Cilindros estes que são colocados sobre dois eixos que os fazem rodar a uma velocidade de 100 ± 5 minutos, durante 12000 ± 10 voltas (Figura 25).

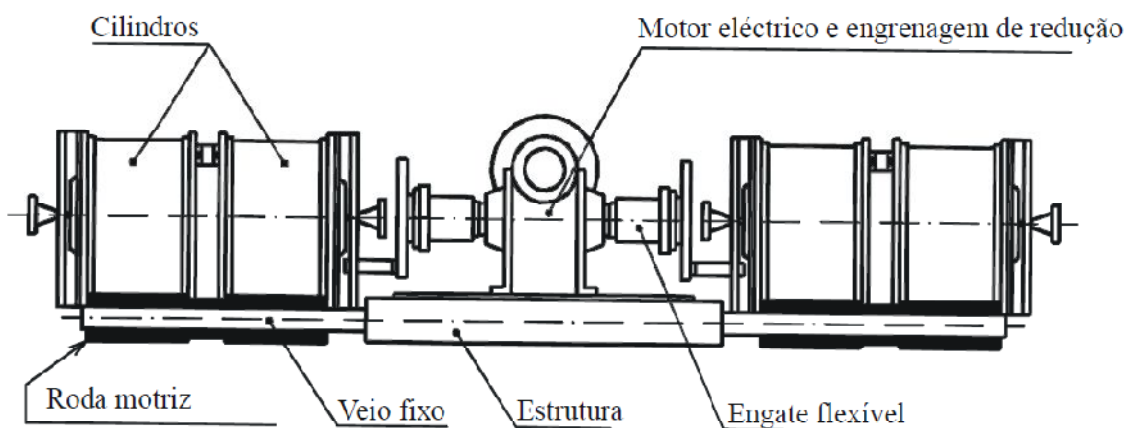


Figura 25 - Esquema de um equipamento de *micro-Deval* típico (IPQ, 2002j)

Quanto menor for o coeficiente *micro-Deval*, maior será a resistência ao desgaste do agregado e, em princípio, maior será a sua resistência mecânica.

A amostra inicial constituída por 2kg de agregado com granulometria compreendida entre 10 mm e 14 mm, passa pelo processo de peneiração utilizando os peneiros 10 mm; 11,2 mm (ou 12,5 mm) e 14 mm, para obter frações distintas, compreendidas entre 10mm e 11,2 mm (ou 12,5 mm) e entre 11,2 mm (ou 12,5 mm) e 14 mm.

Cada fração é lavada separadamente e seca em estufa até massa constante.

No fim da secagem misturam-se as duas frações granulométricas de forma a obter uma amostra laboratorial modificada. A distribuição granulometria do provete deve respeitar um dos requisitos seguintes:

- 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 ensaio é realizado sobre dois provetes elementares, com massa de 500 ± 2 gramas cada.

Cada provete elementar de 500 ± 2 gramas é colocado num cilindro, com esferas de aço suficientes para se obter uma carga de 5000 gramas. Ao provete mais carga abrasiva juntam-se $2,5 \pm 0,05$ litros de água, (Figura 26).



Figura 26 - Agregado com as esferas e água

Após o ensaio, recolhe-se o material e as esferas de aço (Figura 27) num recipiente tendo o cuidado de evitar a perda de qualquer agregado.



Figura 27 - Aspeto após o ensaio, com a extração da maior parte da água e esferas

Lava-se o material sobre um peneiro de 1,6 mm, seca-se em estufa, e regista-se a massa (m) das partículas superiores a 1,6 mm, arredondada à grama.

Para cada provete elementar é calculado o coeficiente *micro-Deval* (M_{DE}), aproximado às décimas, pela equação (4.23):

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5} \quad (4.23)$$

Onde:

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

m Massa das partículas de dimensão superior a 1,6 mm, em gramas.

Regista-se o valor médio como sendo o coeficiente *micro-Deval*, obtido através dos dois provetes elementares. Expressa-se o valor médio arredondado ao número inteiro mais próximo.

O coeficiente *micro-Deval* deve ser declarado pela correspondente categoria especificada no Quadro 15 (IPQ, 2004).

Quadro 15 - Categorias para os valores máximos da resistência ao desgaste por atrito (IPQ, 2004)

Coeficiente <i>micro-Deval</i>	Categoria M_{DE}
≤ 10	10
≤ 15	15
≤ 20	20
≤ 25	25
≤ 35	30
>35	$M_{DE} Declarado$
Não requerido	$M_{DE} NR$

5. Outros trabalhos realizados com RCD's

5.1. Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se alguns trabalhos de investigação realizados com agregados de Resíduos de Construção e Demolição, com vista à sua utilização em camadas ligadas e não ligadas de pavimentos rodoviários.

Um dos objetivos da apresentação destes trabalhos é a comparação dos resultados neles obtidos com os resultados alcançados no presente trabalho.

Na síntese da apresentação destes trabalhos são apenas referidos os resultados dos ensaios relativos à caracterização dos ARCD's também realizados no trabalho agora desenvolvido.

5.2. Estudo: "Caracterização dos agregados grossos reciclados e ensaios de provetes de betão produzidos com agregados reciclados de RCD"

5.2.1. Considerações iniciais

O estudo "Caracterização dos agregados grossos reciclados e ensaios de provetes de betão produzidos com agregados reciclados de RCD" foi desenvolvido no Instituto Superior Técnico no âmbito do "Projeto REAGIR - Reciclagem de Entulho no Âmbito da Gestão Integrada de Resíduos" (IST, 2006).

Este estudo teve como principal objetivo a análise dos resultados dos ensaios nos agregados grossos reciclados de betão e mistos.

Para dar cumprimento a este objetivo foram realizados, entre outros, os seguintes ensaios aos dois tipos de agregados:

- Análise granulométrica - Norma NP 1379 (1976);
- Massa Volúmica - Norma NP 581 (1969);
- Absorção de água - Norma NP 581 (1969);
- *Los Angeles* - Especificação LNEC E 237 (1971).

5.2.2. Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste estudo foram:

- Agregados grossos reciclados de betão (AGRB);
- Agregados grossos reciclados mistos (56% betão e argamassa, 22% pedra, 18% de materiais cerâmicos e 4% de outros materiais) (AGRM).

Os agregados grossos reciclados foram recolhidos na unidade piloto de reciclagem de RCD localizada em Montemor-o-Novo.

5.2.3. Caracterização geométrica

A avaliação da composição granulométrica dos agregados grossos reciclados de betão e mistos foi feita de acordo com a norma NP 1379 - Inertes para argamassas e betões: Análise granulométrica de 1976.

O Quadro 16 apresenta a composição granulométrica dos agregados grossos reciclados de betão (AGRB) e agregados grossos reciclados mistos (AGRM), e nas Figura 28 e Figura 29 apresentam-se as respetivas curvas granulométricas.

Quadro 16 - Composição granulométrica dos agregados grossos reciclados de betão e mistos

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem cumulativa que passa [%]	
	AGRB	AGRM
19	100	100
12,7	100	99,7
9,51	77,5	82,6
6,35	10,4	30
4,76	6,7	15
2,38	2,3	1,3
<2,38	0	0

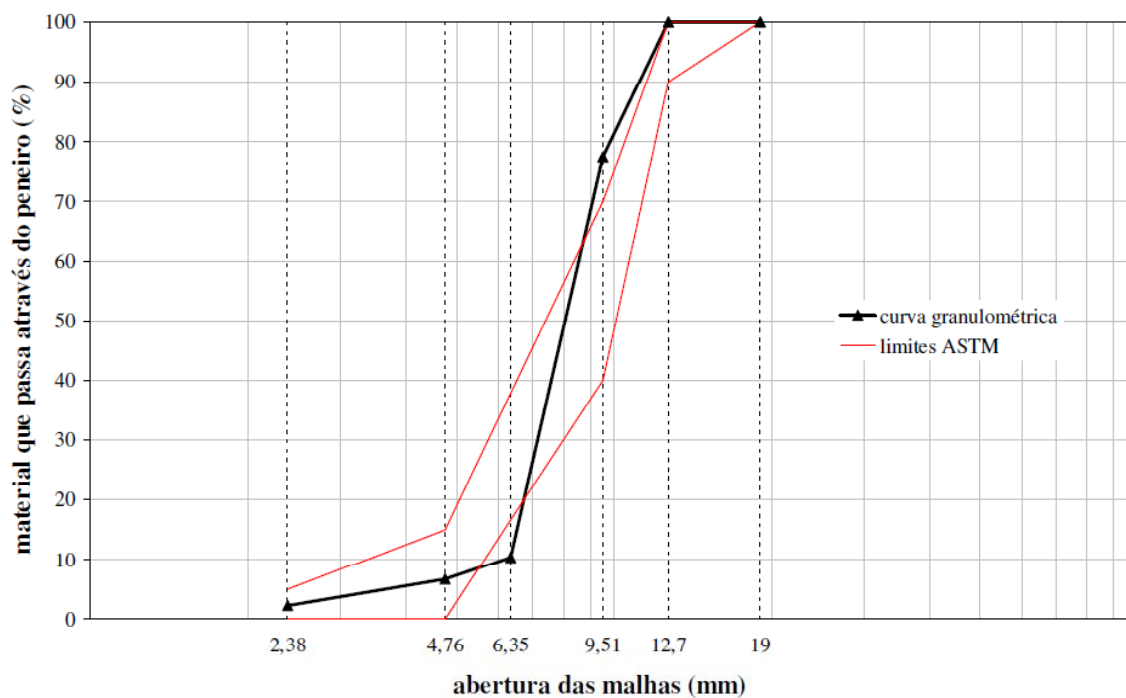


Figura 28 - Curva granulométrica dos agregados grossos reciclados de betão (IST, 2006)

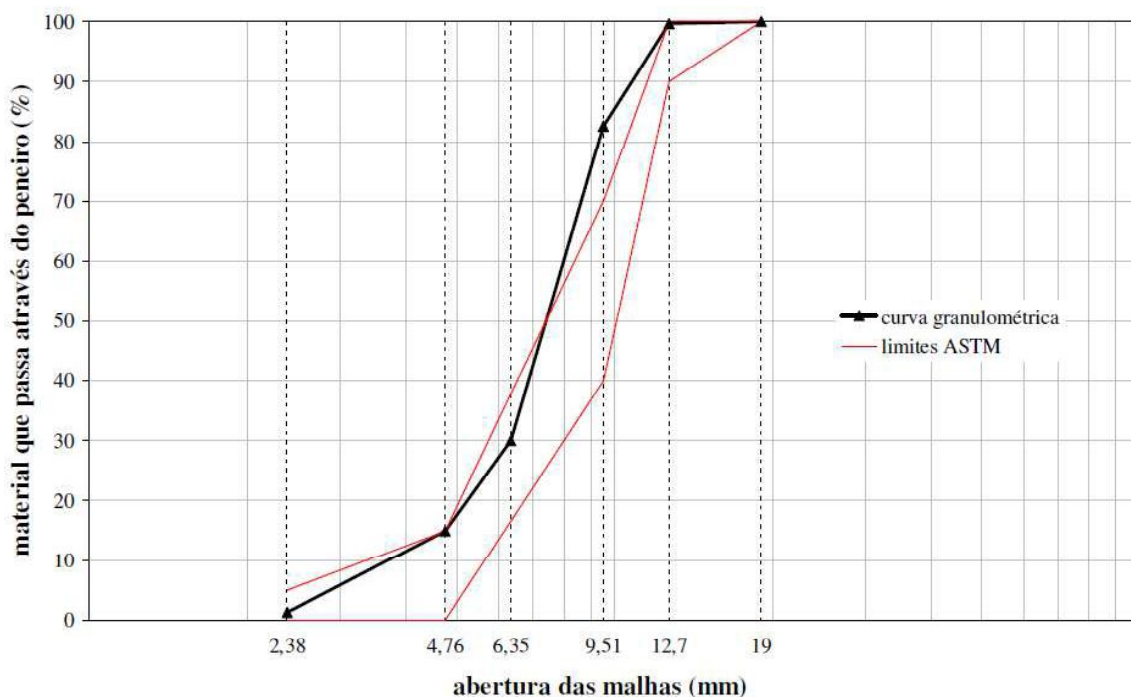


Figura 29 - Curva granulométrica dos agregados grossos reciclados mistos (IST, 2006)

Nas Figura 28 e Figura 29, as linhas vermelhas referem-se ao fuso granulométrico referido na norma ASTM C 33-90 - *Standard Specification for Concrete Aggregates - American Society For Testing And Material* de 1990, para agregados grossos com máxima e mínima dimensão de 12,7 e 4,76 mm respetivamente.

5.2.4. Caracterização mecânica

A determinação das massas volúmicas e da absorção de água para as partículas retidas no peneiro 4,72 mm dos agregados grossos reciclados de betão e mistos cujos resultados se apresentam no Quadro 17, foram realizadas de acordo com a norma NP 581- Inertes para argamassas e betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos de 1969.

Quadro 17 - Absorção e massa volúmica dos agregados grossos reciclados de betão e mistos (4,72/19 mm)

Parâmetros	Unidades	AGRB	AGRM
Massa volúmica do material impermeável das partículas [ρ_a]	Mg/m ³	2,513	2,575
Massa volúmica das partículas secas em estufa [ρ_{rd}]	Mg/m ³	2,084	2,084
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca [ρ_{ssd}]	Mg/m ³	2,254	2,275
Absorção de água, após 24 horas de imersão em água [WA_{24}]	%	8,2	9,2

A perda por desgaste dos agregados grossos reciclados de betão e mistos foi determinada com a utilização da máquina de *Los Angeles*, de acordo com a especificação E 237 - Agregados: Ensaio de Desgaste Pela Máquina de Los Angeles de 1970.

A percentagem de perda por desgaste obtida no ensaio *Los Angeles* para os agregados grossos reciclados de betão foi de 41% e para os agregados grossos reciclados mistos, foi de 47%.

5.3. Trabalho “Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego”

5.3.1. Considerações iniciais

O trabalho “Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego” foi desenvolvido, com vista à obtenção do grau de Mestre, por Rosa Maria Matos Pestana, no Instituto Superior Técnico em Lisboa, Portugal, tendo sido concluída em 2008 (Pestana, 2008).

O objetivo principal deste trabalho consistiu na caracterização do comportamento mecânico de RCD resultantes de betão estrutural, para aplicação em camadas de base e de sub-base de estradas de baixo tráfego.

Para atingir estes objetivos foi realizada a identificação e caracterização laboratorial da amostra de RCD e realizados, entre outros, os seguintes ensaios:

- Análise granulometria - NP EN 933-1 (2000);
- Índice de achatamento - NP EN 933-3 (2000);
- Equivalente de areia - NP EN 933-8 (2002)
- Adsorção de azul de metileno - NP EN 933-9 (2002)
- Fragmentação pela máquina de *Los Angeles* - NP EN 1097-2 (2002);
- Desgaste pelo ensaio de *micro-Deval* - NP EN 1097-1 (2002).

5.3.2. Materiais utilizados

O material utilizado neste trabalho são cubos de betão britado, com dimensão máxima das partículas de aproximadamente 31,5 mm. O betão utilizado é constituído, na sua maioria por elementos estruturais, tais como vigas, lajes e pilares.

5.3.3. Caracterização geométrica

A análise granulométrica do material foi realizada, com base na norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000) e obteve os valores indicados no Quadro 18, correspondente à curva granulométrica da Figura 30.

Quadro 18 - Resultados do ensaio de análise granulométrica, adaptado (Pestana, 2008)

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem cumulativa do material passado [%]
40	100
31,5	98
20	73
16	57
14	50
12,5	46
10	36
8	30
6,3	25
4	18
2	12
1	9
0,500	6
0,250	5
0,125	4
0,063	3,8

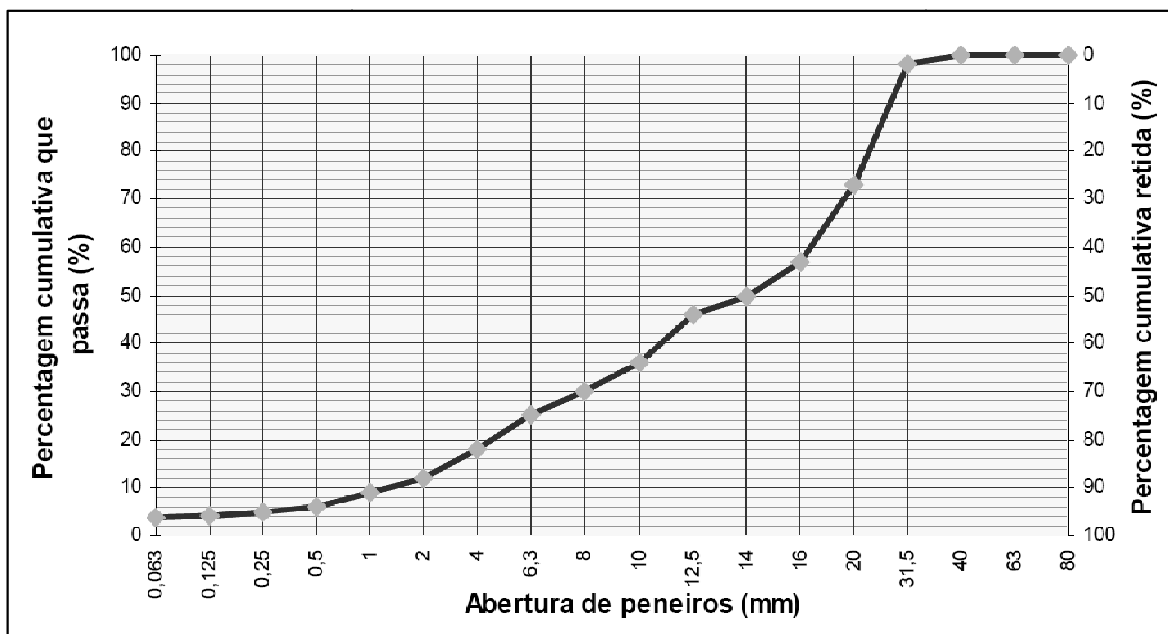


Figura 30 - Curva granulométrica do betão britado (Pestana, 2008)

A curva obtida revela uma granulometria bem graduada, com dimensão máxima de partículas de 31,5 mm, medida do peneiro no qual passa 98% do material, e dimensão mínima de 0,25 mm, medida do peneiro no qual passa apenas 5% do material.

