DAVID JORGE DE BRITO LOPES CAMARATE

INCORPORAÇÃO DE VIDRO RECICLADO EM BETÕES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE AMASSADURA NO AGREGADO RECICLADO DE VIDRO

Orientador: Felicita Maria Guerreiro Pires
Coorientador: Manuel Gomes Vieira

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2016

DAVID JORGE DE BRITO LOPES CAMARATE

INCORPORAÇÃO DE VIDRO RECICLADO EM BETÕES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE AMASSADURA NO AGREGADO RECICLADO DE VIDRO

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil no Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Ramo Construção e Estruturas conferido pela Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias.

Orientador: Professora Engenheira Felicita Maria Guerreiro Pires (ULHT)
Coorientador: Doutor Manuel Gomes Vieira (LNEC)

Dissertação defendida em provas públicas na Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, no dia 16 de dezembro de 2016, perante o júri nomeado pelo Despacho nº 293/2016, de 5 de dezembro de 2016, com a seguinte composição:

Júri
Presidente: Professor Doutor António Manuel Gardete Mendes Cabaço (ULHT)
Arguente: Doutora Maria Sofia Coelho Costa e Sousa Ribeiro (LNEC)
Orientador: Professora Engenheira Felicita Maria Guerreiro Pires (ULHT)

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2016

Agradecimentos

Quero agradecer à Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias pela minha formação e pela disponibilização dos meios necessários à realização desta dissertação, nomeadamente do laboratório e da biblioteca.

O meu agradecimento ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil por ter disponibilizado equipamento para a realização de ensaios.

Quero também agradecer à Engenheira Professora Felicita Pires por ter aceitado ser a minha orientadora e ao Coorientador Engenheiro Manuel Vieira pela sugestão do tema e por toda a disponibilidade e simpatia demonstradas.

Um agradecimento muito especial ao Engenheiro Pedro Ramos pela sua total disponibilidade para me ajudar em todas as fases da dissertação.

Aos meus colegas de Mestrado, André Neves, Pedro Rolim, Nuno Costa e Tiago Almeida pelo companheirismo, motivação e ajuda ao longo de todo o curso e durante a fase de elaboração da parte prática da dissertação.

À minha tia Maria José Ferreira por ter realizado a revisão linguística do texto.

Por último, mas não menos importante, o meu agradecimento à minha família, em especial Pai e Mãe, pelo apoio dado ao longo da minha vida.

Resumo

O vidro é um dos produtos utilizados na construção, pelo que a sustentabilidade desta indústria passa pela reciclagem e reutilização deste material. Uma das grandes dificuldades da reciclagem do vidro é a sua separação, pois, para manter as suas características e qualidades para a fabricação de novos objetos de vidro, este terá de ser separado por cores. Por esta razão, apesar de uma grande consciencialização da população para a reciclagem, torna-se importante encontrar outras soluções sustentáveis para o uso do vidro que não pode ser reciclado noutras aplicações. Depois de muitos autores terem estudado a viabilidade do uso do vidro como agregado em betões, surgiu a necessidade de analisar a influência do processo de amassadura nas características do agregado reciclado de vidro para, em trabalhos futuros, haver uma perceção do seu desgaste e avaliar as consequências resultantes da sua adição como agregado em betões.

No presente estudo, foi analisada a ação da misturadora, durante a amassadura, sobre a granulometria do agregado de vidro. Assim, os agregados foram colocados numa misturadora, tendo-se posteriormente simulado o processo de amassadura mecânico. Numa primeira fase, foram usados apenas os agregados reciclados de vidro; numa segunda fase, foram utilizados só os agregados naturais britados e, numa terceira fase, utilizaram-se os dois tipos de agregados em conjunto. Para verificar as alterações no desempenho mecânico provocadas pela misturadora, comparativamente com a mistura manual, foram fabricados betões com uma taxa de substituição, em volume, de 25 % e 50 % do agregado natural britado pelo agregado reciclado de vidro.

Depois da realização do trabalho experimental, verificou-se que, apesar de haver uma alteração granulométrica por parte do agregado reciclado de vidro, esta não influencia significativamente a resistência do betão.

Palavras Chave: Agregados de vidro; Betão; Processo de amassadura; Misturadora.

Abstract

Glass is one of the products used in construction, therefore it is very important to reuse it for the sustainability of this industry. One of the major challenges in glass recycling is its separation because, in order to maintain its characteristics and qualities to produce new glass objects glass must be separated according to its colour. For this reason, and in spite of a high population awareness of recycling, it is important to find other sustainable solutions for the use of that glass that can't be recycled for other applications. After many studies on the feasibility of using glass as an aggregate in concrete, there arose the need of analyzing the influence of the mixing process in the recycled glass aggregate in order to have the perception of its wear and to evaluate the resulting consequences of its addition as an aggregate in concrete, in future studies.

In this study, we analyzed the action of the mixer, while mixing, onto the glass aggregate grading. Thus, the aggregates were placed in a mixer and subsequently the mechanical mixing process was simulated. Initially, only the glass of recycled aggregates was used; in a second stage, the crushed natural aggregates were used; And finally in a third stage, two types of aggregates were used together. In order to verify the changes occurred in the mechanical performance caused by the mixer, in comparison with the manual mixing, the concrete was produced with a replacement rate in volume of 25 % and 50 % of the natural aggregate crushed by the glass recycled aggregate.

After the experimental work was over, we came to the conclusion that, despite the occurrence of a change in the particle size of the recycled glass aggregate, this one does not influence the concrete resistance significantly.

Keywords: Glass aggregates; Concrete; Mixing process; Mixer.

Abreviaturas

A/C – Relação água/cimento

ARV – Agregado reciclado de vidro

ANB – Agregado natural britado

ANB [20;25] – 7,5 kg de agregado natural britado com granulometria entre os peneiros 20 e 25 mm

BF – Betão com agregados finos

BG – Betão com agregados grossos

BFG – Betão com agregados finos e grossos

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISO – Organização Internacional de Normalização

LA – Ensaio de desgaste *Los Angeles*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEC E – Especificação LNEC

NP – Norma Portuguesa

EN – Norma Europeia

ULHT – Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

T.S. – Taxa de substituição

Símbolos

A_{ef} – dosagem de água de amassadura, litro por metro cúbico

A – parâmetro da trabalhabilidade

A_c – área de secção transversal do provete na qual a força de compressão é aplicada, em milímetro quadrado

B – parâmetro da compacidade

C – classe de resistência

$D_{máx}$ – máxima dimensão do agregado

d_{min} – mínima dimensão do agregado

f – percentagem de finos que passa através do peneiro de 0,063 mm

f_c – resistência à compressão, em megapascal

F – carga máxima à rotura, em Newton

I - índice de vazios, litro por metro cúbico

m – massa retida no peneiro de 1,6 mm, em grama

m_2- massa do recipiente e do provete, em quilograma

m_1- massa do recipiente vazio, em quilograma

M_1 – massa seca do provete de ensaio, em quilograma

M_2 – massa seca do provete de ensaio após secagem, em quilograma

P – massa do material peneirado retido no recipiente de fundo, em quilograma

$P_{D/2}$ – percentagem de agregado que passa no peneiro, cuja abertura da malha é metade da máxima dimensão do agregado

R – raio médio do molde a betonar

$R/D_{máx}$ – quociente entre o raio médio do molde a betonar (R) e o diâmetro máximo do agregado ($D_{máx}$). A relação $R/D_{máx}$ assume-se como sendo 1, por esta situação ser a mais desfavorável, o que implica que R é igual a $D_{máx}$

R_i % – percentagem de material retido no peneiro i

R_i – massa retida no peneiro i, em quilograma

V – capacidade do recipiente, em litro

V_v – volume de vazios, litro por metro cúbico

V_s – volume de sólidos, litro por metro cúbico

XC – exposição ambiental

ρ_b – baridade, em megagrama por metro cúbico

Índice

1. Introdução 1

1.1. Considerações Iniciais 1

1.2. Objetivo 1

1.3. Metodologia e organização da dissertação 2

2. Estado da arte 5

2.1. Introdução 5

2.2. Origem do vidro 5

2.3. Propriedades gerais do vidro 6

2.3.1. Vidro *float* 7

2.3.2. Vidro temperado 8

2.4. Composição do vidro 8

2.5. Reciclagem do vidro 9

2.6. Vidro como um agregado 11

2.6.1. Descrição de trabalhos experimentais 11

2.6.1.1. Trabalho de Gautam, Srivastava & Agarwal (2012) 11

2.6.1.2. Trabalho de Oliveira, Gomes & Santos (2008) 13

2.6.1.3. Trabalho de Ismail e Al-Hashmi (2009) 15

2.6.1.4. Trabalho de Malik et al. (2013) 17

2.6.1.5. Trabalho de Lima et al. (2011) 19

2.6.1.6. Trabalho de Barbosa et al. (2011) 21

2.6.1.7. Trabalho de Diogo Serpa (2012) 24

3. Trabalho experimental 29

3.1. Introdução 29

3.2. Planificação do trabalho experimental 29

3.2.1. Primeira fase experimental 29

3.2.2. Segunda fase experimental 30

3.2.3. Terceira fase experimental 30

3.2.4. Quarta fase experimental 30
3.2.5. Quinta fase experimental 31
3.3. Agregados 31
3.3.1. Análise granulométrica 32
3.3.1.1. Aparelhos e utensílios 33
3.3.1.2. Procedimento de ensaio 34
3.3.1.3. Cálculos e expressão dos resultados 35
3.3.2. Massa volúmica aparente ou baridade 36
3.3.2.1. Aparelhos e utensílios 36
3.3.2.2. Preparação dos provetes elementares 37
3.3.2.3. Procedimento de ensaio 37
3.3.2.4. Cálculos e expressão dos resultados 38
3.3.3. Ensaio de desgaste dos agregados na betoneira 39
3.3.3.1. Aparelhos e utensílios 39
3.3.3.2. Procedimento de ensaio 39
3.3.4. Ensaio de desgaste na máquina de *Los Angeles* 40
3.3.4.1. Aparelhos e utensílios 41
3.3.4.2. Procedimento de ensaio 42
3.3.4.3. Cálculos do coeficiente de desgaste *Los Angeles* (*LA*) 42
3.3.4.4. Resultados 42
3.4. Betão 43
3.4.1. Cálculo da composição pelo método de Faury 43
3.4.1.1. Dados 43
3.4.1.2. Máxima dimensão do agregado 44
3.4.1.3. Mínima dimensão do agregado 44
3.4.1.4. Volume de vazios 44
3.4.1.5. Índice de vazios 45
3.4.1.6. Dosagem de água 46
3.4.1.7. Relação A/C 46
3.4.1.8. Volume de sólidos 46
3.4.1.9. Volume de cimento 47

3.4.2. Curva de referência de Faury 47
3.4.2.1. Módulo de finura da curva de referência 49
3.4.2.2. Ajustamento das quantidades de agregados à curva de referência 50
3.4.2.3. Composição centesimal 50
3.4.2.4. Quantidades dos agregados por metro cúbico 50
3.4.2.5. Composição do betão 51
3.5. Processo de amassadura 52
3.5.1. Amassadura mecânica 52
3.5.1.1. Aparelhos e utensílios 53
3.5.1.2. Procedimento de ensaio 53
3.5.2. Amassadura manual 54
3.5.2.1. Aparelhos e utensílios 54
3.5.2.2. Procedimento de ensaio 54
3.6. Determinação no betão 55
3.6.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams) 55
3.6.1.1. Aparelhos e utensílios 55
3.6.1.2. Procedimento de ensaio 55
3.6.1.3. Resultados 57
3.6.2. Moldagem de provetes 57
3.6.3. Quantidade de água que o betão acumula durante a conservação 59
3.6.3.1. Aparelhos e utensílios 59
3.6.3.2. Procedimento de ensaio 59
3.6.3.3. Resultados 59
3.6.4. Velocidade de propagação de ultrassons 60
3.6.4.1. Aparelhos e utensílios 61
3.6.4.2. Procedimento de ensaio 61
3.6.4.3. Resultados 62
3.6.5. Ensaio do esclerómetro 62
3.6.5.1. Aparelhos e utensílios 63
3.6.5.2. Procedimento de ensaio 63
3.6.5.3. Resultados 64

3.6.6. Resistência à compressão 64

3.6.6.1. Aparelhos e utensílios 65

3.6.6.2. Procedimento de ensaio 65

3.6.6.3. Avaliação do tipo de rotura 66

3.6.6.4. Resultados 66

4. Apresentação e discussão dos resultados do trabalho experimental 69

4.1. Introdução 69

4.2. Agregados 69

4.2.1. Análise granulométrica 69

4.2.1.1. Areia 69

4.2.1.2. Brita 1 70

4.2.1.3. Brita 2 71

4.2.1.4. Curvas granulométricas dos agregados naturais 71

4.2.2. Massa volúmica aparente ou baridade 72

4.2.3. Ensaio de desgaste dos agregados na betoneira 73

4.2.3.1. Análise granulométrica dos agregados sujeitos ao desgaste na betoneira 73

4.2.3.1.1. Análise granulométrica do agregado reciclado de vidro 73

4.2.3.1.2. Análise granulométrica do agregado natural britado 75

4.2.3.1.3. Análise granulométrica do agregado reciclado de vidro com 7,5 kg de agregado natural britado com granulometria entre os peneiros 20 e 25 mm 76

4.2.4. Desgaste *Los Angeles* 82

4.3. Comportamento do betão no estado fresco 83

4.3.1. Abaixamento (cone de Abrams) 83

4.4. Propriedades do betão no estado endurecido 86

4.4.1. Massas volúmicas aparentes 86

4.4.2. Quantidade de água que o betão acumula durante a conservação 87

4.4.3. Resistência à compressão 89

5. Conclusões 93

5.1. Considerações finais 93

5.2. Propostas para trabalhos futuros 94

Referências bibliográficas 97

Anexo A – Ficha técnica do cimento

Anexo B – Análise granulométrica dos agregados

Anexo C – Massa volúmica aparente dos agregados

Anexo D – Ensaio de desgaste dos agregados na betoneira

Anexo E – Ensaio de desgaste *Los Angeles*

Anexo F – Quantidades usadas nos betões

Anexo G – Ensaio de abaixamento "Cone de Abrams"

Anexo H – Massa volúmica aparente e quantidade de água que o betão acumula durante a conservação

Anexo I – Resistência à compressão

Anexo J – Velocidade de propagação de ultrassons

Anexo L – Ensaio do esclerómetro

Índice de Figuras

Figura 1 – Estrutura do vidro....6
Figura 2 – Percentagens dos diferentes constituintes do vidro....9
Figura 3 – Vantagens da reciclagem do vidro....9
Figura 4 – Ciclo de reciclagem do vidro....10
Figura 5 – Quantidade de material reciclado em Portugal....10
Figura 6 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Gautam, Srivastava & Agarwal (2012)....13
Figura 7 – Resistência à compressão de misturas com areia de vidro, aos 7 e 28 dias (Oliveira, Gomes & Santos (2008))....14
Figura 8 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Ismail e Al-Hashmi (2009)....17
Figura 9 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Malik et al. (2013)....19
Figura 10 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Lima et al. (2011)....21
Figura 11 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Barbosa et al. (2011)....23
Figura 12 – Curvas granulométricas dos agregados (Serpa, D. (2012))....25
Figura 13 – Resultados do ensaio de abaixamento (Serpa, D. (2012))....26
Figura 14 – Evolução da resistência à compressão no tempo (Serpa, D. (2012))....26
Figura 15 – Peneiros de ensaio....33
Figura 16 – Algumas etapas da determinação da massa volúmica aparente. A – Recipiente vazio; B – Enchimento do recipiente com o auxílio da pá; C – Remoção do material em excesso com o auxílio da régua; D – Pesagem do conjunto do recipiente mais agregado....38
Figura 17 – Ensaio de desgaste na betoneira. A - ARV; B – ANB; C – Conjunto de ARV com ANB [20;25]....40
Figura 18 – Máquina *Los Angeles* do LNEC....41
Figura 19 – Análise granulométrica dos agregados....49
Figura 20 – Betoneira da ULHT....53
Figura 21 – Pá usada durante a amassadura manual....54

Figura 22 – Sequência do ensaio de abaixamento.....56
Figura 23 – Formas de abaixamento (NP EN 12350-2 (2009)) 57
Figura 24 – Etapas de moldagem dos provetes. A – Molde de 150 mm de aresta; B – Molde após passagem do óleo descofrante; C e E – Enchimento do molde por camadas; D e F – Vibração do betão (agulha vibratória); G – Rasar a superfície do molde; F – Moldes com enchimento finalizado; I – Provetes após desmoldagem e identificação; J e K – Provetes dentro do tanque de água; L – Provetes após serem retirados do tanque de água.....58
Figura 25 – Pesagem de um provete (balança).....60
Figura 26 – Esquema de funcionamento do ensaio de ultrassons 61
Figura 27 – Ensaio de ultrassons.....62
Figura 28 – Esquema do esclerómetro de Schmidt (NP EN 12504-2 (2012)) 63
Figura 29 – Ensaio esclerométrico: a) esquema de funcionamento do esclerómetro, b) Esclerómetro durante o ensaio 63
Figura 30 – Ensaio à compressão de um cubo de aresta igual a 150 mm 65
Figura 31 – Roturas satisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2012).....66
Figura 32 – Roturas não satisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2012).....66
Figura 33 – A – Provete durante o ensaio de compressão; B – Provete após ensaio de compressão. 67
Figura 34 – Análise granulométrica dos agregados naturais.....72
Figura 35 – A – Aspeto inicial do ARV; B - Aspeto final do ARV.....73
Figura 36 – Análise granulométrica do ARV.....74
Figura 37 – Pormenor da análise granulométrica do ARV 74
Figura 38 – A – Aspeto inicial do ANB; B - Aspeto final do ANB.....75
Figura 39 – Análise granulométrica do ANB.....75
Figura 40 – Pormenor da análise granulométrica do ANB 76
Figura 41 – A – Aspeto inicial do ANB [20;25]; B – Aspeto final dos ARV e ANB [20;25].....76
Figura 42 – Análise granulométrica do ARV.....77
Figura 43 – Pormenor da análise granulométrica do ARV 77
Figura 44 – Desgaste em massa dos agregados durante o ensaio em conjunto.....78
Figura 45 – Desgaste dos agregados consoante as frações dos peneiros, para $M_i - M_1$..79
Figura 46 – Estimativa do desgaste conjunto de agregados 80
Figura 47 – Diferença entre o desgaste do ARV e o ANB, para $M_i - M_1$ 81

Figura 48 – (A) Agregado reciclado de vidro antes do ensaio *LA*; (B) Agregado reciclado de vidro depois do ensaio *LA* 83
Figura 49 – Abaixamento de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009) 84
Figura 50 – Diferentes abaixamentos obtidos 85
Figura 51 – Massas Volúmicas, valores de acordo com a norma NP EN 19390-7 (2009).....86
Figura 52 – Quantidade de água que o betão acumula durante a conservação em percentagem 87
Figura 53 – Relação do teor de água e o ensaio de ultrassons.....88
Figura 54 – Resistência à compressão (MPa).....89
Figura 55 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras na betoneira 90
Figura 56 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras manuais 90
Figura 57 - Relação da resistência à compressão e o ensaio de ultrassons 91
Figura 58 - Relação da resistência à compressão e o ensaio do esclerómetro.....92

Índice de Quadros

Quadro 1 – Propriedades dos agregados utilizados por Gautam, Srivastava, & Agarwal (2012) 12
Quadro 2 – Composição das amassaduras estudadas por Gautam, Srivastava, & Agarwal (2012) 12
Quadro 3 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Gautam, Srivastava, & Agarwal (2012) 12
Quadro 4 – Propriedades dos agregados utilizados por Oliveira, Gomes & Santos (2008) 14
Quadro 5 – Composição das amassaduras estudadas por Oliveira, Gomes & Santos (2008) 14
Quadro 6 - Caracterização granulométrica dos agregados utilizados por Ismail e Al-Hashmi (2009) 15
Quadro 7 – Propriedades dos agregados utilizados por Ismail e Al-Hashmi (2009) 16
Quadro 8 – Composição das amassaduras estudadas por Ismail e Al-Hashmi (2009) 16
Quadro 9 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Ismail e Al-Hashmi (2009) 16
Quadro 10 – Propriedades dos agregados utilizados por Malik et al. (2013) 18
Quadro 11 – Composição das amassaduras estudadas por Malik et al. (2013) 18
Quadro 12 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Malik et al. (2013) 18
Quadro 13 – Caracterização granulométrica dos agregados utilizados por Lima et al. (2011) 20
Quadro 14 – Propriedades dos agregados utilizados por Lima et al. (2011) 20
Quadro 15 – Composição das amassaduras estudadas por Lima et al. (2011) 20
Quadro 16 - Caracterização dos agregados utilizados por Barbosa et al. (2011) 22
Quadro 17 – Propriedades dos agregados utilizados por Barbosa et al. (2011) 22
Quadro 18 – Características das três famílias estudadas por Barbosa et al. (2011) 22
Quadro 19 – Valores obtidos nas amassaduras estudadas por Barbosa et al. (2011) 23
Quadro 20 – Propriedades dos agregados utilizados por Serpa (2012) 24
Quadro 21 – Massa dos provetes de ensaio para agregados de peso corrente (NP EN 933-1 (2014)) 33

Quadro 22 – Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado (NP EN 1097-3 (2002)) 37
Quadro 23 – Quantidades de massas usadas no ensaio *Los Angeles* 41
Quadro 24 – Peneiros de acordo com a NP EN 933-2 41
Quadro 25 – Volume de vazios do betão em função da máxima dimensão do agregado (adaptado de Sousa Coutinho (1997 b)) 44
Quadro 26 – Valores dos parâmetros K e K' para a determinação do índice de vazios (adaptado de Sousa Coutinho (1997 b)) 45
Quadro 27 – Valores dos parâmetros A e B da curva de referência de Faury(adaptado de Sousa Coutinho (1997 b)) 48
Quadro 28 - Abaixamento do cone de Abrams – Classes de abaixamento (NP EN 206-1 (2007)) 57
Quadro 29 – Análise granulométrica da areia 70
Quadro 30 – Análise granulométrica da brita 1 70
Quadro 31 – Análise granulométrica da brita 2 71
Quadro 32 – Baridades dos agregados 72
Quadro 33 – Diferença das percentagens das massas do material passado 79
Quadro 34 – Resultados da determinação da resistência à fragmentação pelo método *Los Angeles* 82
Quadro 35 – Valores dos abaixamentos de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009) 83
Quadro 36 – Massas volúmicas, valores de acordo com a norma NP EN 19390-7 (2009) 86
Quadro 37 – Resultados da quantidade de água que o betão acumula durante a conservação 87
Quadro 38 – Resultados do ensaio da resistência à compressão (MPa) 89

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

O betão é um material compósito, formado pela mistura, em proporções convenientes, de um ligante hidráulico, agregado grosso, agregado fino e água, podendo eventualmente serem adicionados adjuvantes e aditivos que entram na mistura em quantidades relativamente pequenas, de forma a melhorar determinadas características do betão.

Geralmente é utilizado na construção de diversas estruturas, nomeadamente pontes, edifícios, barragens, muros de suporte, pavimentos e estradas. É o material mais usado em construções por se tratar de um material muito versátil e passível de ser fabricado e moldado no próprio local, o que o torna assim mais económico. Como desvantagens, apontam-se a sua baixa resistência à tração, a baixa ductilidade e as variações de dimensão ocorridas em resultado das alterações das condições termo-higrométricas.

Atualmente, tendo em vista a sustentabilidade dos recursos naturais, torna-se importante a reciclagem de produtos. O vidro, como produto largamente utilizado pelo mundo fora, entra nesta política, tendo em consideração algumas das suas características, nomeadamente a durabilidade, a versatilidade e a confiabilidade.

Em Portugal reciclam-se cerca de 7600 toneladas de vidro, que representam 13 % do vidro que consumimos. Neste contexto, torna-se importante a reutilização do vidro, por ser um material sobre o qual não se consegue precisar o tempo que leva à sua deterioração (estimado em 4000 anos aproximadamente) e por ser 100 % reciclável. A viabilização técnica da sua reutilização pode contribuir para a diminuição do impacto ambiental causado por este material.

1.2. Objetivo

Apesar de já existirem diversos trabalhos, nos quais foi estudada a viabilidade da utilização no fabrico de betões de agregados reciclados de vidro para diversas percentagens de substituição do agregado natural tanto para as frações finas como

grossas, verificou-se que não existem estudos sobre a influência do processo de amassadura nos resultados obtidos.

Assim, o principal objetivo desta dissertação foi avaliar se o processo de amassadura altera significativamente as características dos agregados reciclados de vidro em substituição parcial dos agregados grossos e, por conseguinte as propriedades do betão com incorporação destes agregados reciclados. Concretamente, foi avaliado se a ação da misturadora, durante a amassadura do betão, altera a granulometria do agregado de vidro.

Para isso, os agregados foram colocados na misturadora individualmente (vidro ou brita) e conjuntamente (vidro e brita), durante dois períodos de três minutos e um de quatro, e foi analisado o desgaste após cada período.

Além disso, foi estudado o desempenho mecânico dos betões com agregado reciclado de vidro, com taxas de substituição de 25 % e 50 %, quando fabricados de forma convencional (misturadora) e, posteriormente, numa mistura manual.

1.3. Metodologia e organização da dissertação

A realização do trabalho de investigação, que culminou na presente Dissertação de Mestrado, seguiu uma metodologia que contempla cinco etapas.

A primeira etapa teve como objetivo a recolha exaustiva de informação, recorrendo-se, para o efeito, a uma pesquisa bibliográfica ampla. Deste modo, pretendeu-se adquirir uma ideia global sobre o tema, inserir este trabalho no conhecimento já adquirido e ganhar sensibilidade para a análise dos resultados subsequentes.

A etapa seguinte consistiu na elaboração de um plano de ensaios para a determinação das características físicas dos agregados e dos betões, seguindo as normas e especificações necessárias à sua realização. Esta fase surgiu da necessidade de planificar os ensaios a realizar, estimar os resultados e definir e quantificar os recursos necessários, de modo a permitir o normal desenvolvimento do trabalho experimental.

Depois da planificação, o trabalho experimental envolveu a recolha e preparação dos materiais, a realização dos ensaios e a obtenção de resultados, de acordo com o planificado na etapa anterior. Numa primeira fase, procedeu-se à obtenção dos agregados reciclados de vidro a serem incorporados, assim como dos agregados naturais

e cimento. Esta fase foi secundada pela caracterização e simulação do desgaste numa misturadora dos agregados, reciclados e naturais, que foram utilizados nos betões. Na terceira fase, procedeu-se à formulação, fabrico e ensaios dos betões no estado fresco. Por fim, foram avaliados os desempenhos mecânicos dos diversos betões no estado endurecido.

Na quarta etapa, procedeu-se ao tratamento e à análise dos resultados dos ensaios aos agregados e dos provetes de betão ensaiados. Os valores alcançados foram comparados com os resultados obtidos em estudos anteriormente realizados por outros autores que são referenciados nas referências bibliográficas.

Na última etapa, concluiu-se a investigação com a redação da presente dissertação que pretende, de uma forma clara, coerente e concisa, apresentar todas as informações, análises e conclusões que este estudo permitiu. Assim, e com o intuito de se tornar mais percetível a organização da presente dissertação, relativamente ao conteúdo de cada capítulo, procede-se à sua descrição:

Capítulo 1: Contempla algumas notas introdutórias sobre a temática abordada no presente trabalho, a referência aos principais fatores que motivaram a realização desta dissertação e aos objetivos da mesma e, por fim, a descrição da metodologia utilizada na sua elaboração e na organização da redação da dissertação;

Capítulo 2: Consiste no levantamento do estado da arte, com a descrição e análise dos resultados consultados acerca do uso de agregado reciclado de vidro (ARV) em betão;

Capítulo 3: Descreve todas as etapas do trabalho experimental, nomeadamente os ensaios realizados aos agregados, ao betão no estado fresco e ao betão no estado endurecido; são ainda apresentados os cálculos efetuados para a determinação das composições dos betões produzidos;

Capítulo 4: Contempla a apresentação e análise dos resultados obtidos durante o trabalho experimental, relativamente aos ensaios descritos no capítulo 3, estabelecendo-se ainda, quando possível, uma comparação com os resultados de outros estudos recolhidos aquando do levantamento bibliográfico;

Capítulo 5: Apresentam-se as conclusões estabelecidas pela análise dos resultados obtidos ao longo do trabalho experimental; procede-se ainda à apresentação de várias propostas de investigações a realizar futuramente, com o objetivo de aprofundar o conhecimento na área em que esta dissertação se insere;

Capítulo 6: Consiste na apresentação da bibliografia que serviu de referência a este trabalho.

Anexos: Contêm as fichas de ensaio relativas a cada procedimento experimental e os respetivos valores calculados.

2. Estado da arte

2.1. Introdução

Da pesquisa bibliográfica efetuada, verificou-se que existiam muitas publicações sobre as propriedades físicas dos betões com incorporação de agregado reciclado de vidro, pelo que se decidiu estudar a influência que o processo de amassadura tem, através do desgaste provocado, tanto nos agregados reciclados de vidro (ARV) como nos agregados naturais britados (ANB).

Assim, o presente capítulo destina-se à apresentação das propriedades dos agregados reciclados de vidro, bem como das características mecânicas dos betões com a incorporação de agregados reciclados de vidro.

2.2. Origem do vidro

A arte de fabricar vidro é muito antiga e é considerada uma das descobertas mais surpreendentes, estando a sua história envolvida em vários mistérios e lendas. Não existindo uma data precisa para a sua descoberta, prevê-se que esta remonte a 4000 a.C. (Fávero 2009), tendo os primeiros objetos manufaturados deste material sido encontrados nas necrópoles egípcias.

A Fenícia (hoje Líbano) foi mencionada por um dos maiores historiadores da Antiguidade, Plínio Caio Segundo, como o berço do vidro. Revela que navegadores fenícios, ao deixarem acesas fogueiras construídas em "pedras" de carbonato de cálcio sobre a areia de uma praia, observaram que, após sofrer a ação do calor, durante toda a noite, que se formava no local um líquido transparente: o vidro.

Uma outra versão é de que teria havido uma fusão natural de areia em virtude de um incêndio provocado por um raio, que resultou em vidro. É provável que o vidro tenha realmente sido descoberto acidentalmente. Mas também há hipóteses de que não tenha surgido naturalmente, mas sim pela queima de peças cerâmicas, ou com a fusão das primeiras peças metálicas pouco antes da Idade do Bronze (5.000 - 4.000 a.C.). As mais antigas peças cerâmicas com revestimento vítreo, ou esmaltadas, datam contudo de aproximadamente 12.000 a.C.

A vidraria só teve o seu desenvolvimento a partir da era cristã, quando, por volta do ano 30 a.C., foi inventada a vara de sopro. Esta descoberta teria supostamente

também ocorrido na Fenícia e tornou possível moldar as peças. A produção concentrou-se na Alexandria, de onde os Fenícios a levaram para todo o Mediterrâneo.

A potência do Império Romano deu novo impulso à técnica de soprar o vidro. Por volta do ano 100 da era cristã, os Romanos começaram a produzir e a usar vidro relativamente plano para aplicar em janelas. O vidro ainda era opaco, mas deixava passar luz suficiente para iluminar os ambientes das construções de famílias mais abastadas. Esta vara de sopro ainda é a mesma utilizada nos dias atuais na produção artesanal do vidro, principalmente para fazer peças decorativas e com formas complexas.

Os primeiros quatro séculos da era cristã foram denominados "idade de ouro do vidro", cuja atividade se concentrava em Roma. (fonte: http://pt.verallia.com)

2.3. Propriedades gerais do vidro

O vidro é dos materiais mais usados, já que o encontramos em diversos utensílios que usamos ao longo da nossa vida, como janelas, mesas, garrafas, copos, pratos, travessas, lentes de óculos, utensílios diversos, peças decorativas, etc.

O vidro é um material não cristalino, que resulta de uma mistura de diversos materiais inorgânicos naturais que, depois de ser submetida a fusão, é arrefecida de uma forma controlada, obtendo-se um material duro homogéneo, estável, inerte, amorfo e isotrópico. A formação de um cristal não é espontânea, ocorrendo num espaço de tempo necessário ao reordenamento molecular e/ou iónico, por difusão. Na Figura 1 é apresentada a estrutura do vidro.

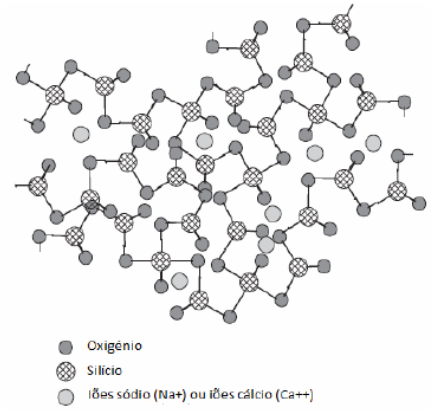


Figura 1 – Estrutura do vidro (Coutinho J. (2011))

De acordo com Martins et al. (2004), as propriedades fundamentais do vidro são transparência e durabilidade. Outras propriedades tornam-se significantes de acordo com o uso que é dado ao material, como, por exemplo, as propriedades físicas:

- **Densidade -** A densidade do vidro é de 2,5, ou seja, este tem uma massa de 2,5 kg por m^2 de superfície e por milímetro de espessura para os vidros planos. A massa volúmica, expressa no sistema de unidades internacional, é de 2500 kg/m^3. Um m^2 de vidro com 4 mm, tem, assim, uma massa de 10 kg.
- **Dureza -** Para determinar a dureza superficial, isto é, a resistência a ser riscado por outro material, utiliza-se a escala MOHS. O vidro tem a dureza 6,5.
- **Resistência à abrasão -** É 16 vezes mais resistente que o granito.

As propriedades mecânicas são:

- **Resistência à compressão -** A resistência do vidro à compressão é muito elevada: 1000 Mpa (N/mm^2);
- **Resistência à tração -** A resistência à tração varia de 3 a 7 MPa (N/mm^2);
- **Resistência à flexão -** Um vidro submetido à flexão fica com uma face em compressão e outra em extensão. A resistência à rotura em flexão é da ordem de:
  - 40 MPa (N/mm^2) para um vidro *float* com recozimento;
  - 120 a 200 MPa (N/mm^2) para um vidro temperado (dependendo da espessura, do acabamento das arestas e do tipo de manufatura).

De seguida, são descritos estes dois tipos de vidro, por serem os vidros mais utilizados na construção.

2.3.1. Vidro *float*

O vidro *float* é um vidro plano e transparente com espessura uniforme e massa homogénea. A qualidade do processo *float* é responsável por cerca de 90 % de toda a produção de vidros planos no mundo. O vidro *float* constitui matéria-prima para outros tipos de vidro, como são os casos do laminado, temperado, duplo, etc.

Gonçalves (2012) diz que o vidro *float* é moldado vazando o fundido vítreo 1150 ºC numa câmara de *float* sobre um banho de estanho metálico fundido (Sn^0), de uns 30 cm de profundidade. Para evitar a oxidação do estanho, a câmara é mantida numa atmosfera extremamente redutora de azoto (N_2), com 0,5 por cento de hidrogénio (H_2). O vidro, com uma viscosidade elevada a esta temperatura ($\eta \sim 10^3$ Pa.s), e o

estanho líquido, bastante fluido, são imiscíveis, exibindo uma superfície de contacto plana. Sobre o estanho líquido forma-se uma folha de vidro que, à medida que vai avançando na câmara de *float*, arrefece e solidifica. Após a saída da câmara de *float*, o vidro entra imediatamente numa câmara de recozimento, sendo depois cortado.

Quando se quebra o vidro *float*, este divide-se em pedaços pontiagudos e cortantes.

2.3.2. Vidro temperado

O vidro temperado é sujeito a um processo de têmpera, no qual o vidro é aquecido a altas temperaturas e, posteriormente, arrefecido muito rapidamente, processo que leva à melhoria da sua resistência, cerca de 5 vezes em relação ao vidro comum.

Para além deste processo, pode-se obter este tipo de vidro através de processos químicos. Segundo Bogas (2011), estes consistem na substituição, à superfície do vidro, de iões de sódio por iões de potássio, que são substancialmente maiores. Contudo, este processo só afeta uma pequena espessura do vidro, pelo que pode não ser eficaz, caso a fenda existente na superfície do vidro seja mais profunda que a espessura submetida ao tratamento.