O Índice de Achatamento foi realizado com base na norma NP EN 933-3 (IPQ, 2002e) tendo-se obtido o valor de 14%.

De acordo com a norma NP EN 933-8 (IPQ, 2002g), foi realizado o ensaio de equivalente de areia, onde se obteve um valor de 83%.

O ensaio de azul de metileno foi realizado com base na norma NP EN 933-9 (IPQ, 2002h), sobre a fração granulométrica 0/2 mm obtendo-se o valor de 0,7 g/kg.

5.3.4. Caracterização mecânica

O ensaio de *Los Angeles* realizado de acordo com a norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002i) forneceu um valor para a perda de 44%.

Por fim, no ensaio de desgaste de *micro-Deval*, realizado segundo a norma NP EN 1097-1 (IPQ, 2002j), obteve-se um coeficiente de *micro-Deval* de 48%.

5.4. Trabalho “Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego ”

5.4.1. Considerações iniciais

O trabalho “Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego ” foi desenvolvido, com vista à obtenção do grau de Mestre, por José Fernando Bolarinho Ferreira, no Instituto Superior Técnico em Lisboa, Portugal, tendo sido concluído em 2009 (Ferreira, 2009).

O principal objetivo do trabalho foi contribuir para um melhor conhecimento das características dos RCD’s, na perspetiva de viabilizar a sua aplicação em camadas de sub-base de pavimentos rodoviários de baixo tráfego, ou eventualmente em aterro.

Por forma a atingir este objetivo foi realizado um conjunto de ensaios, laboratoriais, segundo a metodologia indicada na especificação LNEC E 473 (LNEC, 2009c), entre os quais:

- Parâmetros geométricos e de natureza:
 - Análise granulométrica (NP EN 933-1 (IPQ, 2000)), com definição de sobretamanhos, classe de granulometria e teor de finos;
 - Qualidade dos finos pelo ensaio do azul de metileno (NP EN 933-9 (IPQ, 2002h));
 - Percentagem de partículas totalmente esmagadas ou partidas e totalmente roladas em agregados grossos (NP EN 933-5).
- Parâmetro de comportamento físico e mecânico:
 - Resistência à fragmentação pelo ensaio de *Los Angeles* (NP EN 1097-2 (IPQ, 2002i));
 - Resistência ao desgaste pelo ensaio do *micro-Deval* (NP EN 1097-1 (IPQ, 2002j)).

O ensaio de equivalente de areia também foi realizado para uma melhor avaliação da qualidade e tipologia dos elementos finos plásticos contidos nas amostras dos materiais em estudo, embora este ensaio não esteja indicado na especificação do LNEC E 473 (LNEC, 2009c).

5.4.2. Materiais utilizados

No âmbito deste trabalho foram utilizados dois materiais. O primeiro material é proveniente da britagem de cubos de betão (RCD-CB) e o segundo é resultante da britagem, em obra, dos materiais de demolição de um edifício (RCD-BDem).

O RCD-CB foi obtido dos elementos estruturais tais como vigas, lajes e pilares, enquanto o RCD-BDem foi obtido dos elementos estruturais misturados com elementos de recobrimentos e acabamentos, tais como, tijolo, azulejo e telha.

5.4.3. Caracterização geométrica

Segundo o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011) os agregados reciclados a utilizar em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários são classificados com B ou C de acordo com a natureza dos seus constituintes e nas categorias AGER1, AGER2 e AGER3 em função da sua aplicação.

No Quadro 19 são apresentados os valores obtidos nas duas amostras e que permitiram a sua classificação. Os dois materiais, RCD-CB e RCD-BDem, pertencem à classe B.

Quadro 19 - Classificação das amostras em estudo de acordo com a natureza dos constituintes da fração grossa (Ferreira, 2009)

Amostra	Classes	Natureza dos constituintes EN132:2002+A1:2007				
		$R_C + R_U + R_G$	R_B	R_A	FL	X
RCD-CB	B	100	0	0	0	0
RCD-BDem	B	96,3	3,6	0	0	0,1

Os autores optaram pela classe AGER 1 para os RCD-CB e RCD-BDem, podendo, assim, ser aplicado em camadas de base e sub-base com tráfego médio de pesados por via inferior a 150.

Os resultados da análise granulométrica dos dois materiais, realizada de acordo com a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000) apresentam-se no Quadro 20 e as curvas granulométricas respetivas na Figura 31.

O ensaio de equivalente de areia foi efetuado de acordo com a norma NP EN 933-8 (IPQ, 2002g).

Os valores obtidos no ensaio de equivalente de areia para o RCD-CB e RCD-BDem são respetivamente, de 86% e de 39%.

No ensaio de azul de metileno, realizado pela NP EN 933-9 (IPQ, 2002h), obteve-se 0,8 gramas de corante por kg da fração granulométrica 0/2 mm para o RCD-CB e 3,3 gramas de corante por kg da fração granulométrica 0/2 mm para o RCD-BDem.

Quadro 20 - Valores obtidos para Análise Granulométrica (Ferreira, 2009)

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem cumulativa que passa[%]	
	RCD-CB	RCD-BDem
31,5	100	100
20	69	83
16	53	71
14	45	55
12,5	39	49
10	29	46
8	22	43
6,3	17	38
4	12	34
2	9	31
1	7	24
0,500	5	21
0,250	4	15
0,125	4	9
0,063	3,9	4

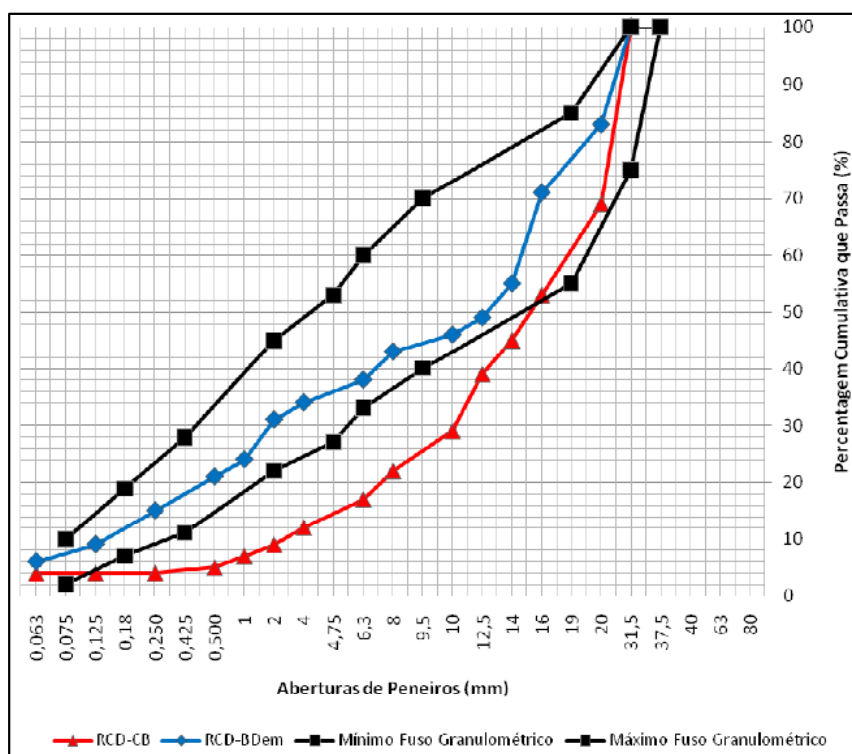


Figura 31 - Curvas granulométricas dos materiais RCD-CB e RCD-BDem (Ferreira, 2009)

5.4.4. Caracterização física e mecânica

O ensaio de *Los-Angeles* foi efetuado com base na norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002i), tendo sido obtido um coeficiente de *Los-Angeles* para RCD-CB de 49% e para o RCD-BDem de 50%.

O ensaio do *micro-Deval* foi efetuado de acordo com o preconizado na norma NP EN 1097-1 (IPQ, 2002j). Os valores obtidos para o RCD-CB e RCD-BDem são respetivamente de 40% e 37%.

5.5. Trabalho “Utilização de Resíduos de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza”

5.5.1. Considerações iniciais

O trabalho “Utilização de Resíduos de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza” foi desenvolvido, com vista à obtenção do grau de Mestre, por João Henrique Camelo Lima, na Universidade Federal do Ceará, Brasil, tendo sido concluído em 2008 (Lima, 2008).

O objetivo principal do trabalho foi a verificação, através de ensaios de laboratório, da possibilidade de aplicação de RCD’s em camadas não ligadas de bases e sub-bases de

pavimentos, diminuindo, assim, o impacto ambiental causado pela rejeição inadequada deste tipo de materiais.

Por forma a atingir este objetivo foi realizado o levantamento das características físicas e mecânicas de um RCD do tipo misto, bem como de um agregado natural (brita de Itaitinga). Também foi estudada a influência da adição da cal e do cimento no acréscimo das propriedades mecânicas do ARCD quando aplicado em pavimentos rodoviários.

De entre os ensaios realizados analisamos os seguintes:

- RCD's
 - Natureza dos materiais - NBR 15116;
 - Granulometria - Norma DNER-ME 083/98;
 - Absorção - Especificação DNER-ME 081/98;
 - Abrasão *Los Angeles* - Norma DNER-ME 035/98;
 - Índice de forma - Norma DNER-ME 086/94;
- Brita de Itaitinga
 - Granulometria - Norma DNER-ME 083/98;
 - Absorção - Especificação DNER-ME 081/98;
 - Abrasão *Los Angeles* - Norma DNER-ME 035/98;
 - Índice de forma - Norma DNER-ME 086/94;

5.5.2. Materiais utilizados

Para o desenvolvimento do trabalho foram recolhidos e estudados diversos materiais (Lima, 2008):

- Solo recolhido no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará. Durante a recolha do solo, os 20 cm superficiais foram rejeitados, com o objetivo de se eliminar compostos orgânicos. O solo é misturado aos agregados;
- RCD misto (Figura 32) constituído por 42,66% de betão/argamassa, 25,76 materiais finos, 21,96% brita, 5,15% telha/tijolo, 3,87% azulejo e 0,60% de materiais indesejáveis (madeira, plástico, gesso e ferro, entre outros), com origem na indústria da construção civil de Fortaleza;



Figura 32 - Agregados RCD misto (Lima, 2008)

- RCD puro (Figura 33) constituído por britagem de peças de betão, (postes, vigas e pilares) com origem na indústria da construção civil de Fortaleza;



Figura 33 - Agregados RCD puro (Lima, 2008)

- Brita - Material convencionalmente utilizado. A pedra escolhida para a recolha da brita foi a Pedreira de Itaitinga, localizada na cidade com o mesmo nome, a 33 km da capital cearense.

A cal e o cimento foram adicionados ao RCD no teor de 2%. Os autores utilizaram esta percentagem porque a intenção era somente melhorar as propriedades da mistura, bem como conhecer a influência desses estabilizantes em comparação com a mistura natural, a partir do uso de uma pequena quantidade.

5.5.3. Caracterização geométrica

A análise granulométrica foi efetuada de acordo com a norma DNER-ME 083/98.

No Brasil, as especificações para materiais de base e sub-base de pavimentos estabilizados granulometricamente são definidos nas normas do DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes) e na NBR-11804 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que, por sua vez, indicam a necessidade de que a curva granulométrica seja contínua e que se enquadre nas faixas granulométricas especificadas.

Na Figura 34 apresenta-se a curva granulometria do ARCD misto e na Figura 35 a curva granulométrica do agregado natural de brita de Itaitinga.

O ARCD misto não se enquadrou totalmente na faixa C do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) mas por se tratar de um material novo e pouco estudado foi decidido pelos autores realizar os ensaios sem a preocupação de enquadrá-los em qualquer faixa granulométrica.

Já a granulometria da brita enquadra-se na faixa C, no entanto, a sua composição granulométrica foi alterada para ser o mais semelhante possível ao RCD.

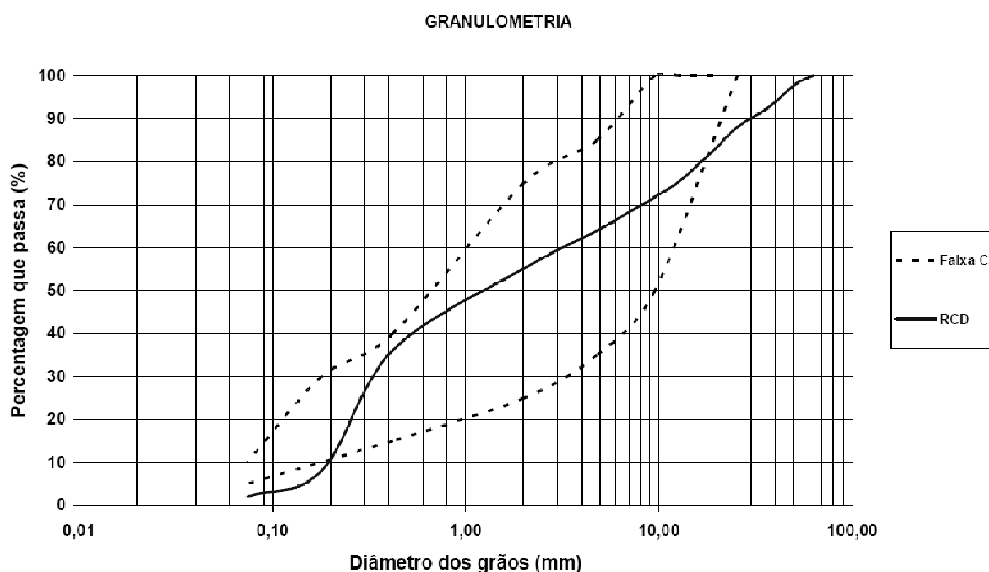


Figura 34 - Curva Granulométrica do Agregado Reciclado “misto” (Lima, 2008)

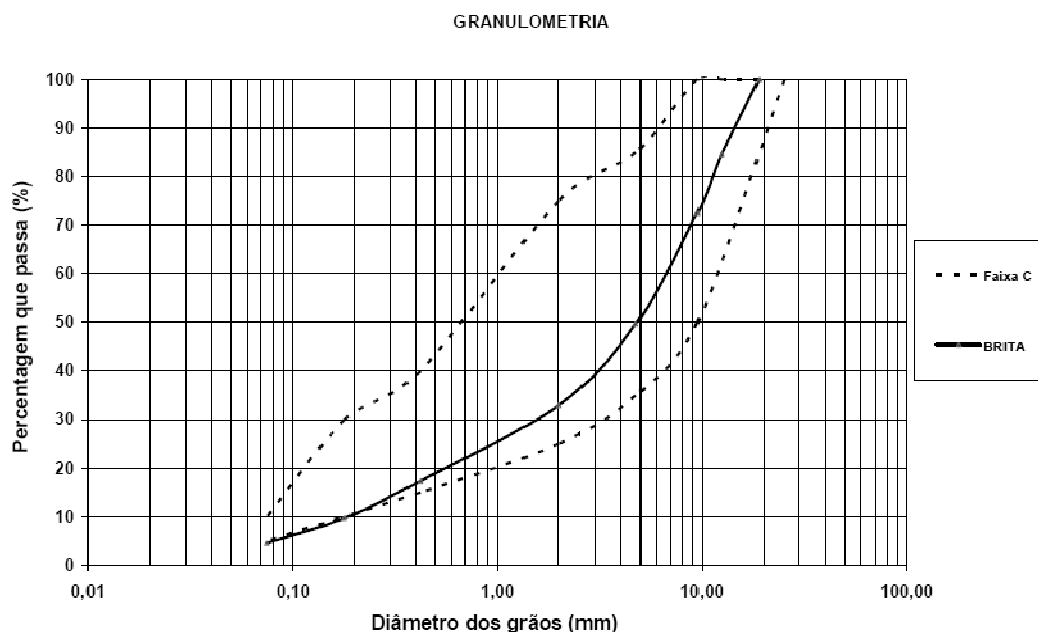


Figura 35 - Curva Granulométrica da brita de Itaitinga (Lima, 2008)

O índice de forma não é comparável com o índice de achatamento da norma (IPQ, 2002e) realizado no presente trabalho, mas analisa-se este ensaio pela informação que dá da forma do agregado estudado no trabalho de Lima, 2008 (Lima, 2008).