O vidro temperado é considerado de segurança, pois, após rotura, estilhaça-se e não apresenta pontas cortantes, evitando assim ferimentos.

2.4. Composição do vidro

De acordo com Martins et al. (2004), os vidros sílico-sodo-cálcicos, utilizados na construção, contêm na sua composição:

- **Sílica**, sob a forma de areia, que tem funções vitrificantes e preenche cerca de 70 a 72 % da composição do vidro;
- **Óxido de sódio** , sob a forma de carbonato e sulfato, que tem funções de fundente e preenche em 14 % a composição do vidro;
- **Óxidos de cálcio e magnésio**, sob a forma de calcário e dolomite, que têm funções de estabilizantes e preenchem cerca de 6 a 8 % a composição do vidro;
- A restante composição é feita por diversos óxidos (de alumínio e de magnésio), que melhoram as propriedades físicas do vidro, principalmente o aumento de resistência à ação dos agentes atmosféricos.

Na Figura 2 estão representadas as percentagens dos diferentes constituintes do vidro.

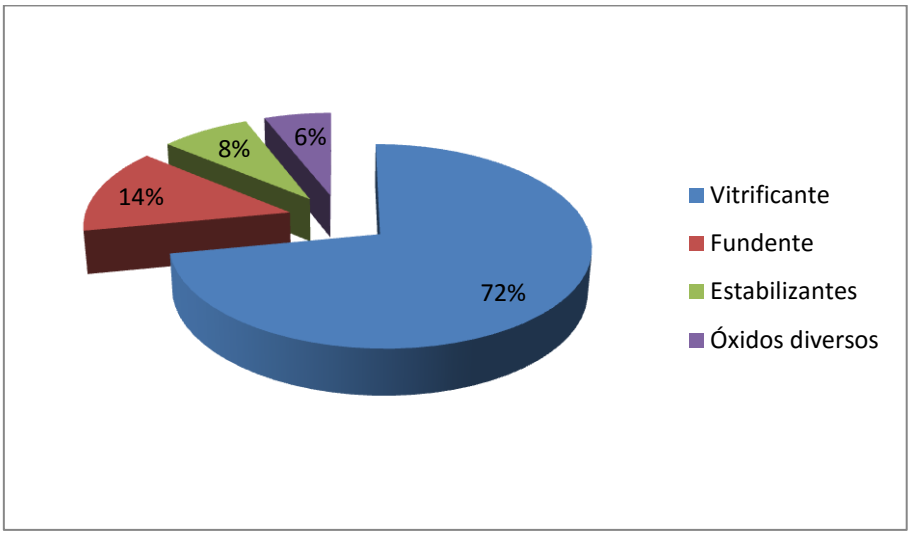


Figura 2 – Percentagens dos diferentes constituintes do vidro

2.5. Reciclagem do vidro

O vidro é um dos produtos mais usados nas tarefas diárias que, ao ser colocado no vidrão, pode ser alvo de um processo de reciclagem, que garanta o seu reaproveitamento para a produção de vidro reciclado. O vidro reciclado tem praticamente todas as características do vidro inicial e pode ser reciclado muitas vezes sem perder as suas características e qualidade. Na Figura 3 estão representadas as vantagens da reciclagem do vidro.



Figura 3 – Vantagens da reciclagem do vidro (fonte: http://www.sobiologia.com.br)

A reciclagem do vidro contribui para a preservação dos recursos naturais, reduzindo a extração das areias e evitando o depósito em aterros deste vidro designado casco. A produção de vidro a partir de material reciclado consome menos energia que a mesma produção não contendo vidro reciclado. Do ponto de vista ambiental, a extração de matérias-primas é reduzida e elimina as emissões gasosas (dióxido de carbono CO_2 e dióxido de enxofre SO_2). A gestão dos resíduos sólidos urbanos é facilitada, promovendo-se uma maior consciencialização e alteração do comportamento da população, contribuindo assim para uma sociedade mais equilibrada. O ciclo da reciclagem do vidro está exemplificado na Figura 4.



Figura 4 – Ciclo de reciclagem do vidro (Fonte: Ta a Reciclar)

Segundo a Sociedade Ponto Verde, em 2013, separaram-se em Portugal 178.795 toneladas de vidro, o que representa 26 % do total de materiais reciclados, ficando só atrás do papel e do cartão. Na Figura 5 estão quantificadas, graficamente, as quantidades de material reciclado em Portugal durante o ano de 2013.

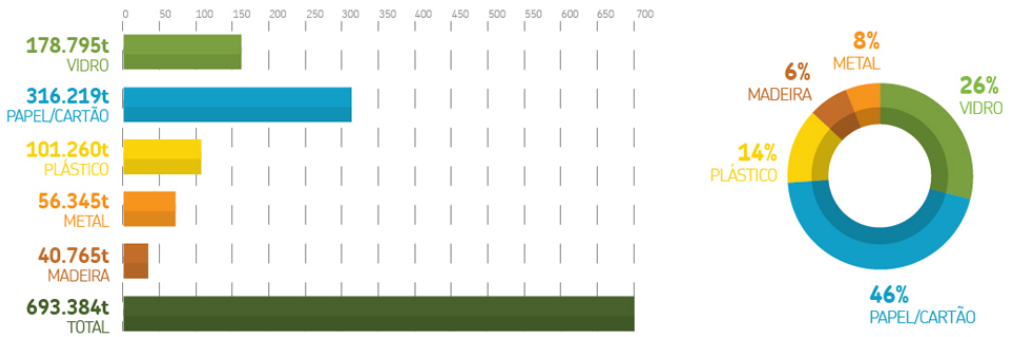


Figura 5 – Quantidade de material reciclado em Portugal (fonte: Sociedade Ponte Verde)

2.6. Vidro como um agregado

Com a transformação de vidro reciclado em agregado artificial, poupa-se um gasto energético ainda considerável em relação à extração e britagem de rochas, por se tratar de material mais frágil, que pode ser desmantelado com facilidade e que não necessita de ser extraído com o auxílio de explosivos ou outras formas mecânicas. A obtenção do vidro reciclado é efetuada basicamente por separação em recipientes específicos que são instalados em centros urbanos para reciclagem convencional do material pela indústria vidreira.

De acordo com Coutinho, J. (2011), de facto é o teor em álcalis, nomeadamente de Na_2O, que pode causar apreensão. Neste sentido a Especificação LNEC E 461 recomenda limitar o teor em álcalis nos betões a valores inferiores a 3,0 kg/m^3 para agregados de classe II e 2,5 kg/m^3 para os de classe III, em virtude da possibilidade da reação álcalis-sílica. Os álcalis do cimento Portland e a sílica do vidro reagem na presença de humidade, correspondendo a uma reação química denominada álcalis-sílica, que, ocorrendo no betão endurecido, forma produtos cuja expansão leva à fissuração do betão e consequente rotura. Por essa razão, estudos com o uso de vidro em betão para substituir parcialmente o agregado grosso nem sempre tiveram bons resultados devido à redução de resistência provocada pela expansão excessiva.

2.6.1. Descrição de trabalhos experimentais

Neste ponto, são descritos sucintamente vários trabalhos experimentais relativos ao estudo da substituição de agregados naturais por agregados reciclados de vidro. Desta forma, são descritos os procedimentos utilizados, as propriedades dos agregados utilizados, a composição de todas as amassaduras realizadas e os resultados obtidos.

2.6.1.1. Trabalho de Gautam, Srivastava & Agarwal (2012)

Neste trabalho experimental, os autores estudaram a influência da substituição parcial de agregados finos de betão por resíduos de vidro. Para isso, usaram betões com taxas de substituição de 10, 20, 30, 40 e 50 %, para além da produção de um betão de referência. Os betões referidos foram ensaiados aos 7 e 28 dias para a resistência à

compressão. De seguida, no Quadro 1 são apresentadas as propriedades dos agregados utilizados.

Quadro 1 – Propriedades dos agregados utilizados por Gautam, Srivastava & Agarwal (2012)

Agregados	Massa Volúmica (kg/dm^3)	Baridade (kg/m^3)	Módulo de Finura
Areia ($D_{máx} = 2{,}36$ mm)	2,62	1573	2,89
Brita 1 ($D_{máx} = 12{,}5$ mm)	2,70	1489	7,01
Brita 2 ($D_{máx} = 20$ mm)	2,71	1477	7,89

No Quadro 2 são apresentadas as quantidades usadas nas diferentes composições do estudo de Gautam, Srivastava & Agarwal (2012), que tiveram uma relação A/C 0,50.

Quadro 2 – Composição das amassaduras estudadas por Gautam, Srivastava & Agarwal (2012)

Taxa de Substituição	Cimento (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	Vidro (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Água (l/m^3)
0 % de Vidro	380,0	1265,4	0,0	634,6	190,0
10 % de Vidro	380,0	1265,4	63,5	571,1	190,0
20 % de Vidro	380,0	1265,4	126,9	507,7	190,0
30 % de Vidro	380,0	1265,4	190,4	444,2	190,0
40 % de Vidro	380,0	1265,4	253,8	380,8	190,0
50 % de Vidro	380,0	1265,4	317,3	317,3	190,0

No estudo da resistência à compressão, foram produzidos provetes cúbicos de 100 mm de aresta aos 7 e 28 dias. No Quadro 3 e na Figura 6 são apresentados os resultados da resistência à compressão obtidos pelos autores.

Quadro 3 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Gautam, Srivastava & Agarwal (2012)

Idade de Cura (dias)	Referência (MPa)	10 % Vidro (MPa)	20 % Vidro (MPa)	30 % Vidro (MPa)	40 % Vidro (MPa)	50 % Vidro (MPa)
7	14,7	21,7	16,7	16,3	16,3	20,3
28	30,3	31,3	31,0	29,7	29,3	24,3

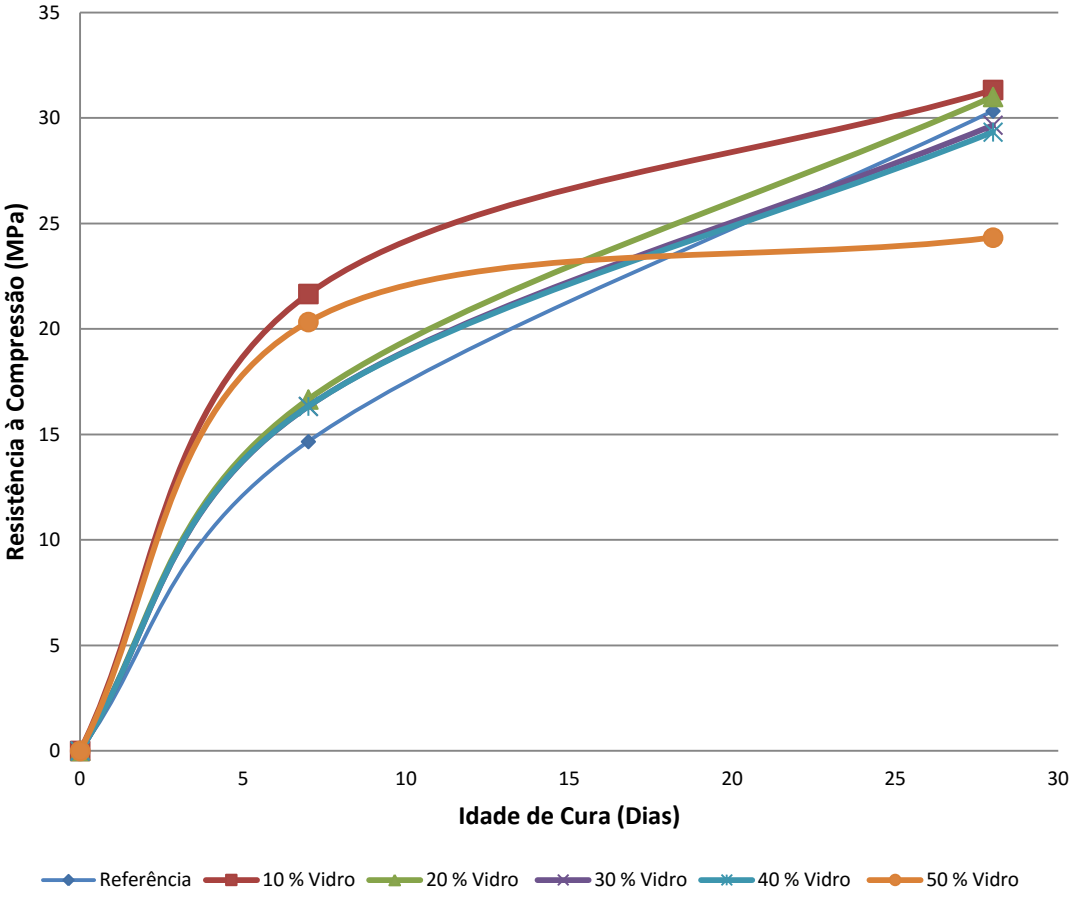


Figura 6 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Gautam, Srivastava & Agarwal (2012)

Gautam, Srivastava & Agarwal (2012) afirmam no final deste estudo que o vidro pode ser usado como substituição do agregado fino até uma taxa de substituição de 40 % e que a ideal é de 10 %.

2.6.1.2. Trabalho de Oliveira, Gomes & Santos (2008)

Os autores apresentaram um estudo experimental no qual exploraram a viabilidade de utilizar vidro colorido na composição de betões estruturais. Para esse efeito, realizaram um betão de referência e substituíram, para diversos teores (25, 50 e 100 %), a areia natural por resíduos de vidro moído e determinaram as resistências à compressão dos betões, nas idades de 7 e 28. As propriedades dos agregados estudados podem ser consultadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades dos agregados utilizados por Oliveira, Gomes & Santos (2008)

Agregados	Massa Volúmica (kg/dm^3)	Baridade (kg/m^3)	Módulo de Finura
Areia ($D_{máx} = 4{,}75$ mm)	2,52	s.d.	3,47
Brita ($D_{máx} = 12{,}7$ mm)	2,70	s.d.	s.d.
Vidro ($D_{máx} = 4{,}76$ mm)	2,51	s.d.	2,40

Para este estudo, o betão de referência foi produzido nas proporções, em massa, de 1:0,29:1,87:3,14 (cimento : cinza volante : agregado fino : agregado grosso), com uma relação A/C de 0,6. No Quadro 5 são apresentadas as quantidades dos constituintes utilizadas nos diversos betões ensaiados.

Quadro 5 – Composição das amassaduras estudadas por Oliveira, Gomes & Santos (2008)

Taxa de Substituição	Cimento (kg/m^3)	Cinza Volante (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	Vidro (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Água (l/m^3)
0 % de Vidro	350,0	101,5	1099,0	0	654,5	210,0
25 % de Vidro	350,0	101,5	1099,0	163,6	490,8	210,0
50 % de Vidro	350,0	101,5	1099,0	327,25	327,25	210,0
100 % de Vidro	350,0	101,5	1099,0	654,5	0	210,0

A resistência à compressão das misturas produzidas foi determinada em conformidade com a EN 12390-3, aos 7 e 28 dias, em cubos de aresta 150 mm. Os betões foram mantidos em condições padrão de temperatura e humidade e os resultados da resistência à compressão são apresentados na Figura 7.

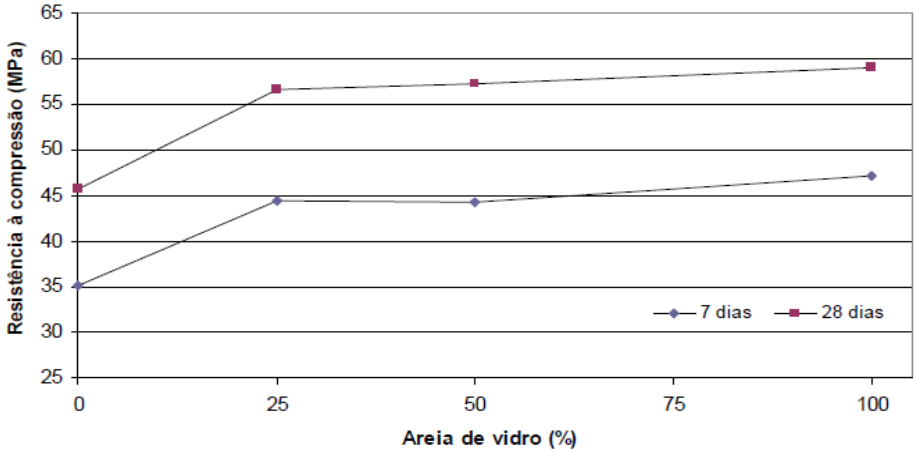


Figura 7 – Resistência à compressão de misturas com areia de vidro, aos 7 e 28 dias (Oliveira, Gomes & Santos (2008))

No final, os resultados dos ensaios indicam que a resistência à compressão cresce com o aumento da percentagem da areia de vidro no betão. Nas taxas de 25, 50 e 100 % a resistência à compressão cresceu na ordem dos 26, 26 e 34 % respetivamente, aos 7 dias. Já aos 28 dias o aumento foi de 24, 25 e 29 %. Este aumento resultou da adição de cinzas volantes que mitigaram o efeito da reação do tipo álcalis-sílica

A trabalhabilidade manteve uma classe de consistência S3, pois, devido à forma lamelar das partículas de vidro, só foi possível com a adição de um adjuvante redutor de água de modo a se manter a relação A/C.

Com todos os resultados dos ensaios realizados, os autores afirmam que, o agregado reciclado com resíduos de vidro colorido pode ser um substituto satisfatório das areias naturais e que isso traz benefícios tanto económicos como ambientais à sociedade.

2.6.1.3. Trabalho de Ismail e Al-Hashmi (2009)

Esta investigação teve por objetivo o estudo das propriedades dos betões com substituição de agregado fino natural por agregado fino de vidro. Neste contexto, foi produzido um betão de referência e posteriormente 3 composições de betão com taxas de substituição do agregado natural fino pelo agregado de vidro de 10, 15 e 20 %. No Quadro 6 são apresentados os valores obtidos na caracterização dos agregados

Quadro 6 - Caracterização granulométrica dos agregados utilizados por Ismail e Al-Hashmi (2009)

Abertura malha (mm)	Areia		Vidro moído	
	Acumulado		**Acumulado**	
	% passado	**% retido**	**% passado**	**% retido**
4,75	96,50	3,50	100,00	0,00
2,36	89,16	10,84	99,98	0,02
1,18	80,70	19,30	68,35	31,65
0,6	68,40	31,60	46,14	53,86
0,3	24,97	75,03	29,63	70,37

As propriedades dos agregados utilizados por Ismail e Al-Hashmi podem ser consultadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Propriedades dos agregados utilizados por Ismail e Al-Hashmi (2009)

Agregados	Massa Volúmica (kg/dm^3)	Baridade (kg/m^3)	Módulo de Finura	Absorção (%)
Areia ($D_{máx} = 4{,}75$ mm)	2,57	1688	2,37	2,71
Brita ($D_{máx} = 20$ mm)	s.d.	1545	s.d.	s.d.
Vidro ($D_{máx} = 2{,}36$ mm)	2,19	1672	2,36	0,39

No Quadro 8 são apresentadas as quantidades usadas nas diferentes composições do estudo de Ismail e Al-Hashmi, que tiveram uma relação A/C 0,53.

Quadro 8 – Composição das amassaduras estudadas por Ismail e Al-Hashmi (2009)

Taxa de Substituição	Cimento (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	Vidro (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Água (l/m^3)
0 % de Vidro	380,0	1020,0	0,0	715,0	201,0
10 % de Vidro	380,0	1020,0	71,5	643,5	201,0
15 % de Vidro	380,0	1020,0	107,3	607,8	201,0
20 % de Vidro	380,0	1020,0	572,0	143,0	201,0

No estudo da resistência à compressão, foram produzidos provetes cúbicos de 150 mm de aresta aos 3, 7, 14 e 28 dias. Os moldes dos provetes foram cheios em 3 camadas de 50 mm e foram compactados usando uma mesa vibratória durante 1 a 1,5 minutos, até que não emergisse nenhuma bolha de ar. Os moldes secaram durante 24 horas e, posteriormente, o betão foi removido dos moldes e submerso em água potável até ao dia do ensaio. No Quadro 9 e na Figura 8 são apresentados os resultados da resistência à compressão obtidos pelos autores.

Quadro 9 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Ismail e Al-Hashmi (2009)

Idade de Cura (dias)	Referência (MPa)	10 % Vidro (MPa)	15 % Vidro (MPa)	20 % Vidro (MPa)
3	26,9	29,1	28,9	27,6
7	31,5	34,6	32,0	31,7
14	43,8	39,1	38,3	38,0
28	44,0	40,3	42,0	45,9

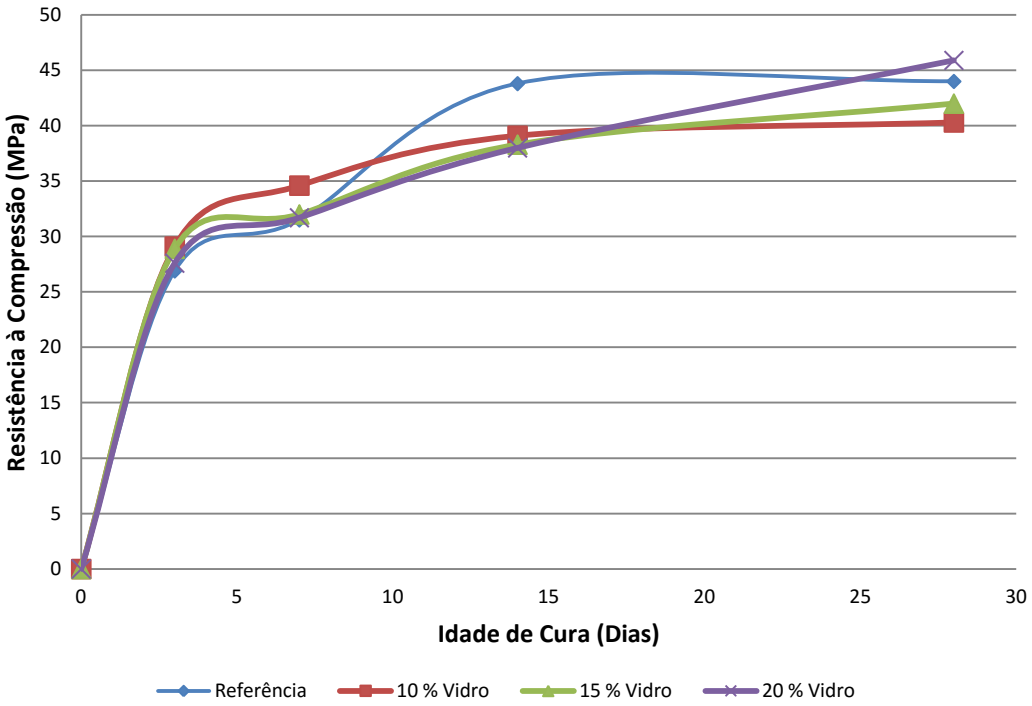


Figura 8 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Ismail e Al-Hashmi (2009)

Como conclusões, os autores afirmam que usar os resíduos de vidro moído como agregados finos pode produzir resultados promissores, visto que a geometria do betão será menos heterogénea. De acordo com os resultados dos ensaios da resistência à compressão, o maior valor foi registado no betão com 20 % de vidro aos 28 dias (45,9 MPa), o que representa um aumento da resistência à compressão de 4,23 % em comparação com o betão de referência.

2.6.1.4. Trabalho de Malik et al. (2013)

Neste trabalho experimental, os autores estudaram a influência da substituição parcial de agregados finos de betão por resíduos de vidro. Para isso, usaram betões com taxas de substituição de 10, 20, 30 e 40 %, para além da produção de um betão de referência. Os betões referidos foram ensaiados aos 7 e 28 dias para a resistência à compressão. De seguida (Quadro 10), são apresentadas as propriedades dos agregados utilizados.

Quadro 10 – Propriedades dos agregados utilizados por Malik et al. (2013)

Agregados	Massa Volúmica (kg/dm^3)	Baridade (kg/m^3)	Módulo de Finura
Areia ($D_{máx} = 4{,}75$ mm)	2,60	s.d.	s.d.
Brita ($D_{máx} = 20$ mm)	2,70	s.d.	s.d.
Vidro ($D_{máx} = 1{,}18$ mm)	2,42	s.d.	s.d.

No Quadro 11 são apresentadas as quantidades usadas nas diferentes composições do estudo de Malik et al., que tiveram uma relação A/C 0,45.

Quadro 11 – Composição das amassaduras estudadas por Malik et al. (2013)

Taxa de Substituição	Cimento (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	Vidro (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Água (l/m^3)	Abaixamento (mm)
0 % de Vidro	425,8	1199,4	0,0	543,5	191,6	25
10 % de Vidro	425,8	1199,4	54,4	489,2	191,6	29
20 % de Vidro	425,8	1199,4	108,7	434,8	191,6	34
30 % de Vidro	425,8	1199,4	163,1	380,5	191,6	40
40 % de Vidro	425,8	1199,4	217,4	326,1	191,6	50

No estudo da resistência à compressão, foram produzidos provetes cúbicos de 150 mm de aresta aos 7 e 28 dias. No Quadro 12 e na Figura 9 são apresentados os resultados da resistência à compressão obtidos pelos autores.

Quadro 12 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Malik et al. (2013)

Idade de Cura (dias)	Referência (MPa)	10 % Vidro (MPa)	20 % Vidro (MPa)	30 % Vidro (MPa)	40 % Vidro (MPa)
7	21,5	24,3	24,7	22,4	18,1
28	28,1	33,7	35,1	30,8	25,7

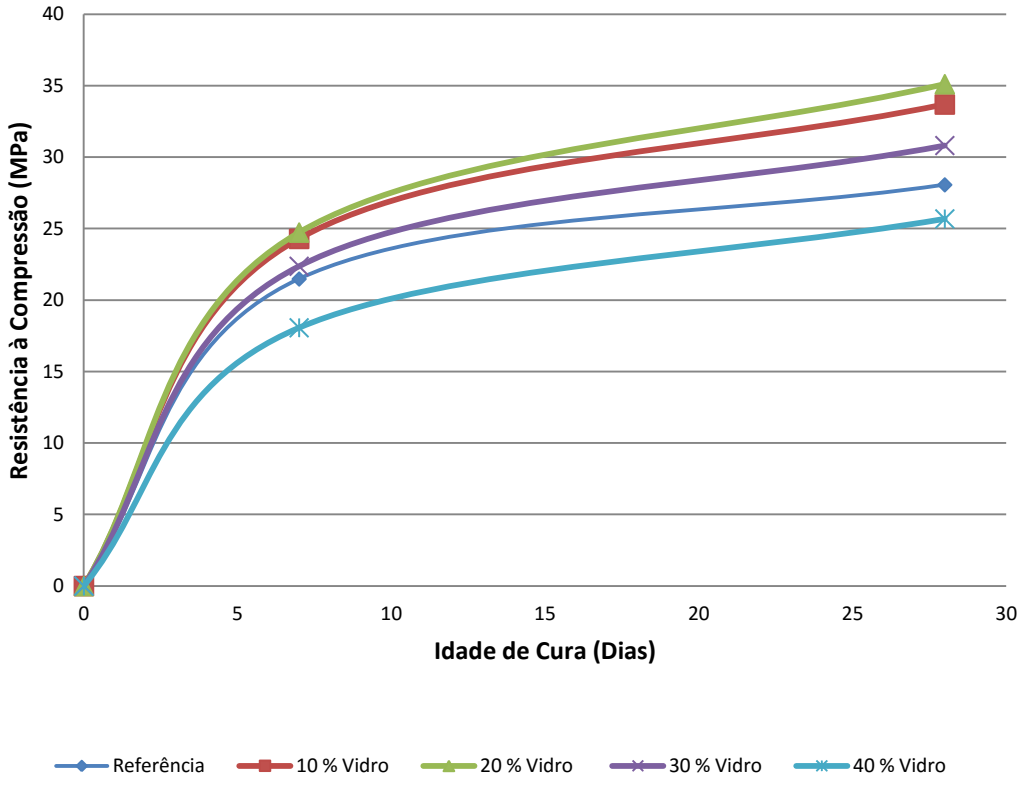


Figura 9 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Malik et al. (2013)

Com base nos resultados obtidos por Malik et al. (2013), conclui-se que com a substituição de 20 % houve um aumento de 15 % e 25 % na resistência à compressão, aos 7 e 28 dias respetivamente.

Estes resultados permitem ainda afirmar que se pode utilizar pó de vidro como substituição parcial dos agregados naturais finos até aos 30 %, em peso, até à dimensão máxima do agregado de 1,18 mm e que no final o betão terá um peso médio mais baixo do que o convencional.

2.6.1.5. Trabalho de Lima et al. (2011)

Neste trabalho experimental, os autores estudaram a influência da substituição de agregado natural fino (areia) por vidro moído, em betões. O vidro utilizado nos ensaios foi proveniente de garrafas. No Quadro 13 são apresentados os valores obtidos na caracterização granulométrica dos agregados por Lima et. al (2011).

Quadro 13 – Caracterização granulométrica dos agregados utilizados por Lima et al. (2011)

Abertura malha (mm)	Vidro moído				Areia				Brita			
			Acumulado				Acumulado				Acumulado	
	Massa retida Total (g)	Massa retida Total (%)	% passado	% retido	Massa retida Total (g)	Massa retida Total (%)	% passado	% retido	Massa retida Total (g)	Massa retida Total (%)	% passado	% retido
25,4	0	0	100,00	0,0	0	0	100,00	0,0	0	0	100,00	0,0
19,1	0	0	100,00	0,0	0	0	100,00	0,0	0	0	100,00	0,0
12,7	0	0	100,00	0,0	0	0	100,00	0,0	1923,1	27,34	72,66	27,34
9,52	0	0	100,00	0,0	0	0	100,00	0,0	3841	54,61	18,04	81,96
6,35	0	0	100,00	0,0	0	0	100,00	0,0	911,8	12,96	5,08	94,92
4,75	0	0	100,00	0,0	17,7	0,25	99,75	0,25	331,5	4,71	0,36	99,64
2,4	20,7	4,14	95,86	4,14	55,7	0,79	98,95	1,05	25,6	0,36	0,00	100,00
1,2	121,8	24,36	71,51	28,49	236,92	3,38	95,57	4,43	0	0,0	0,00	100,00
0,6	120,7	24,14	47,37	52,63	4930	70,34	25,24	74,76	0	0,0	0,00	100,00
0,3	83,4	16,68	30,69	69,31	1617,33	23,07	2,16	97,84	0	0,0	0,00	100,00
0,150	58,4	11,68	19,02	80,98	151,5	2,16	0,00	100,00	0	0,0	0,00	100,00
0,075	95,1	19,02	0,00	100,00	0	0,00	0,00	100,00	0	0,0	0,00	100,00
Total	500,1	**Módulo Finura:**		**3,59**	7009,15	**Módulo Finura:**		**2,78**	357,1	**Módulo Finura:**		**4,04**

Os betões tiveram como taxas de substituição 10, 15, 20 e 100 % para além do betão de referência e foram ensaiados aos 63 dias, com um traço de 1:1,974:3,06 (cimento : areia : Brita) e uma relação A/C de 0,45. As propriedades dos agregados usados são apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Propriedades dos agregados utilizados por Lima et al. (2011)

Agregados	Massa Volúmica (kg/dm^3)	Baridade (kg/m^3)	Módulo de Finura
Areia ($D_{máx} = 1,2$ mm)	2,63	s.d.	2,78
Brita ($D_{máx} = 19,1$ mm)	2,92	s.d.	4,04
Vidro ($D_{máx} = 2,4$ mm)	2,51	s.d.	3,59

No Quadro 15 são apresentadas as quantidades de materiais utilizados e as respetivas taxas de substituição de areia por vidro, para os 6 betões ensaiados.

Quadro 15 – Composição das amassaduras estudadas por Lima et al. (2011)

Taxa de Substituição	Cimento (kg)	Areia (kg)	Vidro (kg)	Brita (kg)	Água (l)
0 % de Vidro	10,5	20,4	0,0	32,2	4,7
5 % de Vidro	10,5	19,4	1,0	32,2	4,7
10 % de Vidro	10,5	18,4	2,1	32,2	4,7
15 % de Vidro	10,5	17,3	3,1	32,2	4,7
20 % de Vidro	10,5	16,3	4,1	32,2	4,7
100 % de Vidro	10,5	0,0	20,7	32,2	4,7

No estudo da resistência à compressão, foram produzidos provetes cilíndricos de diâmetro de 120 mm e altura de 200 mm aos 7 e 28 dias. Na Figura 10 são apresentados os resultados experimentais das resistências à compressão para as respetivas taxas de substituição (T.S.).

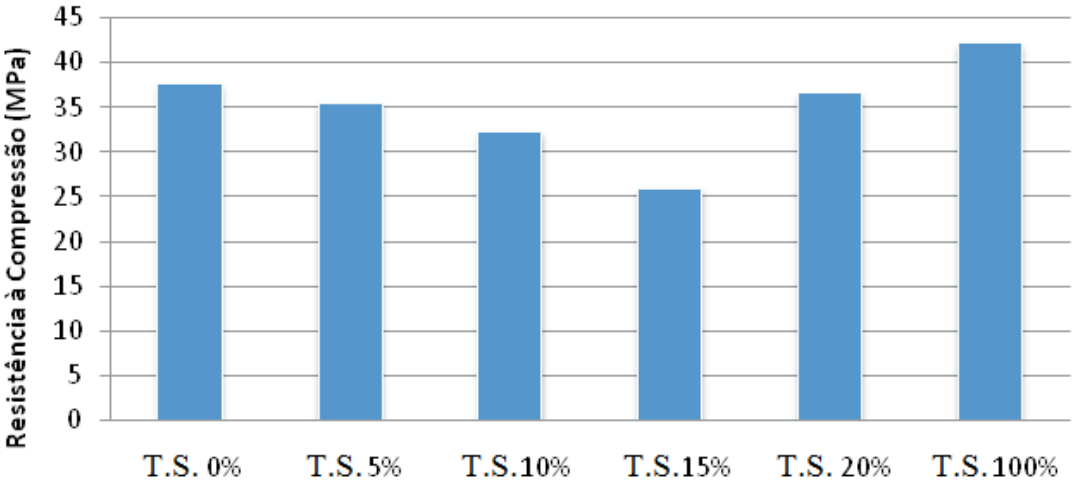


Figura 10 – Valores da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Lima et al. (2011)

No trabalho experimental de Lima et al. (2011) observa-se que a substituição de agregado natural fino (areia) por agregado reciclado fino (vidro) não alterou significativamente a resistência à compressão. Ainda assim, a adição de vidro fez com que na mistura com a taxa de substituição de 15 % houvesse uma redução de resistência à compressão, em relação à do betão de referência. No entanto, na taxa de substituição de 100 % a resistência obtida já foi superior.

2.6.1.6. Trabalho de Barbosa et al. (2011)

Os autores avaliaram a viabilidade da utilização de vidro como agregado fino em substituição de agregado natural fino (areia). Para este estudo, realizaram um betão de referência e dois com taxas de substituição de agregado de vidro por agregado natural fino de 50 e 100 %. Para as avaliações comparativas entre betões, ensaiaram a resistência à compressão dos betões aos 7 e 28 dias. A caracterização dos agregados e as propriedades dos agregados usados pelos autores são apresentadas nos Quadro 16 e 17.

Quadro 16 - Caracterização dos agregados utilizados por Barbosa et al. (2011)

Abertura malha (mm)	% retido (Areia)	% retido (Vidro)	% retido (Brita 1)
25,0	0,0	0,0	0,0
19,0	0,0	0,0	0,3
12,5	0,0	0,0	49,5
9,5	0,0	0,0	43,9
6,3	0,1	0,0	6,2
4,8	0,9	0,2	0,1
2,4	3,2	12,8	0,0
1,2	8,1	18,8	0,0
0,6	26,3	27,9	0,0
0,3	37,4	20,1	0,0
0,2	16,5	11,1	0,0
0,0	7,5	9,3	0,0

Quadro 17 – Propriedades dos agregados utilizados por Barbosa et al. (2011)

Agregados	Massa Volúmica (kg/dm^3)	Baridade (kg/dm^3)	Módulo de Finura
Areia ($D_{máx} = 2{,}4$ mm)	s.d.	1,47	2,25
Brita 1 ($D_{máx} = 12{,}5$ mm)	s.d.	1,43	6,94
Vidro ($D_{máx} = 4{,}8$ mm)	2,47	s.d.	2,76

No Quadro 18 são apresentadas as características das três famílias das composições do estudo de Barbosa et al. (2011), que tiveram uma relação A/C 0,55.