O ensaio do índice de forma realizado pela norma DNER-ME 086/94 varia entre 0 (zero) e 1 (um), sendo que quanto mais próximo estiver do 0 (zero), mais alongadas são as partículas (agregado lamelar).

O índice de forma do reciclado misto foi de 0,68%, e da brita de Itaitinga foi de 0,66%, o que significa que ambos os materiais são constituídos por partículas de formas cúbicas.

Os agregados cúbicos são mais indicados para pavimentação, dado que um material lamelar tende a quebrar-se com mais facilidade quando exposto ao tráfego.

5.5.4. Caracterização física e mecânica

A determinação da absorção de água foi efetuada de acordo com a especificação DNER-ME 081/98.

O teor de absorção de água obtido para o agregado reciclado misto foi de 7% e para a brita de Itaitinga foi de 0,8%.

O ensaio de *Los Angeles* foi realizado com base na norma DNER-ME 035/98 e obteve-se o valor de 49% para o reciclado misto e 45,86% para a brita de Itaitinga.

5.6. Trabalho “*Recycling of Clay Bricks as Aggregate in Asphalt Concrete*”

5.6.1. Considerações iniciais

O trabalho “*Recycling of Clay Bricks as Aggregate in Asphalt Concrete*” foi desenvolvido por *Fouad M. Khalaf* da *Napier University* em Edimburgo, Escócia, Reino Unido (Khalaf, Fouad M., 2004).

O objetivo principal deste trabalho consistiu na investigação da possibilidade de utilizar tijolos esmagados como agregado em Misturas Betuminosas.

Neste trabalho foram realizados ensaios com vista à caracterização das propriedades físicas e mecânicas de dois tipos de agregado esmagado de tijolos de barro novo, um agregado reciclado de tijolo e agregado granítico natural. O agregado de granito foi analisado como termo de comparação.

Alguns dos ensaios realizados foram:


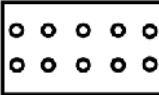
- Análise granulométrica - BS 812: Part 103.1 (BSI, 1985b),
- Resistência à compressão - BS 3921 (BSI, 1985a),
- Densidade relativa de agregados - BS 812: Parte 2 (BSI, 1995),
- Porosidade do agregado realizado segundo o procedimento de ensaio de *Khalaf e DeVenny*, 2002 (Khalaf & DeVenny, 2002)

5.6.2. Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Agregado miúdo de betão;
- Dois tipos de tijolo de barro (215 x 102,5 x 65 mm) novo, com diferentes resistências à compressão, as quais se apresentam no Quadro 21.
- Agregado natural de granito esmagado com dimensão máxima de 20 mm.

Quadro 21 - Tipos de tijolo de argila utilizadas no estudo (Khalaf, Fouad M., 2004)

Nº.	Tipo de Tijolo	Vista de Cima	Força de compressão do tijolo (f_b) (N/mm^2)
1	3-ranhuradas		53,42
2	10-buracos		81,24

Nota: Os resultados na tabela são a média dos resultados dos ensaios (BSI, 1985a)

Os dois tipos de agregado de tijolo cerâmico novo foram partidos com o martelo, até à dimensão máxima de 20 mm.

O agregado de tijolo cerâmico reciclado que contém pelo menos seis tipos de tijolo diferentes foi esmagado até atingir uma granulometria inferior a 20 mm. As impurezas presentes neste material são de argamassa que foram, na sua maioria, reduzidas a pó e removidas.

5.6.3. Caracterização geométrica

A análise granulométrica, embora não apresentada no trabalho foi realizada em todos os tipos de agregados de acordo com norma *Testing aggregates: Method for determination of particle size distribution, sieve tests, BS 812: Part 103.1* (BSI, 1985b).

5.6.4. Caracterização mecânica

O ensaio da densidade relativa dos agregados foi determinado de acordo com a Norma *Testing aggregates: Methods for determination of density, BS 812: Parte 2* (BSI, 1995), usando o método do frasco de gás.

Os resultados de densidade relativa para os agregados utilizados nesta investigação são os apresentados no Quadro 22 e mostram que os agregados de tijolo têm menores densidades relativas do que o agregado de granito, tornando-se numa vantagem para os agregados de tijolo dado que são mais leves, tornando a mistura betuminosa menos densa do que o agregado de granito.

Quadro 22 - Valores da densidade relativa e porosidade (Khalaf, Fouad M., 2004)

Nº	Tipo de agregado	Densidade relativa	Porosidade [%]
1	Tijolo novo com 3 ranhuras	2,12	20,12
2	Tijolo novo com 10 buracos	2,35	16,84
3	Resíduo de Tijolo	1,91	24,47
4	Granito	2,89	6,23

Para o cálculo das propriedades foram utilizados os procedimentos de ensaio desenvolvidos por Khalaf e DeVenny (Khalaf & DeVenny, 2002) os resultados são apresentados no Quadro 22.


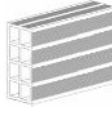

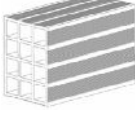
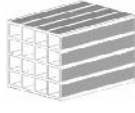
Algumas das conclusões deste trabalho são:

- A utilização de tijolo novo ou resíduo de tijolo moído como agregado graúdo em misturas betuminosas é uma opção viável;
- As misturas betuminosas feitas com agregados de tijolo necessitam de uma maior quantidade de betume em comparação com as misturas betuminosas produzida com agregado de granito. Este fator deve-se ao facto de os agregados de tijolo terem uma elevada porosidade e rugosidade.

No entanto, é importante referir que o tijolo utilizados no trabalho de Khalaf, 2004 (Khalaf, Fouad M., 2004), tem uma resistência à compressão muito superior à do tijolo utilizado em Portugal.

No caso do tijolo novo de três ranhuras a resistência à compressão é aproximadamente vinte e oito vezes superior e no caso do tijolo novo de 10 buracos é aproximadamente quarenta e três vezes superior à do yijolo usado em Portugal, de acordo com a ficha técnica do tijolo tradicional da empresa Portuguesa Preceram - Industrias de Construção, S.A (Preceram, 2012), Quadro 23.

Quadro 23 - Tipos de tijolo de cerâmica mais comum em Portugal (Preceram, 2012)

Designação	Tipo de Tijolo	Configuração	Resistência à compressão do tijolo (N/mm^2)
30x20x7	8-buracos		$\geq 1,9$
30x20x9	8-buracos		$\geq 1,7$
30x20x11	8-buracos		$\geq 1,5$
30x20x15	12-buracos		$\geq 1,5$
30x20x22	16-buracos		$\geq 1,5$

5.7. Trabalho “*The Potential Use of Construction and Demolition Waste in Road Construction in Ireland*”

5.7.1. Considerações iniciais

O trabalho “*The Potential Use of Construction and Demolition Waste in Road Construction in Ireland*” foi preparado por A. R. Woodside, W. D. H. Woodward e J. McElhinney da Universidade de Ulster, Irlanda do Norte, para a 5ª Conferência Internacional de Misturas Betuminosas e Pavimentos que decorreu na Grécia (Woodside et al., 2011).

O objetivo principal deste trabalho consistiu na análise de mistura betuminosa “AC 20 HDM Binder 160/220” constituída por agregado natural de calcário *Carboniferous* em comparação com a incorporação de diferentes quantidades de RCD e análise das suas alterações.

Para atingir este objetivo foram realizados, entre outros, os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica - IS EN 13108
- Ensaio de *Los Angeles*
- Ensaio de *micro-Deval*

Foram preparadas quatro misturas de agregado natural com RCD:

- Mistura A, com 100% de agregado natural, usada como controlo;
- Mistura B, com 50% de agregado reciclado e 50% de agregado natural;
- Mistura C, com 25% de agregado reciclado e 75% de agregado natural;
- Mistura D, com 10% de agregado reciclado e 90% de agregado natural.

5.7.2. Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram:

- Resíduo de construção e demolição constituído por betão, tijolo e pedra;
- O Agregado natural calcário *Carboniferous*, típico da Irlanda.

5.7.3. Caracterização geométrica

Para realizar a mistura betuminosa AC 20 HDM 160/220, os autores optaram por misturar RCD com agregado natural de forma a dar cumprimento à norma IS EN 13108 (CEN, 2006), correspondente à NP EN 13108-1 (IPQ, 2011b).

No Quadro 24 apresentam-se as granulometrias indicada pela norma IS EN 13108 (CEN, 2006).

Quadro 24 - Análise Granulométrica (CEN, 2006)

Abertura dos peneiros (mm)	Material (%)	Tolerância FPC (%)	Especificação (%)
31,5	100	-2	98-100
20	99	-9+5	90-100
10	62	+9	53-71
2	30	+7	23-37
0,25	12	+5	7-17
0,063	8,0	+3,0	5,0-11,0

No Quadro 25 e Quadro 26 apresentam-se as análises granulométricas das quatro misturas, sendo que os provetes foram compactados em moldes com 100 mm de diâmetro e em moldes com 150 mm de diâmetro.

Quadro 25 - Detalhes das misturas, molde de 100 mm de diâmetro (Woodside, Woodward, & J.McElhinney, 2011)

Mistura A		Mistura B		Mistura C		Mistura D	
Tamanho do Peneiro (mm)	Agregado Natural (g)	Agregado Reciclado (g)	Agregado Natural (g)	Agregado Reciclado (g)	Agregado Natural (g)	Agregado Reciclado (g)	Agregado Natural (g)
	100%	50%	50%	25%	75%	10%	90%
31,5	418	209	209	104	314	42	376
20	652	176	176	88	264	35	317
10	198	99	99	50	148	20	178
2	44	22	22	11	33	4	40
0,25	88	44	44	22	66	9	79

Quadro 26 - Detalhes das misturas, molde 150 mm de diâmetro (Woodside, Woodward, & J.McElhinney, 2011)

Mistura A		Mistura B		Mistura C		Mistura D	
Tamanho do Peneiro (mm)	Agregado Natural (g)	Agregado Reciclado (g)	Agregado Natural (g)	Agregado Reciclado (g)	Agregado Natural (g)	Agregado Reciclado (g)	Agregado Natural (g)
	100%	50%	50%	25%	75%	10%	90%
31,5	760	380	380	190	570	76	684
20	640	320	320	160	480	64	576
10	360	180	180	90	270	36	324
2	80	40	40	20	60	8	72
0,25	160	80	80	40	120	16	144

5.7.4. Caracterização mecânica

O RCD constituído por betão, tijolo e pedra foi esmagado em laboratório de forma a ter dimensões de 20 mm, 14 mm, 10 mm, 6 mm e finos.

Sobre o RCD foram realizados os ensaios de *Los Angeles*, obtendo-se 27,5 %, de *micro-Deval* por via húmida com o valor de 17,5% e de absorção de água com o valor de 4%.

Os autores afirmam que o uso de RCD's na mistura betuminosa AC 20 melhora a sua rigidez e concluem que as amostras secas que contêm RCD's apresentam melhor comportamento do que amostras só de agregado natural. A rigidez ótima foi obtida para a mistura com incorporação de 25% de RCD's.

5.8. Trabalho “*Performance Evaluation of Brick Chips as Coarse Aggregate on the Properties of Bituminous Mixes*”

5.8.1. Considerações iniciais

O trabalho “*Performance Evaluation of Brick Chips as Coarse Aggregate on the Properties of Bituminous Mixes*” foi realizado por H. M. Rasel, M. A. Sobhan e M. N. Rahman na Universidade de Engenharia e Tecnologia de Rajshahi no Bangladesh (Rasel et al., 2011).

O objetivo principal deste trabalho consistiu em verificar se a utilização de agregados obtidos a partir de tijolo novo e RCD de tijolo é aceitável no fabrico de misturas betuminosas.

Para atingir estes objetivos foram realizados, entre outros, os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica
- Massa específica - AASHTO T19
- Absorção de água - AASHTO T84
- *Los Angeles* - AASHTO T104

5.8.2. Materiais Utilizados

Os materiais utilizados foram os abaixo indicados:

- Resíduo de tijolo proveniente da demolição de um edifício da cidade de Rajshahi, no Bangladesh;
- Tijolo novo (recolhido no fabricante);
- Agregado natural.

As amostras recolhidas foram partidas manualmente em pedaços com dimensão máxima de 25 mm.

5.8.3. Caracterização geométrica

A granulometria dos agregados na mistura betuminosa da presente investigação é dada na Figura 36.

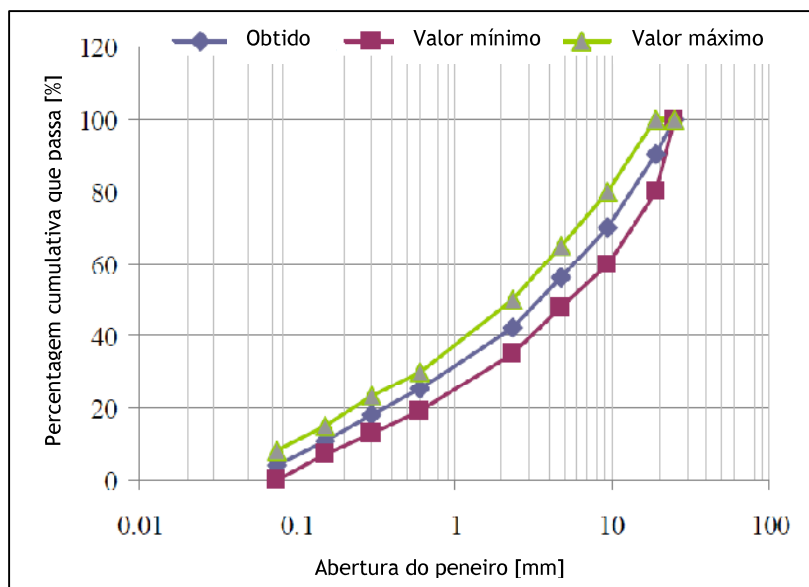


Figura 36 - Análise granulométrica (Rasel et al., 2011)

5.8.4. Caracterização mecânica

As propriedades mecânicas encontradas para os três agregados estão indicadas no Quadro 27.

Quadro 27 - Propriedades dos agregados grossos, adaptado (Rasel et al., 2011)

Propriedades	Uni.	Agregados		
		Natural	Tijolo novo	Resíduo tijolo
Massa volúmica das partículas secas em estufa [ρ_{rd}]	Mg/m ³	2,62	1,92	1,91
Massa volúmica do material impermeável das partículas [ρ_a]	Mg/m ³	2,73	2,45	2,43
Absorção de água	%	1,45	11,30	11,34
<i>Los Angeles</i>	%	26	38	45

No trabalho de (Rasel et al., 2011) é concluí-se que a utilização de tijolo novo e RCD de tijolo é viável como agregado graúdo em misturas betuminosas, sendo que, com este agregado há a necessidade de aumentar a quantidade de ligante betuminoso em comparação com a mistura convencional, devido à sua elevada porosidade.

5.9. Trabalho “*Engineering Properties and Applications of Recycled Brick Rubble*”

5.9.1. Considerações iniciais

O trabalho “*Engineering Properties And Applications Of Recycled Brick Rubble*” foi realizado para obtenção do grau de Doutor por *Thurairatnam Aatheesan* na Faculdade de Engenharia e Ciências Industriais, Centro de Infra-estrutura Sustentável da Universidade de Tecnologia de Swinburne, Austrália, em 2011 (Aatheesan, 2011).

O objetivo principal deste estudo foi investigar a possibilidade de reutilização do tijolo, betão e pedra de basalto britada em camadas não ligadas.

Para atingir este objectivo foram realizados os seguintes ensaios às amostra de agregado com 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 40 % e 50 % de RCD de tijolo moído misturado com betão esmagado (Classe 3) e pedra basáltica britada (Classe 3):

- Análise granulométrica - AS 1141.11 (1996) “*Particle size distribution by sieving*”;
- Densidade das partículas retidas no peneiro 4,75 mm - AS 1141.6.1 (2000) “*Particle density and water absorption of coarse aggregate - Weighing-in-Water Method*”;
- Densidade das partículas passadas no peneiro 4,75 mm - AS 1141.5 (2000) “*Particle density and water absorption of fine aggregates*”;
- Absorção de água - AS 1141.6.1 (2000) “*Particle density and water absorption of coarse aggregate - Weighing-in-Water Method*”;
- Los Angeles - AS 1141.23 (1995) “*Methods for sampling and testing aggregates - Los Angeles Value*”;
- Índice de achatamento (*flakiness*) - AS 1141.15 (1999) “*Methods for determination of particle shape - Flakiness index*”;

5.9.2. Materiais Utilizados

Foram usadas amostras de tijolo moído, betão esmagado (classe 3) e pedra basáltica britada (classe 3) recolhidas em dois centros de reciclagem de *Victoria*, *Alex Fraser em Laverton* do Norte e *Delta* em *Sunshine*.

O tijolo moído recolhido do centro de reciclagem de *Alex Fraser em Laverton* é constituído tipicamente por 70% de tijolo e 30% de outros materiais, tais como asfalto, cimento e rocha.

As amostras recolhidas têm uma granulometria com dimensão máxima de 20 mm sendo que na Figura 37 à Figura 39 estão representados as várias amostras dos agregados reciclados, recolhidos no centro de reciclagem de *Alex Fraser em Laverton*.



Figura 37 - Agregados de resíduo de tijolo moído (20 mm), centro de reciclagem *Alex Fraser em Laverton* (Aatheesan, 2011)



Figura 38 - Agregado de resíduo de betão esmagado (CC3), (20 mm), centro de reciclagem *Alex Fraser em Laverton* (Aatheesan, 2011)



Figura 39 - Agregado de resíduo de pedra basáltica britada (Classe 3), (20 mm), centro de reciclagem *Alex Fraser em Laverton* (Aatheesan, 2011)

O centro de reciclagem de *Delta*, localizado na Sunshine produz pedra britada, betão esmagado e tijolo moído, em várias classes.

As amostras de agregado de tijolo moído, betão esmagado (Classe 3) e pedra basáltica britada (Classe 3) recolhidas têm uma dimensão máxima de 20 mm. Neste local o resíduo tijolo é

constituído tipicamente por 40 % de tijolo, 55 % de betão e 5% de misturas betuminosas trituradas.

A Figura 40 representa a amostra de agregado de tijolo moído do centro de reciclagem *Delta Reciclagem, Sunshine*.



Figura 40 - Agregado de resíduo de tijolo moído (20 mm), *Delta em Sunshine* (Aatheesan, 2011)

5.9.3. Caracterização geométrica

5.9.3.1. Propriedades geométricas e mecânicas do tijolo moído

Os ensaios laboratoriais foram realizados sobre amostras de tijolo moído recolhidas nos dois centros de reciclagem referidos, *Fraser Alex Reciclagem* (local 1) *Delta* (local 2).

A análise granulométrica das amostras de tijolo dos dois locais, antes e depois da compactação modificada está indicada no Quadro 28 e correspondente à curva granulométrica da Figura 41.

Quadro 28 - Distribuição granulométrica do resíduo tijolo (antes da compactação) - Local 1 e Local 2

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem cumulativa do material passado [%]			
	Local 1		Local 2	
	Antes da Compactação	Depois da Compactação	Antes da Compactação	Depois da Compactação
26,5	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	97,5	100,0	100,0	99,6
13,2	76,1	89,5	88,2	91,1
9,50	65,3	79,4	77,7	82,3
4,75	46,4	60,2	57,2	62,5
2,36	34,9	47,8	45,1	49,8
0,425	17,3	26,4	22,9	26,5
0,075	6,6	11,0	8,5	10,4

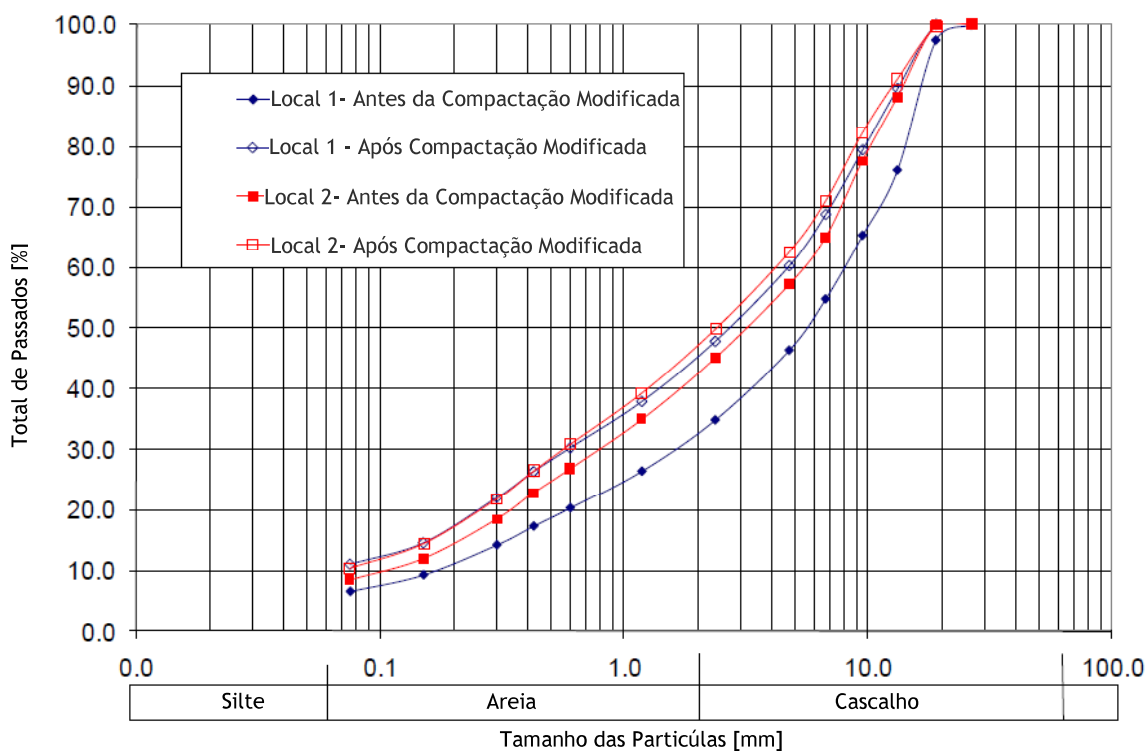


Figura 41 - Comparação das curvas granulométricas da amostra de resíduo de tijolo moído antes e depois da compactação - Local 1 e Local 2 (Aatheesan, 2011)

A amostra de tijolo moído do Local 1 tem maior percentagem de tijolo 70%, relativamente ao Local 2 com 40% de tijolo e 55% de betão, o que pode ser um dos factores que justifiquem a redução da granulometria maior do material do Local 1 relativamente à redução de granulometria do Local 2.

No Quadro 29 estão representadas as propriedades mecânicas do tijolo moído recolhido nos dois centros de reciclagem e da pedra britada.

Quadro 29 - Propriedades mecânicas das amostras de tijolo moído - Local 1 e Local 2

Ensaio		Unid.	Tijolo		Britas (classe 3)
			Local 1	Local 2	
Densidade das partículas	4,75/19 mm	t/m ³	2,67	2,65	2,86
	0/4,75 mm	t/m ³	2,63	2,60	2,85
Absorção água	4,75/19 mm	%	6,15	6,20	3,32
	0/4,75 mm	%	6,87	7,16	4,72
Índice de Achatamento		%	14	-	19
<i>Los Angeles</i>		%	36	-	21

De acordo com os valores indicados no Quadro 29 foi concluído que:

- A densidade de partículas grossas e finas de agregados de tijolos moído é inferior à densidade da pedra britada de (classe 3).
- A absorção de água de partículas grossas e finas de agregados de tijolos moído é maior do que as das pedras britadas (classe 3).
- O índice de achatamento revela que a amostra do Local 1 tem boa quantidade de partículas alongadas.
- As amostras de tijolo moído sofrem um maior desgaste de abrasão durante o ensaio de Los Angeles.
- As superfícies das amostras de tijolo moído são mais abrasíveis uma vez que o tijolo é principalmente feito de argila.

5.9.3.2. Propriedades geométricas e mecânicas do tijolo moído misturado com betão esmagado (classe 3)

A quantidade de betão e tijolo são designadas por XXCC/YYCB, onde XX e YY definem a percentagem de betão esmagado (CC) e tijolo moído (CB), respetivamente.

Os ensaios laboratoriais foram realizados em amostras de mistura de tijolo moído com betão triturado em diferentes percentagens.

A análise granulométrica das amostras de tijolo moído com betão triturado está indicada no Quadro 30, correspondente à curva granulométrica da Figura 42.

Quadro 30 - Distribuição granulométrica do tijolo misturado com betão, série 1 (Aatheesan, 2011)

Abertura dos peneiros [mm]	Descrição da amostra / Percentagem cumulativa do material passado [%]							
	50CC 50CB	60CC 40CB	70CC 30CB	75CC 25CB	80CC 20CB	85CC 15CB	90CC 10CB	100CC
26,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	99,1	98,5	99,3	99,3	99,4	98,7	99,7	99,1
13,2	87,3	88,3	88,1	89,6	88,8	82,3	83,5	79,0
9,5	76,6	75,1	74,7	80,1	78,9	70,3	72,8	67,6
4,75	58,4	56,0	54,3	62,9	56,5	50,9	51,1	49,3
2,36	45,0	45,9	42,4	49,5	44,9	39,0	39,0	38,3
0,075	7,5	5,7	5,8	8,0	4,8	4,7	4,5	3,6

Legenda: CC = Betão Esmagado CB = Tijolo Moído

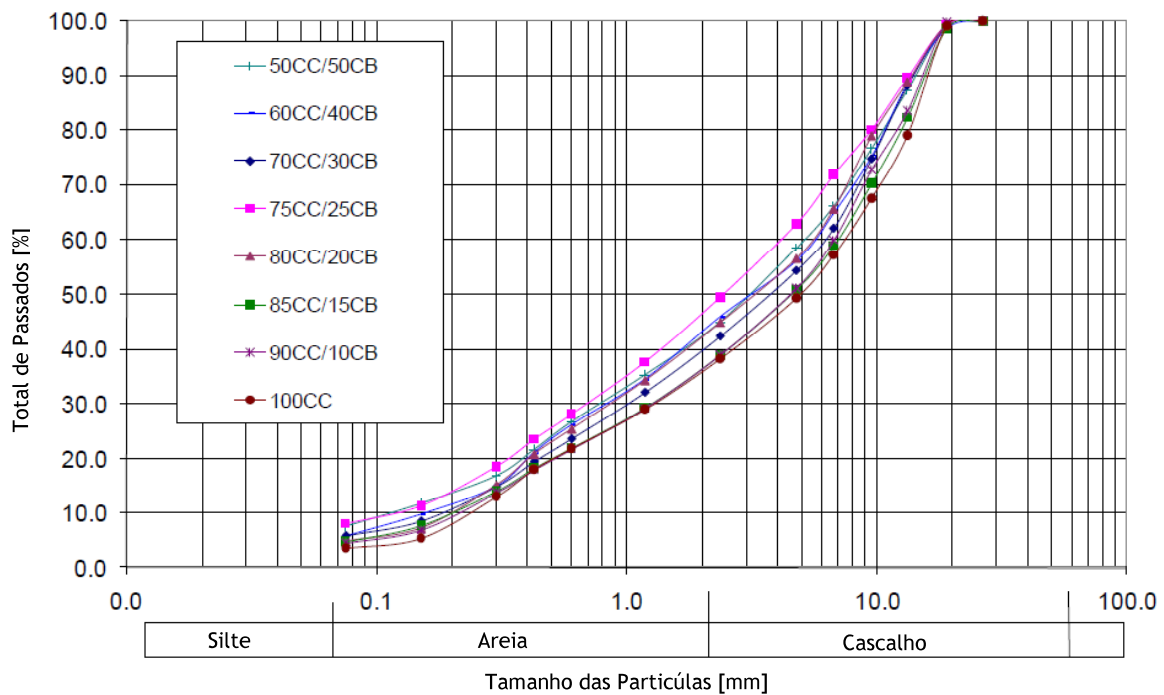


Figura 42 - Curvas granulométricas de tijolo misturado com betão, série 1, adaptado (Aatheesan, 2011)

No Quadro 31 apresentam-se as propriedades mecânicas do tijolo moído misturado com betão esmagado.

Quadro 31 - Propriedades mecânicas das amostras de tijolo misturado com betão (Aatheesan, 2011)

Ensaios		Uni.	Descrição da amostra							
			50CC 50CB	60CC 40CB	70CC 30CB	75CC 25CB	80CC 20CB	85CC 15CB	90CC 10CB	100CC
Densidade das Partículas	4,75/19mm	t/m ³	2,69	2,68	2,67	2,71	2,70	2,71	2,47	2,76
	0/4,75 mm	t/m ³	2,63	2,59	2,65	2,43	2,60	2,41	2,67	2,65
Absorção de água	4,75/19mm	%	5,36	5,91	5,56	5,32	5,33	5,43	5,69	4,66
	0/4,75 mm	%	8,03	8,69	7,97	6,90	7,50	8,70	8,98	9,75
Índice de achatamento		%	14	13	13	13	11	12	11	11
<i>Los Angeles</i>		%	33	32	30	28	30	30	32	28

Legenda: CC = Betão Esmagado CB = Tijolo Moído

No trabalho de Aatheesan, 2011 (Aatheesan, 2011), na apreciação das propriedades geométricas e mecânicas do tijolo moído misturado com betão esmagado concluiu-se que:

- Mistura de 50% de tijolo moído não mostrara nenhuma variação significativa nas suas propriedades de engenharia;
- Todas as misturas de betão esmagado com até 25% de tijolo moído tiveram um bom desempenho durante os ensaios do módulo de resiliência e propriedades de deformação permanente.

5.9.3.3. Propriedades geométricas e mecânicas do tijolo moído misturado com pedra brita (classe 3)

Os ensaios laboratoriais foram realizados em amostras de mistura de tijolo moído com pedra britada em diferentes percentagens.

A análise granulométrica das amostras de tijolo moído misturado com pedra britada está indicada no Quadro 32, correspondente à curva granulométrica da Figura 43.

Quadro 32 - Distribuição granulométrica do tijolo misturado com pedra britada, série 1 (Aatheesan, 2011)

Abertura dos peneiros [mm]	Descrição da amostra / Percentagem cumulativa do material passado [%]							
	50CR 50CB	60CR 40CB	70CR 30CB	75CR 25CB	80CR 20CB	85CR 15CB	90CR 10CB	100CR
26,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	98,7	98,8	97,7	99,7	99,3	100,0	97,4	99,3
13,2	82,2	81,2	82,7	90,4	89,7	89,0	76,8	89,7
9,5	69,1	66,3	74,8	82,1	77,9	77,8	65,8	81,9
4,75	46,4	44,5	52,2	57,8	51,1	53,4	44,2	55,3
2,36	33,4	31,2	38,4	42,5	37,9	39,2	33,3	39,0
0,075	7,4	7,2	10,1	10,7	9,6	9,9	8,8	10,2

Legenda: CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

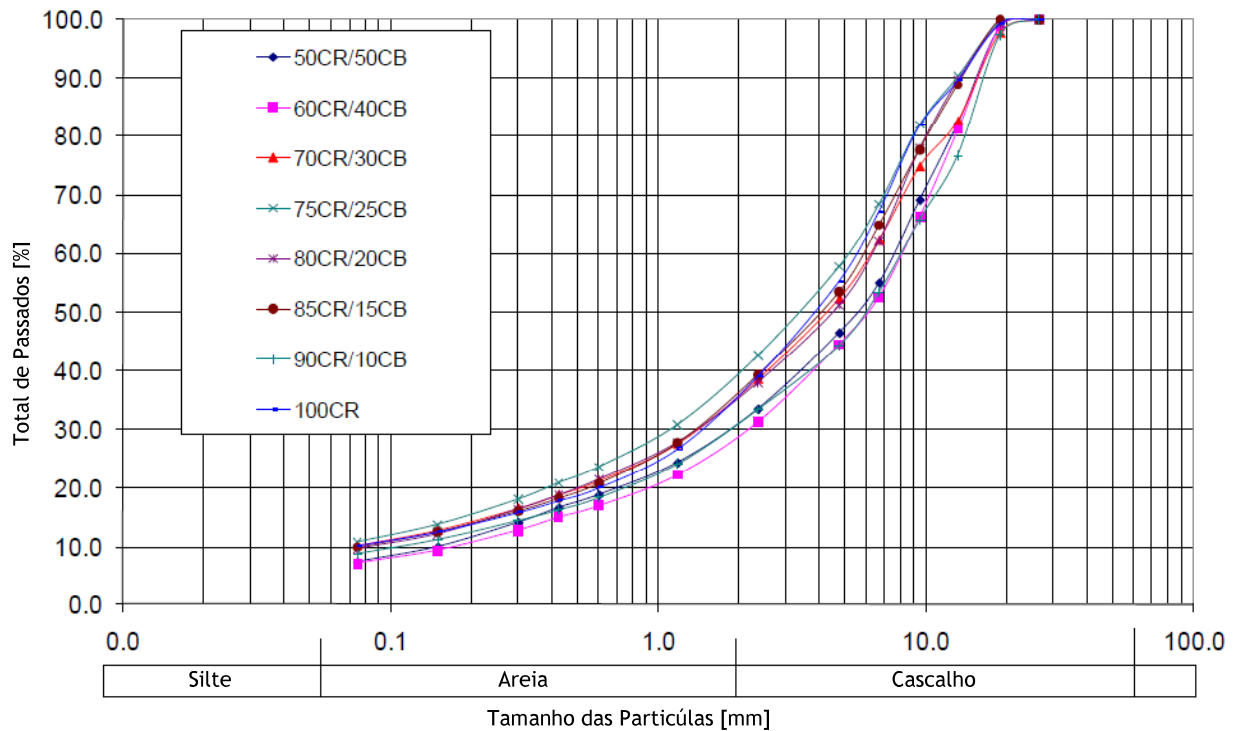


Figura 43 - Curvas granulométricas de tijolo misturado com pedra britada, série 1, adaptado (Aatheesan, 2011)

No Quadro 33 apresentam-se as propriedades mecânicas do tijolo moído misturado com pedra britada.