Quadro 18 – Características das três famílias estudadas por Barbosa et al. (2011)

Taxa de Substituição	Traço (Cimento:Areia:Vidro:Brita)
0 % de Vidro	1:0:1,95:2,90
50 % de Vidro	1:0,97:0,97:2,90
100 % de Vidro	1:1,95:0:2,90

No estudo da resistência à compressão, foram produzidos provetes cúbicos de 100 mm x 200 mm (diâmetro x altura) aos 7 e 28 dias. No Quadro 19 são apresentados os resultados obtidos pelos autores e na Figura 11 são representados graficamente os valores da resistência à compressão.

Quadro 19 – Valores obtidos nas amassaduras estudadas por Barbosa et al. (2011)

Betão	Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	Abaixamento (mm)	Densidade (kg/m^3)
Referência	22	31,2	115	2414
50 % Vidro	15	25,4	110	2310
100 % Vidro	10,5	18,3	140	2191

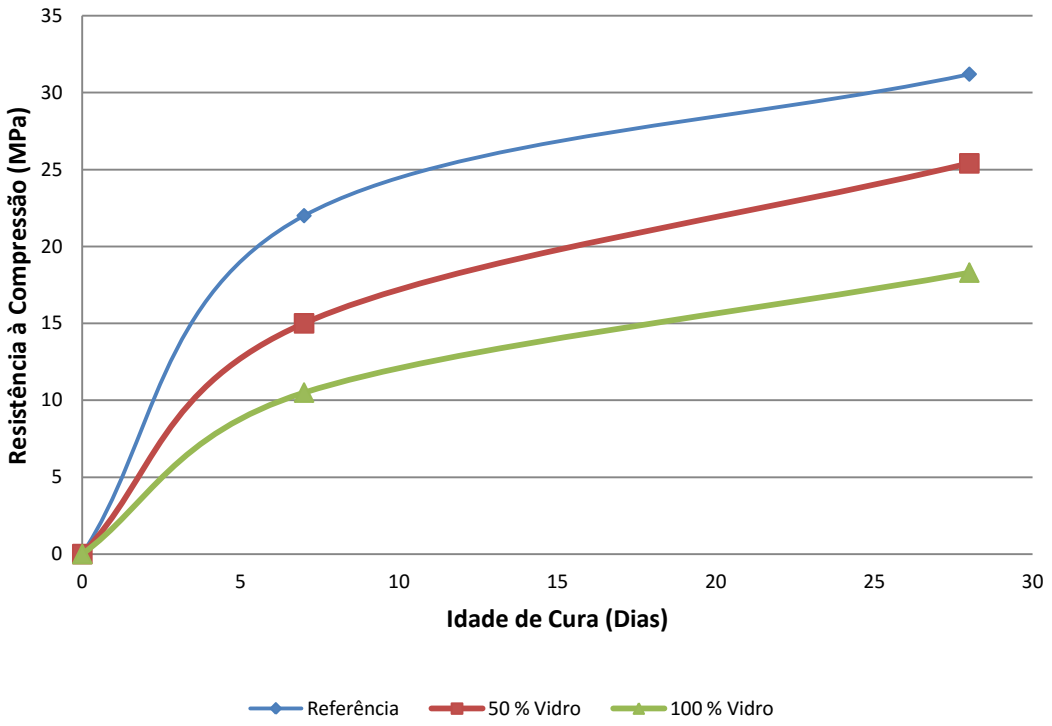


Figura 11 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras estudadas por Barbosa et al. (2011)

Os resultados destes autores revelam que o betão de referência tem o melhor desempenho. Contudo, os betões com substituição do agregado natural por reciclado de vidro apresentam resultados satisfatórios, principalmente o com 50 % de substituição. Para Barbosa et. al. existe uma forte possibilidade de utilizar este agregado reciclado em betões estruturais.

2.6.1.7. Trabalho de Diogo Serpa (2012)

Diogo Serpa realizou um estudo das características dos agregados naturais para posterior fabrico de um betão de referência através do cálculo da composição pelo método de Faury. Depois desse betão, produziu outros betões com substituição dos agregados naturais por agregados provenientes da reciclagem de vidro. Para isso, fez variar as granulometrias substituídas, procedendo à substituição dos agregados finos (BF), grossos (BG) e ambos (BFG). Essa substituição foi feita para taxas de 5, 10 e 20 %.

Para a caracterização dos agregados, usou a análise granulométrica, a massa volúmica, as baridades e o ensaio de desgaste *Los Angeles*.

Por fim, procedeu à caracterização dos betões, tanto no estado fresco, como no estado endurecido, tendo para o efeito realizado ensaios de abaixamento e de resistência à compressão em diversas idades de cura, determinando assim a evolução da resistência à compressão aos 7, 28, 56 e 92 dias. As propriedades dos agregados usados pelo autor são apresentadas no Quadro 20.

Quadro 20 – Propriedades dos agregados utilizados por Serpa (2012)

Agregados	**Massa Volúmica (kg/dm^3)**	**Baridade (Mg/m^3)**	**Módulo de Finura**	**Desgaste *Los Angeles***
Areia fina ($D_{máx} = 1$ mm)	2,58	1,50	1,95	s.d.
Areia grossa ($D_{máx} = 4$ mm)	2,62	1,55	3,29	s.d.
Brita 0,5 ($D_{máx} = 8$ mm)	2,66	1,44	5,53	34
Brita 1 ($D_{máx} = 16$ mm)	2,65	1,43	6,70	31
Brita 2 ($D_{máx} = 22{,}4$ mm)	2,65	1,43	7,36	32
Vidro ($D_{máx} = 8$ mm)	2,52	1,36	4,79	38

De acordo com os resultados dos ensaios da análise granulométrica, realizados para os agregados em estudo, Diogo Serpa traçou as respetivas curvas granulométricas resultantes conforme a Figura 12.

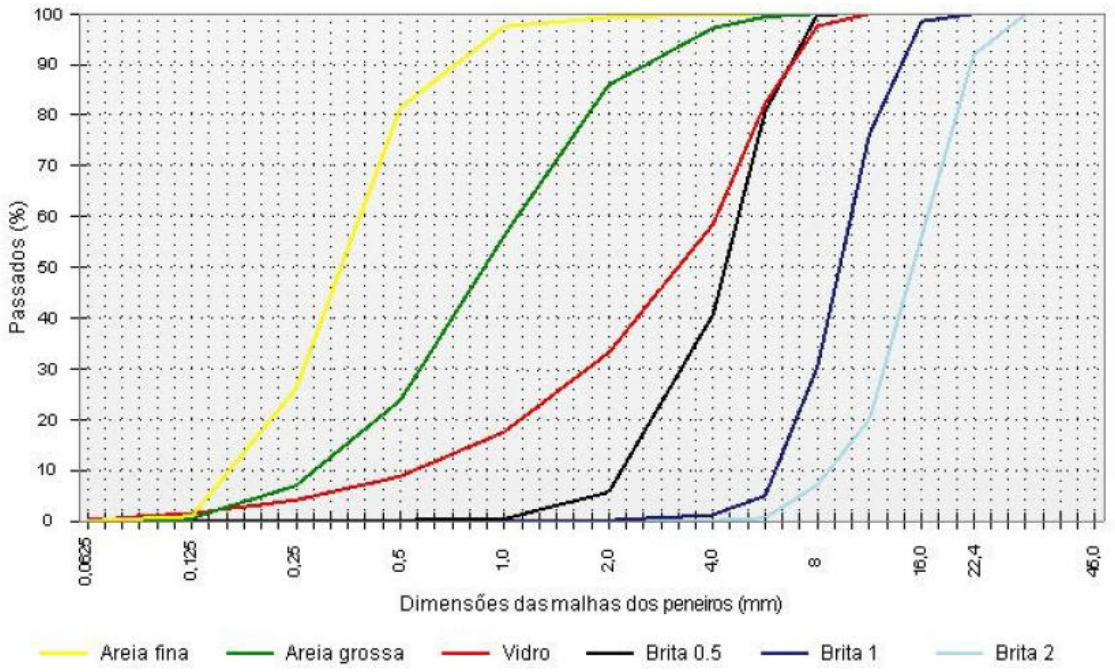


Figura 12 – Curvas granulométricas dos agregados (Serpa, D. (2012))

Os valores das massas volúmicas aparentes ou baridades são muito semelhantes, apesar disso as areias apresentam uma baridade ligeiramente superior.

Comparando a baridade do vidro com a das britas, nota-se um valor mais baixo. Esta diferença deve-se à diferença das massas volúmicas dos agregados.

No que se refere ao ensaio de desgaste de *Los Angeles*, o autor realizou um ensaio por cada agregado em análise, podendo assim comparar os respetivos desgastes para os diferentes tipos de agregados.

Os valores do desgaste dos agregados apresentam uma perda por desgaste muito semelhante, mesmo sendo de diferentes granulometrias. Face aos resultados, pode-se afirmar que os valores obtidos para os agregados de vidro (38) estão conformes com o que se encontra prescrito na especificação LNEC E-467 (2006), estabelecendo que se podem utilizar agregados no fabrico de betão com um limite de 50.

Na fase de estudo dos betões no estado fresco, salientam-se os ensaios de abaixamento (cone de Abrams) realizados, tendo sido estabelecido como objetivo um intervalo compreendido entre os 125 ± 10 mm.

Os resultados obtidos para as várias composições são apresentados na Figura 13.

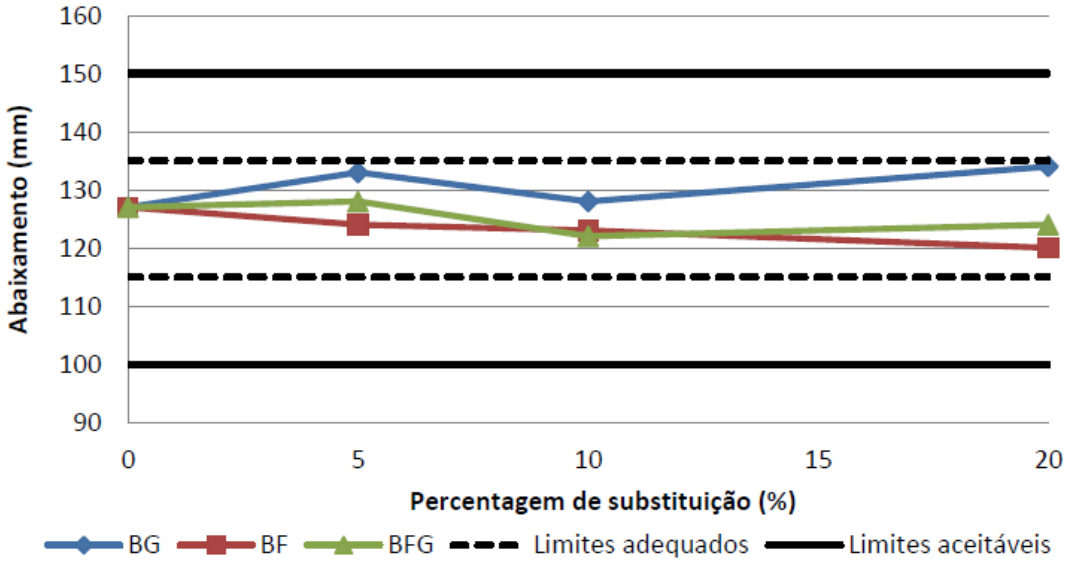


Figura 13 – Resultados do ensaio de abaixamento (Serpa, D. (2012))

Por forma a alcançar o objetivo de limitar o abaixamento ao intervalo pretendido conforme se pode observar na Figura 13, o autor do estudo utilizou sempre a mesma trabalhabilidade, em todos os betões estudados, alterando apenas a relação A/C.

Nos ensaios realizados nos betões no estado endurecido, determinou a capacidade resistente dos mesmos sob tensão uniaxial uniforme, e consequente análise da evolução da resistência à compressão em função da idade de cura (Figura 14).

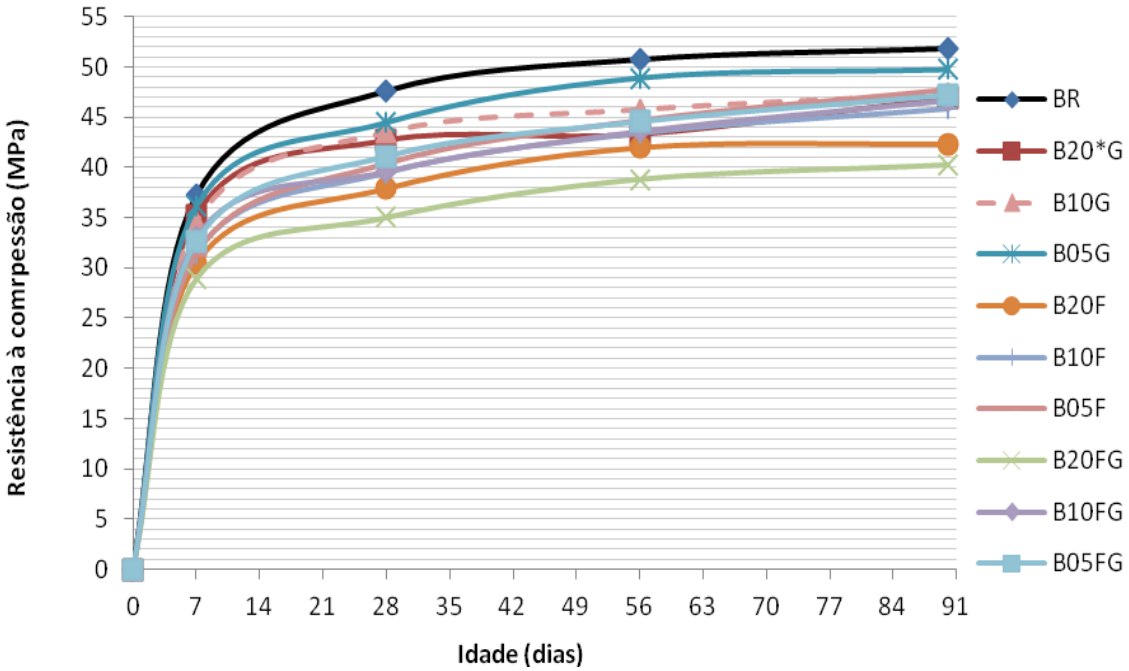


Figura 14 – Evolução da resistência à compressão no tempo (Serpa, D. (2012))

Legenda:
BR – Betão de referência, sem incorporação de agregados provenientes da trituração de vidro;
B05F – Betão com 5 % de agregados de vidro por substituição de finos;
B10F – Betão com 10 % de agregados de vidro por substituição de finos;
B20F – Betão com 20 % de agregados de vidro por substituição de finos;
B05G – Betão com 5 % de agregados de vidro por substituição de grossos;
B10G – Betão com 10 % de agregados de vidro por substituição de grossos;
B20G – Betão com 20 % de agregados de vidro por substituição de grossos;
B05FG – Betão com 5 % de agregados de vidro por substituição de 2,5 % de finos e 2,5 % de grossos;
B10FG – Betão com 10 % de agregados de vidro por substituição de 5 % de finos e 5 % de grossos;
B20FG – Betão com 20 % de agregados de vidro por substituição de 10 % de finos e 10 % de grossos;

Como consequência deste estudo, o autor concluiu que, com o aumento da percentagem de substituição de agregados primários por agregados de vidro, houve um decréscimo da resistência à compressão. Todavia, nos betões em que substituiu os agregados primários grossos por agregados de vidro grossos, a redução da resistência foi menor. Com a substituição de agregados finos, a resistência diminuiu ainda mais significativamente, em relação ao betão de referência.

Assim, a incorporação dos agregados reciclados de vidro, em substituição parcial dos agregados naturais, é viável para betão estrutural, devendo-se ter especial atenção à tendência de decréscimo do comportamento mecânico.

3. Trabalho experimental

3.1. Introdução

Neste capítulo descrevem-se todas as fases deste trabalho experimental realizadas para avaliar a influência que um processo de amassadura poderá ter nas características de um betão com a incorporação de agregado de vidro reciclado, nomeadamente por alteração das características deste agregado.

Descrevem-se os diversos ensaios realizados aos agregados (naturais e reciclados) e aos betões produzidos. Assim, são apresentadas as referências às normas, bem como a descrição sucinta dos vários procedimentos experimentais.

São também apresentados os cálculos referentes à formulação das composições dos betões.

A realização do trabalho experimental dividiu-se entre o laboratório da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologia (ULHT) e o do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

3.2. Planificação do trabalho experimental

O trabalho experimental teve cinco fases distintas que se passam a descrever.

3.2.1. Primeira fase experimental

A primeira fase consistiu na recolha do agregado reciclado de vidro, proveniente da vidreira de Tires.

Os agregados grossos são naturais de origem calcária. O agregado fino que foi utilizado consiste numa areia siliciosa.

O ligante hidráulico utilizado é fabricado pela SECIL, sendo este um Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5 N, certificado pela norma NP EN 197-1 (2012). Pode ser consultada a ficha técnica no Anexo A.

3.2.2. Segunda fase experimental

Na segunda fase, procedeu-se à caracterização física dos agregados naturais.

Para os agregados naturais, foram realizados os seguintes ensaios de acordo com a normalização aplicável:

- Análise granulométrica, segundo a norma NP EN 933-1 (2014);
- Determinação das baridades, de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2002);

Na sua preparação, os agregados reciclados de vidro foram triturados e separados por frações granulométricas, tendo sido retiradas as partículas que não se apresentavam arredondadas. As quantidades usadas por fração granulométrica em cada betão são apresentadas no Anexo F.

3.2.3. Terceira fase experimental

Nesta fase, procedeu-se ao cálculo da composição do betão de referência pelo método de Faury.

Para a execução deste cálculo, estabeleceu-se uma trabalhabilidade mole, uma dosagem de cimento de 300 kg/m^3 e uma relação A/C entre os 0,5 e 0,6.

Para a execução dos betões, objeto da presente dissertação, substituiu-se, num primeiro betão, 25 % do volume dos agregados grossos por igual volume dos agregados reciclados de vidro, enquanto, num segundo betão, o valor de substituição foi de 50 %.

3.2.4. Quarta fase experimental

Na sequência do plano experimental estabelecido, avaliou-se, na betoneira, o desgaste dos agregados naturais grossos britados, dos agregados reciclados de vidro e ainda da mistura resultante de agregados reciclados de vidro com 7,5 kg de agregados naturais grossos britados (com fração granulométrica compreendida entre os 20 e 25 mm). Esta avaliação teve 3 fases de duração:

- Numa primeira fase, submeteu-se os agregados reciclados de vidro a um processo similar de amassadura, tendo-se posteriormente realizado um ensaio de análise granulométrica. Repetiu-se este método mais duas vezes, uma com a duração de 3 minutos e outra de 4 minutos.

- Na segunda fase, repetiu-se a operação, mas com os agregados naturais britados.
- Numa terceira fase, repetiu-se o processo anteriormente descrito, utilizando três provetes constituídos pela mistura acima descrita.

Fez-se ainda o ensaio de desgaste *Los Angeles* para o agregado reciclado de vidro, de acordo com norma NP EN 1097-2 (2011).

3.2.5. Quinta fase experimental

Nesta fase experimental, efetuou-se o fabrico dos betões nas composições propostas, em quantidades suficientes para a posterior elaboração dos vários ensaios. Foram estudados e analisados os resultados destes ensaios.

- No estado fresco
  - ensaio de abaixamento (cone de Abrams), de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009).
- No estado endurecido
  - massa volúmica NP EN 19390-7 (2009);
  - quantidade de água que o betão acumula durante a conservação (Sem norma);
  - velocidade de propagação de ultrassons para 2, 7 e 28 dias – NP EN 12504-4 (2007);
  - ensaio do Martelo de Schmidt ou do esclerómetro para 2, 7 e 28 dias - NP EN 12504-2 (2012);
  - resistência à compressão para 2, 7 e 28 dias – NP EN 12390-3 (2011).

3.3. Agregados para betão

Agregado é o termo geral que designa os materiais sólidos granulares, para utilização no betão, sem propriedades aglutinantes. Os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados de materiais previamente usados na construção. As suas principais funções são: servir de enchimento diminuindo o custo, proporcionar resistência e durabilidade e reduzir alterações de volume devido ao processo de hidratação e secagem.

De acordo com Coutinho, A. (1997a), os betões de agregados correntes são constituídos por agregados de natureza rochosa, cujas partículas podem ter dimensões

que variam entre 200 mm a 0,1 mm, dispersas na pasta de cimento e que constituem um volume que pode oscilar entre 70 a 80 % do volume total do betão. A utilização dos agregados deve-se a razões técnicas e económicas, sendo necessário tomar em consideração que as suas características afetam profundamente o comportamento do betão.

Estes materiais influenciam todas as propriedades do betão, em particular a sua resistência, através da distribuição granulométrica, da sua tensão de rotura e da resistência da ligação entre a pasta de cimento e a sua superfície. Assim, as propriedades essenciais que se exigem ao agregado são de natureza geométrica, física e química:

- Adequada forma e dimensões proporcionadas, segundo determinadas regras;
- Adequada resistência às ações aplicadas;
- Adequadas propriedades químicas relativamente ao ligante e às ações exteriores;
- Isenção de substâncias prejudiciais.

A melhor informação que se pode obter sobre a qualidade de um agregado é a observação do comportamento do betão feito com ele. Quando se pretende aplicar um agregado que ainda não tenha sido explorado, com comportamento desconhecido, e quando se procede ao controlo diário do agregado proveniente de dadas origens, os agregados só podem ser considerados, em última análise, a partir das propriedades do betão que com eles se fabrica e não exclusivamente com base em ensaios isolados.

3.3.1. Análise granulométrica

O princípio adotado na análise granulométrica seguiu a norma NP EN 933-1 (2014), que diz como realizar os ensaios para a análise granulométrica, mais especificamente pelo método de peneiração.

A norma NP EN 933-1 especifica um método, usando peneiros de ensaio, para a análise granulométrica dos agregados, sendo aplicável aos agregados de origem natural ou artificial, incluindo agregados leves, com dimensão nominal até 63 mm, mas excluindo finos.

A análise granulométrica resulta da percentagem do peso do material que fica retido nos diversos peneiros. Estes peneiros são separados por diversos tamanhos, separando o material por camadas, em diversas frações granulométricas. Entre outros dados, esta análise permite conhecer as máximas e mínimas dimensões do agregado.

Esta análise torna-se importante, pois podem-se corrigir os seus padrões granulométricos, permitindo obter uma melhor compacidade dos betões.

3.3.1.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se, como aparelhos e utensílios, peneiros de ensaio com aberturas como especificado na NP EN 933-2 (Figura 15) e em conformidade com as exigências da ISO 3310-1 e ISO 3310-2; tampa e recipiente do fundo adaptados aos peneiros; uma estufa ventilada controlada por termóstato de modo a manter uma temperatura de (110 $\pm$ 5) °C; equipamento de lavagem; balança com precisão de $\pm$ 0,1 % da massa do provete; tabuleiros e escovas.



Figura 15 – Peneiros de ensaio

A norma NP EN 933-1 (2014) refere que as amostras deverão ser reduzidas, de acordo com a NP EN 933-2, de modo a obter o número necessário de provetes de ensaio. E refere também que a massa de cada provete de ensaio deverá estar conforme o Quadro 21, para agregados de densidade compreendida entre 2000 kg/m^3 e 3000 kg/m^3.

Quadro 21 – Massa dos provetes de ensaio para agregados de peso corrente (NP EN 933-1 (2014))

Dimensão máxima do agregado ($D_{máx}$) (mm)	Massa do provete (mínima) (kg)
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Para agregados de tamanhos diferentes da $D_{máx}$ do Quadro 21, a massa mínima do provete de ensaio deverá ser interpolada a partir das massas dadas pelo mesmo.

Segundo a norma, a secagem dos provetes de ensaio deverá ser efetuada a uma temperatura de (110 ± 5) ºC até alcançar massa constante. Posteriormente, o provete deverá arrefecer, seguindo-se a pesagem e registo como M_1.

3.3.1.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Colocar o provete de ensaio numa estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 º C até atingir uma massa constante (pesagens sucessivas após secagem com pelo menos 1 hora de intervalo e não diferindo de 0,1 %). Pesar e registar o resultado como M_1.
2. Proceder à lavagem do provete de ensaio, colocar o provete de ensaio num recipiente e adicionar água suficiente para o cobrir.
3. Agitar o provete de ensaio com o vigor necessário para se obter a separação completa e suspensão dos finos.
4. Molhar ambos os lados de um peneiro de 0,063 mm, e colocar por cima um peneiro de proteção (1 mm e 2 mm).
5. Colocar os peneiros de forma que a suspensão que os atravessa possa ser despejada ou, se necessário, recolhida num recipiente adequado.
6. Despejar o provete de ensaio no peneiro superior. Continuar a lavagem até que a água que atravessa o peneiro 0,063 mm seja límpida.
7. Secar o material com granulometria superior a 0,063 mm a 110 ± 5 ºC até alcançar massa constante. Deixar arrefecer, pesar e registar o resultado como M_2.
8. Seguir para a peneiração, despejar o material lavado e seco (ou diretamente a amostra seca) na coluna de peneiros. Esta coluna é constituída por um certo número de peneiros encaixados, e dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com fundo e tampa.
9. Agitar a coluna de peneiros manualmente.

10. Transferir todo o material que passa através de cada peneiro para o peneiro seguinte da coluna antes de continuar a peneiração com este peneiro.
11. Pesar o material retido no peneiro de maior dimensão das aberturas e registar a massa como R_1.
12. Efetuar a mesma operação para o peneiro imediatamente inferior e registar a massa do material retido como R_2.
13. Continuar com a mesma operação para todos os peneiros na coluna, de modo a obter as massas das diferentes frações dos materiais retidos e registar estas massas como R_3, R_4, …, R_n.
14. Pesar o material peneirado retido no fundo e registar a sua massa como P.

3.3.1.3. Cálculos e expressão dos resultados

1. Registar as várias massas num relatório de ensaio, apresentado no Anexo B.
2. Calcular a massa retida em cada peneiro, como percentagem da massa original seca M_1.
3. Calcular a percentagem cumulativa da massa original que passa através de cada peneiros até ao peneiro de 0,063 mm, através da expressão:

$$R_i\ \% = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \qquad (1)$$

Onde:

R_i % - percentagem de material retido no peneiro i;

R_i - massa retida no peneiro i, em quilograma;

M_1 - massa seca do provete de ensaio, em quilograma.

4. Calcular a percentagem de finos (f) que passa através do peneiro de 0,063 mm de acordo com a seguinte equação:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

f - percentagem de finos que passa através do peneiro de 0,063 mm;

M_1 - massa seca do provete de ensaio, em quilograma;

M_2 - massa seca do provete de ensaio, em quilograma;

P - massa do material peneirado retido no recipiente de fundo, em quilograma.

5. Validar os resultados, somando as massas R_i e P (se diferir mais de 1 % da massa M_2, é necessário repetir o ensaio).

3.3.2. Massa volúmica aparente ou baridade

Para a determinação dos valores da massa volúmica aparente, também denominada baridade, foi seguida a norma NP EN 1097-3 (2002). Esta é definida como o quociente entre a massa do agregado seco, preenchendo sem compactação um dado recipiente pela capacidade do recipiente.

3.3.2.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se, como aparelhos e utensílios, uma estufa ventilada, controlada por termóstato, de modo a manter uma temperatura de (110 $\pm$ 5) °C; um recipiente, contentor cilíndrico estanque, em metal inoxidável. A relação entre o diâmetro interior e a profundidade interna do contentor deve estar compreendida entre 0,5 e 0,8 e a sua capacidade mínima é a indicada no Quadro 22. Usaram-se ainda uma balança com precisão de $\pm$ 0,1 % da massa do provete, uma pá e uma régua.

Quadro 22 – Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado (NP EN 1097-3 (2002))

Máxima dimensão do agregado (D) (mm)	Capacidade (l)
Até 4	1,0
Até 16,0	5,0
Até 31,5	10
Até 63	20

3.3.2.2. Preparação dos provetes elementares

Obter três provetes por agregado a ser estudado. Os agregados devem ser secos a (110 $\pm$ 5) °C até massa constante. A massa de cada provete elementar deve estar compreendida entre 120 e 150 % da massa necessária para encher o recipiente.

3.3.2.3. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Pesar o recipiente vazio, seco e limpo (m_1). Pousar o recipiente sobre uma superfície horizontal e enchê-lo com a ajuda da pá até transbordar. Durante o enchimento do recipiente, limitar a segregação apoiando a pá no bordo superior. Em nenhum momento o bordo da pá deve estar a mais de 50 mm abaixo do bordo superior.
2. Remover com cuidado todo o excedente no cimo do recipiente, de forma a que a superfície seja visível de maneira uniforme para evitar a segregação. Nivelar a superfície dos agregados com a ajuda da régua, tendo cuidado para não compactar nenhuma parte da superfície superior. Se isto não for possível, nivelar a superfície à mão, com cuidado, para se aproximar o volume dos agregados da capacidade do recipiente.
3. Pesar o recipiente cheio e registar a sua massa com a aproximação de 0,1 % (m_2). Efetuar o ensaio sobre três provetes elementares.

Na Figura 16 estão representadas algumas das etapas da determinação da massa volúmica aparente.

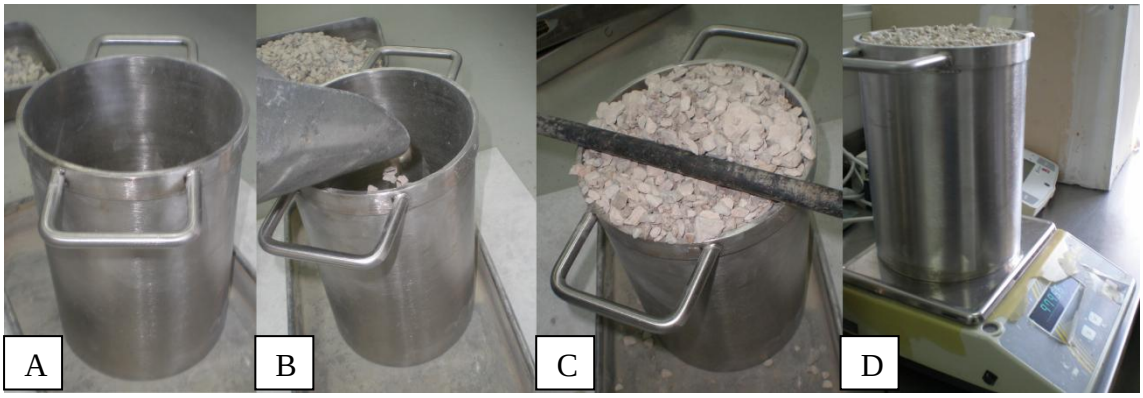


Figura 16 – Algumas etapas da determinação da massa volúmica aparente. A – Recipiente vazio; B – Enchimento do recipiente com o auxílio da pá; C – Remoção do material em excesso com o auxílio da régua; D – Pesagem do conjunto do recipiente mais agregado

3.3.2.4. Cálculo e expressão dos resultados

A baridade ρ_b calcula-se para cada provete elementar segundo a seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3)$$

Onde:

ρ_b- baridade em megagrama por metro cúbico (Mg/m^3);

m_2- massa do recipiente e do provete, em quilograma (kg);

m_1- massa do recipiente vazio, em quilograma (kg);

V- Capacidade do recipiente, em litro (l).

Registar a baridade ρ_b como sendo a média de três valores aproximados à segunda casa decimal, no caso de agregados de massa normal, e à terceira casa decimal, no caso de agregados leves.

3.3.3. Ensaio de desgaste dos agregados na betoneira

Este ensaio não foi realizado de acordo com nenhuma norma. O principal objetivo foi avaliar o desgaste que a misturadora provoca nos agregados naturais e nos reciclados de vidro, quando estes estão isolados, numa primeira fase, e posteriormente misturados, verificando-se a alteração das diversas frações granulométricas.

A marca da betoneira utilizada para o ensaio é Unimec, com um peso de 55 kg, uma capacidade total do tambor de 135 litros e 97 litros por mistura de betão. O tambor tem como dimensões 67x67x68 centímetros e gira a 25 rotações por minuto. De acordo com o fabricante, a potência do motor é de 0,37 kilowatt, a absorção da corrente é de 2 Ampere, a voltagem é de 230 Volt e a frequência é de 50 Hertz.

3.3.3.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se como aparelhos e utensílios, peneiros de acordo com a NP EN 933-2 uma balança com precisão de $\pm$ 0,1 % da massa do provete; uma betoneira; um tabuleiro e um cronómetro e escovas.

3.3.3.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Lavar os agregados em estudo, individualmente, colocá-los em estufa ventilada, a uma temperatura entre os 105 e os 110 º C, secando-os até massa constante.
2. Preparar o agregado a ser estudado: as massas ou volumes foram divididas pelas percentagens dos agregados reciclados de vidro que vão ser usados no betão, em todas as frações dos peneiros.
3. Colocar os agregados na betoneira durante 3 minutos, simulando o processo de amassadura.
4. Realizar ensaio de análise granulométrica.
5. Repetir os pontos 2 e 3, mais uma vez.
6. Repetir os pontos 2 e 3, novamente, mas alterando a duração da amassadura para 4 minutos.

Na Figura 17 são apresentados os agregados durante o ensaio de desgaste na betoneira.



Figura 17 – Ensaio de desgaste na betoneira. A - ARV; B – ANB; C – Conjunto de ARV com ANB [20;25]

3.3.4. Ensaio de desgaste na máquina de *Los Angeles*

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 1097–2 (2011), que determina a resistência à fragmentação pelo método de *Los Angeles*.

Este ensaio tem por objetivo caracterizar o material ensaiado, em relação à resistência, ao choque e ao desgaste, indicando de forma indireta a resistência mecânica do agregado, de modo a que possam ser verificadas as suas alterações em relação ao estado inicial.

A máquina de *Los Angeles* tem um tambor cilíndrico giratório, oco e de aço, no qual será introduzida uma amostra do material a ser ensaiado, bem como um certo número de esferas de aço normalizadas, em função do tipo de material a ser ensaiado. De seguida, o tambor cilíndrico efetua um determinado número de voltas, em torno do seu eixo, a uma velocidade constante. Após o ensaio, é retirado o material usado, passando-o pelo peneiro nº 12. O resultado final será o desgaste que o material registou durante este processo.

De acordo com a especificação LNEC E 467 (2006), os agregados grossos para serem aplicados em betão devem ter um valor máximo de 50.

As massas usadas para o ensaio tiveram em conta a composição granulométrica dos agregados naturais britados, e estão apresentadas no Quadro 23.

Quadro 23 – Quantidades de massas usadas no ensaio *Los Angeles*

Abertura malha (mm)	Massa do agregado reciclado de vidro (g)	Percentagem da massa do agregado reciclado de vidro	Massa do agregado reciclado de vidro a ser usada no ensaio *LA* (g)
14	272	55,34 %	2767,07
12,5	219	44,66 %	2232,93

3.3.4.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se, como aparelhos e utensílios, peneiros de acordo com a NP EN 933-2, presentes no Quadro 24; uma balança com precisão de $\pm$ 0,1 % da massa do provete; uma estufa ventilada, controlada por termóstato, de modo a manter uma temperatura de (110 $\pm$ 5) °C; uma máquina *Los Angeles* (Figura 18); cargas abrasivas constituídas por esferas de aço (cada esfera deve ter um diâmetro compreendido entre os 45 mm e os 49 mm, massas compreendidas entre os 440 g e 445 g, em que a massa total esteja compreendida entre os 4690 g e os 4860 g) e um tabuleiro.

Quadro 24 – Peneiros de acordo com a NP EN 933-2

Ensaio	Dimensão da abertura (mm)
Los Angeles	1,6 10 12,5 14



Figura 18 – Máquina *Los Angeles* do LNEC

3.3.4.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Lavar o agregado reciclado de vidro e colocá-lo na estufa ventilada, a uma temperatura entre os 105 e os 110 º C.
2. Preparar 5000 g do agregado a ser estudado, com partículas entre o peneiro 10 e o de 14 mm, com as massas a serem divididas pelas percentagens dos agregados reciclados de vidro que vão ser usados no betão, nestas frações.
3. Registar a massa do provete como m.
4. Colocar os agregados de vidro, juntamente com a carga abrasiva, e 11 esferas metálicas com uma massa entre os 4,690 a 4,860 kg.
5. Fechar a abertura do cilindro da máquina e iniciar o funcionamento da mesma.
6. Sujeitar os agregados de vidro a 500 rotações, durante 15 minutos.
7. Remover o material do interior do cilindro da máquina e coloca-lo num tabuleiro.
8. Lavar e peneirar no peneiro 1,6 mm.
9. Colocar a fração retida no peneiro 1,6 mm a uma temperatura entre 105 e os 110 º C até ter uma massa constante.