Quadro 33 - Propriedades mecânicas das amostras de tijolo misturado com pedra britada (Aatheesan, 2011)

Ensaio		Uni.	Descrição da amostra							
			50CR 50CB	60CR 40CB	70CR 30CB	75CR 25CB	80CR 20CB	85CR 15CB	90CR 10CB	100CR
Densidade das Partículas	4,75/19mm	t/m ³	2,67	2,71	2,72	2,76	2,78	2,78	2,80	2,86
	0/4,75 mm	t/m ³	2,82	2,77	2,83	2,82	2,80	2,82	2,82	2,85
Absorção de água	4,75/19mm	%	4,15	3,90	3,75	3,59	3,08	3,11	3,24	3,32
	0/4,75 mm	%	4,59	5,26	5,15	4,60	5,21	5,17	4,85	4,72
Índice de achatamento		%	12	12	17	18	18	20	18	19
<i>Los Angeles</i>		%	29	29	27	23	21	22	22	21

Legenda: CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

Da análise do Quadro 33 verificou-se que os agregados britados (pedra basáltica) são mais alongados do que os agregados moídos (tijolo), que são arredondados. Isto indica que as amostras com maior percentagem de tijolo têm um índice de achatamento menor, sendo que valores elevados de índice de achatamento podem provocar dificuldades no imbricamento entre os agregados e afectar a trabalhabilidade da amostra.

5.9.3.4. Comparação entre as propriedades geométricas e mecânicas das várias misturas de tijolo esmagado

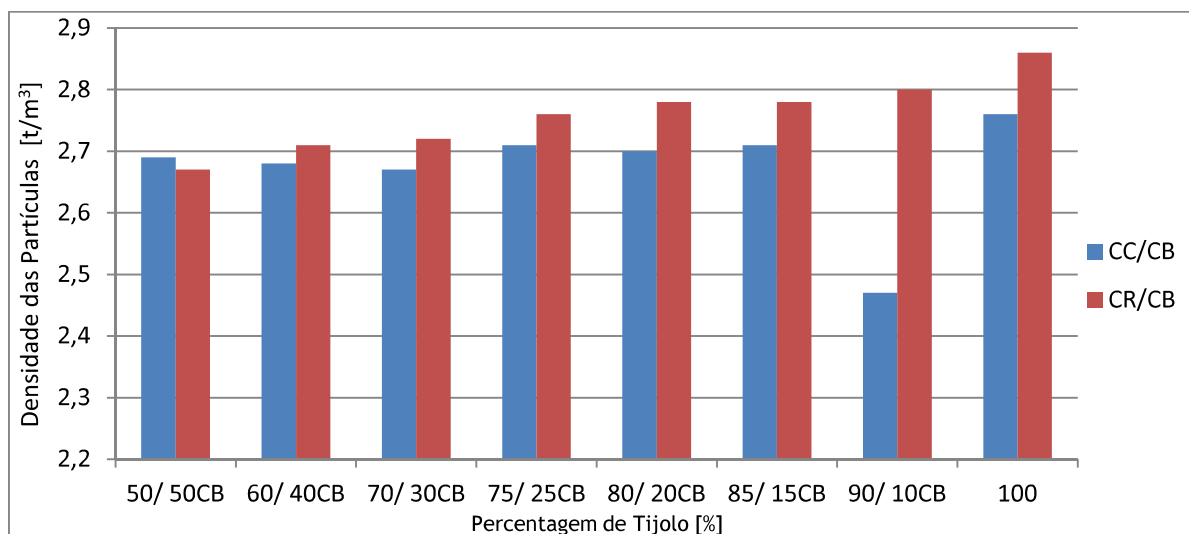
Da análise do Quadro 34, Figura 44 e Figura 45 verifica-se que a densidade das partículas grossas e finas das amostras de pedra britada com tijolo moído são maiores do que a das amostras de betão com tijolo moído.

O betão como é constituído por agregados de areia e cimento é mais poroso do que a pedra britada e quanto maior é a porosidade de uma material menor é a sua densidade.

Quadro 34 - Comparação da densidade das partículas (4,75/19 mm e 0/4,75 mm) para CC/CB e CR/CB (Aatheesan, 2011)

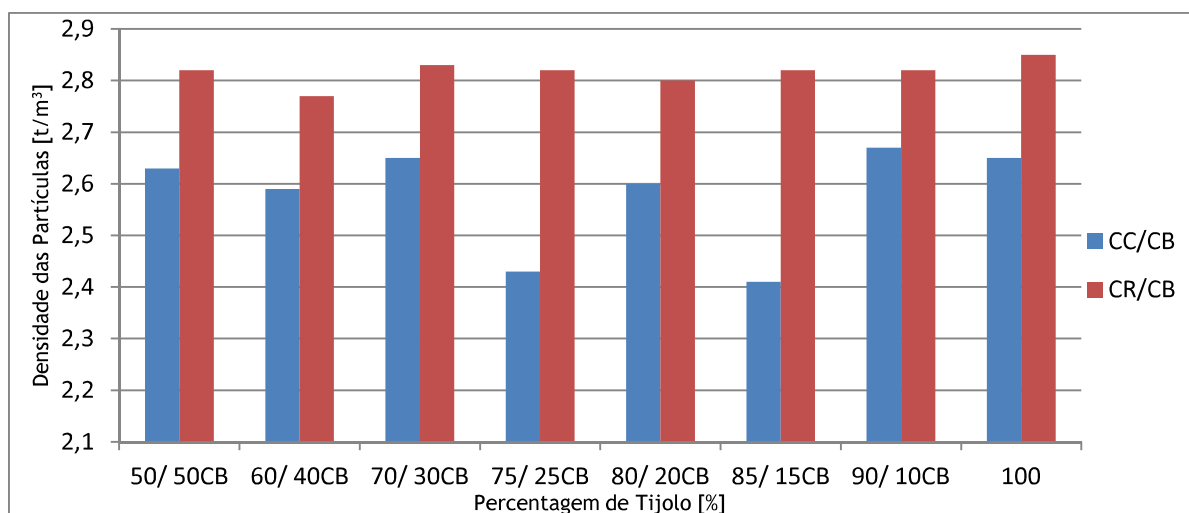
Densidade das Partículas		Uni.	Descrição da amostra							
			50/50CB	60/40CB	70/30CB	75/25CB	80/20CB	85/15CB	90/10CB	100
4,75/19 mm	CC/CB	t/m ³	2,69	2,68	2,67	2,71	2,70	2,71	2,47	2,76
	CR/CB	t/m ³	2,67	2,71	2,72	2,76	2,78	2,78	2,80	2,86
0/4,75 mm	CC/CB	t/m ³	2,63	2,59	2,65	2,43	2,60	2,41	2,67	2,65
	CR/CB	t/m ³	2,82	2,77	2,83	2,82	2,80	2,82	2,82	2,85

Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído



Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

Figura 44 - Densidade das partículas grossas (4,75/19 mm), CC/CB e CR/CB



Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

Figura 45 - Densidade das partículas finas (0/4,75 mm), CC/CB e CR/CB

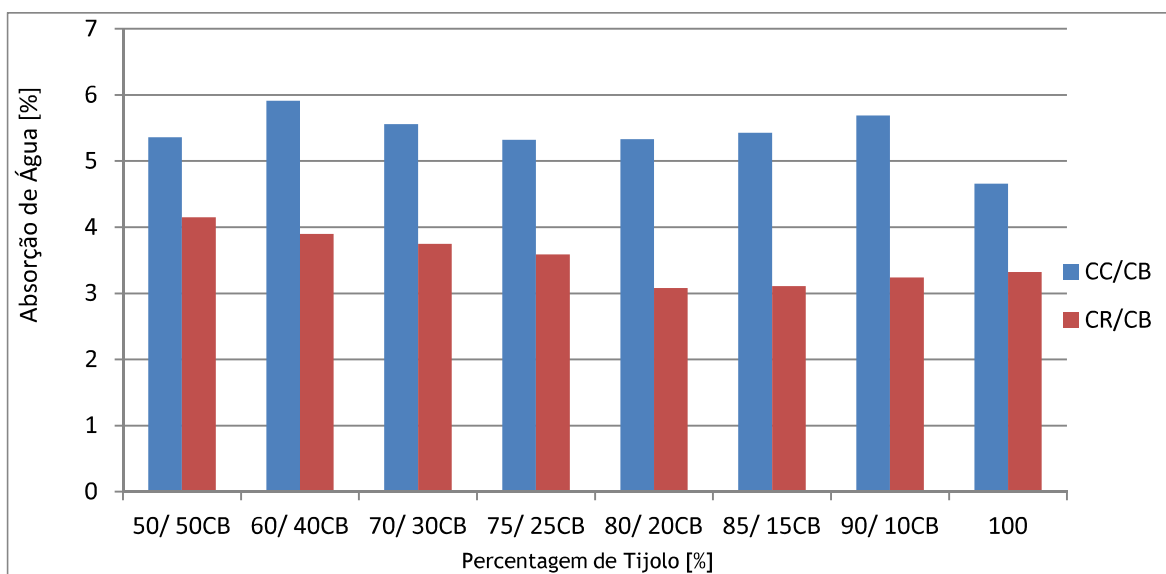
Da análise do Quadro 35, Figura 46 e Figura 47, verifica-se que a absorção de água das partículas grossas e finas de tijolo moído misturado com betão esmagado é maior do que a da mistura de pedra britada com tijolo moído.

O betão esmagado, como já foi referido anteriormente, é mais poroso que a pedra britada o que leva ao aumento da absorção de água do agregado betão.

Quadro 35 - Comparação da absorção de água (4,75/19 mm e 0/4,75 mm) para CC/CB e CR/CB

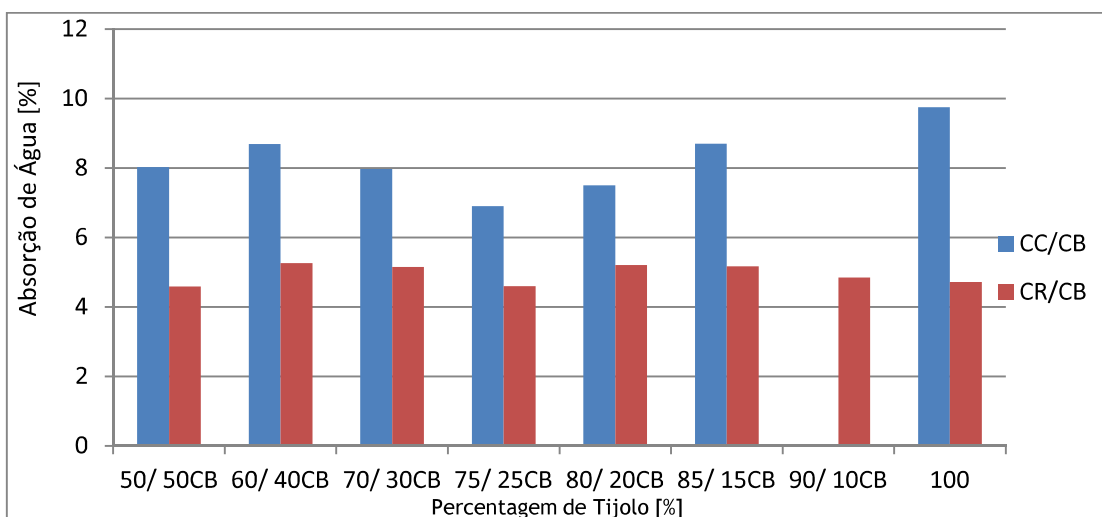
Absorção de água		Uni.	Descrição da amostra							
			50/ 50CB	60/ 40CB	70/ 30CB	75/ 25CB	80/ 20CB	85/ 15CB	90/ 10CB	100
4,75/19 mm	CC/CB	%	5,36	5,91	5,56	5,32	5,33	5,43	5,69	4,66
	CR/CB	%	4,15	3,90	3,75	3,59	3,08	3,11	3,24	3,32
0/4,75 mm	CC/CB	%	8,03	8,69	7,97	6,90	7,50	8,70	8,98	9,75
	CR/CB	%	4,59	5,26	5,15	4,60	5,21	5,17	4,85	4,72

Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído



Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

Figura 46 - Absorção de água das partículas grossas (4,75/19 mm), CC/CB e CR/CB



Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

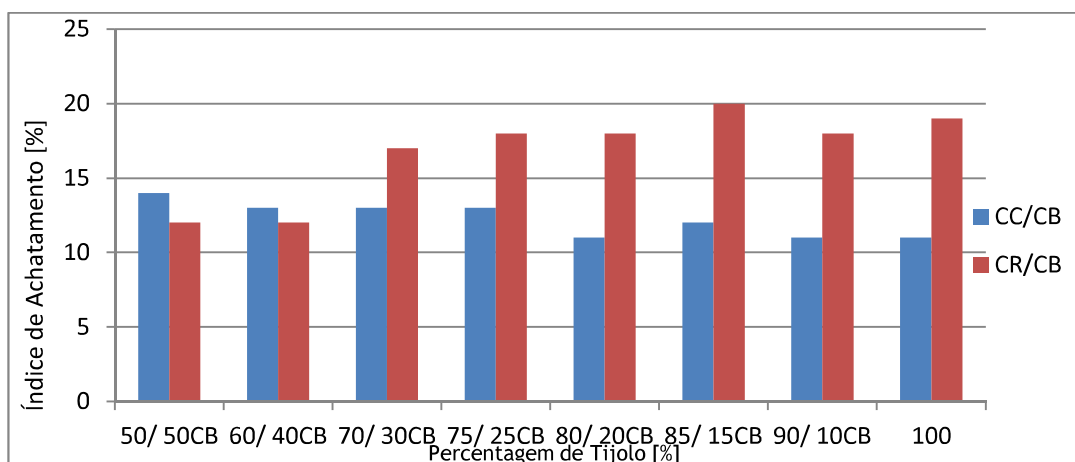
Figura 47 - Absorção de água das partículas finas (0/4,75 mm), CC/CB e CR/CB

Da análise do Quadro 36 e Figura 48 verifica-se que o índice de achatamento da pedra britada com tijolo moído é maior do que o do betão esmagado com tijolo moído.

Quadro 36 - Comparação do índice de achatamento entre CC/CB e CR/CB

Índice de Achatamento	Uni.	Descrição da amostra							
		50/ 50CB	60/ 40CB	70/ 30CB	75/ 25CB	80/ 20CB	85/ 15CB	90/ 10CB	100
CC/CB	%	14	13	13	13	11	12	11	11
CR/CB	%	12	12	17	18	18	20	18	19

Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído



Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

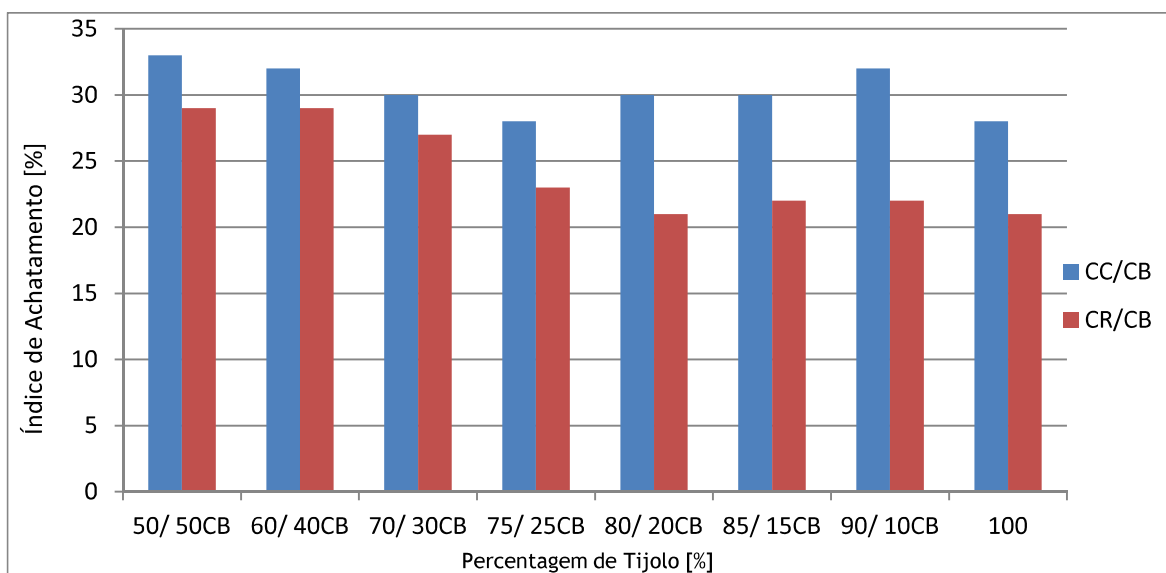
Figura 48 - Índice de achatamento, CC/CB e CR/CB

Da análise do Quadro 37 e Figura 49 verifica-se o valor de *Los Angeles* é superior na mistura betão esmagado com tijolo moído do que na mistura de pedra britada com betão moído.

Quadro 37 - Comparação do *Los Angeles* entre CC/CB e CR/CB

<i>Los Angeles</i>	Uni.	Descrição da amostra							
		50/ 50CB	60/ 40CB	70/ 30CB	75/ 25CB	80/ 20CB	85/ 15CB	90/ 10CB	100
CC/CB	%	33	32	30	28	30	30	32	28
CR/CB	%	29	29	27	23	21	22	22	21

Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído



Legenda: CC = Betão Esmagado CR = Pedra Britada CB = Tijolo Moído

Figura 49 - *Los Angeles*, CC/CB e CR/CB

6. Estudo experimental

6.1. Considerações iniciais

No presente capítulo apresentam-se os resultados da caracterização em laboratório das propriedades geométricas e físicas, realizada ao ARCD betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (17 01 07), fornecido pela empresa Ambilei - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S. A., unidade de Castelo Branco.

As amostras foram reduzidas de acordo com a norma NP EN 932-2 (IPQ, 2002d) e restringidas ao material passado no peneiro de 20 mm.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Castelo Branco com a exceção do ensaio da determinação da resistência ao desgaste (*micro-Deval*), que foi realizado no Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Todos os ensaios foram realizados sobre dois provetes e os resultados que se apresentam nos pontos seguintes são os valores médios desses ensaios.

6.1.1. Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados

A classificação dos constituintes dos agregados grossos reciclados foi realizada com base na norma NP EN 933-11 (IPQ, 2011a).

A amostra do ARCD foi recolhida em conformidade com a norma NP EN 932 (IPQ, 2002c) e reduzida em conformidade com a norma NP EN 932-2 (IPQ, 2002d), até se obter um provete de 20 kg.

Peneirou-se o provete de forma a separar as partículas correspondente da fração granulométrica 4/20 mm, com massa correspondente a M_1 . As partículas inferiores a 4 mm são pesadas e registadas como M_4 .

Para facilitar a divisão reduziu-se o número de partículas a uma massa de 6440,9 g.

As proporções obtidas para o ARCD em estudo são apresentadas no Quadro 38 e na Figura 50.

Quadro 38 - Classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados

Constituintes	Massas [g]	Proporções
X	$M_X = 3,5$	$100 \times M_X / M_1 = 0,02\%$
Rc	$M_{Rc} = 1487,1$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Rc} \times M_3) = 22,97\%$
Ru	$M_{Ru} = 1445,4$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Ru} \times M_3) = 22,33\%$
Rb	$M_{Rb} = 3390,5$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Rb} \times M_3) = 52,37\%$
Ra	$M_{Ra} = 113,2$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Ra} \times M_3) = 1,75\%$
Rg	$M_{Rg} = 1,2$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Rg} \times M_3) = 0,02\%$
		Total = 99,46%

Sendo que:

$$V_{FL} = 93 \text{ ml};$$

$$\text{Proporção FL} = 6,1 \text{ cm}^3/\text{kg}.$$

Onde:

- M_1 Massa do provete;
- M_2 Remanescente não flutuante;
- M_3 Remanescente não flutuante separado por constituintes;
- V_{FL} Volume das partículas flutuantes;
- M_x Massa de materiais coesivos, metais, madeiras não flutuantes, plásticos, borrachas e estuque;
- M_{Rc} Massa de betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria;
- M_{Ru} Massa de agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- M_{Rb} Massa de elementos cerâmicos de alvenaria, blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante;
- M_{Ra} Massa de materiais betuminosos;
- M_{Rg} Massa de vidros;
- FL Proporção material flutuante;
- X Proporção dos materiais coesivos, metais, madeiras não flutuantes, plásticos, borrachas e estuque;
- Rc Proporção de betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria;
- Ru Proporção de agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- Rb Proporção de elementos cerâmicos de alvenaria, blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante;
- Ra Proporção de materiais betuminosos;
- Rg Proporção de vidros.

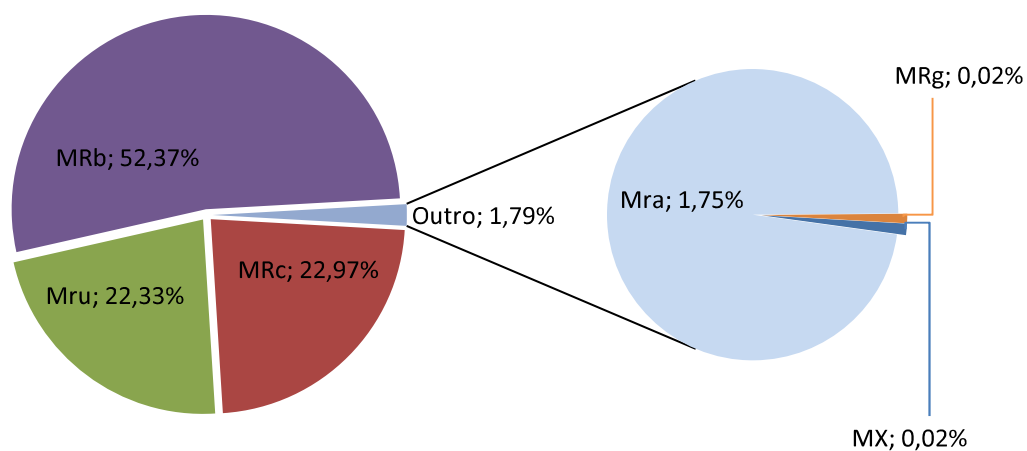


Figura 50 - Gráfico correspondente aos constituintes do agregado grosso reciclado

Onde:

- M_x Massa de materiais coesivos, metais, madeiras não flutuantes, plásticos, borrachas e estuque;
- M_{Rc} Massa de betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria;
- M_{Ru} Massa de agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- M_{Rb} Massa de elementos cerâmicos de alvenaria, blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante;
- M_{Ra} Massa de materiais betuminosos;
- M_{Rg} Massa de vidros;

6.1.2. Análise granulométrica

A avaliação da composição granulométrica dos ARCD's foi feita de acordo com a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000), a qual só é aplicável a agregados com dimensão nominal até 63 mm (IPQ, 2000).

A análise granulométrica da fração fina (partículas inferiores a 0,063 mm) dos materiais não podendo ser realizada por peneiração, é feita por sedimentação, em que o tamanho das

partículas é avaliado através da velocidade com que as mesmas depositam no seio duma solução aquosa. Dado que o conhecimento da granulometria das fração fina, não é, em geral, necessária para os trabalhos de pavimentação rodoviária, (Branco et al., 2011) optou-se por não realizar este ensaio.

A coluna de peneiros utilizada foi constituída pelos peneiros 16 mm, 14 mm, 12,5 mm, 10 mm, 8 mm, 6,3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 µm, 250 µm, 125 µm, 63 µm.

No Quadro 39 apresenta-se a composição granulométrica média dos ARCD's e, a partir dos valores apresentados no mesmo, construiu-se a curva granulométrica representada na Figura 51.

Quadro 39 - Composição granulométrica do ARCD's

Aberturas do peneiro [mm]	Percentagem cumulativa de material passado [%]
20	100,0
16	90,4
14	83,1
12,5	79,2
10	70,5
8	62,1
6,3	54,6
4	43,7
2	33,4
1	24,1
0,5	16,9
0,25	11,6
0,125	8,0
0,063	6,5

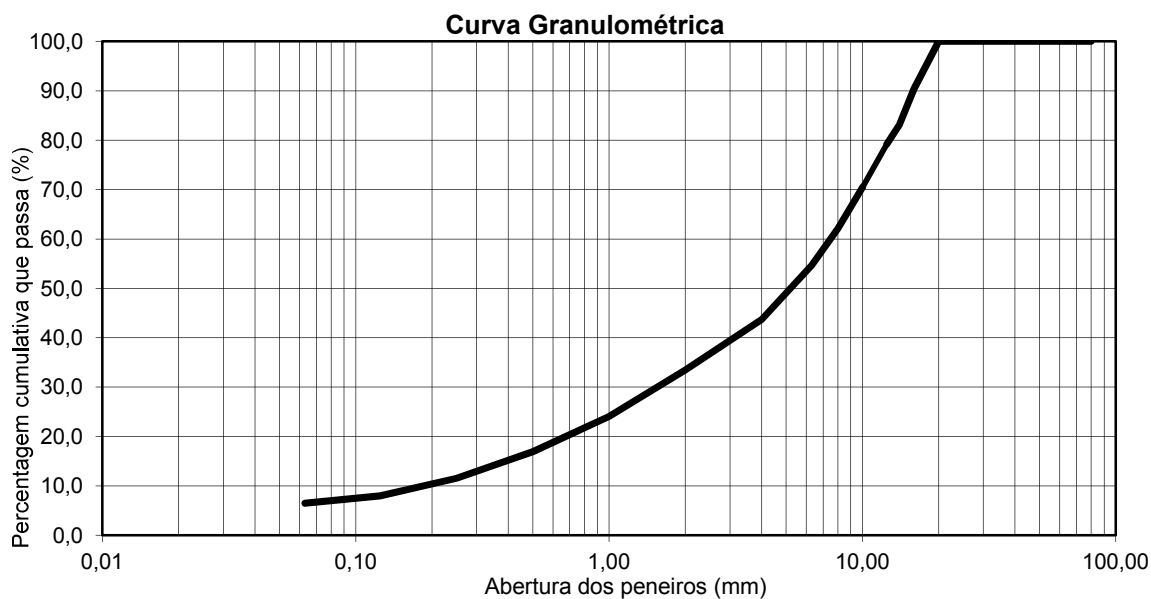


Figura 51 - Curva granulométrica do ARCD

6.1.3. Forma das Partículas - Índice de achatamento

A análise do desempenho quanto à forma das partículas fez-se através do ensaio da determinação da forma das partículas - Índice de achatamento, com base na NP EN 933-3 (IPQ, 2002e).

Os agregados a utilizar em pavimentos rodoviários devem apresentar partículas com forma aproximadamente cúbica, sendo que a utilização de partículas achatadas e alongadas deve ser evitada por se tornarem mais frágeis, conduzindo a alterações granulométricas significativas, durante o processo de fabrico e colocação em obra.

Da realização do ensaio, obteve-se para o ARCD em estudo um índice de achatamento de 16 %, logo pertence à categoria FL_{20} .

6.1.4. Qualidade dos Finos - Ensaio do equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia foi realizado segundo a NP EN 933-8 (IPQ, 2002g) e tem como objetivo avaliar a limpeza do agregado e dar uma primeira indicação sobre a natureza dos finos.

O equivalente de areia obtido para o ARCD em estudo foi de 56,9 %, o que corresponde à categoria SE_{50} (InIR, 2009).

6.1.5. Qualidade dos finos - Ensaio do azul de metileno

A avaliação da qualidade dos finos pelo ensaio do azul de metileno realizou-se segundo a NP EN 933-9 (IPQ, 2002h).

No caso do ARCD em estudo, foram utilizadas 30 g de caulinite (mais a respetiva solução corante adsorvida), por se entender que a quantidade de finos presentes no provete era baixa.

O volume total de solução corante adsorvida por 30g de caulinite seca foi de 30 ml. Dado que o cálculo do valor de azul de metileno da caulinite é dado pela equação (6.1):

$$MB_K = V'/30 \quad (6.1)$$

Logo:

$$MB_K = 1 \text{ g}/100\text{g} \quad (6.2)$$

O ensaio é realizado sobre uma solução de 200 gramas de material seco de fração granulométrica 0/2 mm e 500 ml de água destilada, com a adição previa de 30 gramas de caulinite e o valor de solução de azul de metileno necessária à sua titulação.

O valor do azul de metileno encontrado foi de 1,5 gramas de corante por kg de fração 0/2 mm, o que corresponde a uma categoria MB_2 .

O Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011), o levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal (InIR, 2009) e a norma NP EN 13043 (IPQ, 2004) recomenda que quando a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm, estiver compreendida entre 3 % e 10 %, em massa, deve ser avaliada a nocividade dos finos da fração 0/0,125 mm e o valor do ensaio de azul de metileno deve estar enquadrado na categoria MB_F10 .

Dado que a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm do ARCD foi em média de 6,5 %, foi realizado o ensaio para a determinação do valor de azul de metileno da fração granulométrica 0/0,125 mm (MB_F).O procedimento foi idêntico ao ensaio da fração granulométrica 0/2 mm, sendo a subamostra constituída por 500ml de água destilada, $30,0 \pm 0,1$ gramas de massa do material de fração granulométrica 0/0,125 mm. Neste caso não houve a necessidade de adicionar a caulinite dado que a mancha formou um rebordo suficientemente perceptível para a identificação da auréola.

O valor médio de MB_F é de 5 gramas de corante por kg da fração 0/0,125 mm, correspondendo à categoria MB_F10 , estando deste modo verificada a não nocividade dos finos.

6.1.6. Massa volúmica e absorção de água

A Determinação da massa volúmica e da absorção de água dos ARCD's foi feita de acordo com a norma NP EN 1097-6 (IPQ, 2003).

Dado que o agregado é de granulometria extensa, foi necessário separar a amostra nas frações 0,063/4 mm e 4/20 mm, sendo que, em ambos os provetes é utilizado o método do picnómetro, embora com diferentes volumes devido à máxima dimensão do agregado de cada fração granulométrica.

No Quadro 40 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios realizados às diferentes frações granulométricas.

Quadro 40 - Massa volúmica e absorção de água (IPQ, 2003)

Parâmetros	Unidades	AC 20 MB CE da EP	Fração granulométrica	
			0,063 a 4 [mm]	4 a 31,5 [mm]
Massa volúmica do material impermeável das partículas [ρ_a]	Mg/m ³	Declarar	2,62	2,57
Massa volúmica das partículas secas em estufa [ρ_{rd}]	Mg/m ³	Declarar	2,32	2,07
Massa volúmica das partículas saturada com superfície seca [ρ_{ssd}]	Mg/m ³	Declarar	2,44	2,27
Absorção de água, após 24 horas de imersão em água [WA_{24}]	%	≤ 2	4,9%	9,4%

6.1.7. Determinação da resistência à fragmentação (*Los Angeles*)

A resistência à fragmentação dos ARCD's foi determinada a partir do ensaio de *Los Angeles*, de acordo com a NP EN 1097-2 (IPQ, 2002i).

A amostra laboratorial foi lavada nos peneiros de 10 mm, 12,5 mm e 14 mm e seca em estufa, para obtenção das frações separadas. Seguidamente a amostra foi reduzida até à massa de 5000±5 gramas, com uma curva granulométrica de 65 % de passados no peneiro 12,5 mm e foi sujeita ao ensaio, tendo-se obtido um coeficiente de *Los Angeles* de 58 %.

6.1.8. Determinação da resistência ao desgaste (*micro-Deval*)

A resistência ao desgaste por atrito em meio húmido dos agregados foi avaliada através do ensaio de *micro-Deval*, especificado pela norma NP EN 1097-1 (IPQ, 2002j).

A amostra inicial, constituída por 2 kg de agregado com granulometria compreendida entre 10 mm e 14 mm, foi separada nos peneiros de 10 mm, 12,5 mm e 14 mm, para obter frações distintas, compreendidas entre 10 mm e 12,5 mm e entre 12,5 mm e 14 mm, sendo que a distribuição granulometria adotada foi de 65 % de material passado no peneiro 12,5 mm.

O coeficiente de *micro-Deval* obtido para o ARCD em estudo foi de 55 %.

7. Análise de resultados

7.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são analisados os resultados dos ensaios realizados no presente trabalho através da comparação com:

- Especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
- Limite máximo recomendado para agregado reciclados pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, volume V.03, 14.03 - Pavimentação para agregados a aplicar em camadas não ligadas;
- Limite máximo recomendado para agregado natural pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, volume V.03, 14.03 - Pavimentação, para agregados constituintes da mistura betuminosa de base AC20.
- Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal do Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP;

- NP EN 13043:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamento superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação do Instituto Português da Qualidade,
- Trabalhos de investigação apresentados no capítulo 5.

7.1.1. Especificações do LNEC

Na sequência de ainda não existir uma especificação para classificação de agregados constituídos por RCD's para aplicação em camadas ligadas de pavimentos rodoviários em camadas ligadas, fez-se a classificação dos constituintes dos agregados grossos reciclados do presente trabalho à luz da especificação do LNEC E 471- "Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betão de ligantes hidráulicos" (LNEC, 2009a).

Na E 471 os agregados são agrupados em três classes, ARB1, ARB2 e ARC, com base na proporção relativa dos constituintes, conforme indicado no Quadro 41.

Quadro 41 - Classificação de agregados reciclados grossos para fabrico de betão (LNEC, 2009a)

Classes	R_c	$R_c + R_u$	R_b	R_a	$X + R_g$	FL
ARB1	$\geq 90 \%$		$\leq 10 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 0,5 \%$	$\leq 2 \%$
ARB2	$\geq 70 \%$		$\leq 30 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 1 \%$	$\leq 2 \%$
ARC	$\geq 90 \%$			$\leq 10 \%$	$\leq 2 \%$	$\leq 2 \%$

Onde:

- FL Material flutuante em volume;
- Ra Materiais betuminosos;
- Rb Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante;
- Rc Proporção do constituinte de betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria;
- Rg Vidro.
- Ru Agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- X Outros: materiais coesivos (p.ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais, (ferrosos e não ferrosos) madeira não flutuante e estuque;

As classes ARB1 e ARB2 são constituídas maioritariamente por betão, misturado ou não com agregados não ligados. A classe ARC (agregados reciclados compostos) tem como constituinte principal o betão, agregados não ligados, e elementos de alvenaria, não havendo exigências quanto às percentagens relativas de cada um deles.

O resíduo 17 01 07, enquadra-se na classe ARC pela especificação E 471 (LNEC, 2009a), dado que os elementos cerâmicos são o constituinte principal, pelo que o ARCD em estudo pertence a esta mesma classe, ou seja é um ARC.

7.1.2. Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal - RCD's Camadas não ligadas

Embora o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011) não faça referência a agregados constituídos por RCD's a aplicar em camadas ligadas de pavimentos rodoviários, permite a aplicação deste tipo de agregados em camadas não ligadas.