3.3.4.3. Cálculos do coeficiente de desgaste *Los Angeles (LA)*:

A perda por desgaste na máquina *Los Angeles* é dada por:

$$\mathrm{LA} = \frac{5000 - \mathrm{m}}{50} \qquad (4)$$

Em que:

m - massa retida no peneiro de 1,6 mm, em grama.

3.3.4.4. Resultados

Apresentar o resultado arredondado ao número inteiro mais próximo.

3.4. Betão

Recorrendo à NP EN 206-1 (2007), o betão de referência teve como objetivo, uma classe de resistência C25/30, de exposição ambiental XC1 e XC2 e de consistência S1. Usou-se como ligante um Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5 N da cimenteira SECIL, certificado pela norma 197-1 (2012). O tipo de agregados naturais utilizados foram os agregados naturais britados de origem calcária e areias do rio, com máxima dimensão do agregado no betão de 20 mm. Para a água de amassadura utilizou-se água potável da rede de abastecimento pública, conforme previsto NP EN 1008 (2003). O método de compactação foi a vibração mecânica normal (agulha de vibração) e não foram adicionados adjuvantes. O local de fabrico foi o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, no Campo Grande, Lisboa.

3.4.1. Cálculo da composição pelo método de Faury

Nesta dissertação foi utilizada a curva de referência de Faury. O recurso a esta curva permite determinar as quantidades ponderadas, para cada agregado utilizado na composição final do betão. As curvas granulométricas dos agregados são utilizadas para que o betão obtenha a máxima compacidade.

3.4.1.1. Dados

Para o cálculo do betão foram usados os seguintes dados:

Dosagem de cimento = 350 kg/m^3;

Massa volúmica do cimento = 3160 kg/m^3;

Massa volúmica da brita = 2660 kg/m^3;

Massa volúmica da areia = 2610 kg/m^3.

De referir que os dados usados tiveram por base valores correntes, por impossibilidade de realizar os ensaios da massa volúmica e da absorção de água, dos agregados.

3.4.1.2. Máxima dimensão do agregado

A máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$), é caracterizada pela menor dimensão da abertura do peneiro, da série de peneiros, através da qual passa, pelo menos, 90 % da massa do agregado. Esta é de extrema importância, pois define os parâmetros da curva granulométrica e do tipo de betão que se emprega.

Máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$) = 20 mm

3.4.1.3. Mínima dimensão do agregado

A mínima dimensão do agregado (d_{min}) é caracterizada pela maior dimensão da abertura do peneiro, da série de peneiros, através da qual não passa 5 % da massa do agregado.

Mínima dimensão do agregado (d_{min}) = 0,25 mm

3.4.1.4. Volume de vazios ($\mathbf{V_v}$)

O volume de vazios é o volume de poros, capilares e fraturas (vazios), existente numa amostra de betão, em relação ao volume total da amostra. O volume de vazios calcula-se a partir da máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$) presente no Quadro 25, onde o valor do volume de vazios pode ser obtido de forma imediata, caso contrário será necessário calculá-lo através de uma interpolação com os valores existentes.

Quadro 25 – Volume de vazios do betão em função da máxima dimensão do agregado (adaptado de Sousa Coutinho (1997 b))

Máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$) (mm)	Volume de vazios (V_v) (l/m^3)
10	30
12,5	25
20	20
25	15
40	10

$$V_v = 20\ l/m^3 \quad (5)$$

3.4.1.5. Índice de vazios (***I***)

O índice de vazios é a parte do volume do betão que não é sólido na amassadura, onde normalmente é preenchida por água ou volume de vazios. A expressão geral que dá o índice de vazios para betão armado e não armado é:

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0{,}75} \qquad (6)$$

Com $\frac{R}{D} = \infty$

R – raio médio do molde a betonar (mm);

D - máxima dimensão do agregado.

Os valores de K e K' podem ser estimados de acordo com o Quadro 26, visto serem parâmetros dependentes da trabalhabilidade pretendida para o betão.

Quadro 26 – Valores dos parâmetros K e K' para a determinação do índice de vazios (adaptado de Sousa Coutinho (1997 b))

Trabalhabilidade	Meios de compactação que se podem empregar	Valores de K			Valores de K'
		Natureza do agregado			
		Areia rolada		Areia britada. Agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	0,24	0,25	0,27	0,002
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	0,25 a 0,27	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,003
Plástica	Vibração média	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,30 a 0,34	0,003
Mole	Apiloamento	0,34 a 0,36	0,36 a 0,38	0,38 a 0,40	0,003
Fluida	Espalhamento e compactação pelo próprio peso	≥ 0,36	≥ 0,38	≥ 0,40	≥ 0,004

Valores adotados:

$K = 0{,}38$

$K' = 0{,}003$

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K\prime}{\frac{R}{D} - 0{,}75} \Leftrightarrow I = \frac{0{,}38}{\sqrt[5]{20}} + \frac{0{,}003}{1 - 0{,}75} \Leftrightarrow I = 0{,}22073\ m^3/m^3 = 220{,}73\ l/m^3$$

3.4.1.6. Dosagem de água (A)

$$I = A_{ef} + V_v \Leftrightarrow A_{ef} = I - V_v \quad (7)$$

Onde:

A_{ef} – dosagem de água de amassadura (l/m^3);

I – índice de vazios (l/m^3);

V_v – volume de vazios (l/m^3).

$$A_{ef} = 220{,}73 - 20 \Leftrightarrow A_{ef} = 200{,}73\ l/m^3$$

3.4.1.7. Relação A/C

Segundo Costa, António e Appleton (2002), a razão água-cimento (A/C) é o parâmetro que mais influencia as propriedades do betão. Quanto maior for o seu valor, mais porosa e permeável é a pasta de cimento, tornando o betão menos resistente e mais sensível à ação dos agentes agressivos que originam a deterioração das estruturas.

Tomando o dado inicial da dosagem de cimento e o do teor de água calculado na secção anterior, tem-se:

$$\text{Relação } \frac{A}{C} = \frac{200{,}73}{350} = 0{,}57$$

3.4.1.8. Volume de sólidos

O volume de sólidos engloba o volume de agregados e de cimento.

$$1000 = V_s + I \Leftrightarrow V_s = 1000 - 220{,}73 = 779{,}27\ dm^3/m^3 \quad (8)$$

3.4.1.9. Volume de cimento

Para se calcular a percentagem de areia, é necessário calcular a percentagem de cimento, de modo a podermos separar os finos, a areia e o cimento, que fazem parte da curva granulométrica.

$$V_{abs}\text{Cimento} = \frac{350}{3{,}16} = 110{,}76\ \text{dm}^3/\text{m}^3$$

Percentagem de cimento:

$$\%\ \text{Cimento} = \frac{110{,}76}{779{,}27} = 14{,}21\ \%$$

3.4.2. Curva de referência de Faury

A curva de referência de Faury consiste na determinação de três coordenadas que formam dois segmentos de reta, que são apresentados no diagrama da análise granulométrica da Figura 19. O eixo das abcissas representa as dimensões das partículas, com escala proporcional à raiz quinta das dimensões e o das ordenadas corresponde à percentagem de material que passa por um peneiro de determinada malha.

À menor dimensão das partículas sólidas, as partículas de cimento com a malha 0,0065 mm, corresponde o primeiro ponto. O limite é dado pela máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$). O ponto intermédio, onde muda o declive, corresponde a metade da máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$) e é obtido através da seguinte expressão:

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0{,}75} \qquad (9)$$

onde os parâmetros A e B dependem da natureza dos agregados, do meio de colocação e da consistência do betão Quadro 27.

Quadro 27 – Valores dos parâmetros A e B da curva de referência de Faury(adaptado de Sousa Coutinho (1997 b))

Trabalhabilidade	Meios de compactação que se podem empregar	Valores de A			Valores de B
		Natureza do agregado			
		Areia rolada		Areia britada. Agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Espalhamento e compactação pelo próprio peso	32	34	38	2

Em que:

$D_{máx}$ - máxima dimensão do agregado;

A - parâmetro da trabalhabilidade;

B - parâmetro da compacidade;

R/D – quociente entre o raio médio do molde a betonar (R) e o diâmetro máximo do agregado (D). A relação R/D assume-se como sendo 1, por esta situação ser a mais desfavorável, o que implica que R é igual a D;

$P_{D/2}$ – percentagem de agregado que passa no peneiro, cuja abertura da malha é metade da máxima dimensão do agregado.

Usando estes valores na expressão, temos que:

$$P_{D/2} = 30 + 17\sqrt[5]{20} + \frac{2}{1-0{,}75} \Leftrightarrow P_{D/2} = 68{,}95$$

Depois de calculados os elementos, foram desenhadas as curvas granulométricas dos agregados e traçada a curva de referência no gráfico da Figura 19, de modo a ser determinado o módulo de finura dessa curva como se indica posteriormente no ponto 3.4.2.1.

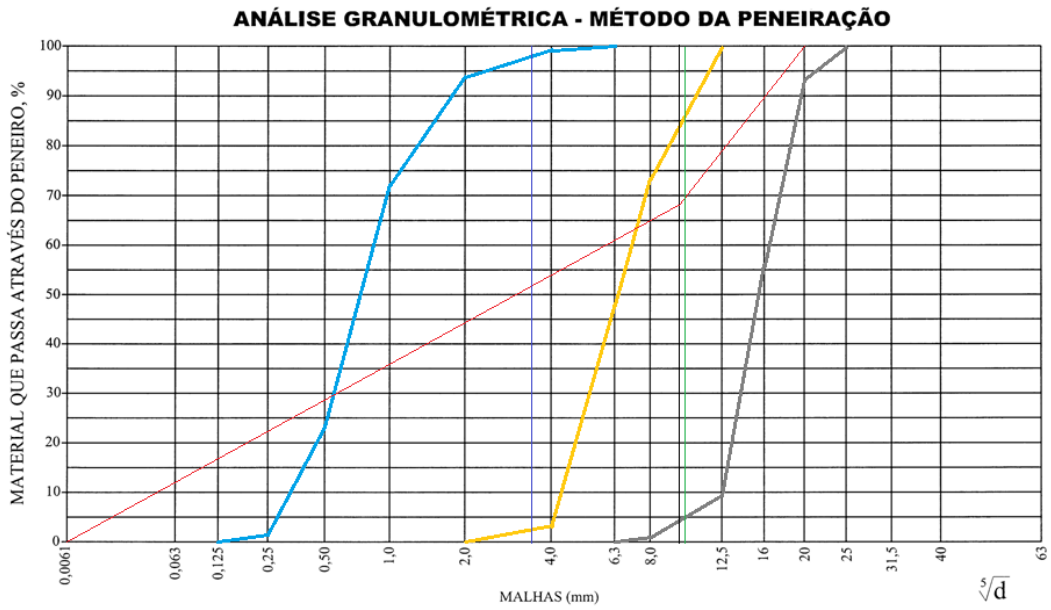


Figura 19 – Análise granulométrica dos agregados

A percentagem da massa dos componentes do betão, retirada do ajustamento das curvas granulométricas, é:

$$\text{Areia} + \text{Cimento} = 51{,}00\ \% \Leftrightarrow \text{Areia} = 51{,}00\ \% - 14{,}21\ \% \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \text{Areia} = 36{,}79\ \% \qquad (10)$$

Brita 2 = 32,00 %

Brita 1 = 17,00 %

Areia = 36,79 %

Cimento = 14,21 %

3.4.2.1. Módulo de finura da curva de referência

O módulo de finura determina-se através da soma das percentagens totais que ficam retidas em cada peneiro da série normal. Esta série é o conjunto de peneiros com abertura de malha correspondente à progressão geométrica de razão 2, iniciada no

peneiro com abertura de malha 0,0125 mm, e estende-se até à máxima dimensão do agregado.

$$\frac{11 + 36 + 42 + 56 + 64 + 72 + 77 + 83}{100} = 4{,}41$$

3.4.2.2. Ajustamento das quantidades de agregados à curva de referência

Como o módulo de finura da curva de referência é de 4,41, a qual não correspondia à da mistura determinada, foram feitos ajustamentos da mistura granulométrica através da seguinte expressão:

$$0{,}4019\ \text{Areia} + 0{,}186\ \text{Brita 1} + 0{,}27\ \text{Brita 2} \qquad (11)$$

3.4.2.3. Composição centesimal

Para calcular o peso dos agregados é necessário determinar a sua composição centesimal:

$$\%\ \text{Areia} = \frac{40{,}19}{100 - 14{,}21} \times 100 = 46{,}85\ \%$$

$$\%\ \text{Brita 1} = \frac{18{,}6}{100 - 14{,}21} \times 100 = 21{,}68\ \%$$

$$\%\ \text{Brita 2} = \frac{27}{100 - 14{,}21} \times 100 = 31{,}47\ \%$$

3.4.2.4. Quantidades dos agregados por metro cúbico

Multiplicando a composição centesimal pelo volume total do agregado e a sua massa volúmica, obtém-se o peso dos componentes por metro cúbico de betão.

$$V_{\text{abs agr}} = V_s - V_{\text{abs cim}} = 779{,}27 - 110{,}76 = 668{,}51\ \text{kg/m}^3 \qquad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Areia} = & \ \%\ \text{Areia composição centesimal} \times V_{\text{abs agr}} \times \rho_{\text{areia}} \\ & = 0{,}4685 \times 668{,}51 \times 2{,}61 = 817{,}44\ \text{kg/m}^3 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \text{Brita 1} = & \ \%\ \text{Brita 1 composição centesimal} \times V_{\text{abs agr}} \times \rho_{\text{brita}} \\ & = 0{,}2168 \times 668{,}51 \times 2{,}66 = 385{,}52\ \text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Brita 2} = & \ \%\ \text{Brita 2 composição centesimal} \times V_{\text{abs agr}} \times \rho_{\text{brita}} \\ & = 0{,}3147 \times 668{,}51 \times 2{,}66 = 559{,}61\text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

3.4.2.5. Composição do betão

Apresenta-se de seguida as composições por metro cúbico de betão:

$$\text{Areia} = 817{,}45\ \text{kg/m}^3$$
$$\text{Brita 1} = 385{,}52\ \text{kg/m}^3$$
$$\text{Brita 2} = 559{,}61\ \text{kg/m}^3$$
$$\text{Cimento} = 350{,}00\ \text{kg/m}^3$$
$$\text{Água} = 200{,}73\ \text{l}$$

Para as amassaduras em estudo, tendo em conta que se utilizaram três cubos de 150 mm de aresta, calcularam-se quantidades de betão para esta amostra com um acréscimo de 20 % para desperdícios.

$$\text{Areia} = 9{,}93\ \text{kg}$$
$$\text{Brita 1} = 4{,}68\ \text{kg}$$
$$\text{Brita 2} = 6{,}80\ \text{kg}$$
$$\text{Cimento} = 4{,}25\ \text{kg}$$
$$\text{Água} = 2{,}20\ \text{l}$$

As quantidades, por fração granulométrica, de agregados utilizadas em cada amassadura de betão, são apresentadas no Anexo F.

3.5. Processo de amassadura

Segundo Coutinho (1997b), a finalidade principal da amassadura é revestir a superfície de todas as partículas do agregado com pasta de cimento e levar todos os componentes do betão a formar um todo homogéneo. Esta uniformidade não deve ser perturbada pela descarga do betão do equipamento que promove a sua amassadura.

A amassadura pode ser manual ou mecânica. A manual está praticamente já fora de aplicação, pois somente é tolerável em pequenas obras, em que não há necessidade de produzir mais de 1 a 2 m^3 de betão por hora. O betão obtido é menos homogéneo do que o fabricado mecanicamente.

3.5.1. Amassadura mecânica

Este procedimento de amassadura é o mais utilizado presentemente, empregando-se em geral misturadoras a que se dá o nome de betoneiras. A betoneira utilizada neste ensaio foi a de eixo com inclinação variável. De acordo com Coutinho (1997b), este tipo de betoneiras possui tambor rotativo, provido no interior de placas dispostas helicoidalmente que asseguram a mistura. Quando o eixo de rotação é horizontal, a descarga faz-se por inversão do sentido da rotação ou pela colocação de uma calha que apara o betão e o conduz para fora e, quando tem inclinação variável, por variação desta inclinação.

As betoneiras de eixo inclinável são dotadas de tambor, em geral cónico, com placas helicoidais no interior. A eficiência da operação da amassadura depende da forma e conceção destas placas, mas a descarga faz-se sempre em boas condições, pois o betão sai rapidamente num todo homogéneo e não segregado, logo que se inclina o eixo de rotação para o lado pretendido. Por tal razão, as betoneiras deste tipo são preferíveis para os betões com trabalhabilidade reduzida e para os que contêm agregados de grandes dimensões.

Na Figura 20 está representada a betoneira utilizada para os ensaios e para a produção do betão.



Figura 20 – Betoneira da ULHT

3.5.1.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se, como aparelhos e utensílios, uma estufa ventilada controlada por termóstato de modo a manter uma temperatura de (110 ± 5) °C; uma betoneira de eixo com inclinação variável; uma colher; tabuleiros e um cronómetro.

3.5.1.2. Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Colocar o provete de ensaio numa estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 º C até atingir uma massa constante (Pesagens sucessivas após secagem com pelo menos 1 hora de intervalo e não diferindo de 0,1 %).
2. Pesar os agregados naturais até atingirem os pesos pretendidos.
3. Colocar os agregados na betoneira, dos mais grossos para os mais finos.
4. Acionar a betoneira (a amassadura teve a duração total de 3 minutos).
5. Adicionar água enquanto a betoneira está em funcionamento.
6. Enviar o betão já misturado para uma caixa antes da realização dos ensaios ao comportamento do betão fresco.

3.5.2. Amassadura manual

Este tipo de amassadura, como foi referido anteriormente, já praticamente não se utiliza para o fabrico de betão. No entanto, quando usada, deve ser realizada numa superfície plana, dura, limpa e não absorvente. A ordem de colocação dos agregados passa dos mais grossos para os mais finos, sendo o cimento colocado depois dos agregados.

3.5.2.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se, como aparelhos e utensílios; uma estufa ventilada controlada por termóstato de modo a manter uma temperatura de (110 $\pm$ 5) °C; uma betoneira de eixo com inclinação variável; uma placa/superfície não absorvente, rígida, plana, sobre a qual é colocado o betão; uma colher; uma pá e um cronómetro.

3.5.2.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Realizar um procedimento normal sem o agregado reciclado de vidro.
2. Verter o betão para o solo para se adicionar o agregado reciclado de vidro de acordo com a dosagem prevista.
3. A partir deste momento, misturar o conjunto manualmente com recurso a uma pá (Figura 21).

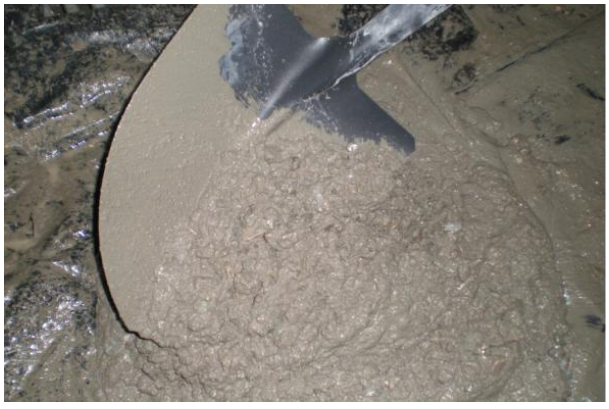


Figura 21 – Pá usada durante a amassadura manual

3.6. Determinação no betão

3.6.1. Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio é realizado segundo a norma NP EN 12350-2 (2009), que específica um método para determinação da consistência do betão fresco.

O objetivo deste ensaio é a medição da trabalhabilidade, que é essencial para caracterizar a classe de consistência do betão. A trabalhabilidade indica a propriedade do betão nesta fase, que associa a maior ou menor facilidade de transporte, colocação, consolidação e acabamento.

O betão é compactado no interior de um molde com a forma troncocónica. Quando o cone é removido, subindo-o, o abaixamento do topo do cone de betão estabelece a medida da sua consistência.

3.6.1.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se, como aparelhos e utensílios, uma molde em metal, com pelo menos 1,5 mm de espessura e duas pegas perto do topo. O seu interior deve ser liso e convenientemente retificado, sem rebites e/ou mossas. Deve ter uma forma troncocónica e as seguintes dimensões internas:

- diâmetro interno da base: 200 ± 2 mm;
- diâmetro interno do topo: 100 ± 2 mm;
- altura: 300 ± 2 mm.

Utilizaram-se ainda um varão de compactação – secção transversal circular, com diâmetro de: 16 ± 1 mm e comprimento de 600 ± 5 mm e extremidades arredondadas; uma régua graduada de 0 a 300 mm, com divisões menores ou iguais a 5 mm e o zero marcado numa extremidade da mesma; uma placa/superfície – não absorvente, rígida, plana, placa ou outra superfície, sobre a qual é colocado o molde; uma colher; uma pá; um pano molhado e um cronómetro.

3.6.1.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Durante o enchimento, manter o molde fixo contra a placa.

2. Fazer o enchimento do molde por três camadas, tendo cada uma um terço da altura do molde aproximadamente e compactar com 25 pancadas através do varão de compactação, sendo estas distribuídas uniformemente por toda a secção transversal de cada camada.
3. Depois de compactar, rasar a superfície de modo a ficar lisa.
4. Remover o molde, subindo-o cuidadosamente na vertical sem transmitir movimentos laterais ou torsionais ao betão.
5. Realizar a operação especificada no ponto anterior num espaço de tempo compreendido entre 5 a 10 segundos, de modo a que todas as operações desde o início até ao fim do ensaio não demorem mais de 150 segundos.
6. Após a remoção do molde, medir em milímetros e registar o abaixamento (h), determinando a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do provete que baixar.

Na Figura 22 está representada a sequência do ensaio de abaixamento.

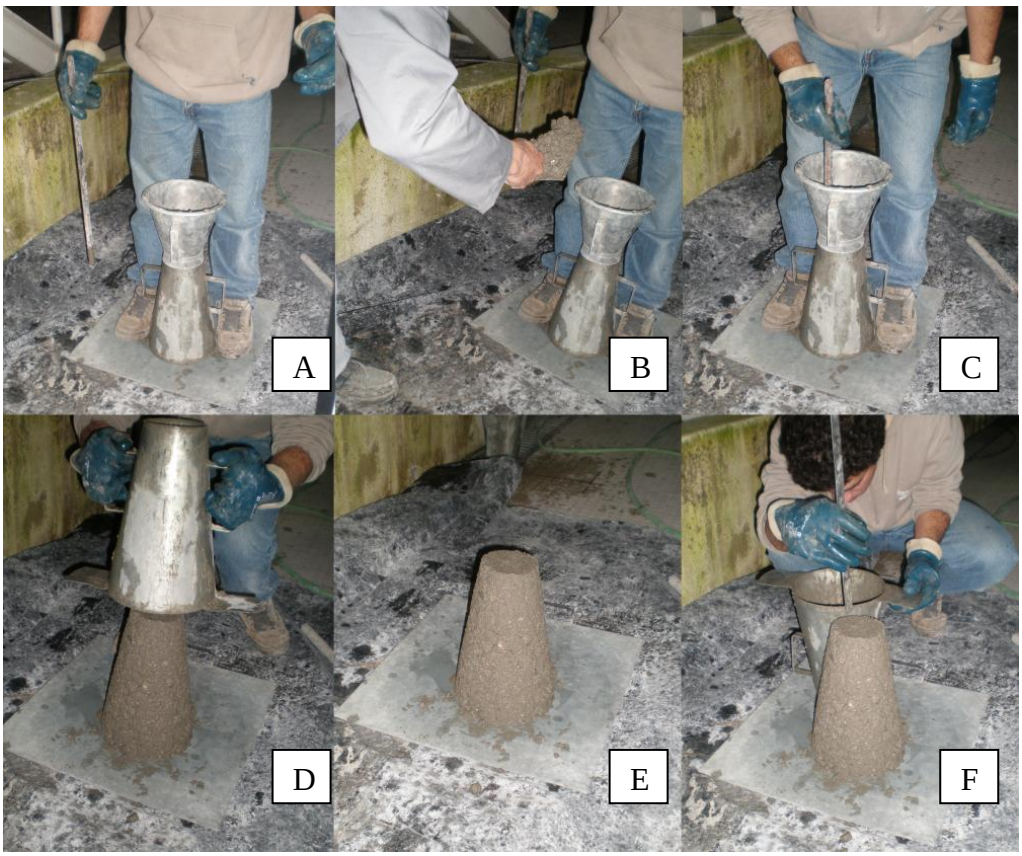


Figura 22 – Sequência do ensaio de abaixamento

3.6.1.3. Resultados

O ensaio só é válido no caso de se verificar um abaixamento verdadeiro, no qual o betão permaneça substancialmente intacto e simétrico de acordo com a Figura 23 (a). Caso se verifique uma forma como a da Figura 23 (b), deve-se recolher outra amostra e repetir o procedimento.

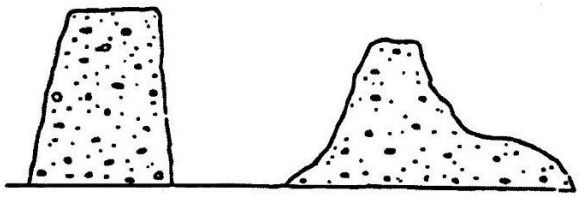


Figura 23 – Formas de abaixamento (NP EN 12350-2 (2009))

A NP EN 206-1 (2007) considera cinco classes de consistência, correspondentes a betões duros, plásticos, moles, fluidos e muito fluidos, apresentadas no Quadro 28.

Quadro 28 - Abaixamento do cone de Abrams – Classes de abaixamento (NP EN 206-1 (2007))

Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	Superior a 210

3.6.2. Moldagem de provetes

Dada a reduzida capacidade da betoneira, foram realizadas diferentes amassaduras para cada conjunto de provetes a serem ensaiados a uma idade específica.

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Antes do início da moldagem dos moldes (moldes com dimensão de 150x150x150 mm^3), limpar e untar os moldes com óleo descofrante, e assentá-los numa superfície lisa, horizontal e firme.

2. Encher o molde em 2 fases, com compactação através da agulha vibratória.
3. Rasar o provete.
4. Identificar os provetes nos moldes.
5. Após a moldagem, conservar os provetes ao ar, no laboratório durante 24 horas.
6. Após o período de 24 horas, desmoldar os provetes de betão e identificá-los devidamente, e colocá-lo dentro de água num tanque até ao dia de ensaio.

Na Figura 24 estão representadas as etapas de enchimento de um molde com betão e provetes após a desmoldagem.



Figura 24 – Etapas de moldagem dos provetes. A – Molde de 150 mm de aresta; B – Molde após passagem do óleo descofrante; C e E – Enchimento do molde por camadas; D e F – Vibração do betão (agulha vibratória); G – Rasar a superfície do molde; F – Moldes com enchimento finalizado; I – Provetes após desmoldagem e identificação; J e K – Provetes dentro do tanque de água; L – Provetes após serem retirados do tanque de água.

3.6.3. Quantidade de água que o betão acumula durante a conservação

A variação da quantidade de água absorvida durante a conservação do betão no estado endurecido pode ser usada como um indicador da sua compacidade, da percentagem de vazios existentes no betão.

O ensaio não foi realizado de acordo com qualquer norma. A massa de cada um dos provetes foi pesada antes da sua colocação no tanque de água, e depois os provetes foram pesados de novo, quando retirados do tanque para os ensaios das características do betão endurecido. Define-se, neste trabalho, que a diferença da massa final e a inicial corresponde à quantidade de água que cada provete acumulou durante a conservação.

3.6.3.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se, os seguintes aparelhos e utensílios: Régua de precisão; balança com precisão de $\pm$ 0,1 % da massa do provete (Figura 25); tanque de água e pano.

3.6.3.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Depois de descofrar o provete, pesar e registar a massa como m_1.
2. Colocar o provete no tanque de água durante as idades de cura pretendidas, 2, 7 e 28 dias.
3. Retirar o provete do tanque de água, limpar a água em excesso com um pano, e pesar, registar a massa como m_2.

3.6.3.3. Resultados

$$Quantidade\ de\ água\ acumulada = m_2 - m_1 \quad (14)$$

Onde:

m_1 - massa inicial

m_2 - massa final

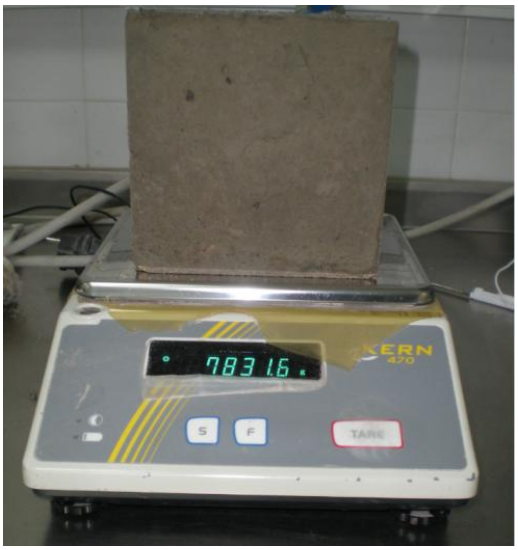


Figura 25 – Pesagem de um provete (balança)

3.6.4. Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi realizado de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007) e com o auxílio de um equipamento de ultrassons.

Segundo Figueiras, J & Rio, J. (2012), este equipamento inclui dois transdutores piezoeléctricos, que funcionam respetivamente como transmissor e recetor, um gerador de sinal e um sistema de aquisição e processamento de sinal, todos integrados numa mesma unidade. O sinal transmitido é constituído por um conjunto de impulso de variação de voltagem elétrica com 53 kHz de frequência central e amplitude até 1 kV, que o transdutor transmissor, em contacto com o betão, transforma em ondas mecânicas. Estas ondas, por sua vez, são propagadas pelo interior ou superfície do betão, conforme o caso, excitando o transdutor recetor, quando o encontram, o qual transforma as ondas mecânicas de volta em sinal elétrico. A unidade de geração, aquisição e processamento de sinal, compara os sinais elétricos transmitidos e recebidos e calcula o tempo de propagação (ver Figura 26).

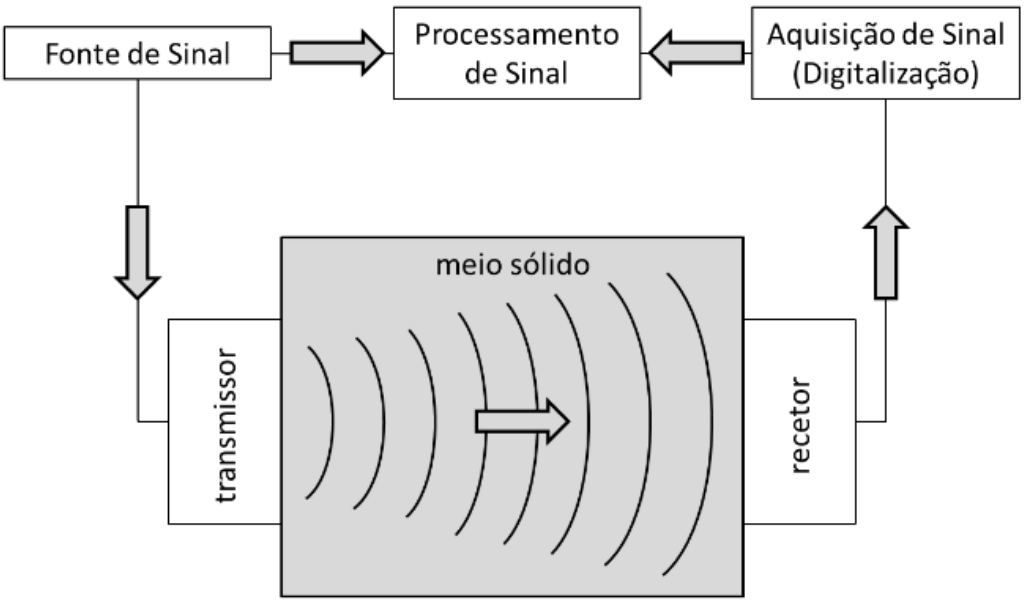


Figura 26 – Esquema de funcionamento do ensaio de ultrassons (Figueiras, J & Rio, J. (2012))

3.6.4.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizou-se um aparelho de medida da velocidade dos ultrassons.

3.6.4.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Ligar o aparelho de ultrassons (Figura 27).
2. Fornecer uma barra de referência para facultar o ajuste do zero do aparelho (o tempo de passagem da barra está inscrito na própria barra, sendo neste caso de 42,5 microssegundos).
3. Aplicar um pouco de massa nos transdutores antes de colocar as faces junto da barra.
4. Ajustar o SET RET de modo a coincidir com o valor da barra (42,5 microssegundos).
5. Fazer a leitura do tempo do aparelho (o PUNDIT indica o tempo do primeiro impulso recebido no transdutor recetor).
6. Medir a distância entre os transdutores.



Figura 27 – Ensaio de ultrassons

3.6.4.3. Resultados

A velocidade de propagação dos ultrassons é dada da seguinte forma:

$$\text{Velocidade} = \frac{\text{Distância (km)}}{\text{Tempo (s)}} \tag{15}$$

3.6.5. Ensaio do esclerómetro

O ensaio não destrutivo do esclerómetro (Figura 28 e Figura 29), aplicado de acordo com a norma NP EN 12504-2 (2012), tem como princípio "uma massa impelida por uma mola embate num percutor em contacto com a superfície e o resultado do ensaio é expresso em termos da distância repercutida pela massa", que determina um valor em kN, chamado de índice esclerométrico. Este tem como vantagem, para avaliações de resistências, como o de ultrassons, poder ser usado *in situ*, em que é avaliada a sua dureza superficial, sendo o valor obtido posteriormente correlacionado empiricamente com a resistência à compressão.

De acordo com Cruz (s.d.), com o aparelho afinado, os resultados obtidos podem, mesmo assim, vir afetados de erros que variam entre 0 % e 20 %.

Este tipo de ensaio é extremamente útil para se avaliar, de modo expedito e com qualquer idade, a homogeneidade do betão aplicado em obra.

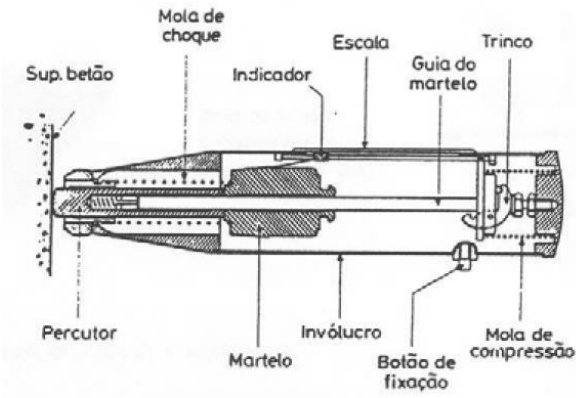


Figura 28 – Esquema do esclerómetro de Schmidt (NP EN 12504-2 (2012))

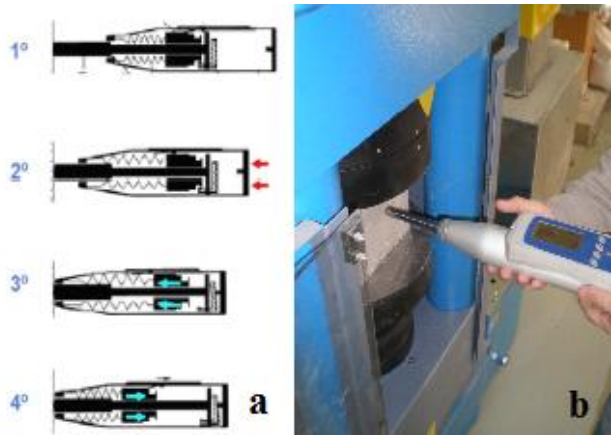


Figura 29 – Ensaio esclerométrico: a) esquema de funcionamento do esclerómetro (Pires, S. (2011)), b) Esclerómetro durante o ensaio

3.6.5.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se os seguintes aparelhos e utensílios: prensa hidráulica; martelo de Schmidt ou esclerómetro e provete.

3.6.5.2. Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Remover a água presente na superfície do betão.
2. Usar o esclerómetro nesta operação, em conformidade com as instruções do fabricante.
3. Ativar no mínimo 3 vezes antes de efetuar qualquer leitura, para garantir que este está a trabalhar corretamente.

4. Trabalhar o esclerómetro a temperaturas dentro da gama de 10 °C e 25 °C.
5. Colocar o provete na prensa hidráulica de modo a possibilitar a realização deste ensaio.
6. Manter firme o esclerómetro numa posição que permita o percutor embater perpendicularmente na superfície que está a ser ensaiada.
7. Aumentar gradualmente a pressão do percutor até que se dê o impacto do esclerómetro.
8. Após o impacto, registar o índice esclerométrico.
9. Usar 10 leituras para obter um valor fiável para cada conjunto de leituras.
10. Registar a posição e orientação do esclerómetro para cada conjunto de leituras.
11. Assegurar que quaisquer 2 pontos de impacto estão afastados mais de 25 mm e que nenhum está a menos de 25 mm da margem.
12. Examinar cada impressão efetuada na superfície após o impacto e, se o impacto esmagar ou partir em vazios perto da superfície, eliminar o resultado.

3.6.5.3. Resultados

O resultado deve ser tomado como a mediana de todas as leituras.

3.6.6. Resistência à compressão

A norma NP EN 12390-3 (2011) define a metodologia a usar nos ensaios do betão endurecido, mais concretamente, a resistência à compressão dos provetes de ensaio.

Este ensaio é o mais importante do betão endurecido, pois é a propriedade que mais habitualmente se avalia para caracterizar o betão, bem como para verificar a sua conformidade.

Durante este ensaio destrutivo, o betão é sujeito a uma força uniaxial uniforme de compressão, numa prensa hidráulica, de forma crescente no tempo, até que o betão atinja o seu ponto de rotura, sendo esse valor o que se regista.

A norma NP EN 206-1 (2007) indica que, para ser determinada a resistência a compressão, os provetes devem respeitar a norma NP EN 12390-1 (2012), podendo ser cúbicos e com arestas de 150 mm (Figura 30).



Figura 30 – Ensaio à compressão de um cubo de aresta igual a 150 mm

3.6.6.1. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio, utilizaram-se como aparelhos e utensílios, uma balança com precisão de $\pm$ 0,1 % da massa do provete; uma máquina de ensaios de compressão; provetes cúbicos e um pano de limpeza dos provetes.

3.6.6.2. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Retirar o provete do tanque de água.
2. Limpar a superfície do provete, retirando o excesso de humidade.
3. Pesar e registar a massa final do provete.
4. Limpar todas as superfícies da máquina de ensaio.
5. Posicionar os provetes cúbicos para que a carga seja aplicada perpendicularmente à direção de moldagem.
6. Centrar o provete relativamente ao prato inferior.
7. Aplicar a carga.
8. Registar os valores máximos da resistência à compressão para os diferentes tipos de betão e idades de cura.

3.6.6.3. Avaliação do tipo de rotura

Após a rotura dos provetes, é necessário verificar a validade do ensaio, verificando visualmente qual a rotura representada na Figura 31, para satisfatória, e Figura 32, para não satisfatória.

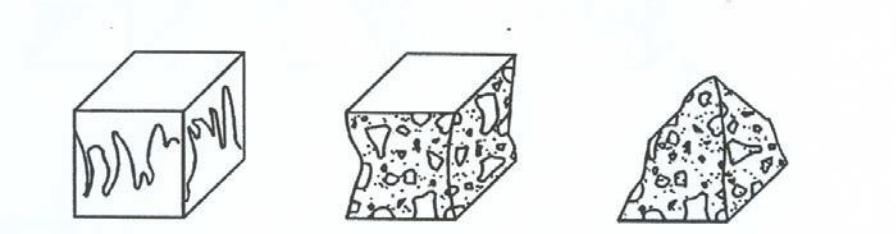


Figura 31 – Roturas satisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2012)

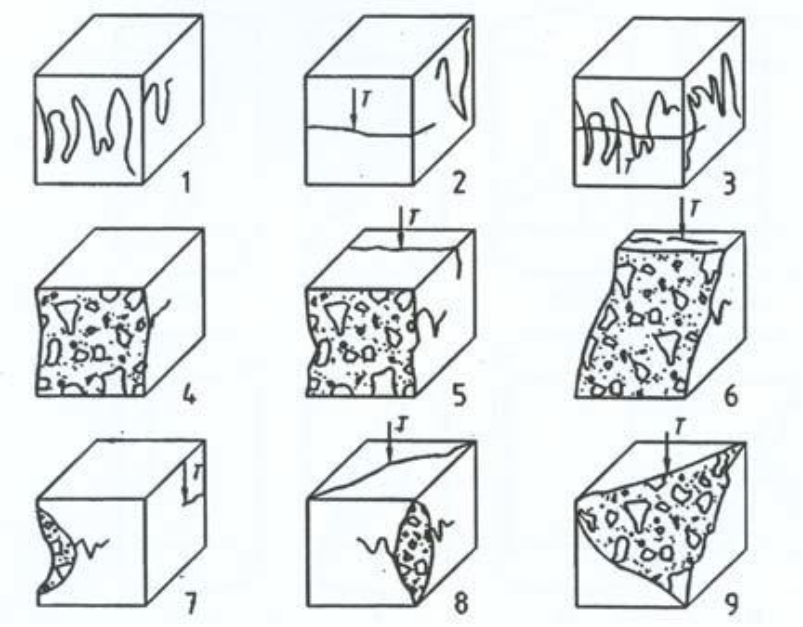


Figura 32 – Roturas não satisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2012)

3.6.6.4. Resultados

A resistência à compressão de cada provete é dada pela seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \tag{16}$$

Onde:

f_c – resistência à compressão (MPa ou N/mm^2);

F – carga máxima à rotura (N);

A_c – área de secção transversal do provete na qual a força de compressão é aplicada (mm^2).

Na Figura 33 está representado um provete durante e outro após o ensaio de compressão.

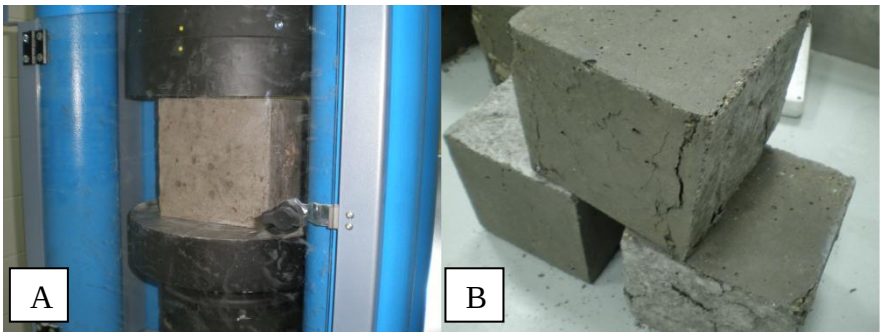


Figura 33 – A – Provete durante o ensaio de compressão; B – Provete após ensaio de compressão.

4. Apresentação e discussão dos resultados do trabalho experimental

4.1. Introdução

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o trabalho experimental.

4.2. Agregados

Nesta secção, são apresentados e discutidos os diversos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados, referentes à caracterização dos agregados dos diversos betões em estudo. São descritos os ensaios da análise granulométrica, da massa volúmica ou baridade, o desgaste dos agregados na betoneira e o desgaste de *Los Angeles*.

4.2.1. Análise granulométrica

Como já foi referido no ponto 3.3.1, este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 933-1 (2014).

Neste ponto, são apresentados os resultados obtidos através da análise granulométrica dos agregados naturais utilizados, para posterior cálculo da composição pelo método de Faury. As folhas de registos dos ensaios são apresentadas no Anexo B.

4.2.1.1. Areia

No Quadro 29 é apresentada a análise granulométrica da areia, a sua massa total retida, a percentagem de massa retida e os acumulados das percentagens de material passado e retido em cada peneiro, bem como o seu módulo de finura. Na Figura 34, está representada a curva granulométrica da areia.

Quadro 29 – Análise granulométrica da areia

			Acumulado	
Abertura malha (mm)	**Massa retida Total (g)**	**%**	**% passado**	**% retido**
6,3	0	0,0	100,0	0,0
4	1,8	0,7	99,3	0,7
2	12,1	4,9	94,3	5,7
1	54,5	22,3	72,1	27,9
0,5	118,9	48,6	23,5	76,5
0,25	55,4	22,6	0,9	99,1
0,125	2	0,8	0,1	99,9
0,063	0,2	0,1	0,0	100,0
Refugo	0	**Módulo Finura:**		**3,10**
Total	244,9			

4.2.1.2. Brita 1

No Quadro 30 é apresentada a análise granulométrica da brita 1, a sua massa total retida, a percentagem de massa retida e os acumulados das percentagens de material passado e retido em cada peneiro, bem como o seu módulo de finura. Na Figura 34, está representada a curva granulométrica da brita 1.

Quadro 30 – Análise granulométrica da brita 1

			Acumulado	
Abertura malha (mm)	**Massa retida Total (g)**	**%**	**% passado**	**% retido**
14	0	0,0	100,0	0,0
12,5	11,7	0,6	99,4	0,6
10	182,0	10,0	89,3	10,7
8	283,6	15,6	73,7	26,3
6,3	458,5	25,3	48,5	51,5
4	821,3	45,2	3,2	96,8
2	55,9	3,1	0,2	99,8
1	1,4	0,1	0,1	99,9
0,5	0,6	0,0	0,0	100,0
0,25	0,5	0,0	0,0	100,0
0,125	0,2	0,0	0,0	100,0
0,063	0,1	0,0	0,0	100,0
Refugo	0,02	**Módulo Finura:**		**6,23**
Total	1815,82			

4.2.1.3. Brita 2

No Quadro 31 é apresentada a análise granulométrica da brita 2, a sua massa total retida, a percentagem de massa retida e os acumulados das percentagens de material passado e retido em cada peneiro, bem como o seu módulo de finura. Na Figura 34, está representada a curva granulométrica da brita 2.

Quadro 31 – Análise granulométrica da brita 2

			Acumulado	
Abertura malha (mm)	**Massa retida Total (g)**	**%**	**% passado**	**% retido**
25	0	0,0	100,0	0,0
20	427,4	6,1	93,9	6,1
16	2665,7	38,3	55,6	44,4
14	1944,5	27,9	27,7	72,3
12,5	1248,6	17,9	9,8	90,2
10	551,4	7,9	1,9	98,1
8	72,4	1,0	0,8	99,2
6,3	32,6	0,5	0,4	99,6
4	17,2	0,2	0,1	99,9
2	2,3	0,0	0,1	99,9
1	0,5	0,0	0,1	99,9
0,5	0,5	0,0	0,1	99,9
0,25	1,3	0,0	0,0	100,0
0,125	1	0,0	0,0	100,0
0,063	0,8	0,0	0,0	100,0
Refugo	1,6	**Módulo Finura:**		**7,43**
Total	6967,8			

4.2.1.4. Curvas granulométricas dos agregados naturais

Na Figura 34, estão representadas as curvas granulométricas dos agregados naturais. No eixo das abcissas, encontra-se a dimensão das partículas numa escala de raiz quinta e, no eixo das ordenadas, a percentagem de material que passa em cada peneiro.

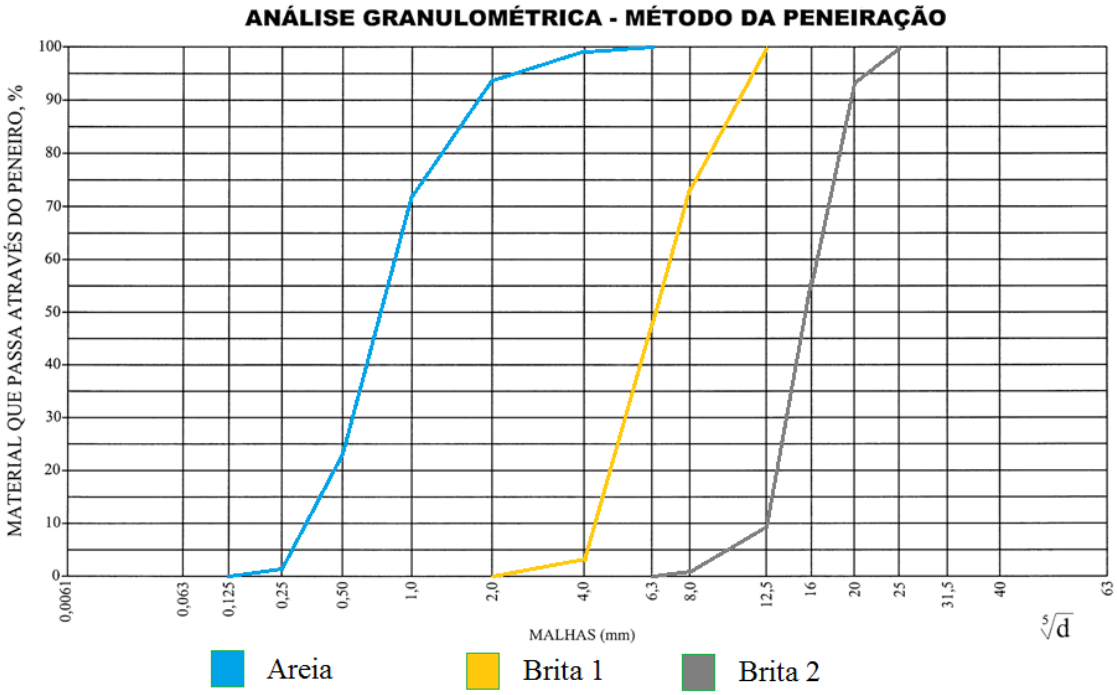


Figura 34 – Análise granulométrica dos agregados naturais

4.2.2. Massa volúmica aparente ou baridade

A massa volúmica aparente ou baridade seguiu a norma NP EN 1097-3 (2002).

No Quadro 32, são apresentados os valores obtidos na média das 3 amostras realizadas por agregado. Os resultados dos cálculos intermédios podem ser consultados no Anexo C.

Quadro 32 – Baridades dos agregados

	Areia	Brita 1	Brita 2	Vidro
$\rho_b(\mathrm{Mg}/m^3)$	1,49	1,38	1,42	1,35

Comparando os valores da baridade do vidro com os das britas, verifica-se que a baridade do vidro é menor, o que se deve essencialmente à sua menor massa volúmica. Em relação à areia, o seu valor da baridade é superior devido à maior continuidade da sua curva granulométrica, o que favorece um melhor rearranjo das partículas.

4.2.3. Ensaio de desgaste dos agregados na betoneira

Este ensaio não seguiu qualquer norma, foi realizado em 3 amostras por agregado e os resultados intermédios podem ser consultados no Anexo D.

4.2.3.1. Análise granulométrica dos agregados sujeitos ao desgaste na betoneira

Analisando as curvas granulométricas nos diversos tempos a que foi sujeito cada agregado, conclui-se que este ensaio permitiu ter uma perceção de quando e quanto se desgastam os agregados. Para uma melhor visualização desse desgaste, apresenta-se a curva granulométrica de cada agregado, correspondente a cada ensaio de desgaste. Posteriormente, foi representada a zona entre os peneiros 10 e 14 mm, pois é neste intervalo que se encontra o maior desgaste dos agregados, neste ensaio.

4.2.3.1.1. Análise granulométrica do agregado reciclado de vidro

De modo a ser percetível o desgaste físico causado pelo desgaste da betoneira, no agregado reciclado de vidro, apresenta-se a Figura 35.

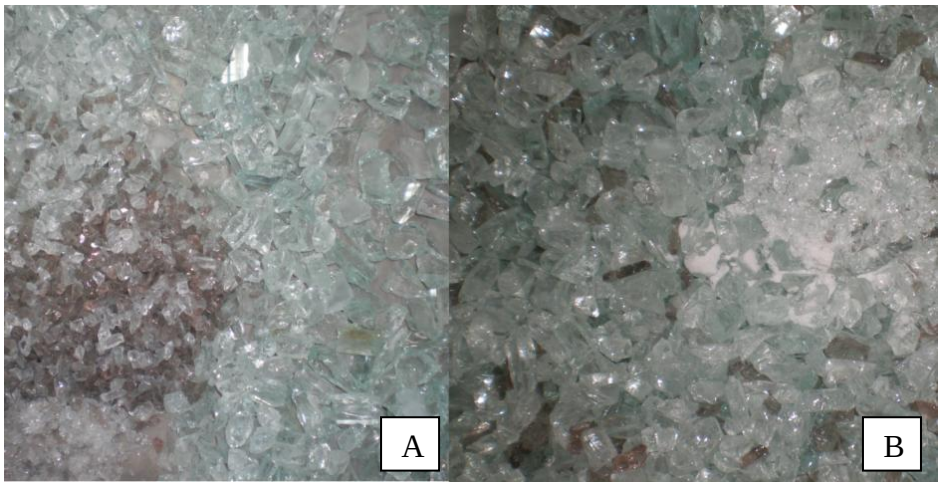


Figura 35 – A – Aspeto inicial do ARV; B - Aspeto final do ARV

Na Figura 36, está representada graficamente a análise granulométrica do agregado reciclado de vidro. Na Figura 37, representam-se em pormenor as curvas granulométricas no intervalo entre os peneiros 10 e 14 mm.

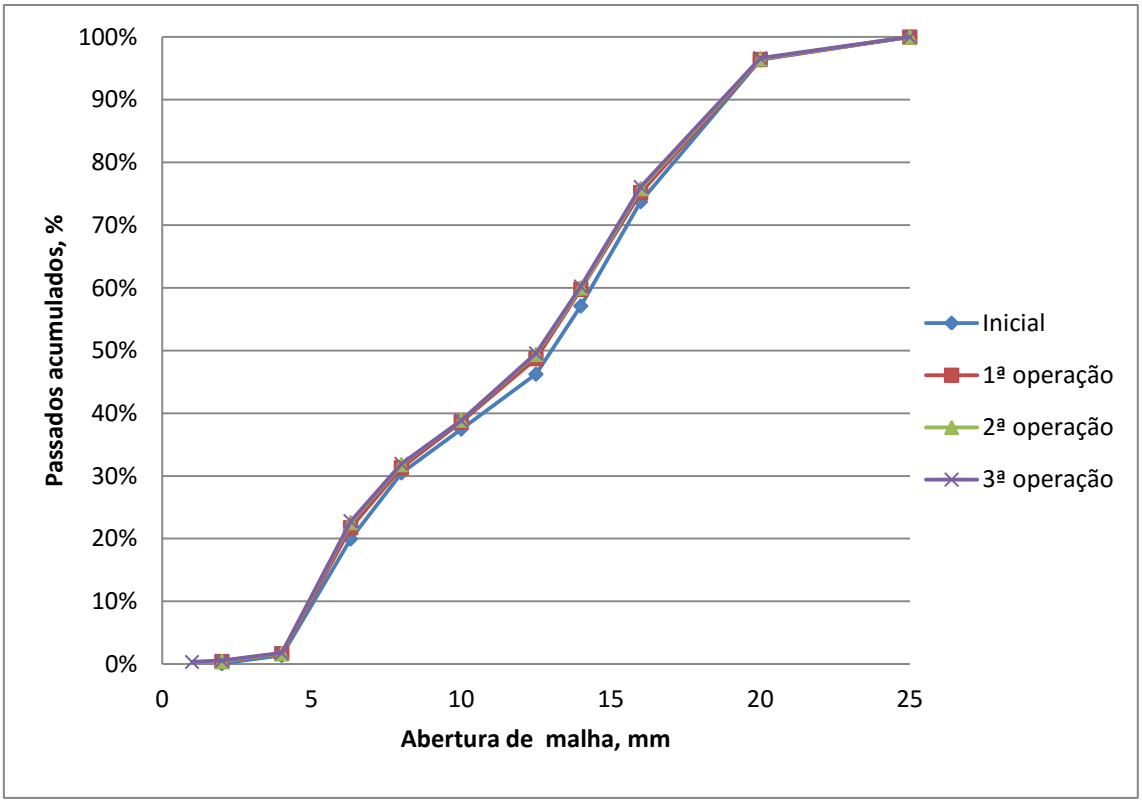


Figura 36 – Análise granulométrica do ARV

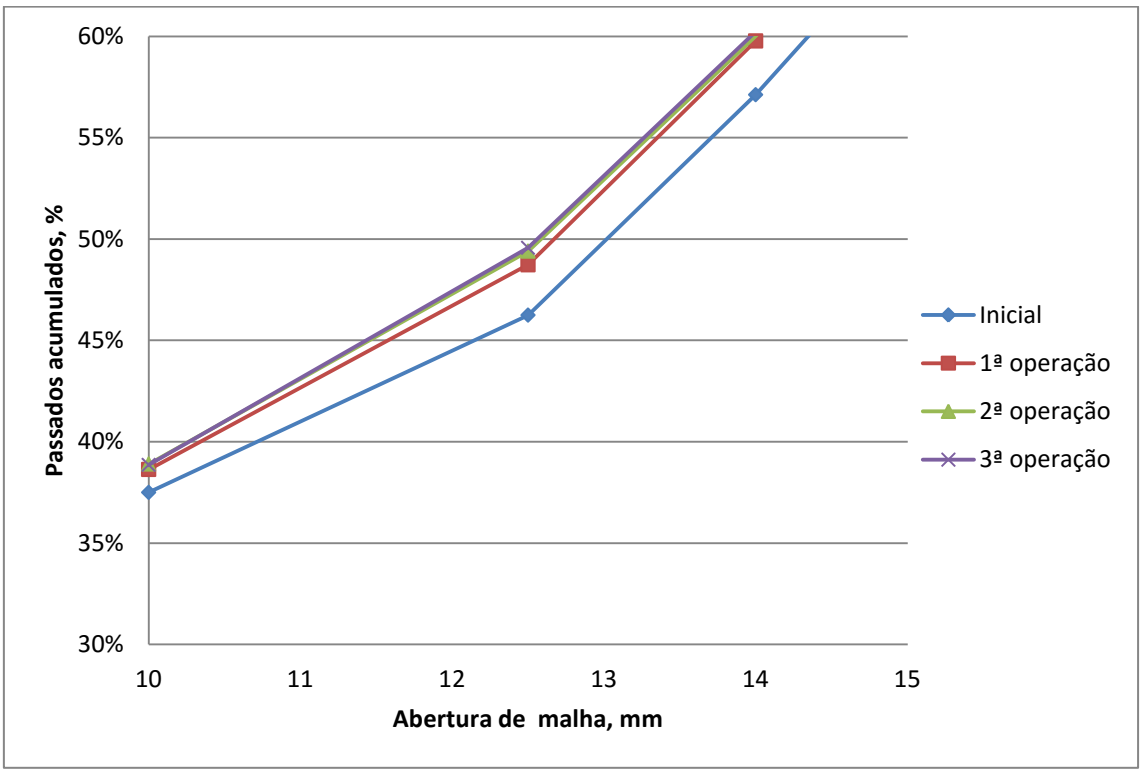


Figura 37 – Pormenor da análise granulométrica do ARV

4.2.3.1.2. Análise granulométrica do agregado natural britado

De modo a ser percetível o desgaste físico causado pelo desgaste da betoneira no agregado natural britado, apresenta-se a Figura 38.

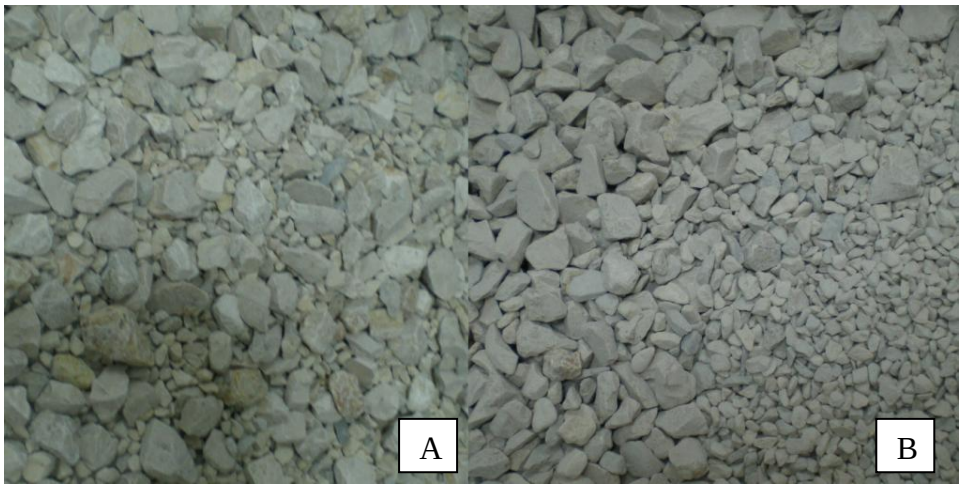


Figura 38 – A – Aspeto inicial do ANB; B - Aspeto final do ANB

Na Figura 39, está representada graficamente a análise granulométrica do agregado natural britado. Na Figura 40, representam-se em pormenor as curvas granulométricas no intervalo entre os peneiros 10 e 14 mm.

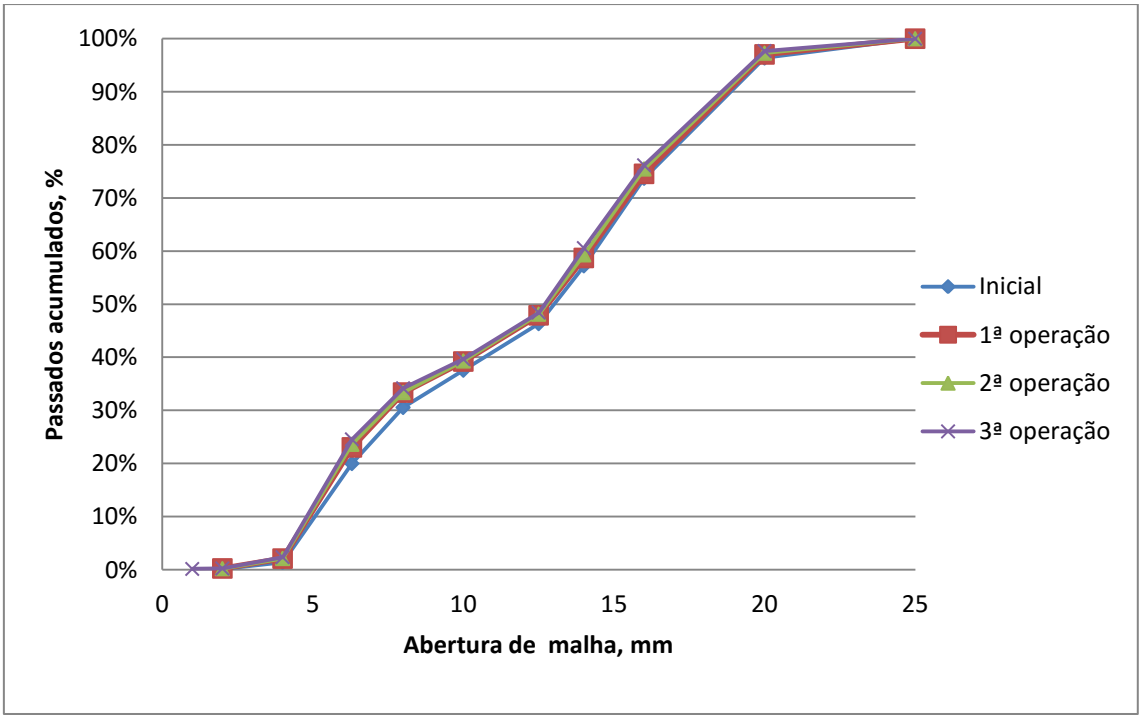


Figura 39 – Análise granulométrica do ANB

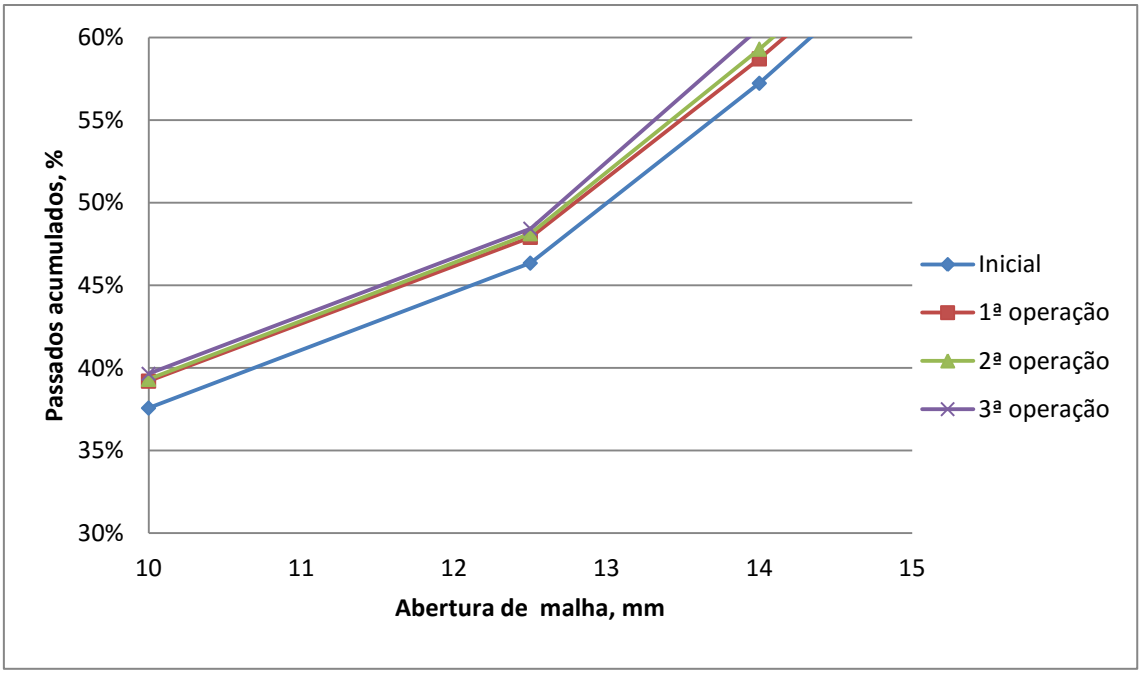


Figura 40 – Pormenor da análise granulométrica do ANB

4.2.3.1.3. Análise granulométrica do agregado reciclado de vidro com 7,5 kg de agregado natural britado com granulometria entre os peneiros 20 e 25 mm

De modo a ser percetível o desgaste físico causado pelo desgaste da betoneira, no agregado reciclado de vidro e nos 7,5 kg de agregado natural britado com granulometria entre os peneiros 20 e 25 mm (ANB [20;25]), quando ensaiados em conjunto, apresenta-se a Figura 41.

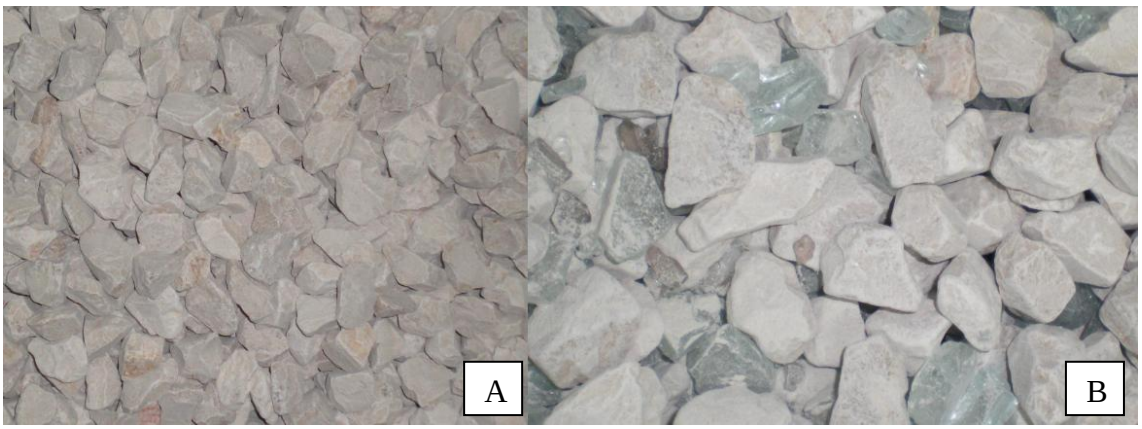


Figura 41 – A – Aspeto inicial do ANB [20;25]; B – Aspeto final dos ARV e ANB [20;25]

Na Figura 42, está representada graficamente a análise granulométrica do agregado reciclado de vidro, quando ensaiado em conjunto com os 7,5 kg de agregado natural britado com granulometria entre os peneiros 20 e 25 mm. Na Figura 43, representam-se em pormenor as curvas granulométricas no intervalo entre os peneiros 10 e 14 mm.

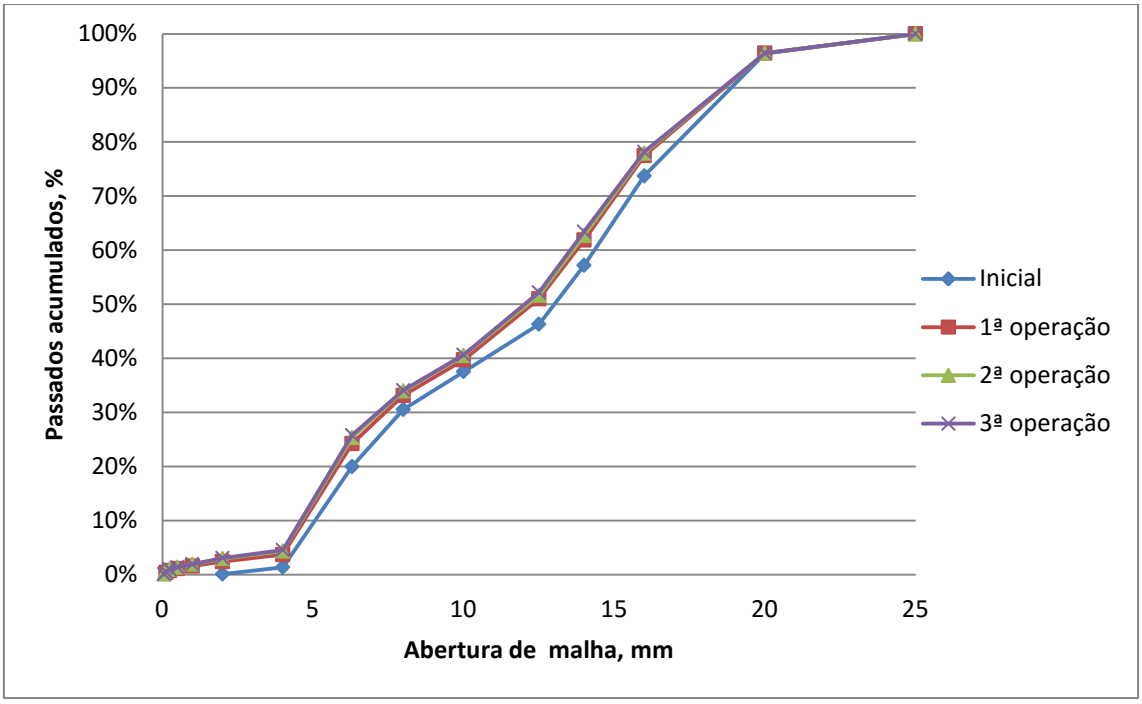


Figura 42 – Análise granulométrica do ARV

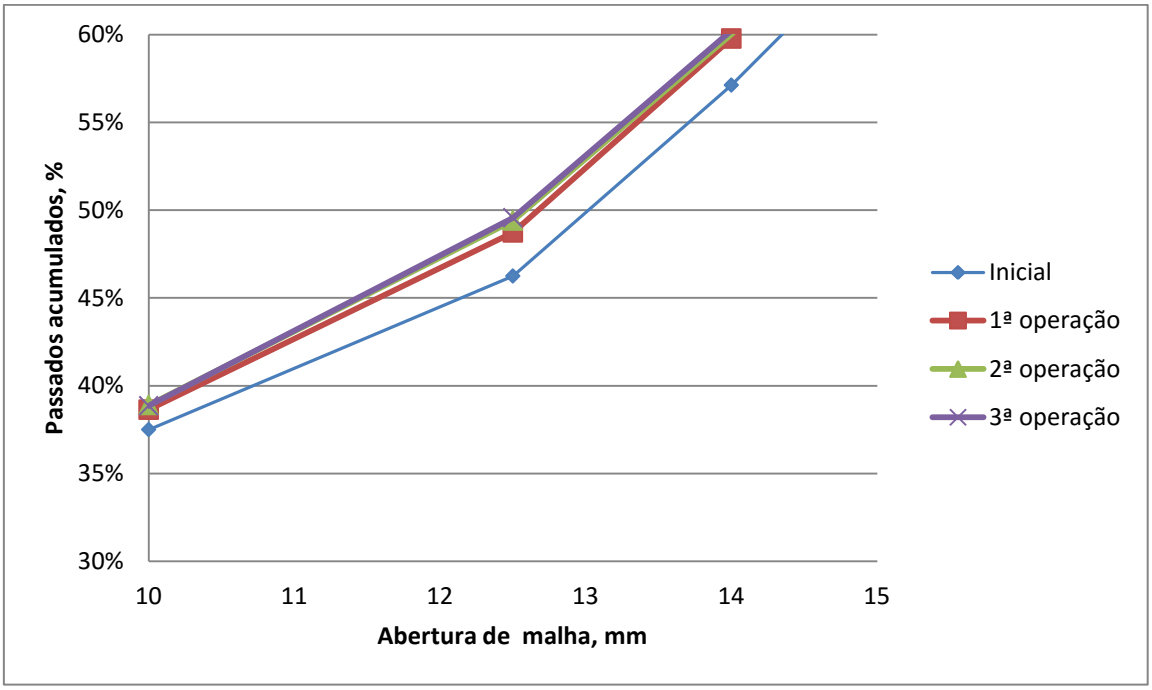


Figura 43 – Pormenor da análise granulométrica do ARV

Após os diversos ensaios de desgaste na betoneira, constatou-se que o agregado reciclado de vidro tem um desgaste visual menos pronunciado que o agregado natural britado, o que se deve à aparência das britas que, devido ao desgaste, ficam arredondadas, algo que não acontece com o vidro.