Para camadas granulares não ligadas de sub-base e base, de pavimentos rodoviários, o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011) classifica os agregados reciclados em duas classes: B ou C, em função da sua composição, Quadro 42, e em três categorias: AGER1, AGR2 e AGER3 de acordo com os campos de aplicação Quadro 43.

Quadro 42 - Classificação dos agregados reciclados de acordo com a natureza dos constituintes da fração grossa, (EP, 2011)

Classes	$R_c + R_u + R_g$	R_g	R_b	R_a	FL	X
B	$\geq 90 \%$	$\leq 5\%$	$\leq 10 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 1\%$
C	$\geq 50 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 10 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 1\%$

Onde:

- FL Proporção de material flutuante;
- Ra Proporção de materiais betuminosos;
- Rb Proporção de elementos cerâmicos de alvenaria, blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante;
- Rc Proporção de betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria;
- Rg Proporção de vidros.
- Ru Proporção de agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- X Proporção dos materiais coesivos, metais, madeiras não flutuantes, plásticos, borrachas e estuque;

Quadro 43 - Campos de aplicação dos agregados (EP, 2011)

Categoria	AGER 1		AGER 2		AGER 3
	C	B	C	B	B
Aplicação em camada de sub-base - TMDp	≤ 50	≤ 150	≤ 150	≤ 300	≤ 300
Aplicação em camada de base - TMDp	NR	≤ 150	≤ 150	≤ 150	≤ 300

Legenda: TMDp - Tráfego Médio Diário de Pesados por via; NR - Não Recomendado

O ARCD em estudo assume, em função da sua composição, valores mais próximos da classe C, como se pode confirmar no Quadro 44, havendo uma grande discrepância entre o valor máximo admitido para a proporção de R_b (elementos cerâmicos de alvenaria) e o obtido no ARCD, sendo neste bastante mais elevado. Esta discrepância não foi tida em consideração dado que esta classificação é referida pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011), para camadas granulares não ligadas de sub-base e base, de pavimentos rodoviários.

Quadro 44 - Comparação da classe C de classificação dos agregados reciclados de acordo com a natureza dos constituintes da fração grossa do Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal e o ARCD

Classes	$R_c + R_u + R_g$	R_g	R_b	R_a	FL	X
C	≥ 50 %	≤ 5 %	≤ 10 %	≤ 5 %	≤ 5 %	≤ 1 %
ARCD	45,32 %	0,02 %	52,37 %	1,75 %	0,34 %	0,02 %

Relativamente ao ensaio da determinação do teor de finos - Ensaio do equivalente de areia e tendo em conta que o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal não refere a realização deste ensaio para a análise das camadas de misturas betuminosas a quente, comparamos este valor com o recomendado para camadas não ligadas, constituídas por agregados naturais.

Para as camadas não ligadas com agregados naturais, o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal estabelece que se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for inferior a 3 %, os finos podem ser considerados não prejudiciais. Dado que no presente trabalho os finos do ARCD têm, em média, 6,5 % de passados no peneiro 0,063 mm tem que se ter em conta a possibilidade de os finos serem prejudiciais.

O Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal para camadas não ligadas refere que para agregados naturais com teor total de finos superior a 3%, para “camadas de sub-base de ABGE-Agregados Britados de Granulometria Extensa” e “camada de regularização” o equivalente de areia deverá ser superior ou igual a 40 %. Para “camadas de base ABGE” e “camada de desgaste e camadas traficadas não revestidas ABGE” o equivalente de areia será superior a 50 %.

Ora, apresentando o ARCD em estudo um equivalente de areia de 56,9 % pode afirmar-se que cumpre os requisitos do Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal para qualquer das camadas não ligadas.

No entanto, considera-se que o resultado do ensaio de azul de metileno caracteriza melhor o agregado, uma vez que o resultado do ensaio de equivalente de areia pode ser fortemente influenciado pelo teor de finos (Pestana, 2008).

7.1.3. Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal - Agregado natural AC20

No Quadro 45 apresenta-se um resumo da caracterização dos ARCD's realizada no presente trabalho e a sua comparação com os valores recomendados pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2001) para agregados naturais a usar em misturas betuminosas AC 20 (MB - Macadame Betuminoso).

Quadro 45 - Comparação valores obtidos no ARCD com o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal

Norma	Ensaio		Un.	ARCD	Categoria	Caderno de Encargos Tipo Obra, EP		
NP EN 933-3	Índice de achatamento		%	16	FL_{20}	FL_{30}	V	
NP EN 933-9	Azul metileno	0/2 mm	g/kg	1,5	MB_2	NR	NA	
		0/0,125 mm	g/kg	5,0	MB_F10	MB_F10	V	
NP EN 1097-6	Massa volúmica e da absorção de água	0,063/4 mm	ρ_a	Mg/m ³	2,62	NA	Declarar	V
			ρ_{rd}		2,32	NA	Declarar	V
			ρ_{ssd}		2,44	NA	Declarar	V
		WA_{24}	%	4,9	NA	≤ 2	X	
	4/31,5 mm	ρ_a	Mg/m ³	2,57	NA	Declarar	V	
		ρ_{rd}		2,07	NA	Declarar	V	
		ρ_{ssd}		2,27	NA	Declarar	V	
		WA_{24}		%	9,4	NA	≤ 2	X
NP EN 1097-2	<i>Los Angeles</i>		%	58	$LA_{Declarar}$	LA_{40}	X	
NP EN 1097-1	<i>micro-Deval</i>		%	55	$M_{DE} Declarado$	$M_{DE} 25$	X	

Legenda: V - Verifica; X - Não Verifica; NA - Não Aplicável; NR - Não Referido

O ARCD em estudo apresenta um índice de achatamento de 16%, correspondente à categoria FL_{20} , sendo admissível um índice de achatamento FL_{30} , verifica-se que o ARCD é menos achatado do que o limite máximo recomendado para agregado natural a aplicar em misturas betuminosas de base AC20.

O valor do azul de metileno é de 1,5 gramas de corante por kg da fração 0/2 mm, o que corresponde a uma categoria MB_2 .

O Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2011) para camadas de mistura betuminosa a quente em camadas de base, o levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal (InIR, 2009) e a norma NP EN 13043 (IPQ, 2004) recomendam que quando a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm estiver compreendida entre 3 % e 10 %, em massa, deve ser avaliada a nocividade dos finos da fração 0/0,125 mm e o valor do ensaio de azul de metileno deve estar enquadrado na categoria MB_F10 .

Dado que a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm do ARCD foi em média de 6,5 %, foi realizado o ensaio para a determinação do valor de azul de metileno (MB_F) da fração granulométrica 0/0,125 mm,

O valor médio de MB_F é de 5 gramas de corante por kg da fração 0/0,125 mm, correspondendo à categoria MB_{F10} estando assim verificada a não nocividade dos finos.

Como referência o ensaio de azul de metileno para a fração 0/2 mm também foi realizado e obteve-se o valor de 1,5 gramas de corante por kg da fração 0/2 mm, o que corresponde a uma categoria MB_2 .

Relativamente aos parâmetros das Massas Volúmicas o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal não especifica os limites recomendáveis, apenas recomenda a sua indicação.

No cálculo das massas volúmicas não há uma grande variação entre os resultados obtidos nos diferentes parâmetros, das diferentes frações granulométricas, o mesmo não se verifica para a absorção de água, que, embora entre os ensaios da mesma fração granulométrica, não tenha havido grandes variações, já entre a fração granulométrica 0,063 a 4 mm e 4 a 31,5 mm a diferença da absorção de água, após 24 horas de imersão em água (WA_{24}) chega a ser de mais do dobro.

A discrepância dos valores de absorção de água pode ser justificada pela diferente forma de realização do ensaio para este parâmetro em função da fração granulométrica.

A absorção de água (em percentagem de massa seca) após a imersão durante 24 horas é dada pela expressão (7.1):

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (7.1)$$

Onde:

M_1 Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, em gramas;

M_4 Massa do provete seco em estufa, em gramas.

Para a fração granulométrica 0,063 a 4 mm a massa do agregado saturado com superfície seca ao ar (M_1) é calculado através da secagem do provete com uma leve corrente de ar morno de modo a evaporar a humidade superficial, até ser atingido o estado da superfície seca, que é verificado pelo processo de enchimento livre do molde troncocónico e apiloamento da superfície com 25 pancadas até o cone do agregado se deformar após a desmoldagem.

Na fração granulométrica 4 mm a 31,5 mm a massa do agregado saturado com superfície seca ao ar (M_1) é calculado através da secagem cuidadosa do provete com panos secos de forma a fazer desaparecerem as películas visíveis de água, mas mantendo um aspeto húmido.

Em conclusão, no que respeita à absorção de água, os ARCD's não cumprem os requisitos de conformidade apresentados no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal para a mistura de base AC20, pois $WA_{24} > 2\%$.

A absorção de água dos agregados está diretamente associada à sua porosidade, como o aumento da superfície específica. No caso dos ARCD's constituídos por grande quantidade de material cerâmico é elevada a absorção de água do material. A superfície mais rugosa e a configuração em geral mais alongada, pelo facto da maior parte deles serem provenientes de tijolo furado, contribuem muito significativamente para o aumento da absorção de água dos ARCD's em relação aos agregados naturais.

Em termos práticos, um aumento significativo da absorção de água pelo agregado dificulta o controlo da trabalhabilidade comprometendo a resistência mecânica do pavimento.

O coeficiente de *Los Angeles* obtido para o ARCD foi de 58 %, valor muito superior ao estipulado no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, que é igual ou inferior a 40 %, categoria LA₄₀, valor, no entanto expectável devido à presença de uma grande quantidade de material cerâmico na composição dos ARCD's com baixa resistência à fragmentação.

O ARCD apresentou um coeficiente de *micro-Deval* de 55 % o que equivale a mais do dobro do valor recomendado pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, que é inferior a 25 % (M_{DE25}).

Da análise da resistência à fragmentação pelo coeficiente de *Los Angeles*, resultou um valor de 58 %, embora superior ao valor máximo recomendado pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal de 50 %, a diferença não é tão significativa quando comparada com o obtido pela resistência ao desgaste pelo coeficiente de *micro-Deval* de 55 %, sendo o valor máximo recomendado de 25 %.

Dado que o ensaio do *micro-Deval* foi realizado por via húmida e sendo a água um fator prejudicial à resistência do agregado, este facto pode justificar os resultados obtidos.

O facto do coeficiente de *Los Angeles* apresentar um elevado índice, indica que o material não é muito resistente, podendo vir a sofrer desgaste com conseqüente modificação das partículas e quantidade de finos. Este fator é importante quando se pretende aplicar este material em camada de pavimento rodoviário, devido às constantes ações a que estas estão sujeitas devido ao tráfego.

Tal como o coeficiente de *Los Angeles* também o coeficiente de *micro-Deval* é elevado, retirando-se as mesmas conclusões.

7.1.4. Outros trabalhos de investigação

Nos Quadro 46 ao Quadro 54 é apresentado um resumo, por ensaio do presente trabalho em comparação com os trabalhos apresentados no capítulo 5.

Quadro 46 - Índice de achatamento

Autor	Norma	Material	Valor [%]
(EST IPCB, 2012)	NP EN 933-3	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	16
(Pestana, 2008)	NP EN 933-3	RCD - Cubos de betão britado (elementos estruturais tais como vigas, lajes e pilares)	14
(Aatheesan, 2011)	AS 1141.15	Tijolo moído - Local 1 _ Laverton	14
		Agregado natural britado	19
		50% Betão esmagado + 50% Tijolo moído	14
		60% Betão esmagado + 40% Tijolo moído	13
		70% Betão esmagado + 30% Tijolo moído	13
		75% Betão esmagado +25% Tijolo moído	13
		80% Betão esmagado +20% Tijolo moído	11
		85% Betão esmagado + 15% Tijolo moído	12
		90% Betão esmagado + 10% Tijolo moído	11
		100% Betão esmagado	11
		50% Pedra britada + 50% Tijolo moído	12
		60% Pedra britada + 40% Tijolo moído	12
		70% Pedra britada + 30% Tijolo moído	17
		75% Pedra britada +25% Tijolo moído	18
		80% Pedra britada +20% Tijolo moído	18
		85% Pedra britada + 15% Tijolo moído	20
90% Pedra britada + 10% Tijolo moído	18		
100% Pedra britada	19		

Relativamente ao índice de achatamento verifica-se que o valor encontrado no presente trabalho está dentro da ordem de grandeza dos valores apresentados pelos diversos autores para materiais semelhantes.

Quadro 47 - Equivalente de areia

Autor	Norma	Material	Valor [%]
(EST IPCB, 2012)	NP EN 933-8	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	57
(Pestana, 2008)	NP EN 933-9	RCD - Cubos de betão britado (elementos estruturais tais como vigas, lajes e pilares)	83
(Ferreira, 2009)	NP EN 933-8	RCD-Britagem de cubos de betão (vigas, lajes e pilares)	86
	NP EN 933-8	RCD-Tijolo, azulejo e telha	39

No ensaio de equivalente de areia o ARCD em estudo apresenta um valor superior comparativamente com RCD de tijolo mas mais baixo de que os RCD's de betão, embora demonstre ser um material limpo.

Quadro 48 - Azul de Metileno

Autor	Norma	Material	Valor	Unidades
(EST IPCB, 2012)	NP EN 933-9	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	5	g de corante/kg da fração granulométrica 0/0,125 mm
			1,5	g de corante/kg da fração granulométrica 0/2 mm
(Pestana, 2008)	NP EN 933-9	RCD - Cubos de betão britado (elementos estruturais tais como vigas, lajes e pilares)	0,7	g de corante/kg da fração granulométrica 0/2 mm
(Ferreira, 2009)	NP EN 933-9	RCD-Britagem de cubos de betão (vigas, lajes e pilares)	0,8	g de corante/kg da fração granulométrica 0/2 mm
		RCD-Tijolo, azulejo e telha	3,3	g de corante/kg da fração granulométrica 0/2 mm

Comparando o resultado do ensaio de azul de metileno para a fração granulométrica de 0/2 mm verifica-se que o agregado em estudo apresenta um valor superior do que o RCD de betão e menor no RCD de tijolo, azulejo e telha, o que era expectável, uma vez que apesar do processo de fabrico, os RCD com materiais cerâmicos na sua composição serão mais plásticos.

Quadro 49 - Massa volúmica do material impermeável das partículas [pa]

Autor	Norma	Material	Valor [Mg/m ³]
(EST IPCB, 2012)	NP EN 1097-6 (0,063/4 mm)	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	2,62
	NP EN 1097-6 (4/31,5 mm)		2,57
(IST, 2006)	NP 1379 (4,72/19 mm)	Agregados grossos reciclados de betão	2,513
		Agregados grossos reciclados mistos (56% betão e argamassa, 22% pedra, 18% de materiais cerâmicos e outros)	2,575
(Rasel et al., 2011)	AASHTO T19	RCD de tijolo, Rajshahi, Bangladesh	2,43
		Tijolo novo (recolhido no fabricante)	2,45
		Agregado natural	2,73

Quadro 50 - Massa volúmica das partículas secas em estufa [prd]

Autor	Norma	Material	Valor [Mg/m ³]
(EST IPCB, 2012)	NP EN 1097-6 (0,063/4 mm)	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	2,32
	NP EN 1097-6 (4/31,5 mm)		2,07
(IST, 2006)	NP 1379 (4,72/19 mm)	Agregados grossos reciclados de betão	2,084
		Agregados grossos reciclados mistos (56% betão e argamassa, 22% pedra, 18% de materiais cerâmicos e outros)	2,084
(Rasel et al., 2011)	AASHTO T19	RCD de tijolo, Rajshahi, Bangladesh	1,91
		Tijolo novo (recolhido no fabricante)	1,92
		Agregado natural	2,62

Quadro 51 - Massa volúmica das partículas saturada com superfície seca [ρ_{ssd}]

Autor	Norma	Material	Valor [Mg/m ³]
(EST IPCB, 2012)	NP EN 1097-6 (0,063/4 mm)	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	2,44
	NP EN 1097-6 (4/31,5 mm)		2,27
(IST, 2006)	NP 1379 (4,72/19 mm)	Agregados grossos reciclados de betão	2,254
		Agregados grossos reciclados mistos (56% betão e argamassa, 22% pedra, 18% de materiais cerâmicos e outros)	2,275

As massas volúmicas obtidas para o RCD em estudo estão dentro da mesma ordem de grandeza comparativamente com os valores apresentados por outros autores.