No gráfico da Figura 44**,** expressou-se graficamente o desgaste em massa dos agregados durante o ensaio de desgaste do agregado reciclado de vidro (ARV), em conjunto com os 7,5 kg de agregado natural britado com granulometria entre os peneiros 20 e 25 mm (ANB [20;25]).

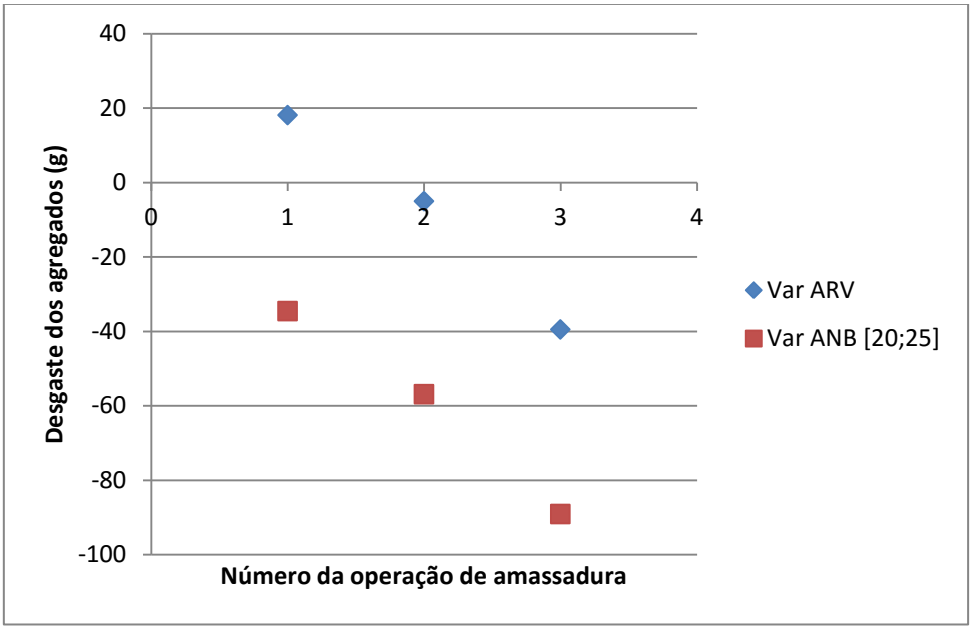


Figura 44 – Desgaste em massa dos agregados durante o ensaio em conjunto

Analisando os desgastes representados na Figura 44, conclui-se que tanto o agregado reciclado de vidro como o agregado natural britado, quando ensaiados em conjunto, apresentam um desgaste linear. O agregado reciclado de vidro apresenta na primeira análise granulométrica um desgaste positivo, devido ao facto de, ao serem ensaiados em conjunto, as britas, ao ficarem em pó, não se conseguem dissociar dos vidros mais finos, daí o valor do peso após desgaste ser mais elevado no agregado reciclado de vidro.

No Quadro 33, apresentam-se as diferenças de percentagens das massas do material passado, entre as diversas simulações do processo de amassadura em função das iniciais, para os diversos agregados.

Quadro 33 – Diferença das percentagens das massas do material passado

Agregado Reciclado de Vidro				Agregado Natural Britado			Agregado Reciclado de Vidro com Brita [20,25]		
Abertura malha (mm)	M_i-M_1	M_i-M_2	M_i-M_3	M_i-M_1	M_i-M_2	M_i-M_3	M_i-M_1	M_i-M_2	M_i-M_3
20	0,1 %	0,2 %	0,3 %	0,7 %	0,9 %	1,3 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
16	1,5 %	2,1 %	2,3 %	0,8 %	1,7 %	2,4 %	3,8 %	4,2 %	4,5 %
14	**2,7 %**	2,9 %	3,1 %	1,5 %	2,1 %	3,3 %	**4,7 %**	**5,5 %**	**6,2 %**
12,5	2,5 %	**3,2 %**	**3,3 %**	1,6 %	1,8 %	2,1 %	4,7 %	5,4 %	5,9 %
10	1,1 %	1,4 %	1,4 %	1,6 %	1,7 %	2,1 %	2,2 %	3,0 %	3,1 %
8	0,8 %	1,3 %	1,5 %	2,8 %	2,8 %	3,6 %	2,6 %	3,4 %	3,6 %
6,3	1,8 %	2,6 %	2,8 %	**3,0 %**	**3,6 %**	**4,6 %**	4,3 %	5,4 %	5,8 %
4	0,3 %	0,3 %	0,4 %	0,7 %	0,7 %	1,0 %	2,3 %	3,0 %	3,2 %
2	0,3 %	0,4 %	0,4 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	2,3 %	2,9 %	3,0 %
1	0,2 %	0,2 %	0,3 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	1,5 %	1,9 %	1,9 %
0,5	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,0 %	0,1 %	1,1 %	1,3 %	1,4 %
0,25	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,8 %	1,0 %	1,0 %
0,125	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,0 %	0,0 %	0,4 %	0,5 %	0,5 %
0,063	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Refugo	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Máximos	2,7 %	3,2 %	3,3 %	3,0 %	3,6 %	4,6 %	4,7 %	5,5 %	6,2 %

No gráfico da Figura 45 estão representados os desgastes, dos diferentes agregados ensaiados, consoante as frações dos peneiros, para M_i-M_1.

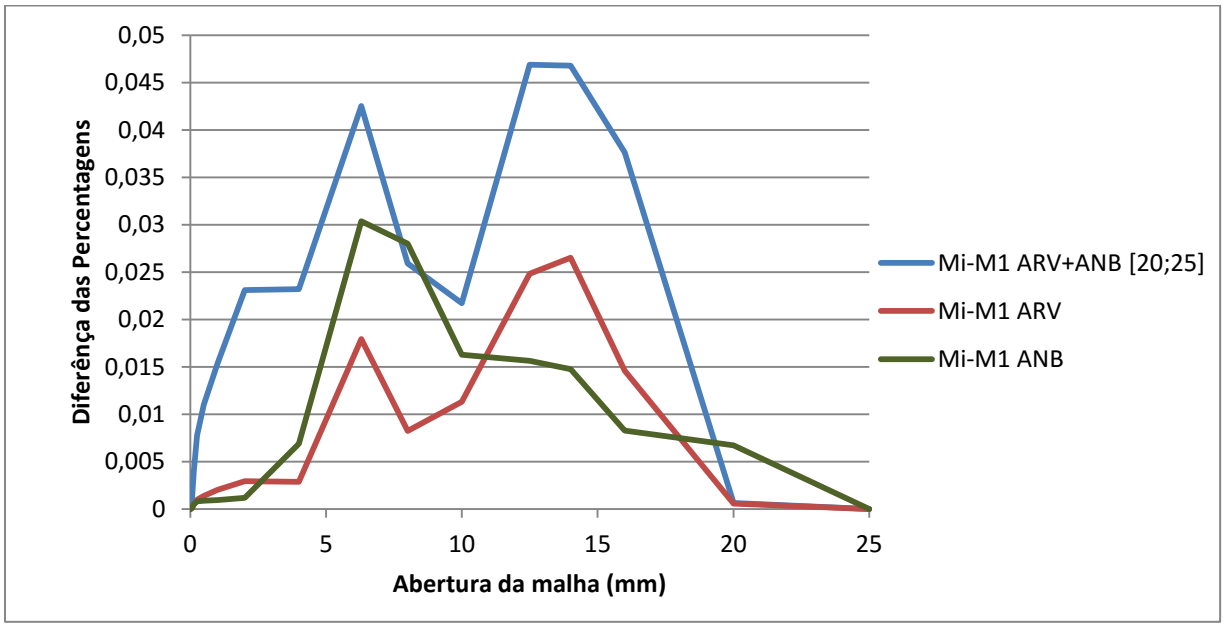


Figura 45 – Desgaste dos agregados consoante as frações dos peneiros, para M_i – M_1

Da análise da Figura 45, pode dizer-se que, quando se juntaram os agregados reciclado de vidro e o natural britado, o desgaste do agregado reciclado de vidro aumentou. Verificou-se que o agregado natural britado potencia o desgaste das frações finas (menores que 4mm) do agregado reciclado de vidro, já que se constatou uma grande perda nessa zona, algo que não se observou aquando do ensaio de desgaste do agregado reciclado de vidro isoladamente.

Quando avaliados individualmente (valores em letra destacada no Quadro 33), constata-se que o agregado reciclado de vidro teve dois picos de maior desgaste, nos peneiros 14 e 12,5 mm, tendo registado outro pico no de 6,3 mm. Já no que se refere ao agregado natural britado, observa-se um maior desgaste nas frações de menor granulometria, apresentando um valor máximo de desgaste na fração granulométrica de 6,3 mm.

Considerando a participação individual dos dois materiais, a melhor estimativa para a previsão do seu desgaste conjunto (como se pode ver no gráfico da Figura 46) implicaria que o desgaste do agregado reciclado de vidro seria afetado pelo valor de 1,03 e os agregados naturais britados pelo valor de 0,90. Estes fatores foram obtidos com recurso ao método dos mínimos quadrados. Constata-se, assim, que o agregado reciclado de vidro tem um peso maior no desgaste conjunto.

$$1{,}03 \times \%\, da\ fração\ de\ cada\ peneiro\ do\ ARV + 0{,}9 \times \%\, da\ fração\ de\ cada\ peneiro\ do\ ANB \tag{17}$$

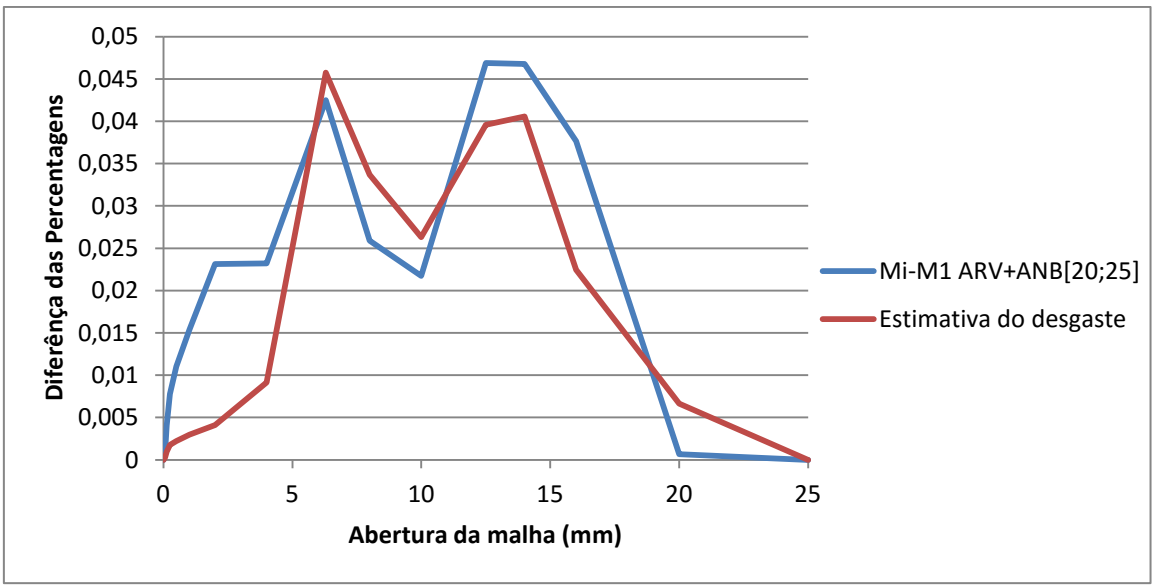


Figura 46 – Estimativa do desgaste conjunto de agregados

Este gráfico mostra a curva que foi estimada, ponderando o desgaste do agregado reciclado de vidro com o agregado natural britado individualmente.

Com esta ponderação, pode-se, em eventuais trabalhos futuros, com este tipo de agregado reciclado, caracterizarem-se os materiais. Ao realizar-se o desgaste de ambos, e ao aplicarem-se estes parâmetros, dever-se-á obter uma curva muito idêntica à da estimativa de desgaste representada na Figura 46.

Na Figura 47 está representada a diferença entre o desgaste do agregado reciclado de vidro e o agregado natural britado.

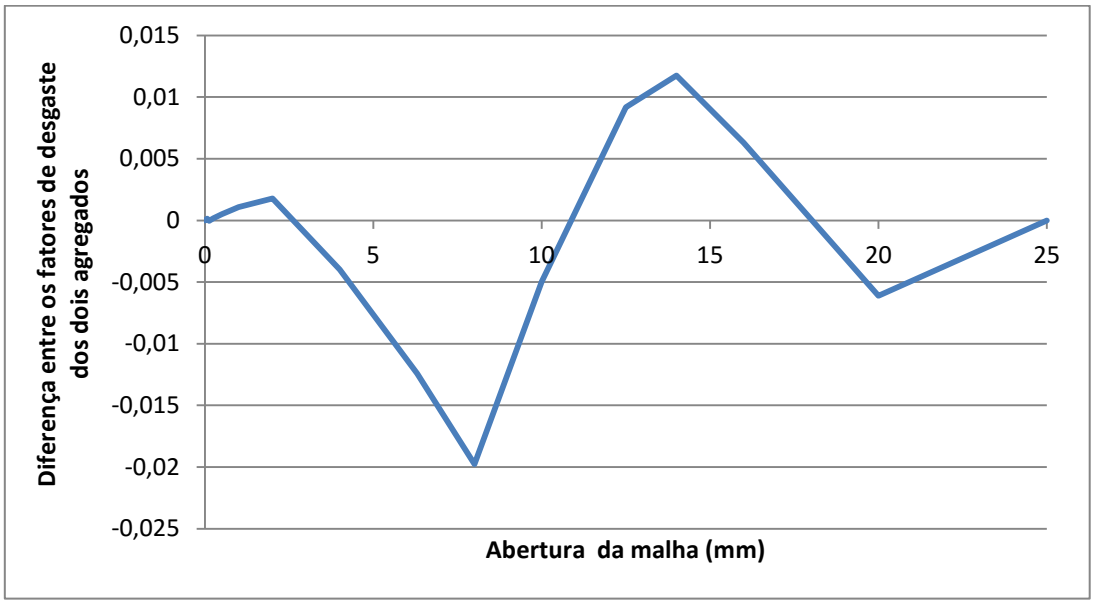


Figura 47 – Diferença entre o desgaste do ARV e o ANB, para $M_i - M_1$

O gráfico da Figura 47 foi realizado para se ter uma melhor perceção de qual a diferença para cada fração granulométrica do teor de material passado após a primeira operação de desgaste, igual a 3 minutos.

Este gráfico revela onde o desgaste do agregado reciclado de vidro é superior ao do agregado natural britado, mostrando que, quando positivo, o agregado reciclado de vidro se desgasta mais, sendo negativo nas frações granulométricas em que o agregado natural britado se desgasta mais.

Assim, contata-se que nas frações de 0 a 5 mm a variação não é significativa. De 5 a 10 mm o agregado natural britado tem um maior desgaste, enquanto de 10 a 18 o agregado reciclado de vidro se desgasta mais. Finalmente, até ao peneiro 25, volta a ser o agregado natural britado a ter um maior desgaste.

4.2.4. Desgaste *Los Angeles*

Para os valores de desgaste do ensaio *Los Angeles*, visto só haver disponibilidade para o ensaio do agregado reciclado de vidro, usaram-se os valores para os agregados naturais britados (brita 1 e brita 2) das referências bibliográficas.

As informações em relação à perda de massa por desgaste do agregado reciclado de vidro podem ser consultadas no Quadro 34, enquanto os cálculos efetuados podem ser analisados no Anexo E.

Quadro 34 – Resultados da determinação da resistência à fragmentação pelo método *Los Angeles*

Agregado	Brita 1*	Brita 2*	Vidro
Coeficiente *LA*	31	32	42

* Valores retirados de Serpa, D. (2012) pág.112

Como se pode constatar pelo Quadro 34, os agregados naturais britados apresentam uma resistência à fragmentação muito semelhante. Já o agregado reciclado de vidro apresenta, comparando com a referência bibliográfica, um valor bastante elevado, em relação ao agregado natural britado.

Este ensaio teve um resultado diferente do ensaio de desgaste na betoneira, visto ser muito mais abrasivo, do que resultou um maior desgaste do agregado reciclado de vidro.

Outro aspeto que levou ao valor *Los Angeles* do agregado reciclado de vidro ser mais elevado em relação aos agregados naturais britados foi o facto de se terem usado as frações entre os peneiros 10 e 14 mm, onde efetivamente estes agregados se desgastam mais, como se pode constatar no ensaio de desgaste na betoneira (Figura 46).

O valor de 42 pode ser considerado um desgaste muito elevado, pois está perto do limite de 50, o qual, de acordo com a especificação LNEC E 467, é o limite superior para que os agregados possam ser aplicados em betões hidráulicos. Ainda que o agregado reciclado de vidro cumpra o estabelecido em norma, encontra-se bastante próximo desse limite, sendo no entanto superior ao verificado com o agregado natural britado que está à volta dos 30.

Na Figura 48 está representado o agregado reciclado de vidro antes e depois do ensaio de *LA*.

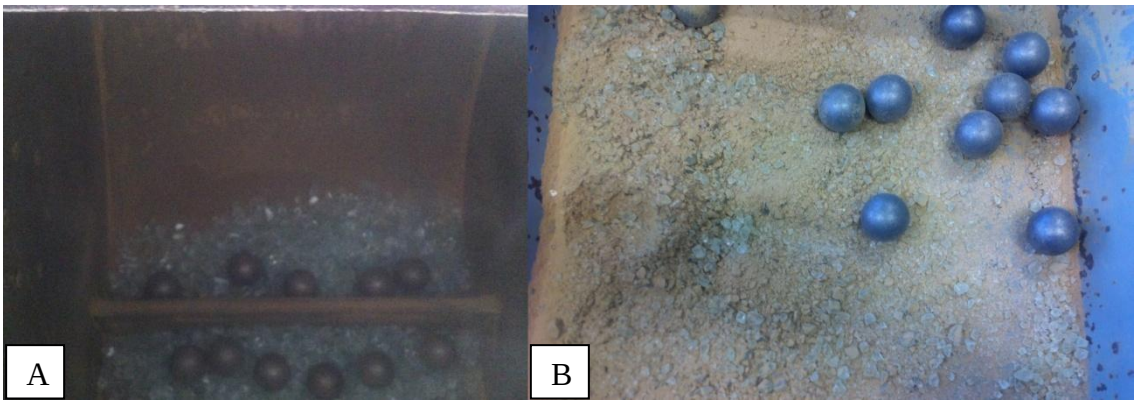


Figura 48 – (A) Agregado reciclado de vidro antes do ensaio *LA*; (B) Agregado reciclado de vidro depois do ensaio *LA*

4.3. Comportamento do betão no estado fresco

Neste subcapítulo, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de determinação do abaixamento e da massa volúmica no betão fresco.

4.3.1. Abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento (cone de Abrams) foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009), como descrito no ponto 3.6.1.

Neste ensaio foi realizada uma amassadura para cada betão, devido à sua reduzida capacidade de fabrico. Por esta razão, os resultados do abaixamentos correspondem a diferentes amassaduras para o mesmo betão, que levou a resultados diferentes, que deveria ter sido feito numa só amassadura.

No Quadro 35 são apresentados os valores dos abaixamentos de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009) e são representados graficamente na Figura 49. Os valores reais são apresentados no Anexo G.

Quadro 35 – Valores dos abaixamentos de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009)

	Idade de ensaio		
	2 Dias	7 Dias	28 Dias
Betão Referência	20	10	10
Betão 25 % Betoneira	10	10	10
Betão 50 % Betoneira	10	20	10
Betão 25 % Manual	20	20	10
Betão 50 % Manual	30	20	20

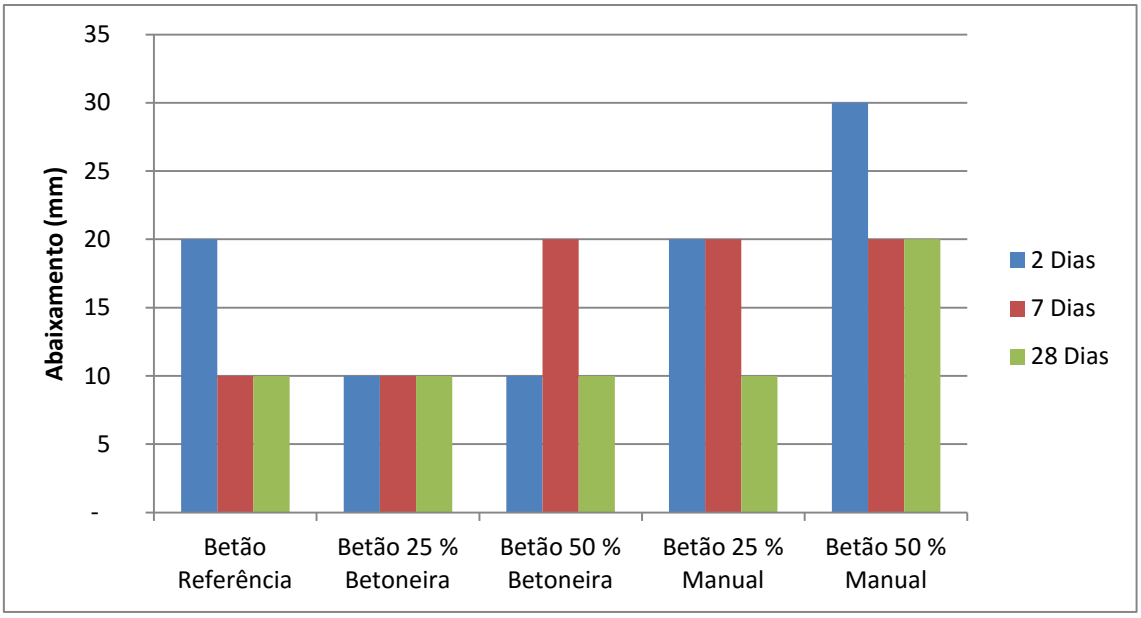


Figura 49 – Abaixamento de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009)

Os resultados do abaixamento, deram relativamente baixos, devido aos agregados terem sido secos em estufa, pois só assim controlamos a quantidade de água que é colocada aquando da amassadura.

Analisando a Figura 49, constata-se que nos abaixamentos as diferenças não são muito significativas, sendo atribuída a classe S1 para todos os betões realizados.

Na Figura 50, são apresentados os abaixamentos dos diversos betões estudados, encontrando-se os valores intermédios de cada abaixamento no Anexo G.

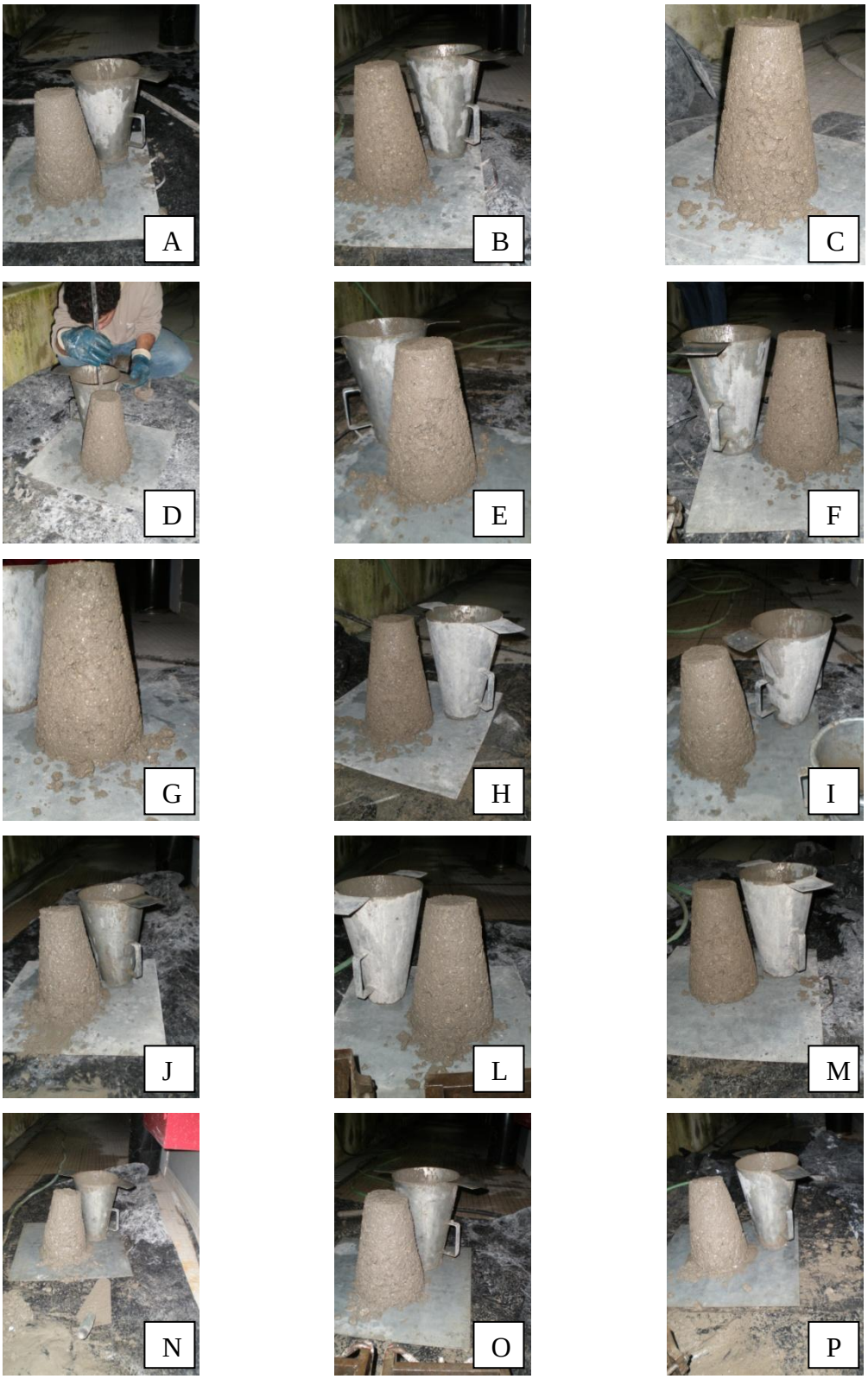


Figura 50 – Diferentes abaixamentos obtidos

Legenda: A) Betão de referência 2 dias B) Betão de referência 7 dias C) Betão de referência 28 dias D) Betão 25 % betoneira 2 dias E) Betão 25 % betoneira 7 dias F) Betão 25 % betoneira 28 dias G) Betão 50 % betoneira 2 dias H) Betão 50 % betoneira 7 dias I) Betão 50 % betoneira 28 dias J) Betão 25 % Manual 2 dias L) Betão 25 % Manual 7 dias M) Betão 25 % Manual 28 dias N) Betão 50 % Manual 2 dias O) Betão 50 % Manual 7 dias P) Betão 50 % Manual 28 dias

4.4. Propriedades do betão no estado endurecido

4.4.1. Massas volúmicas aparentes

As massas volúmicas dos betões que se apresentam no Quadro 36 e Figura 51, são massas volúmicas aparentes, pois foram obtidas considerando a massa dos provetes e o seu volume medido através das dimensões dos cubos.

Quadro 36 – Massas volúmicas, valores de acordo com a norma NP EN 19390-7 (2009)

	Massa Volúmica Inicial (kg/m^3)	Massa Volúmica Final (kg/m^3)
Betão Referência	2360	2370
Betão 25 % Betoneira	2340	2360
Betão 50 % Betoneira	2330	2340
Betão 25 % Manual	2360	2370
Betão 50 % Manual	2350	2360

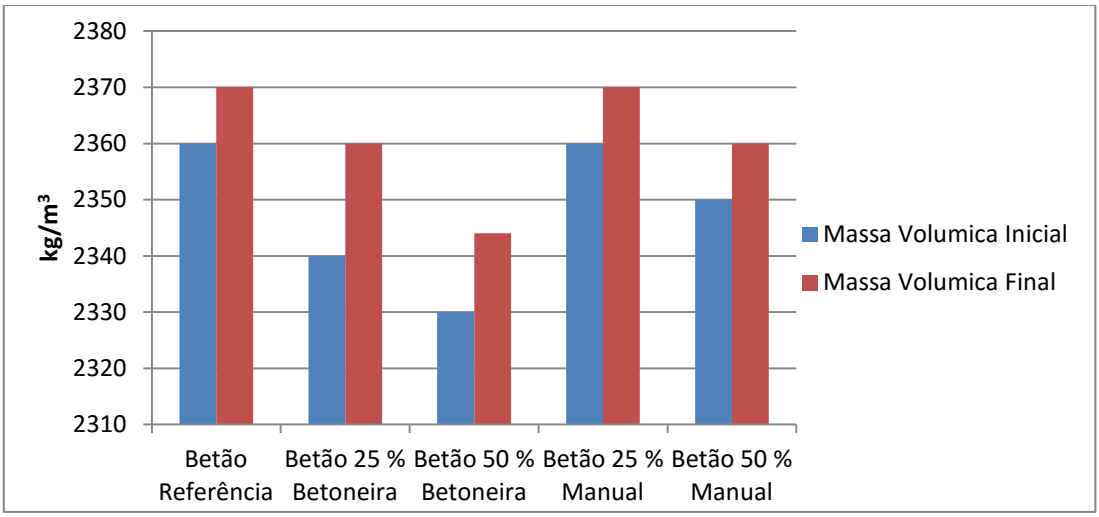


Figura 51 – Massas Volúmicas, valores de acordo com a norma NP EN 19390-7 (2009)

Observando a figura anterior, constata-se que a massa volúmica sofre um decréscimo, com a substituição do agregado natural pelo reciclado, algo já esperado, visto o agregado reciclado de vidro ter uma densidade inferior ao do agregado natural britado.

Depois, já na mistura manual, obteve-se um aumento da massa volúmica para o betão com 25 % de agregado reciclado de vidro, possivelmente devido ao desgaste na betoneira no conjunto dos agregados que, como visto no ensaio de desgaste dos

agregados na betoneira, se desgastam mais mutuamente em relação ao desgaste que têm quando ensaiadas individualmente. Assim sendo, temos um desgaste maior no ensaio conjunto mecânico em relação ao manual, o que pode ter provocado a acumulação de mais material fino. O material fino, como se sabe, tende a acumular mais volume de vazios, conduzindo à diminuição da massa volúmica.

4.4.2. Quantidade de água que o betão acumula durante a conservação

O ensaio da quantidade de água que o betão acumula durante a conservação foi realizado por imersão dos cubos de betão e não seguiu qualquer norma.

Este ensaio permitiu caracterizar a porosidade do betão com a evolução da idade de cura do betão e com a substituição dos agregados naturais britados pelos reciclados de vidro, nas diversas taxas de substituição estudadas.

Considerando que o betão não perde matéria sólida durante a conservação, os resultados são apresentados no Quadro 37 e representados graficamente na Figura 52. Os pesos dos betões e os cálculos intermédios efetuados são apresentados no Anexo H.

Quadro 37 – Resultados da quantidade de água que o betão acumula durante a conservação

	Idade de ensaio		
	2 Dias	7 Dias	28 Dias
Betão Referência	0,48 %	0,50 %	0,64 %
Betão 25 % Betoneira	0,49 %	0,57 %	0,67 %
Betão 50 % Betoneira	0,50 %	0,50 %	0,70 %
Betão 25 % Manual	0,36 %	0,60 %	0,74 %
Betão 50 % Manual	0,35 %	0,56 %	0,68 %

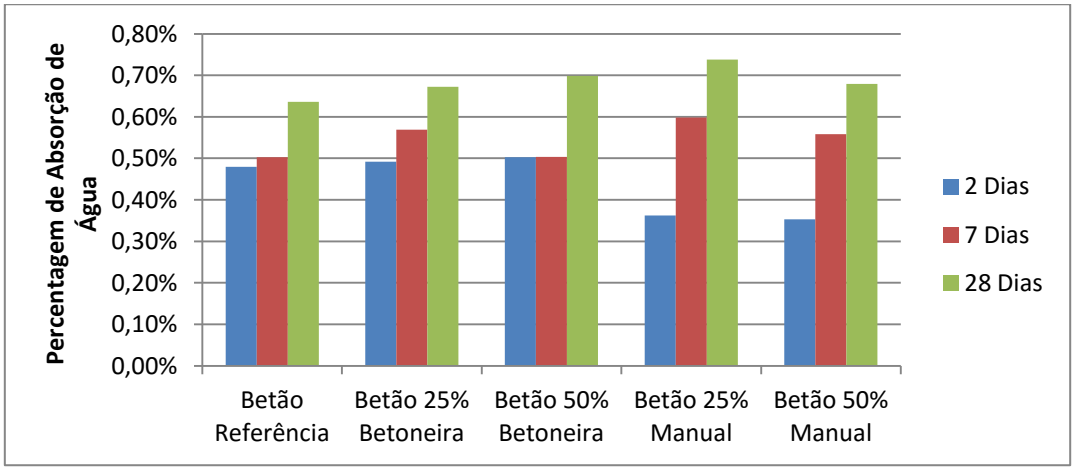


Figura 52 – Quantidade de água que o betão acumula durante a conservação em percentagem

Da análise dos resultados, constata-se que, como era expectável, a absorção de água aumentou com o tempo e com o aumento da taxa de incorporação de agregado reciclado de vidro, para as amassaduras na betoneira, exceto no betão dos 7 dias com 50 % do agregado reciclado de vidro. Isto deve-se ao facto de, quando temos um material com muitas partículas finas, estas tenderem a absorver mais água e, ao ficarem com mais água, esta tende a evaporar e a criar maior porosidade. Tal ocorrerá principalmente se estas partículas finas não forem do cimento, uma vez que, existindo mais poros, haverá mais água.

Nas amassaduras manuais, a quantidade de água que o betão acumula durante a conservação, inexplicavelmente, inverteu a tendência, ao diminuir com o aumento da taxa de incorporação do agregado reciclado de vidro. Isto pode-se, eventualmente, dever à mistura manual não ser tão eficiente, ou por haver alguns agregados que não ficaram tão bem envolvidos com pasta de cimento, criando zonas sem ligante, conduzindo assim a uma maior porosidade.

Na Figura 53 está representada a relação entre o teor de água e o ensaio de ultrassons.

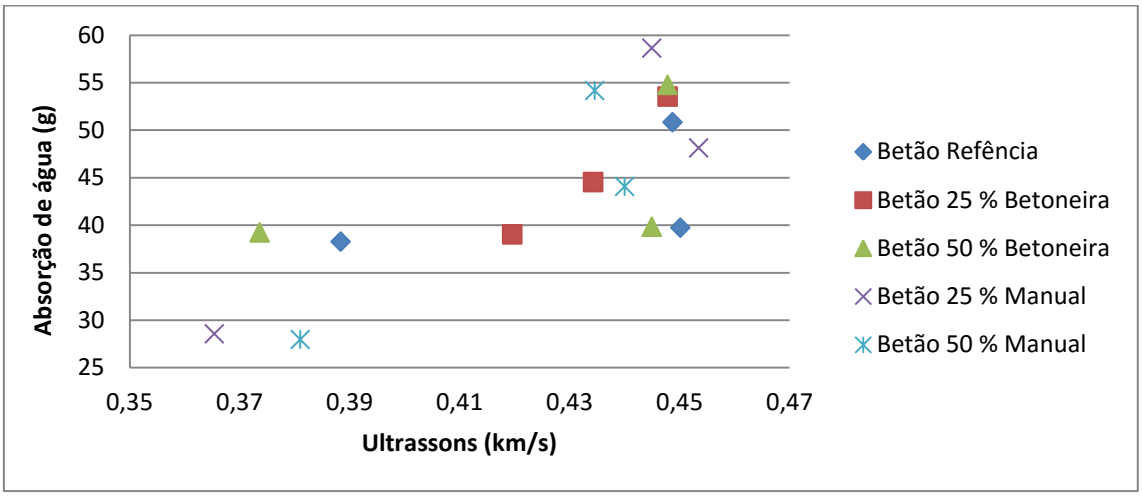


Figura 53 – Relação do teor de água e o ensaio de ultrassons

O gráfico da Figura 53 indica a sensibilidade dos ultrassons ao teor de humidade do betão e, como se pode verificar, o som transmite-se mais rapidamente quando o betão tem um maior teor de humidade. Assim, pode-se afirmar que, quanto mais água o betão contiver no seu interior, menos tempo o som leva a passar por ele, logo maior a velocidade do ultrassom.

4.4.3. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011).

Este ensaio permitiu avaliar a propriedade mecânica mais importante do betão, com a análise da substituição dos agregados naturais britados pelos agregados reciclados de vidro e das diferenças da amassadura mecânica e manual. De referir que os valores da resistência à compressão apresentados são valores médios.

Os resultados da resistência à compressão são apresentados no Quadro 38 e representados graficamente na Figura 54, sendo os valores intermédios apresentados no Anexo I.

Quadro 38 – Resultados do ensaio da resistência à compressão (MPa)

	Idade de ensaio		
	2 Dias	7 Dias	28 Dias
Betão Referência	13,99	19,89	34,11
Betão 25 % Betoneira	15,31	20,23	33,19
Betão 50 % Betoneira	17,44	20,34	31,59
Betão 25 % Manual	9,85	26,36	36,35
Betão 50 % Manual	8,88	23,62	27,34

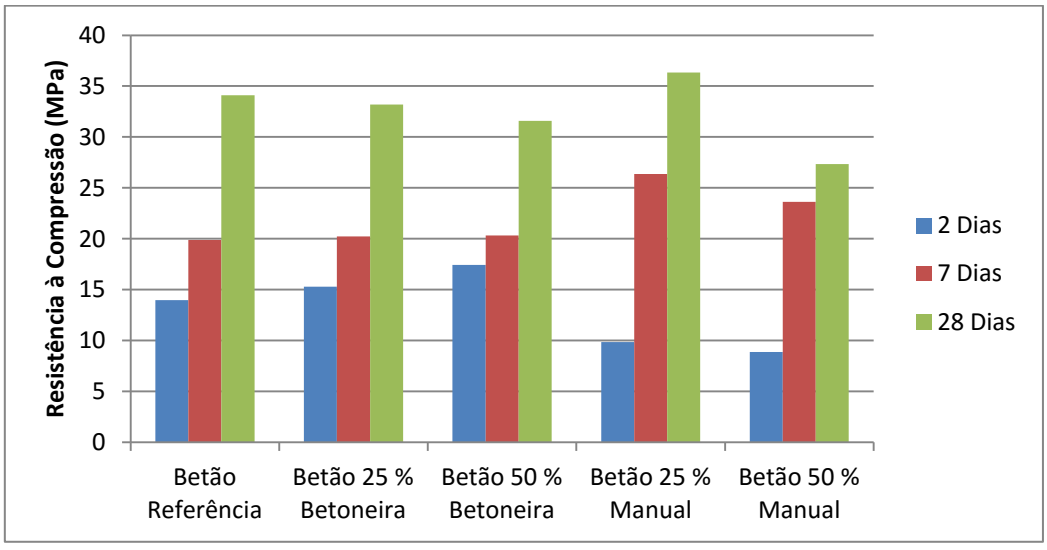


Figura 54 – Resistência à compressão (MPa)

Nas Figura 55 e 56, observa-se o comportamento do betão com o aumento da idade de cura para amassadura mecânica e manual, respetivamente.

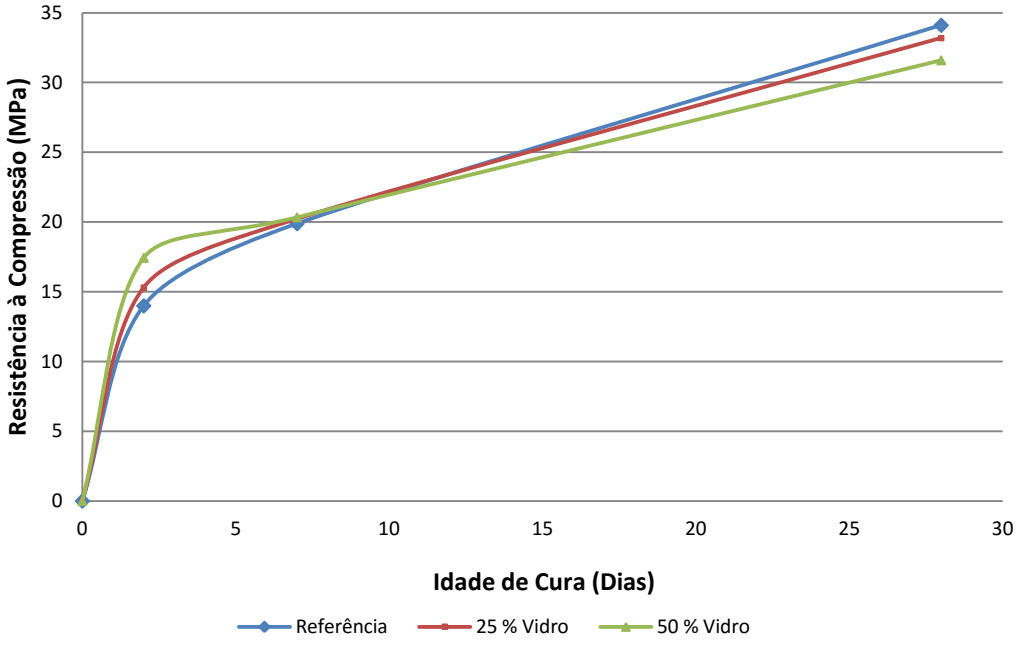


Figura 55 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras na betoneira

Os resultados permitem concluir que, na amassadura mecânica, os betões com agregado reciclado de vidro começaram por ter uma resistência à compressão superior ao de referência. Quando a idade de cura atinge os 7 dias, todos os betões têm resistências equivalentes. Depois, com o aumentar da idade de cura, observa-se uma tendência de redução de resistência do betão à compressão.

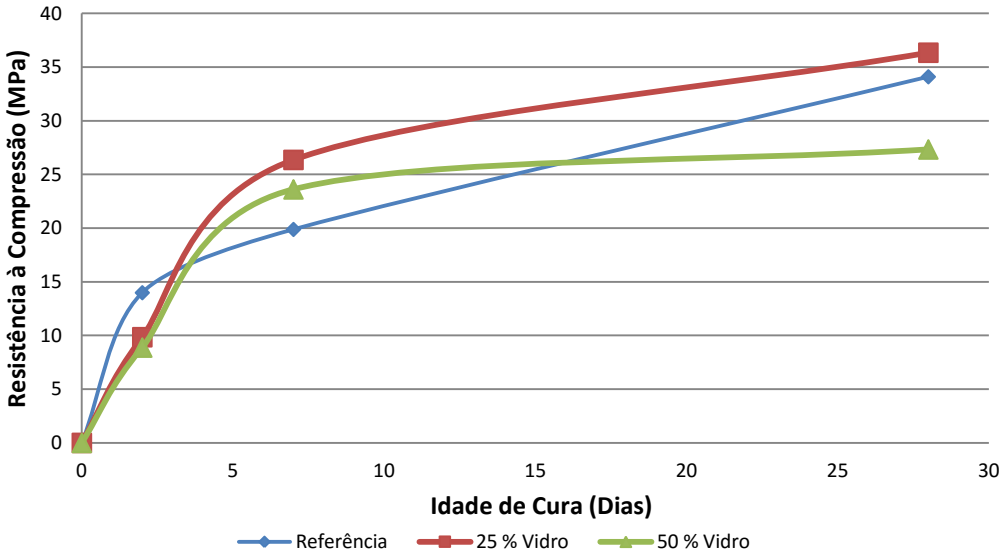


Figura 56 – Evolução da resistência à compressão das amassaduras manuais

No que se refere à amassadura, na qual os agregados reciclados de vidro foram misturados manualmente, nos betões com idades de cura mais pequenas, o valor da resistência à compressão é menor, tornando-se superior à do betão de referência entre o segundo e o sétimo dia, contrariando a tendência verificada na amassadura mecânica. No betão de amassadura manual com 50 % de agregado reciclado de vidro, a resistência à compressão aos 28 dias foi significativamente inferior à dos outros betões. Observando-se os resultados obtidos nos outros ensaios (esclerómetro e ultrassons), deduz-se que o seu resultado poderá estar incorreto, devendo ser mais próximo do verificado para o betão com 25 % de vidro.

Nas Figuras 57 e 58, apresentam-se os valores médios da resistência à compressão em função dos ensaios de ultrassons e do esclerómetro, respetivamente. Os valores dos provetes representados graficamente, que apresentam resultados mais elevados, indiciando uma maior resistência dos betões.

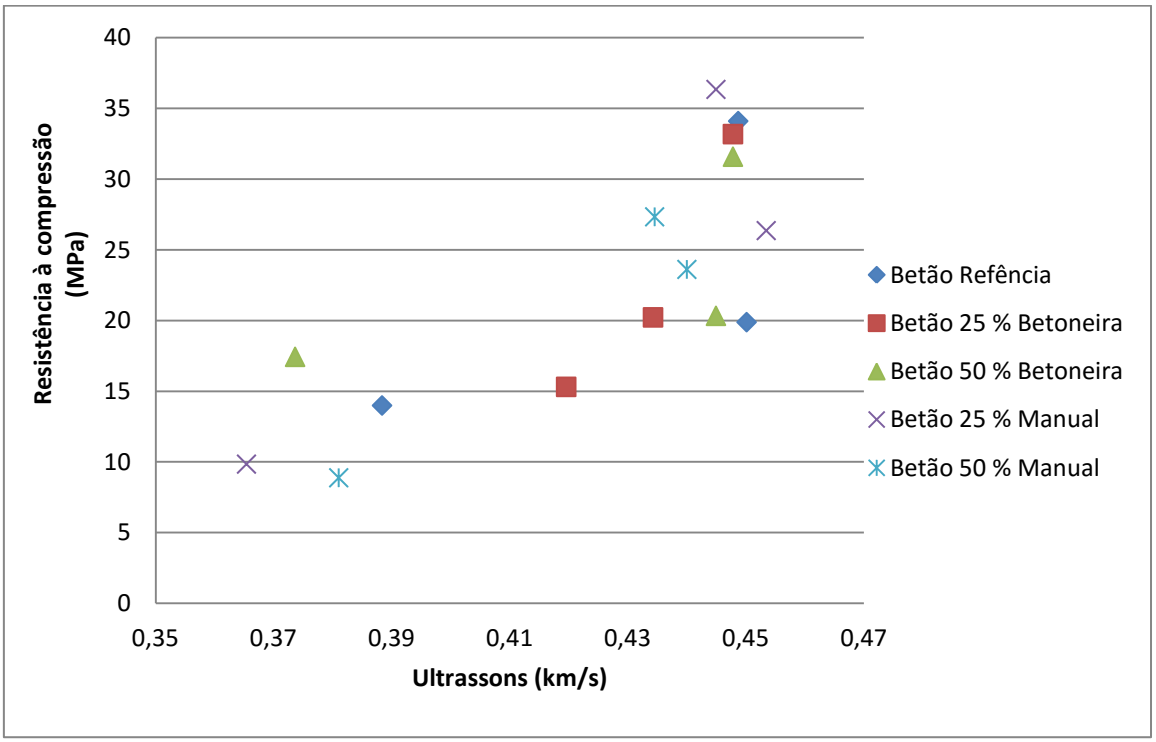


Figura 57 - Relação da resistência à compressão e o ensaio de ultrassons

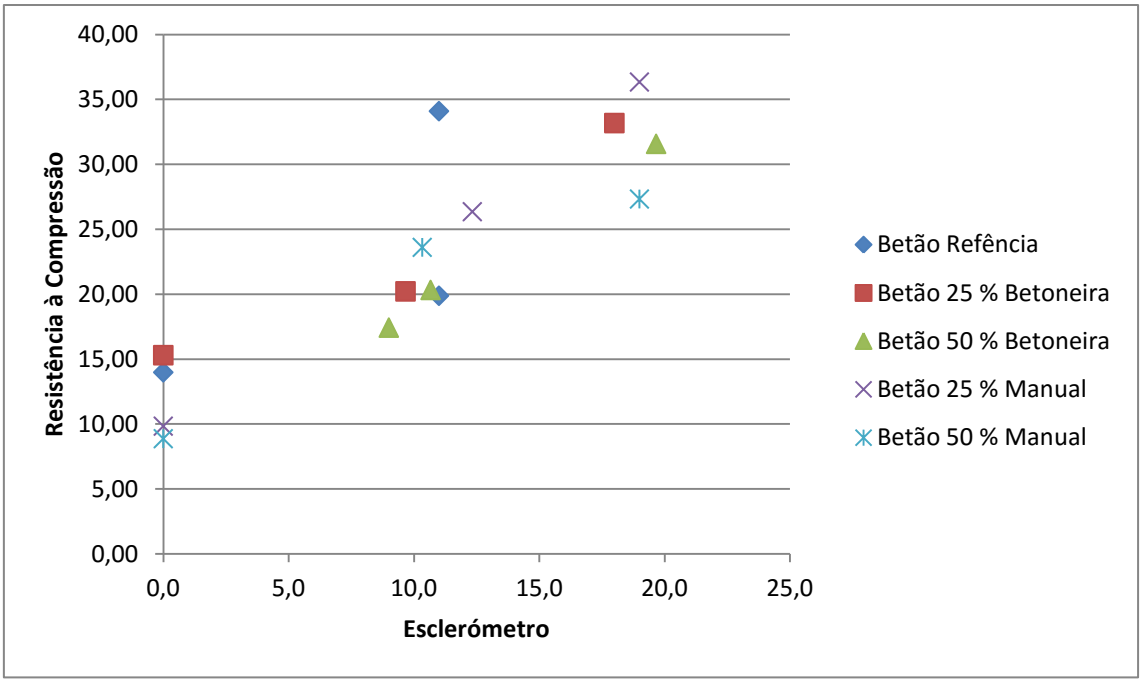


Figura 58 - Relação da resistência à compressão e o ensaio do esclerómetro

5. Conclusões

5.1. Considerações finais

É inegável a importância deste tipo de estudos, de modo a criar-se uma gestão mais segura e eficiente dos resíduos sólidos gerados pelo Homem. Com as mais diversas possibilidades, a utilização deste tipo de resíduos em betões torna-se uma prática bastante interessante e viável. Neste sentido, a indústria da construção civil pode assumir um papel preponderante na absorção de boa parte destes resíduos.

Depois da realização desta dissertação, identificou-se, durante a fase experimental, um problema relacionado com a amostragem, devido à capacidade limitada de produção do betão. Esta era limitada ao fabrico de 3 cubos de cada vez. Assim, para que os resultados se dispersassem no conjunto, estes 3 cubos não deveriam ter sido ensaiados no mesmo dia. Um betão fabricado em diferentes momentos pode ter um comportamento diferente. Por isso, teria sido conveniente que os provetes realizados na mesma amassadura fossem ensaiados a idades diferentes, para que, no fim, se diminuísse o erro de amostragem.

Na sequência da questão inicial que deu origem à presente dissertação, conclui-se que, de acordo com os procedimentos realizados neste trabalho, apesar de se verificar uma alteração da granulometria do agregado reciclado de vidro quando se avalia o seu desgaste numa misturadora, esta alteração não influencia significativamente as propriedades do betão ensaiadas. De referir que os valores de desgaste obtidos são virtuais pois, ao serem misturados tradicionalmente numa betoneira, os agregados irão ter um amortecimento, o que os leva a terem desgastes inferiores aos obtidos.

Os agregados reciclados de vidro podem ser aplicados em betões de ligante hidráulico, apesar do seu elevado desgaste no ensaio de *Los Angeles*. O elevado valor registado a esta propriedade está em conformidade com o verificado no ensaio de desgaste na misturadora, realizado neste trabalho, onde se observou que as frações onde se verificou maior desgaste foram as dos peneiros 14 e 12,5 mm, frações estas que correspondem às usadas no ensaio de *Los Angeles*.

No que se refere à trabalhabilidade, verificou-se uma tendência negativa quando se substituía o agregado natural britado pelo reciclado de vidro, eventualmente devido à forma das partículas de vidro que obrigam a um aumento da razão A/C para a mesma trabalhabilidade.

A massa volúmica aparente do betão sofreu um decréscimo, já esperado, devido à diferença entre as densidades do agregado reciclado de vidro e do agregado natural britado. Outra possível razão terá sido a acumulação de material fino no betão com os agregados reciclados de vidro, material esse que provoca um maior volume de vazios.

Os valores da resistência à compressão aos 28 dias sofrem um decréscimo com o aumento da incorporação de agregado reciclado de vidro. No entanto, para as amassaduras realizadas na betoneira, quando a idade de cura é inferior a 7 dias, a resistência inverte essa tendência, não tendo sido possível deduzir uma justificação para esta diferença. No que se refere aos betões nos quais os agregados reciclados de vidro foram misturados manualmente, os betões apresentaram maiores ganhos de resistência à compressão mais tardiamente, aos 7 e 28 dias, pois, no que se refere aos 2 dias, a resistência foi bem mais baixa do que a dos betões misturados tradicionalmente. A menor resistência dos betões misturados tradicionalmente pode dever-se à menor aderência dos agregados reciclados de vidro à pasta de cimento.

Quantificou-se a quantidade de água que o betão terá absorvido durante a sua conservação utilizando-a como indicador da porosidade.

O ensaio de ultrassons permitiu avaliar a uniformidade do betão e o teor de humidade para além da zona superficial, confirmando-se as relações expectáveis com a resistência e a porosidade. A dispersão de resultados é justificada pelos problemas associados à amostragem acima referidos.

O ensaio do esclerómetro só permite avaliar a resistência superficial dos cubos de betão. Ainda assim, os seus resultados do ensaio do esclerómetro apresentaram, em geral, uma correlação aceitável com os da resistência à compressão, demonstrando que o betão dos provetes ensaiados se apresentava homogéneo, ainda que alguns dos valores do esclerómetro não apresentassem a mesma tendência dos obtidos no ensaio da resistência à compressão, o que terá a ver com o carácter do ensaio do esclerómetro, o qual avalia essencialmente a resistência superficial do betão.

5.2. Propostas para trabalhos futuros

Como nunca se tinha estudado a influência do processo de amassadura com este tipo de agregados e como se verificou que a betoneira empregue neste trabalho não influencia muito o desgaste dos agregados, levanta-se a questão de saber o que uma

betoneira com uma maior energia de mistura pode provocar no agregado. Assim, como propostas para trabalhos futuros, propomos os seguintes temas/procedimentos:

- Verificar o desgaste em betoneiras com diferentes energias de mistura;
- Tentar homogeneizar o processo de amassadura manual;
- Realizar o estudo das resistências para além dos 28 dias;
- Medir as resistências de betões com taxas de substituição de 75 e 100 % de agregado natural britado por agregado reciclado de vidro;
- Verificar a influência da adição de adjuvantes e plastificantes;
- Avaliar o comportamento acústico e térmico;
- Estudar os efeitos da reação expansiva do tipo álcalis-sílica.

Referências bibliográficas

Barbosa, R, Carvalho, J, Mota, J, Silva, A (2011). *Concreto Produzido com Parte de Resíduo de Vidro na Ilha de Fernando de Noronha – PE.* (Anais do 53ª Congresso Brasileiro de Concreto CBC2011). Acedido em 25 de maio de 2015 em http://www.vieiramota.com.br/concreto_com_residuo_vidro_fn.pdf

Bogas, J. (2011). *Fachadas de Vidro. Explorar os Limites da Utilização do Vidro na Construção.* Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil da Universidade do Minho, Escola de Engenharia, orientada por Professor Doutor Paulo Cruz, Braga.

Coutinho, A. (1997a). *Fabrico e Propriedades do Betão, Volume I.* 3ª ed. Lisboa: LNEC.

Coutinho, A. (1997b). *Fabrico e Propriedades do Betão, Volume II.* 3ª ed. Lisboa: LNEC.

Coutinho, A. & Gonçalves, A. (1994). *Fabrico e Propriedades do Betão, Volume III*. 2ª ed. Lisboa: LNEC.

Coutinho, J. (2011). *Betões Eco-Eficientes Com Resíduos.* (1ªs Jornadas de Materiais na Construção). Acedido em 30 de dezembro de 2014 em http://paginas.fe.up.pt/~be2012/ Indice/ BE2012 /pdf-files/054_Artigo.pdf

Cruz, H. (s.d.). *Obras de Construção Civil.* Lisboa: Rei dos Livros.

Cunha, P. (2011). *Conformidade da Resistência à Compressão do Betão.* Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil da Universidade do Minho, Escola de Engenharia, orientada por Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar, Professor Doutor Pedro Nuno Ferreira Pinto Oliveira & Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo, Braga.

Dias, J. (2004). *A Análise Sedimentar e o conhecimentos dos Sistemas Marinhos.* Acedido em 12 de novembro de 2014 de http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks/Sedim/ SedimB_AG.pdf.

Fávero, R (2009). *Avaliação da Utilização de Sucata de Vidro como Adição Mineral Frente à Sílica Ativa e como Agregado Miúdo Artificial na Produção de Materiais à base de Cimento.* Trabalho para obtenção do grau de Diplomação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, orientada por Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Porto Alegre.

Ferreira, L. (2007). *Betões Estruturais com Incorporação de Agregados Grossos Reciclados de Betão. Influência da Pré-Saturação.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, orientada por Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito, Lisboa.

Figueiras, J & Rio, J. (2012). *Deteção de Dano com Ultrassons em Elementos de Betão Estrutural.* (Encontro Nacional de BETÃO ESTRUTURAL – BE2014 FEUP). Acedido em 14 de dezembro de 2014 em http://paginas.fe.up.pt/~be2012/Indice/BE2012/pdffiles/054_Artigo.pdf.

Gautam, S., Srivastava, V. & Agarwal, V. (2012). *Use of glass wastes as fine aggregate in Concrete.* (*J. Acad. Indus. Res.* Vol. 1). Acedido em 25 de maio de 2015 em http://jairjp.com/NOVEMBER %202012/10 %20GOWTHAM.pdf

Gomes, C & Pelisser, F. (2011). *Propriedades Mecânicas do Concreto com Adição de Vidro Reciclado.* Artigo para obtenção do Título de Engenheiro Civil da UNESC, Criciúma. Acedido em 25 de maio de 2015 em https://www.researchgate.net/publication/268351767_Propriedades_Mecnicas_do_Concreto_Com_Adio_de_Vidro_Reciclado.

Gonçalves, P. (2007). *Betão com Agregados Reciclados.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, orientada por Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito, Lisboa.

Ismail, Z & Al-Hashmi, E. (2009). *Recycling of Waste Glass as a Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete. (*Department of Environmental Engineering, College of Engineering, University of Baghdad, Iraq). Acedido em 25 de maio de 2015 em http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X0800281X

Lima R, Righi; D., Köhler, L. & Kirchlof, L. (2011) *Efeitos da Substituição da Areia por Vidro Moído no comportamento de Concretos em Elevadas Temperaturas.* Acedido em 25 de novembro de 2014 em http://www.revistaeep.com/imagens/volume11_02/cap 03.pdf.

Malik, M, Bashir, M, Ahmad, S, Tariq, T & Chowdhary, U. (2013). *Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial*. (IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)). Acedido em 26 de maio de 2015 em de http://www.iosrjen.org/Papers/vol3_issue7 %20(part-6)/B03760813.pdf

Martins, J. & Pinto, J. (2004). Materiais *de Construção I. O Vidro*. 1ª ed. Acedido em 14 de dezembro de 2014 em exa.yimg.com/kq/groups/24054498/433641539/name/ Vidros+2.pdf.

Mascarenhas, J. (2008). *Sistemas de Construção. IX – Contributos para o Cumprimento do RCCTE, Detalhes Construtivos sem Pontes Térmicas Materiais Básicos (6ª parte: O Betão.*2ª ed. Lisboa: Livros Horizonte.

Oliveira, L; Gomes, J & Santos, P. (2008) – *Avaliação de Desempenho da Substituição da Areia Natural por Areia de Resíduos de Vidro em Betões Estruturais.* (Encontro Nacional Betão Estrutural, Guimarães, 5,6 e 7 de novembro).

Pires, S. (2011). *Estudo Comparativo da Resistência à Compressão do Betão em Provetes Normalizados e em Estruturas Betonadas.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia dos Materiais da Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias. orientada por Professora Doutora Margarida Lima, Lisboa.

Sampaio, C. (2010). *Caracterização do Betão Através de Técnicas Não-Destrutivas.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, orientada pela Professora Doutora Ana Maria Magalhães Ribeiro Sarmento Teixeira de Bastos, Porto. Acedido em 29 de novembro de 2014 em http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58432/1/000141258.pdf.

Serpa, D. (2012). *Desempenho Mecânico de Betões com Incorporação de Agregados Provenientes da Trituração de Vidros.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, orientada por Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito, Lisboa.

Vieira, M., Gonçalves, M. Clara., et al (2012). *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção.* 1ª Ed. Lisboa: IST Press.

Sites:

http://pt.verallia.com Acedido em 25 de janeiro de 2015

http://ta-a-reciclar.blogspot.pt/ Acedido em 27 de janeiro de 2015

http://www.sobiologia.com.br/ Acedido em 22 de fevereiro 2015

Normas / Especificações de Ensaios

NP EN 197-1 (2012) Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Lisboa: IPQ.

NP EN 933-1 (2014) Ensaios das propriedades geométricas dos agregados Parte 1: Análise granulométrica Método da peneiração. Lisboa: IPQ.

NP EN 1097-3 (2002) Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Lisboa: IPQ.

NP EN 1097-2 (2011) Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação. Lisboa: IPQ.

NP EN 1097-3 (2002) Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Lisboa: IPQ.

NP EN 12350-2 (2009) Ensaios do betão fresco Parte 2: Ensaio de abaixamento. Lisboa: IPQ.

NP EN 12504-4 (2007) Ensaio do betão nas estruturas Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons. Lisboa: IPQ.

NP EN 12504-2 (2012) Ensaios do betão nas estruturas Parte 2: Ensaio não destrutivo Determinação do índice esclerométrico. Lisboa: IPQ.

NP EN 12390-1 (2012) Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes. Lisboa: IPQ.

NP EN 12390-3 (2011) Ensaios do betão endurecido Parte 3: Resistência à compressão de provetes. Lisboa: IPQ.

NP EN 206-1 (2007) Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa: IPQ.

LNEC E 461 (2007) Metodologias para prevenir reações expansivas internas. Lisboa: LNEC.

LNEC E 467 (2006) Guia para a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos. Lisboa: LNEC.

ANEXOS

ANEXO A

FICHA TÉCNICA DO CIMENTO

Cimento Portland de Calcário
CEM II/B-L 32,5 N

CE
EN 197-1 0856



Constituintes

65% ≤ Clínquer ≤ 79%
21% ≤ Calcário ≤ 35%
Sulfato de cálcio regulador de presa

Características

Químicas

Sulfatos (SO_3) ≤ 3,5%
Cloretos (Cl) ≤ 0,10%

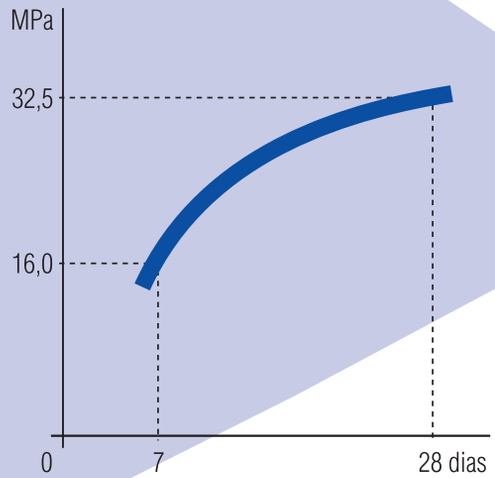
Físicas

Início de presa (min) ≥ 75
Expansibilidade (mm) ≤ 10

Mecânicas

Resistência à compressão
Valores mínimos
7 dias: 16,0 MPa
28 dias: 32,5 MPa

Resistência mecânica à compressão
Curva de crescimento mínimo



Propriedades especiais do betão fabricado com este cimento

- Desenvolvimento lento das resistências iniciais
- Progressão gradual das resistências até 28 dias
- Elevada trabalhabilidade em argamassas e em betões mesmo com baixa relação água/cimento

Utilizações recomendadas

- Betão armado
  Indicado principalmente para as classes de resistência C12/15 a C25/30
- Pré-fabricação
  Elementos estruturais em betão armado sem exigências mecânicas significativas
  Artefactos e outros elementos em betão simples
- Betonagem de grandes massas
- Betão simples de uso geral em fundações e elevações
- Argamassas de todos os tipos
- Solo cimento

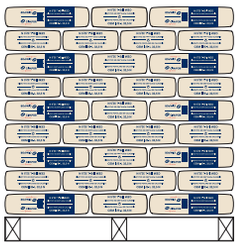
Precauções na aplicação

- Respeitar as dosagens de cimento mínimas e as relações água/cimento máximas normativas
- Assegurar uma cura e proteção adequadas de acordo com as disposições normativas
- Não retirar cofragem nem remover escoramento antes do betão ter a resistência suficiente
- Em ambientes agressivos seguir estritamente as recomendações normativas e os textos técnicos sobre o assunto

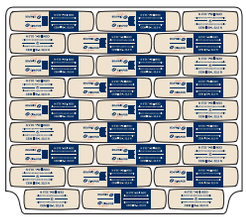
Contraindicações

- Betonagem sob temperaturas baixas

Acondicionamento



Palete platificada - Tara perdida
72 Sacos de 25 kg – 1800 kg



Pacotão
71 Sacos de 25 kg – 1775 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente selado



Granel
25 toneladas

Ambiente e Segurança

- Usar vestuário de proteção, luvas e equipamento protetor para a vista/face adequados
- Quando ensacado contém redutor de crómio (VI). O seu período de validade é de dois meses após a data de ensacagem, sempre que se respeitem as condições de armazenagem mencionadas no saco
- A produção deste cimento representa uma diminuição das emissões de CO_2 para a atmosfera
- Para mais informações, consulte a Ficha de Dados de Segurança, disponível em www.cimpor-portugal.pt

CIMPOR
uma empresa InterCement

SERVIÇO COMERCIAL
Rua Alexandre Herculano, 35 - 1250-009 LISBOA
Tel.: (+351) 21 311 81 00 - Fax: (+351) 21 311 82 21

SERVIÇO TÉCNICO-COMERCIAL
Rua Alexandre Herculano, 35 - 1250-009 LISBOA
Tel.: (+351) 21 311 81 00 - Fax: (+351) 21 311 82 21

SERVIÇO DE CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO
Av. Américo Duarte - S. Pedro Fins - 4425-504 MAIA
Tel.: (+351) 22 968 80 00 - Fax: (+351) 22 967 18 38

www.cimpor-portugal.pt
Dcomercial@cimpor.com

FT.05_2014/01

ANEXO B

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

AREIA / BRITA 1 / BRITA 2

FOLHA DE REGISTO DE ENSAIOS	AGREGADOS	Pág 1 de 1
Laboratório de Ensaios	Análise granulométrica Método da peneiração	FRE 1A-01
	Norma: NP EN 933-1:2014	

Proc. N.º __/___/___ **Pedido N.º**_____

Cliente/empreitada: _____

Material: _____Areia_____

Identificação: _____

Procedimento usado: lavagem e peneiração

Massa Seca Total (M_1)= _____246,1_____ **(g)**

Massa seca após lavagem (M_2)=_____**(g)**

Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_1 - M_2$ = _____**(g)**

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)		Massa do Material retido - R_i (g)	Percentagem do material retido, P_i (%) $\frac{R_i}{M_1}\times 100$	Percentagem cumulativa do material passado, (%) $100-\sum_1^i P_i$	Percentagem cumulativa do material retido, (%) $\sum_1^i P_i$
Série Base	Série Base + Série 2				
	40	0	0	100	0
31,5	31,5	0	0	100	0
	25	0	0	100	0
	20	0	0	100	0
16	16	0	0	100	0
	14	0	0	100	0
	12,5	0	0	100	0
	10	0	0	100	0
8	8	0	0	100	0
	6,3	0	0	100	0
4	4	1,8	0,7	99,3	0,7
2	2	12,1	4,9	94,3	5,7
1	1	54,5	22,3	72,1	27,9
0,500	0,500	118,9	48,6	23,5	76,5
0,250	0,250	55,4	22,6	0,9	99,1
0,125	0,125	2	0,8	0,1	99,9
0,063	0,063	0,2	0,1		

P **- material restante no fundo , g**	0	Módulo de finura – Nota: ***percentagens cumulativas retidas de todos os peneiros da série BASE*** $MF=\frac{\sum_1^i P_i}{100}$	MF= 3,10

Percentagem de finos (f) que passa através do peneiro de 0,063 mm $f=\frac{(M_1-M_2)+P}{M_1}\times 100$	
Verificação da conformidade do ensaio $\frac{M_2-\left(\sum R_i+P\right)}{M_2}\times 100=$	Ok se < 1 %

Executou: _____ **Data:** __/___/__ **Calculou:** _____ **Verificou:** _____

FOLHA DE REGISTO DE ENSAIOS	AGREGADOS	Pág 1 de 1
Laboratório de Ensaios	Análise granulométrica Método da peneiração	FRE 1A-01
	Norma: NP EN 933-1:2000	

Proc. N.º __/___/___ **Pedido N.º**_____

Cliente/empreitada: _____

Material: _____Brita 1_____

Identificação: _____

Procedimento usado: lavagem e peneiração

Massa Seca Total (M_1)=_____1815,82_____ **(g)**

Massa seca após lavagem (M_2)=_____(g)

Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_1 - M_2$ = _____(g)

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)		Massa do Material retido - R_i (g)	Percentagem do material retido, P_i (%) $\frac{R_i}{M_1}\times 100$	Percentagem cumulativa do material passado, (%) $100-\sum_1^i P_i$	Percentagem cumulativa do material retido, (%) $\sum_1^i P_i$
Série Base	Série Base + Série 2				
	40	0	0	100	0
31,5	31,5	0	0	100	0
	25	0	0	100	0
	20	0	0	100	0
16	16	0	0	100	0
	14	0	0	100	0
	12,5	11,7	0,6	99,4	0,6
	10	182,0	10,0	89,3	10,7
8	8	283,6	15,6	73,7	26,3
	6,3	458,5	25,3	48,5	51,5
4	4	821,3	45,2	3,2	96,8
2	2	55,9	3,1	0,2	99,8
1	1	1,4	0,1	0,1	99,9
0,500	0,500	0,6	0	0	100
0,250	0,250	0,5	0	0	100
0,125	0,125	0,2	0	0	100
0,063	0,063	0,1	0		

P **- material restante no fundo , g**	0,02	**Módulo de finura – Nota:** ***percentagens cumulativas retidas de todos os peneiros da série BASE*** $MF=\frac{\sum_1^i P_i}{100}$	**MF= 6,23**

Percentagem de finos (f) que passa através do peneiro de 0,063 mm $f=\frac{(M_1-M_2)+P}{M_1}\times 100$	
Verificação da conformidade do ensaio $\frac{M_2-\left(\sum R_i+P\right)}{M_2}\times 100=$	**Ok se < 1 %**