Quadro 52 - Absorção de Água

Autor	Norma	Material	Valor [%]
(EST IPCB, 2012)	NP EN 1097-6 (0,063/4 mm)	Agregados de alvenaria (52%), betão (23%), pedra natural (22%) e 3% de outros materiais	4,9
	NP EN 1097-6 (4/31,5 mm)		9,4
(IST, 2006)	NP 581	Agregados grossos reciclados de betão	8,2
		Agregados grossos reciclados mistos (56% betão e argamassa, 22% pedra, 18% de materiais cerâmicos e outros)	9,2
(Lima, 2008)	DNER-ME 081/98	RCD misto - Betão/argamassa (43%), materiais finos (26%), brita (22%) e outros	7
		Brita Itaitinga/CE	0,8
(Woodside et al., 2011)	NR	RCD - Betão, tijolo e pedra	4
(Rasel et al., 2011)	AASHTO T84	RCD de tijolo, Rajshahi, Bangladesh	11,34
		Tijolo novo	11,3
		Agregado natural	1,45
(Aatheesan, 2011)	AS 1141.6.1 (4,75/19 mm)	Tijolo moído - Local 1_Laverton	6,15
		Tijolo moído - Local 2_Delta, Sunshine	6,2
		Agregado natural britado	3,32
		50% Betão esmagado + 50% Tijolo moído	5,36
		60% Betão esmagado + 40% Tijolo moído	5,91
		70% Betão esmagado + 30% Tijolo moído	5,56
		75% Betão esmagado +25% Tijolo moído	5,32
		80% Betão esmagado +20% Tijolo moído	5,33
		85% Betão esmagado + 15% Tijolo moído	5,43
		90% Betão esmagado + 10% Tijolo moído	5,69
		100% Betão esmagado	4,66
		50% Pedra britada + 50% Tijolo moído	4,15
		60% Pedra britada + 40% Tijolo moído	3,9
		70% Pedra britada + 30% Tijolo moído	3,75
		75% Pedra britada +25% Tijolo moído	3,59
		80% Pedra britada +20% Tijolo moído	3,08
		85% Pedra britada + 15% Tijolo moído	3,11
90% Pedra britada + 10% Tijolo moído	3,24		
100% Pedra britada	3,32		

Autor	Norma	Material	Valor [%]
(Aatheesan, 2011)	AS 1141.6.1 (0/4,75 mm)	Tijolo moído - Local 1_ Laverton	6,87
		Tijolo moído - Local 2_Delta, Sunshine	7,16
		Agregado natural britado	4,72
		50% Betão esmagado + 50% Tijolo moído	8,03
		60% Betão esmagado + 40% Tijolo moído	8,69
		70% Betão esmagado + 30% Tijolo moído	7,97
		75% Betão esmagado +25% Tijolo moído	6,9
		80% Betão esmagado +20% Tijolo moído	7,5
		85% Betão esmagado + 15% Tijolo moído	8,7
		90% Betão esmagado + 10% Tijolo moído	8,98
		100% Betão esmagado	9,75
		50% Pedra britada + 50% Tijolo moído	4,59
		60% Pedra britada + 40% Tijolo moído	5,26
		70% Pedra britada + 30% Tijolo moído	5,15
		75% Pedra britada +25% Tijolo moído	4,6
		80% Pedra britada +20% Tijolo moído	5,21
		85% Pedra britada + 15% Tijolo moído	5,17
		90% Pedra britada + 10% Tijolo moído	4,85
		100% Pedra britada	4,72

Legenda: NR - Não referido

A absorção de água não é problemática para os agregados grossos naturais, que geralmente apresentam valores da absorção inferiores a 1 %, mas é problemática para os agregados reciclados (IST, 2006).

A absorção de água de 4,9% do ARCD do presente trabalho para a fração granulométrica 0,063/4 mm é um valor bastante positivo tendo em conta o tipo de material, sendo que o valor de absorção de água de 9,4 % obtido para a fração granulométrica 4/31,5 mm é mais próximo dos valores obtidos nos trabalhos em comparação, para o mesmo tipo de material, mais concretamente comparando com o trabalho (IST, 2006).

Quadro 53 - Los Angeles

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-Britagem de cubos de betão (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
(Aatheesan, 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		

Legenda: NR - Não referido

O valor do ensaio de *Los Angeles* obtido no presente trabalho foi o mais desfavorável comparativamente com todos os trabalhos analisados. Embora em alguns dos trabalhos tenha sido utilizado RCD's com uma grande percentagem de incorporação de material cerâmico, estes apresentam propriedades de resistência bastante distintas. Este facto pode ser devido às características originais do material cerâmico, no que respeita à sua resistência, como referido no capítulo 5.

Quadro 54 - micro-Deval

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 betão (vigas, lajes e pilares)	40
		RCD - Tijolo, azulejo e telha	37
(Woodside et al., 2011)	NR	RCD - Betão, tijolo e pedra	17,5

Legenda: NR - Não referido

Por último, o ARCD do presente trabalho também obteve o valor mais desfavorável no ensaio de micro-Deval, à semelhança do que aconteceu com o *Los Angeles*. Este facto vem reforçar a ideia, já referida, de que embora os RCD's apresentados nos diferentes estudos sejam semelhantes, em termos de composição, apresentam resistências bastante diferentes.

8. Conclusões finais e trabalhos futuros

O estudo desenvolvido no âmbito desta dissertação teve como objetivo tirar conclusões acerca da utilização de Resíduos de Construção e Demolição em camadas ligadas de pavimentos, nomeadamente em camadas de base AC20 de estradas de baixo tráfego.

É importante perceber se os agregados reciclados têm capacidade de poderem ser misturados com os agregados naturais mantendo as características mínimas espectáveis para a sua função.

Sendo assim, este estudo baseou-se na caracterização geométrica, física e mecânica de ARCD de mistura de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (17 01 07), em laboratório.

Este objetivo prendeu-se essencialmente com as vantagens do ponto de vista económico e de proteção do meio ambiente, em utilizar RCD's evitando, assim, a necessidade de recorrer a vazadouros e, por outro lado, levando a uma menor extração de novos agregados.

A curva granulométrica, apresentou um agregado de granulometria extensa, truncado na dimensão máxima de 20 mm e percentagem de finos de 6,5 %. O índice de achatamento está dentro dos limites aceitáveis para agregado natural. O resultado do ensaio de equivalente de

areia revela um material limpo e o ensaio de valor de azul de metileno, mais fiável, revela a existência de partículas com alguma sensibilidade à água.

A absorção de água está diretamente associada à porosidade dos agregados e aumento da superfície específica. Sendo os materiais principais do ARCD, tijolo e telha, materiais cerâmicos haverá sempre uma discrepância nos valores aceitáveis de absorção de água para agregados naturais. No entanto haverá interesse em analisar o ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, determinação da massa volúmica e da absorção de água da norma NP EN 1097-6, dado que, para diferentes frações granulométricas (0,063/4 mm e 4/31 mm) apresentam-se métodos diferentes na determinação absorção de água, levando a resultados não espectáveis, dado que seria esperado que a fração granulométrica 4/31 mm tivesse uma absorção de água inferior à fração granulométrica 0,063/4 mm, por apresentar uma menor área contacto e de acordo com o trabalho de Aatheesan, 2011 (Aatheesan, 2011).

Finalmente com os ensaios *de Los Angeles* e *micro-Deval* conclui-se que os resultados obtidos estão dentro dos resultados espectáveis para material cerâmico, mas bastante elevados comparativamente com o limite máximo recomendado pelo Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal para agregados naturais a aplicar em misturas betuminosas e até mesmo para camadas não ligadas com material reciclado, em que esta análise é feita com a soma destes dois parâmetros.

O material cerâmico constituinte do ARCD reduz consideravelmente a resistência à fragmentação e ao desgaste do agregado. O comportamento do pavimento com incorporação deste tipo de RCD terá uma maior fragilidade no processo de fabrico, colocação em obra e vida útil, que será tanto maior quanto maior for a sua percentagem de incorporação.

As proporções dos constituintes dos RCD's têm uma grande variabilidade e heterogeneidade em função da sua origem (Lima, 2008). Esta variabilidade, tornando-se uma limitação para a utilização de RCD's como agregado na construção civil, provoca um aumento da necessidade de controlo da qualidade do produto.

Como conclusão do estudo efetuado, que compreendeu a caracterização laboratorial das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do ARCD de mistura de betão, tijolo, ladrilho, telha e material cerâmico (17 01 07) e a análise de diversos estudos, considera-se que estes materiais apresentam possibilidades da sua aplicação parcial em camadas ligadas de base em estradas de baixo tráfego. É, no entanto, imprescindível a criação de especificações que estabeleçam requisitos mínimos e recomendações para a utilização de agregados reciclados em camadas ligadas de pavimentos rodoviários de baixo tráfego.

É de salientar que uma prévia avaliação das propriedades físicas e mecânicas destes agregados, com um adequado controlo in situ e boas práticas de construção, assegurará um bom desempenho ao longo da vida útil do pavimento.

Para trabalhos futuros evidencia-se a importância da continuação deste estudo, nomeadamente com a realização de ensaios triaxiais cíclicos, que permitiriam retirar mais conclusões acerca do comportamento mecânico dos agregados reciclados. Além disso é importante que se realizem mais estudos acerca deste tipo de material, nomeadamente com materiais com diversas origens e portanto diferentes composições e diferentes quantidades de incorporação de ARCD com agregado natural, alargando o leque de possíveis tipos de materiais bem como de aplicações.

O ensaio de *micro-Deval* comprovou que o ARCD tem um mau desempenho na presença de água. Esta fragilidade poderá ser aprofundada com a realização do mesmo ensaio por via seca e posterior comparação dos valores.

Considera-se igualmente importante analisar o RCD separadamente, isto é, amostra dos constituintes de maior quantidade do ARCD em estudo, RCD de betão e RCD de material cerâmico, exclui-se o agregado natural com origem em RCD dado que este material ao abrigo do Decreto-Lei n.º 46,2008 (Decreto-Lei n.º 46, 2008) deve ser reutilizados na obra de origem.

Com esta análise pretende-se definir a quantidade ótima de cada constituinte de RCD adicionado ao agregado natural para aplicação em camadas ligadas de pavimentos rodoviários com o objetivo de uma incorporação de ARCD ótima, garantindo a qualidade da mistura betuminosa, para estradas de baixo tráfego.

Seria também importante a realização futura da mistura betuminosa em laboratório e em central com aplicação em trechos experimentais em estradas de baixo tráfego para validar estas conclusões em condições reais de construção.

Referências Bibliográficas

- Aatheesan, T. (2011). "Engineering properties and applications of recycled brick rubble." Tese Doutorado. Austrália: Faculdade de Engenharia e Ciência Industriais, Centro de Infra-estrutura Sustentável da Universidade de Tecnologia de Swinburne.
- Antunes, M. L. (2005). *Curso: "Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários."*. Retrieved Janeiro 24, 2012, from <http://www.lnec.pt>: http://www.lnec.pt/organizacao/dt/nira/cursoCRPR/apresentacao_geral.pdf
- APA. (2011). *Consulta da página da Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.* Retrieved Janeiro 26, 2012, from www.apambiente.pt: <http://www.apambiente.pt/politicasambiente/Residuos/Paginas/default.aspx>
- Azevedo, M. C., Ribeiro, J. Q., & Teixeira, A. (2003). *"II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclaem de Pavimentos."*. Porto, Portugal: FEUP.
- Bardini, V. S., Gutiérrez, L. M., & Fernandes, J. L. (2010). "A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas". São Paulo, Brasil: Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos.
- Batista, A. M. (1999). "Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Aplicabilidade em Portugal do Métodos Existentes.". In *Tese de Mestrado*. Coimbra: Dep. Eng^a Civil da F.C.T.da U. de Coimbra.
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2011). *"Pavimentos Rodoviários."*. Coimbra: Almedina.
- BSI. (1985a). "Specification for clay bricks". In *BS 3921*. London: British Standards Institution.
- BSI. (1985b). "Testing aggregates: Method for determination of particle size distribution, sieve tests". In *BS 812: Parte 103.1*. London: British Standards Institution.
- BSI. (1990a). "Testing aggregates: Method for determination of aggregate impact value (AIV)". In *BS 812: Part 112*. London: British Standards Institution.
- BSI. (1990b). "Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas: Method of test for the determination of the composition of design wearing course rolled asphalt". In *BS 598: Part 107*. London: British Standards Institution.
- BSI. (1995). "Testing aggregates: Methods for determination of density". In *BS 812: Parte 2*. London: British Standards Institution.
- BSI. (1995). "Testing aggregates: Methods for determination of density". In *BS 812: Part 2*. London: British Standards Institution.
- CEN. (2002). "Characterisation 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 particle size below 10 mm". In *EN 12457-4*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2006). "Bituminous mixtures. Material specifications. Part 1: Asphalt concrete.". In *EN 13108-1*. European Committee for Standardization.
- Decreto-Lei n.º 46. (2008). Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. In *Decreto-Lei n.º 46/2008*. Diário da República, 1.ª série — N.º 51 — 12 de Março de 2008.
- Decreto-Lei n.º 73. (2011). Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. In *Decreto-Lei n.º 73/2011*. Lisboa: Diário da República 1.ª série — N.º 116— 17 de Junho de 2011.

- EP. (2011). "Caderno de encargos tipo obra. 14.03 - Pavimentos. Características dos materiais.". Lisboa: Estradas de Portugal, S.A. Retrieved from Estradas de Portugal, S.A.
- Eurostat. (2011). *NACE Rev. 2*. Retrieved from Statistical classification of economic activities: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics
- Ferreira, J. F. (2009). "Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego." Dissertação de Mestrado . Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Freire, A. C. (2004). "*Palestra sobre Agregados para Misturas Betuminosas*". Retrieved Janeiro 23, 2012, from http://www.dec.fct.unl.pt/UNIC/palestras/Ciclo_Palestras_2004/palestras_Rocha/PalestraAMB.pdf.
- InIR. (2009). In F. C. Branco, & M. Q. Ferreira, "*Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal*". Lisboa: Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP.
- InIR. (sd). "Directivas para a concepção de pavimentos. Critérios de dimensionamento.". Lisboa: Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP.
- IPQ. (1999). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação de distribuição granulométrica de peneiros de ensaios.". In *NP EN 933-2*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2000). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração.". In *NP EN 933-1*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002a). "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Part 7: Determinação da massa volúmica do filer Método do picnómetro.". In *NP EN 1097-7*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002b). "Agregados para betão.". In *NP EN 12620*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002c). "Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 1: Métodos de amostragem". In *NP EN 932-1*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002d). "Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 2: Método de redução de amostra laboratoriais.". In *NP EN 932-2*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002e). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento.". In *NP EN 933-3*. Lisboa: Instituto português da Qualidade.
- IPQ. (2002f). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma.". In *NP EN 933-4*. Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002g). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos. Ensaio de equivalente de areia". In *NP EN 933-8*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002h). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 9: Determinação do teor de finos. Ensaio de azul de metileno". In *NP EN 933-9*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2002i). "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação". In *NP EN 1097-2*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

- IPQ. (2002j). "Ensaio da propriedade mecânica e física dos agregados. Parte 2: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval)". In *NP EN 1097-1*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2003). "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.". In *NP EN 1097-6*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2004). "Agregados para misturas betuminosas e tratamento superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.". In *NP EN 13043*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2005a). "Agregados leves. Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injeção.". In *NP EN 13055-1*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2005b). "Agregados para argamassas.". In *NP EN 13139*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2005c). "Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária.". In *NP EN 13242*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2005d). "Agregados para balastro de via férrea.". In *NP EN 13450*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2011a). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 11: Ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados.". In *NP EN 933-11*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2011b). "Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso.". In *NP EN 13108-1*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IST. (2006). Estudo: "Caracterização dos agregados grossos reciclados e ensaios de provetes de betão produzidos com agregados reciclados de RCD.". Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Jiménez, F. P., & Sánchez, J. A. (2006). "*Manual de Pavimentação*". Barcelona: CEPISA Betumes.
- Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2002). "New tests for porosity and water absorption of fired clay bricks". Reino Unido: Journal of Materials in Civil Engineering - ASCE Library , Vol. 14, No. 4, July/August 2002, pp. 334-337.
- Khalaf, Fouad M. (2004). "Recycling of Clay Bricks as Aggregate in Asphalt Concrete". In "*International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*". Reino Unido: School of the Built Environment, Napier University.
- Kloek, W., & Blumenthal, K. (2009). "*Generation and treatment of waste*". Retrieved Maio 15, 2012, from http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-SF-09-030/EN/KS-SF-09-030-EN.PDF
- Lima, J. H. (2008). "Utilização de Resíduos de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza" Dissertação de Mestrado. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.
- LNEC. (1962). "Vocabulário de Estradas e Aeródromos.". In *E 1*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (1970). "Agregados: Ensaio de Desgaste Pela Máquina de Los Angeles.". In *E 237*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (2009a). "Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betão de ligantes hidráulicos.". In *E 471*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- LNEC. (2009b). "Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central.". In *E 472*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (2009c). "Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos.". In *E 473*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (2009d). "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.". In *E 474*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Luzia, R. C. (2008). "*Camadas não ligadas em pavimentos rodoviários - Estudo do comportamento.*". Portugal: Almedina.
- Pestana, R. M. (2008). "Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego" Dissertação de Mestrado. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Pinto, A. B. (2003). "Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência." Tese de Doutoramento. Évora: Universidade de Évora.
- Portaria nº. 209. (2004). Ministérios da Economia, da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas, da Saúde e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente. In *Portaria nº. 209/2004*. Lisboa: Diário da República N.º 53 – 3 de Março de 2004.
- Preceram. (2012, 06 01). *Preceram - Indústrias de Construção, S.A.* Retrieved from "Ficha Técnica Tijolo Tradicional": <http://www.preceram.pt/tradicional.php>
- Rasel, H. M., Sobhan, M. A., & Rahman, M. N. (2011). "Performance Evaluation of Brick Chips as Coarse Aggregate on the Properties of Bituminous Mixes". *SAMRIDDHI-A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology - Volume 2 Issue 2*, ISSN:2229-7111.
- Woodside, A., Woodward, W. D., & J.McElhinney. (2011). "The Potential Use of Construction and Demolition Waste in Road Construction in Ireland". Article in "5th International Conference: Bituminous Mixtures and Pavements". Irlanda: University of Ulster, UK.