Executou: _____ **Data:** __/___/__ **Calculou:** _____ **Verificou:** _____

FOLHA DE REGISTO DE ENSAIOS	AGREGADOS	Pág 1 de 1
Laboratório de Ensaios	Análise granulométrica Método da peneiração	FRE 1A-01
	Norma: NP EN 933-1:2000	

Proc. N.º __/___/___ **Pedido N.º**_____

Cliente/empreitada: _____

Material: _____Brita 2_____

Identificação: _____

Procedimento usado: lavagem e peneiração

Massa Seca Total (M_1)=_____6983,3_____ **(g)**

Massa seca após lavagem (M_2)=_____**(g)**

Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_1 - M_2$ = _____**(g)**

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)		Massa do Material retido - R_i (g)	Percentagem do material retido, P_i (%) $\frac{R_i}{M_1}\times 100$	Percentagem cumulativa do material passado, (%) $100-\sum_1^i P_i$	Percentagem cumulativa do material retido, (%) $\sum_1^i P_i$
Série Base	Série Base + Série 2				
	40	0	0	100	0
31,5	31,5	0	0	100	0
	25	0	0	100	0
	20	427,4	6,1	93,9	6,1
16	16	2665,7	38,3	55,6	44,4
	14	1944,5	27,9	27,7	72,3
	12,5	1248,6	17,9	9,8	90,2
	10	551,4	7,9	1,9	98,1
8	8	72,4	1,0	0,8	99,2
	6,3	32,6	0,5	0,4	99,6
4	4	17,2	0,2	0,1	99,9
2	2	2,3	0	0,1	99,9
1	1	0,5	0	0,1	99,9
0,500	0,500	0,5	0	0,1	99,9
0,250	0,250	1,3	0	0	100
0,125	0,125	1	0	0	100
0,063	0,063	0,8	0		

P **- material restante no fundo , g**	1,6	Módulo de finura – Nota: ***percentagens cumulativas retidas de todos os peneiros da série BASE*** $MF=\frac{\sum_1^i P_i}{100}$	MF= 7,43

Percentagem de finos (f) que passa através do peneiro de 0,063 mm $f=\frac{(M_1-M_2)+P}{M_1}\times 100$	
Verificação da conformidade do ensaio $\frac{M_2-(\sum R_i+P)}{M_2}\times 100=$	Ok se < 1 %

Executou: _____ **Data:** __/___/__ **Calculou:** _____ **Verificou:** _____

ANEXO C

MASSA VOLÚMICA APARENTE DOS AGREGADOS

	Areia				
Peso do recepiente de 1L (g)	M1 - 0,790	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Massa do recipiente + Provete - M2 (kg)		2,2853	2,2798	2,2785	2,2798
Baridade Média (kg)		1,4953	1,4898	1,4885	1,4898

	Brita 1				
Peso do recepiente de 5L (g)	M1 - 2,9464	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Massa do recipiente + Provete - M2 (kg)		9,7956	9,8976	9,9121	9,8976
Baridade Média (kg)		6,8492	6,9512	6,9657	6,9512

	Brita 2				
Peso do recepiente de 10L (g)	M1 - 4,9107	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Massa do recipiente + Provete - M2 (kg)		19,0501	19,1078	19,0806	19,0806
Baridade Média (kg)		14,1394	14,1971	14,1699	14,1699

	Vidro				
Peso do recepiente de 10L (g)	M1 - 4,9112	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Massa do recipiente + Provete - M2 (kg)		18,4465	18,4580	18,4630	18,4580
Baridade Média (kg)		13,5353	13,5468	13,5518	13,5468

ANEXO D

ENSAIO DE DESGASTE DOS AGREGADOS NA BETONEIRA

PROCESSO DE AMASSADURA SÓ COM AGREGADO RECICLADO DE VIDRO

Peso em gramas do ARV, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

1ª Amostra					2ª Amostra					3ª Amostra					Média				
Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª
25	0	0	0	0	25	0	0	0	0	25	0	0	0	0	25	0	0	0	0
20	91,1	89,1	86,0	83,5	20	91,0	88,7	87,2	85,0	20	91,2	90,3	85,9	81,8	20	91,1	89,4	86,4	83,4
16	566,3	536,7	509,6	507,7	16	566,2	529,3	519,1	511,6	16	565,8	522,8	518,0	511,8	16	566,1	529,6	515,6	510,4
14	413,6	406,2	430,0	427,3	14	423,2	363,8	370,8	378,8	14	413,0	387,0	382,7	376,5	14	416,6	385,7	394,5	394,2
12,5	272,4	294,8	268,0	271,4	12,5	272,1	266,7	262,5	256,8	12,5	272,2	265,7	262,2	266,9	12,5	272,2	275,7	264,2	265,0
10	219,0	208,8	234,8	235,9	10	218,9	289,2	294,7	299,0	10	219,1	258,2	255,4	263,4	10	219,0	252,1	261,6	266,1
8	175,1	196,6	181,3	170,8	8	175,0	166,4	165,7	167,7	8	175,0	183,8	180,8	175,5	8	175,0	182,3	175,9	171,3
6,3	264,0	215,6	219,9	214,9	6,3	264,0	231,6	212,6	223,9	6,3	264,0	270,0	259,6	243,9	6,3	264,0	239,1	230,7	227,6
4	465,0	501,0	513,6	523,6	4	465,0	524,8	541,9	527,3	4	465,0	478,1	503,4	515,9	4	465,0	501,3	519,6	522,3
2	32,0	35,0	33,5	33,8	2	32,0	30,6	31,2	27,7	2	32,0	29,6	29,0	30,1	2	32,0	31,7	31,2	30,5
1	1,0	4,0	6,0	6,4	1	1,0	2,4	3,3	3,6	1	1,0	3,5	3,9	4,9	1	1,0	3,3	4,4	5,0
0,5	1,0	3,5	4,6	5,5	0,5	1,0	1,9	2,6	2,5	0,5	1,0	2,5	3,9	5,3	0,5	1,0	2,6	3,7	4,4
0,25	1,0	2,7	2,5	3,1	0,25	1,0	1,7	1,9	1,5	0,25	1,0	1,5	1,7	2,6	0,25	1,0	2,0	2,0	2,4
0,125	0,0	1,7	0,9	0,9	0,125	0,0	1,2	0,8	0,8	0,125	0,0	0,9	0,6	1,2	0,125	0,0	1,3	0,8	1,0
0,063	0,0	0,8	0,3	0,4	0,063	0,0	1,0	0,4	0,5	0,063	0,0	0,2	0,2	0,5	0,063	0,0	0,7	0,3	0,5
Refugo	0,0	0,6	0,7	0,6	Refugo	0,0	0,9	0,6	0,4	Refugo	0,0	0,1	0,4	0,7	Refugo	0,0	0,5	0,6	0,6
Total	2501,5	2497,1	2491,7	2485,8	Total	2501,5	2500,2	2495,3	2487,1	Total	2501,5	2494,2	2487,7	2481,0	Total	2504,1	2497,2	2491,6	2484,6

Peso acumulado, em gramas, do ARV, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª

1ª Amostra					2ª Amostra					3ª Amostra					Média				
Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª
20	91,1	89,1	86	83,5	20	91,0	88,7	87,2	85,0	20	91,2	90,3	85,9	81,8	20	91,1	89,4	86,4	83,4
16	657,4	625,8	595,6	591,2	16	657,2	618,0	606,3	596,6	16	657,0	613,1	603,9	593,6	16	657,2	619,0	601,9	593,8
14	1071	1032	1025,6	1018,5	14	1080,4	981,8	977,1	975,4	14	1070,0	1000,1	986,6	970,1	14	1073,8	1004,6	996,4	988,0
12,5	1343,4	1326,8	1293,6	1289,9	12,5	1352,5	1248,5	1239,6	1232,2	12,5	1342,2	1265,8	1248,8	1237,0	12,5	1346,0	1280,4	1260,7	1253,0
10	1562,4	1535,6	1528,4	1525,8	10	1571,4	1537,7	1534,3	1531,2	10	1561,3	1524,0	1504,2	1500,4	10	1565,0	1532,4	1522,3	1519,1
8	1737,5	1732,2	1709,7	1696,6	8	1746,4	1704,1	1700,0	1698,9	8	1736,3	1707,8	1685,0	1675,9	8	1740,1	1714,7	1698,2	1690,5
6,3	2001,5	1947,8	1929,6	1911,5	6,3	2010,4	1935,7	1912,6	1922,8	6,3	2000,3	1977,8	1944,6	1919,8	6,3	2004,1	1953,8	1928,9	1918,0
4	2466,5	2448,8	2443,2	2435,1	4	2475,4	2460,5	2454,5	2450,1	4	2465,3	2455,9	2448,0	2435,7	4	2469,1	2455,1	2448,6	2440,3
2	2498,5	2483,8	2476,7	2468,9	2	2507,4	2491,1	2485,7	2477,8	2	2497,3	2485,5	2477,0	2465,8	2	2501,1	2486,8	2479,8	2470,8
1	2499,5	2487,8	2482,7	2475,3	1	2508,4	2493,5	2489,0	2481,4	1	2498,3	2489,0	2480,9	2470,7	1	2502,1	2490,1	2484,2	2475,8
0,5	2500,5	2491,3	2487,3	2480,8	0,5	2509,4	2495,4	2491,6	2483,9	0,5	2499,3	2491,5	2484,8	2476,0	0,5	2503,1	2492,7	2487,9	2480,2
0,25	2501,5	2494	2489,8	2483,9	0,25	2510,4	2497,1	2493,5	2485,4	0,25	2500,3	2493,0	2486,5	2478,6	0,25	2504,1	2494,7	2489,9	2482,6
0,125	2501,5	2495,7	2490,7	2484,8	0,125	2510,4	2498,3	2494,3	2486,2	0,125	2500,3	2493,9	2487,1	2479,8	0,125	2504,1	2496,0	2490,7	2483,6
0,063	2501,5	2496,5	2491	2485,2	0,063	2510,4	2499,3	2494,7	2486,7	0,063	2500,3	2494,1	2487,3	2480,3	0,063	2504,1	2496,6	2491,0	2484,1
Refugo	2501,5	2497,1	2491,7	2485,8	Refugo	2510,4	2500,2	2495,3	2487,1	Refugo	2500,3	2494,2	2487,7	2481,0	Refugo	2504,1	2497,2	2491,6	2484,6

Análise granulométrica do ARV, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

Inicial			Acumulado		1ª			Acumulado		2ª			Acumulado		3ª			Acumulado	
Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido
25	0	0%	100%	0%	25	0	0%	100%	0%	25	0	0%	100%	0%	25	0	0%	100%	0%
20	91,1	4%	96%	4%	20	89,4	4%	96%	4%	20	86,4	3%	97%	3%	20	83,4	3%	97%	3%
16	566,1	23%	74%	26%	16	529,6	21%	75%	25%	16	515,6	21%	76%	24%	16	510,4	21%	76%	24%
14	416,6	17%	57%	43%	14	385,7	15%	60%	40%	14	394,5	16%	60%	40%	14	394,2	16%	60%	40%
12,5	272,2	11%	46%	54%	12,5	275,7	11%	49%	51%	12,5	264,2	11%	49%	51%	12,5	265,0	11%	50%	50%
10	219,0	9%	38%	62%	10	252,1	10%	39%	61%	10	261,6	11%	39%	61%	10	266,1	11%	39%	61%
8	175,0	7%	31%	69%	8	182,3	7%	31%	69%	8	175,9	7%	32%	68%	8	171,3	7%	32%	68%
6,3	264,0	11%	20%	80%	6,3	239,1	10%	22%	78%	6,3	230,7	9%	23%	77%	6,3	227,6	9%	23%	77%
4	465,0	19%	1%	99%	4	501,3	20%	2%	98%	4	519,6	21%	2%	98%	4	522,3	21%	2%	98%
2	32,0	1%	0%	100%	2	31,7	1%	0%	100%	2	31,2	1%	0%	100%	2	30,5	1%	1%	99%
1	1,0	0%	0%	100%	1	3,3	0%	0%	100%	1	4,4	0%	0%	100%	1	5,0	0%	0%	100%
0,5	1,0	0%	0%	100%	0,5	2,6	0%	0%	100%	0,5	3,7	0%	0%	100%	0,5	4,4	0%	0%	100%
0,25	1,0	0%	0%	100%	0,25	2,0	0%	0%	100%	0,25	2,0	0%	0%	100%	0,25	2,4	0%	0%	100%
0,125	0,0	0%	0%	100%	0,125	1,3	0%	0%	100%	0,125	0,8	0%	0%	100%	0,125	1,0	0%	0%	100%
0,063	0,0	0%	0%	100%	0,063	0,7	0%	0%	100%	0,063	0,3	0%	0%	100%	0,063	0,5	0%	0%	100%
Refugo	0,0	**Módulo Finura:**		6,94	Refugo	0,5	**Módulo Finura:**		6,91	Refugo	0,6	**Módulo Finura:**		6,39	Refugo	0,6	**Módulo Finura:**		6,39
Total	2504,1				Total	2497,2				Total	2491,6				Total	2484,6			

PROCESSO DE AMASSADURA SÓ COM AGREGADO NATURAL BRITADO

Peso em gramas do ANB, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

1ª Amostra					2ª Amostra					3ª Amostra					Média				
Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª
25	0	0	0	0	25	0	0	0	0	25	0	0	0	0	25	0	0	0	0
20	91,2	91,0	88,0	78,4	20	90,1	71,7	56,2	36,7	20	91,0	58,9	58,8	57,0	20	90,8	73,9	67,7	57,4
16	566,6	549,1	531,5	509,8	16	566,3	572,0	545,0	550,8	16	566,6	564,4	552,4	536,1	16	566,5	561,8	543,0	532,2
14	412,8	394,7	408,6	356,8	14	411,9	383,5	411,1	401,5	14	412,6	408,8	388,3	399,5	14	412,4	395,7	402,7	385,9
12,5	271,8	288,1	261,3	329,7	12,5	272,5	248,0	290,8	309,4	12,5	272,5	273,2	282,0	261,9	12,5	272,3	269,8	278,0	300,3
10	219,6	141,4	171,0	182,4	10	219,5	270,8	239,4	229,3	10	219,0	240,1	247,8	239,9	10	219,4	217,4	219,4	217,2
8	175,2	157,4	156,8	131,1	8	176,5	126,3	126,1	123,7	8	175,0	154,5	160,7	152,2	8	175,6	146,1	147,9	135,7
6,3	263,9	286,3	246,2	229,8	6,3	264,3	253,7	250,7	247,4	6,3	264,2	233,7	231,4	236,4	6,3	264,1	257,9	242,8	237,9
4	465,1	540,0	565,5	568,6	4	465,1	519,3	520,8	532,0	4	465,1	510,1	519,7	547,4	4	465,1	523,1	535,3	549,3
2	32,2	44,0	44,2	56,7	2	32,1	44,5	47,9	51,8	2	32,1	50,5	51,3	48,8	2	32,1	46,3	47,8	52,4
1	1,0	1,7	1,8	2,5	1	1,1	1,5	1,6	1,8	1	1,2	1,7	2,0	2,2	1	1,1	1,6	1,8	2,2
0,5	1,0	1,2	1,0	1,4	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	0,5	0,7	1,0	0,9	1,0	0,5	0,8	1,1	1,0	1,3
0,25	1,0	0,7	0,4	0,8	0,25	1,0	1,3	1,1	1,2	0,25	1,0	1,3	1,2	1,2	0,25	1,0	1,1	0,9	1,1
0,125	0,0	0,2	0,1	0,1	0,125	0,0	0,6	0,3	0,4	0,125	0,0	1,6	0,3	0,3	0,125	0,0	0,8	0,2	0,3
0,063	0,0	0,6	0,4	0,6	0,063	0,0	1,4	1,1	1,0	0,063	0,0	1,3	1,3	1,1	0,063	0,0	1,1	0,9	0,9
Refugo	0,0	0,1	0,1	0,2	Refugo	0,0	0,2	0,1	0,1	Refugo	0,0	0,2	0,1	0,2	Refugo	0,0	0,2	0,1	0,2
Total	2501,4	2496,5	2476,9	2448,9	Total	2501,4	2495,8	2493,4	2488,5	Total	2501,4	2501,3	2498,2	2485,2	Total	2501,2	2497,9	2489,5	2474,2

Peso acumulado, em gramas, do ANB, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

1ª Amostra					2ª Amostra					3ª Amostra					Média				
Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª
20	91,2	91	88	78,4	20	90,1	71,7	56,2	36,7	20	91,0	58,9	58,8	57,0	20	90,8	73,9	67,7	57,4
16	657,8	640,1	619,5	588,2	16	656,4	643,7	601,2	587,5	16	657,6	623,3	611,2	593,1	16	657,3	635,7	610,6	589,6
14	1070,6	1034,8	1028,1	945	14	1068,3	1027,2	1012,3	989,0	14	1070,2	1032,1	999,5	992,6	14	1069,7	1031,4	1013,3	975,5
12,5	1342,4	1322,9	1289,4	1274,7	12,5	1340,8	1275,2	1303,1	1298,4	12,5	1342,7	1305,3	1281,5	1254,5	12,5	1342,0	1301,1	1291,3	1275,9
10	1562	1464,3	1460,4	1457,1	10	1560,3	1546,0	1542,5	1527,7	10	1561,7	1545,4	1529,3	1494,4	10	1561,3	1518,6	1510,7	1493,1
8	1737,2	1621,7	1617,2	1588,2	8	1736,8	1672,3	1668,6	1651,4	8	1736,7	1699,9	1690,0	1646,6	8	1736,9	1664,6	1658,6	1628,7
6,3	2001,1	1908	1863,4	1818	6,3	2001,1	1926,0	1919,3	1898,8	6,3	2000,9	1933,6	1921,4	1883,0	6,3	2001,0	1922,5	1901,4	1866,6
4	2466,2	2448	2428,9	2386,6	4	2466,2	2445,3	2440,1	2430,8	4	2466,0	2443,7	2441,1	2430,4	4	2466,1	2445,7	2436,7	2415,9
2	2498,4	2492	2473,1	2443,3	2	2498,3	2489,8	2488,0	2482,6	2	2498,1	2494,2	2492,4	2479,2	2	2498,3	2492,0	2484,5	2468,4
1	2499,4	2493,7	2474,9	2445,8	1	2499,4	2491,3	2489,6	2484,4	1	2499,3	2495,9	2494,4	2481,4	1	2499,4	2493,6	2486,3	2470,5
0,5	2500,4	2494,9	2475,9	2447,2	0,5	2500,2	2492,3	2490,8	2485,8	0,5	2500,0	2496,9	2495,3	2482,4	0,5	2500,2	2494,7	2487,3	2471,8
0,25	2501,4	2495,6	2476,3	2448	0,25	2501,2	2493,6	2491,9	2487,0	0,25	2501,0	2498,2	2496,5	2483,6	0,25	2501,2	2495,8	2488,2	2472,9
0,125	2501,4	2495,8	2476,4	2448,1	0,125	2501,2	2494,2	2492,2	2487,4	0,125	2501,0	2499,8	2496,8	2483,9	0,125	2501,2	2496,6	2488,5	2473,1
0,063	2501,4	2496,4	2476,8	2448,7	0,063	2501,2	2495,6	2493,3	2488,4	0,063	2501,0	2501,1	2498,1	2485,0	0,063	2501,2	2497,7	2489,4	2474,0
Refugo	2501,4	2496,5	2476,9	2448,9	Refugo	2501,2	2495,8	2493,4	2488,5	Refugo	2501,0	2501,3	2498,2	2485,2	Refugo	2501,2	2497,9	2489,5	2474,2

Análise granulométrica do ANB, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

Inicial			Acumulado		1ª			Acumulado		2ª			Acumulado		3ª			Acumulado	
Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido
25	0	0%	100%	0%	25	0	0%	100%	0%	25	0	0%	100%	0%	25	0	0%	100%	0%
20	90,9	4%	96%	4%	20	89,9	4%	96%	4%	20	88,9	4%	96%	4%	20	87,7	4%	96%	4%
16	566,0	23%	74%	26%	16	476,9	19%	77%	23%	16	461,7	19%	78%	22%	16	449,0	18%	78%	22%
14	413,0	17%	57%	43%	14	393,0	16%	62%	38%	14	379,2	15%	63%	37%	14	363,2	15%	63%	37%
12,5	272,2	11%	46%	54%	12,5	273,9	11%	51%	49%	12,5	276,1	11%	52%	48%	12,5	276,2	11%	52%	48%
10	219,1	9%	38%	62%	10	284,1	11%	40%	60%	10	277,9	11%	41%	59%	10	283,8	12%	41%	59%
8	175,1	7%	31%	69%	8	165,8	7%	33%	67%	8	163,2	7%	34%	66%	8	161,1	7%	34%	66%
6,3	264,0	11%	20%	80%	6,3	224,1	9%	24%	76%	6,3	215,2	9%	25%	75%	6,3	204,5	8%	26%	74%
4	465,0	19%	1%	99%	4	517,0	21%	4%	96%	4	523,2	21%	4%	96%	4	522,1	21%	5%	95%
2	32,0	1%	0%	100%	2	32,4	1%	2%	98%	2	35,0	1%	3%	97%	2	36,5	1%	3%	97%
1	1,0	0%	0%	100%	1	20,5	1%	2%	98%	1	25,9	1%	2%	98%	1	28,2	1%	2%	98%
0,5	1,0	0%	0%	100%	0,5	12,0	0%	1%	99%	0,5	14,4	1%	1%	99%	0,5	14,1	1%	1%	99%
0,25	1,0	0%	0%	100%	0,25	9,2	0%	1%	99%	0,25	10,2	0%	1%	99%	0,25	10,2	0%	1%	99%
0,125	0,0	0%	0%	100%	0,125	9,4	0%	0%	100%	0,125	10,9	0%	1%	99%	0,125	10,7	0%	1%	99%
0,063	0,0	0%	0%	100%	0,063	7,8	0%	0%	100%	0,063	10,4	0%	0%	100%	0,063	10,3	0%	0%	100%
Refugo	0,0	**Módulo Finura:**		6,94	Refugo	2,4	**Módulo Finura:**		6,79	Refugo	3,2	**Módulo Finura:**		6,26	Refugo	3,1	**Módulo Finura:**		6,25
Total	2500,3				Total	2518,4				Total	2495,3				Total	2460,8			

PROCESSO DE AMASSADURA SÓ COM AGREGADO RECICLADO DE VIDRO QUANDO ENSAIADO EM CONJUNTO COM 7,5 KG DE AGREGADO NATURAL BRITADO

Peso em gramas do ARV, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

1ª Amostra					2ª Amostra					3ª Amostra					Média				
Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª
25	0	0	0	0	25	0	0	0	0	25	0	0	0	0	25	0	0	0	0
20	90,5	89,9	88,6	86,2	20	91,3	90,1	89,3	88,9	20	90,8	89,6	88,7	87,9	20	90,9	89,9	88,9	87,7
16	566,1	493,1	472,0	462,6	16	566,0	480,2	459,3	433,5	16	565,8	457,5	453,9	450,9	16	566,0	476,9	461,7	449,0
14	412,9	379,0	372,3	351,9	14	413,2	389,7	387,2	367,8	14	413,0	410,4	378,0	369,9	14	413,0	393,0	379,2	363,2
12,5	272,3	269,4	264,2	257,6	12,5	272,3	301,7	293,8	326,2	12,5	272,0	250,5	270,3	244,9	12,5	272,2	273,9	276,1	276,2
10	219,3	284,5	285,1	278,9	10	219,1	273,4	272,4	275,5	10	218,9	294,3	276,3	297,0	10	219,1	284,1	277,9	283,8
8	175,3	184,2	164,3	163,1	8	175,0	152,4	154,0	145,5	8	175,0	160,9	171,2	174,8	8	175,1	165,8	163,2	161,1
6,3	263,9	221,5	210,6	201,8	6,3	264,0	226,1	210,1	202,7	6,3	264,1	224,7	224,8	208,9	6,3	264,0	224,1	215,2	204,5
4	465,1	516,1	529,7	526,8	4	465,0	509,8	528,2	529,6	4	465,0	525,2	511,7	509,8	4	465,0	517,0	523,2	522,1
2	32,0	32,7	35,1	37,1	2	32,0	30,2	32,6	34,5	2	32,0	34,4	37,2	38,0	2	32,0	32,4	35,0	36,5
1	1,0	23,0	28,8	32,2	1	1,0	20,2	26,1	28,3	1	1,0	18,3	22,9	24,2	1	1,0	20,5	25,9	28,2
0,5	1,0	13,8	18,9	21,2	0,5	1,0	11,5	15,1	9,3	0,5	1,0	10,6	9,1	11,9	0,5	1,0	12,0	14,4	14,1
0,25	1,0	11,4	17,2	19,6	0,25	1,0	8,7	7,5	5,1	0,25	1,0	7,5	5,9	6,0	0,25	1,0	9,2	10,2	10,2
0,125	0,0	12,7	17,8	19,2	0,125	0,0	9,2	6,8	4,3	0,125	0,0	6,2	8,0	8,5	0,125	0,0	9,4	10,9	10,7
0,063	0,0	10,1	17,3	19,3	0,063	0,0	6,5	6,4	7,5	0,063	0,0	6,7	7,5	4,1	0,063	0,0	7,8	10,4	10,3
Refugo	0,0	2,8	6,7	4,0	Refugo	0,0	1,8	1,7	3,6	Refugo	0,0	2,7	1,2	1,8	Refugo	0,0	2,4	3,2	3,1
Total	2500,4	2544,2	2528,6	2481,5	Total	2500,9	2511,5	2490,5	2462,3	Total	2499,6	2499,5	2466,7	2438,6	Total	2500,3	2518,4	2495,3	2460,8
Peso da Brita	7505,4	7456,2	7430,7	7395,4	Peso da Brita	7500,3	7466,9	7450,4	7417,2	Peso da Brita	7509,9	7488,8	7463,8	7435,7	Peso da Brita	7505,2	7470,6	7448,3	7416,1

Peso acumulado, em gramas, do ARV, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

1ª Amostra					2ª Amostra					3ª Amostra					Média				
Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª	Abertura malha mm	Inicial	1ª	2ª	3ª
20	90,5	89,9	88,6	86,2	20	91,3	90,1	89,3	88,9	20	90,8	89,6	88,7	87,9	20	90,9	89,9	88,9	87,7
16	656,6	583,0	560,6	548,8	16	657,3	570,3	548,6	522,4	16	656,6	547,1	542,6	538,8	16	656,8	566,8	550,6	536,7
14	1069,5	962	932,9	900,7	14	1070,5	960,0	935,8	890,2	14	1069,6	957,5	920,6	908,7	14	1069,9	959,8	929,8	899,9
12,5	1341,8	1231,4	1197,1	1158,3	12,5	1342,8	1261,7	1229,6	1216,4	12,5	1341,6	1208,0	1190,9	1153,6	12,5	1342,1	1233,7	1205,9	1176,1
10	1561,1	1515,9	1482,2	1437,2	10	1561,9	1535,1	1502,0	1491,9	10	1560,5	1502,3	1467,2	1450,6	10	1561,2	1517,8	1483,8	1459,9
8	1736,4	1700,1	1646,5	1600,3	8	1736,9	1687,5	1656,0	1637,4	8	1735,5	1663,2	1638,4	1625,4	8	1736,3	1683,6	1647,0	1621,0
6,3	2000,3	1921,6	1857,1	1802,1	6,3	2000,9	1913,6	1866,1	1840,1	6,3	1999,6	1887,9	1863,2	1834,3	6,3	2000,3	1907,7	1862,1	1825,5
4	2465,4	2437,7	2386,8	2328,9	4	2465,9	2423,4	2394,3	2369,7	4	2464,6	2413,1	2374,9	2344,1	4	2465,3	2424,7	2385,3	2347,6
2	2497,4	2470,4	2421,9	2366	2	2497,9	2453,6	2426,9	2404,2	2	2496,6	2447,5	2412,1	2382,1	2	2497,3	2457,2	2420,3	2384,1
1	2498,4	2493,4	2450,7	2398,2	1	2498,9	2473,8	2453,0	2432,5	1	2497,6	2465,8	2435,0	2406,3	1	2498,3	2477,7	2446,2	2412,3
0,5	2499,4	2507,2	2469,6	2419,4	0,5	2499,9	2485,3	2468,1	2441,8	0,5	2498,6	2476,4	2444,1	2418,2	0,5	2499,3	2489,6	2460,6	2426,5
0,25	2500,4	2518,6	2486,8	2439	0,25	2500,9	2494,0	2475,6	2446,9	0,25	2499,6	2483,9	2450,0	2424,2	0,25	2500,3	2498,8	2470,8	2436,7
0,125	2500,4	2531,3	2504,6	2458,2	0,125	2500,9	2503,2	2482,4	2451,2	0,125	2499,6	2490,1	2458,0	2432,7	0,125	2500,3	2508,2	2481,7	2447,4
0,063	2500,4	2541,4	2521,9	2477,5	0,063	2500,9	2509,7	2488,8	2458,7	0,063	2499,6	2496,8	2465,5	2436,8	0,063	2500,3	2516,0	2492,1	2457,7
Refugo	2500,4	2544,2	2528,6	2481,5	Refugo	2500,9	2511,5	2490,5	2462,3	Refugo	2499,6	2499,5	2466,7	2438,6	Refugo	2500,3	2518,4	2495,3	2460,8

Análise granulométrica do ARV, inicial e depois da 1ª, 2ª e 3ª operação

Inicial			Acumulado		1ª			Acumulado		2ª			Acumulado		3ª			Acumulado	
Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido	Abertura malha mm	Massa retida Total g	%	% passado	% retido
25	0,0	0%	100%	0%	25	0,0	0%	100%	0%	25	0,0	0%	100%	0%	25	0	0%	100%	0%
20	90,8	4%	96%	4%	20	73,9	3%	97%	3%	20	67,7	3%	97%	3%	20	57	2%	98%	2%
16	566,5	23%	74%	26%	16	561,8	22%	75%	25%	16	543,0	22%	75%	25%	16	532	22%	76%	24%
14	412,4	16%	57%	43%	14	395,7	16%	59%	41%	14	402,7	16%	59%	41%	14	386	16%	61%	39%
12,5	272,3	11%	46%	54%	12,5	269,8	11%	48%	52%	12,5	278,0	11%	48%	52%	12,5	300	12%	48%	52%
10	219,4	9%	38%	62%	10	217,4	9%	39%	61%	10	219,4	9%	39%	61%	10	217	9%	40%	60%
8	175,6	7%	31%	69%	8	146,1	6%	33%	67%	8	147,9	6%	33%	67%	8	136	5%	34%	66%
6,3	264,1	11%	20%	80%	6,3	257,9	10%	23%	77%	6,3	242,8	10%	24%	76%	6,3	238	10%	25%	75%
4	465,1	19%	1%	99%	4	523,1	21%	2%	98%	4	535,3	22%	2%	98%	4	549	22%	2%	98%
2	32,1	1%	0%	100%	2	46,3	2%	0%	100%	2	47,8	2%	0%	100%	2	52	2%	0%	100%
1	1,1	0%	0%	100%	1	1,6	0%	0%	100%	1	1,8	0%	0%	100%	1	2	0%	0%	100%
0,5	0,8	0%	0%	100%	0,5	1,1	0%	0%	100%	0,5	1,0	0%	0%	100%	0,5	1	0%	0%	100%
0,25	1,0	0%	0%	100%	0,25	1,1	0%	0%	100%	0,25	0,9	0%	0%	100%	0,25	1	0%	0%	100%
0,125	0,0	0%	0%	100%	0,125	0,8	0%	0%	100%	0,125	0,2	0%	0%	100%	0,125	0	0%	0%	100%
0,063	0,0	0%	0%	100%	0,063	1,1	0%	0%	100%	0,063	0,9	0%	0%	100%	0,063	1	0%	0%	100%
Refugo	Refugo	**Módulo Finura:**		6,94	Refugo	0,2	**Módulo Finura:**		6,89	Refugo	0,1	**Módulo Finura:**		6,37	Refugo	0	**Módulo Finura:**		6,35
Total	Total				Total	2501,2				Total	2497,9				Total	2489,5			

ANEXO E

ENSAIO DE DESGASTE *LOS ANGELES*

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UPAVMAT - Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes

NP EN 1097-2: 2011 - Determinação da resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles

DATA	Agregados Grossos	PROCESSO Nº

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:

Massa da amostra passada no peneiro de 14mm e retida no de 10mm			**(kg)**	4,9987
Massa do material passado no peneiro de	12,5 mm		(g)	2766,7
Percentagem do material passado no peneiro de		(60 a 70)	(%)	**55** passar peneiro 11,2mm
Massa do material passado no peneiro de	11,2 mm		(g)	2232,0
Percentagem do material passado no peneiro de		(30 a 40)	(%)	**45**

Número total de esferas			**11**
Número total de rotações			**500**
Massa total das esferas a utilizar no ensaio	4,690 a 4,860	**(kg)**	4,816
Massa constante da amostra a ensaiar	5000 ± 5	(g)	4998,7
Massa constante da amostra após a realização do ensaio (m) (material retido no peneiro de 1,6mm)		(g)	2917,6
Coeficiente Los Angeles $LA = \frac{5000 - m}{50}$		**(LA)**	**42**

Equipamentos utilizados:

Observações:

OPERADOR: **VISTO:**

ANEXO F

QUANTIDADES USADAS NOS BETÕES

Quantidades por amassadura

Constituintes	Betão Referência	Betão 25 % Betoneira	Betão 50 % Betoneira	Betão 25 % Manual	Betão 50 % Manual	Unidades
Cimento	4,253	4,253	4,253	4,253	4,253	kg
Areia	9,932	9,932	9,932	9,932	9,932	kg
Brita 1	4,684	1,171	2,342	1,171	2,342	kg
Brita 2	6,799	1,699	3,399	1,699	3,399	kg
Vidro	0,000	2,698	5,395	2,698	5,395	kg
Água	2,200	2,200	2,200	2,200	2,200	l

Quantidades por metro cúbico

Constituintes	Betão Referência	Betão 25 % Betoneira	Betão 50 % Betoneira	Betão 25 % Manual	Betão 50 % Manual	Unidades
Cimento	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000	kg/m^3
Areia	817,445	817,445	817,445	817,445	817,445	kg/m^3
Brita 1	385,522	96,378	192,755	96,378	192,755	kg/m^3
Brita 2	559,612	139,865	279,730	139,865	279,730	kg/m^3
Vidro	0,000	222,032	444,065	222,032	444,065	kg/m^3
Água	200,730	200,730	200,730	200,730	200,730	l/m^3

Quantidades usadas por fração granulométrica em cada betão

Betão de Referência			
Abertura malha (mm)	Massa da Brita 1 (g)	Massa da Brita 2 (g)	Massa do Vidro (g)
25	0,0	0,0	0,0
20	0,0	417,0	0,0
16	0,0	2601,1	0,0
14	0,0	1897,4	0,0
12,5	30,2	1219,0	0,0
10	469,5	538,0	0,0
8	731,6	70,6	0,0
6,3	1182,7	31,8	0,0
4	2118,6	16,8	0,0
2	144,2	2,2	0,0
1	3,6	1,0	0,0
0,5	1,5	1,0	0,0
0,25	1,3	1,3	0,0
0,125	0,5	1,0	0,0
0,063	0,3	0,8	0,0
Total	4683,9	6799,1	0,0

Betão com 25 % de ARV			
Abertura malha (mm)	Massa da Brita 1 (g)	Massa da Brita 2 (g)	Massa do Vidro (g)
25	0,0	0,0	0,0
20	0,0	312,8	208,5
16	0,0	1950,8	1300,6
14	0,0	1423,0	948,7
12,5	22,6	913,8	609,2
10	352,1	403,5	269,0
8	548,7	53,0	35,3
6,3	887,0	23,9	15,9
4	1588,9	12,6	8,4
2	108,1	1,7	1,1
1	2,7	0,4	0,2
0,5	1,2	0,4	0,2
0,25	1,0	1,0	0,6
0,125	0,4	0,7	0,5
0,063	0,2	0,6	0,4
Total	3513,0	5098,1	3398,7

Betão com 50 % de ARV			
Abertura malha (mm)	Massa da Brita 1 (g)	Massa da Brita 2 (g)	Massa do Vidro (g)
25	0,0	0,0	0,0
20	0,0	208,5	196,0
16	0,0	1300,6	1222,3
14	0,0	948,7	891,6
12,5	15,1	609,2	586,7
10	234,7	269,0	473,5
8	365,8	35,3	377,0
6,3	591,4	15,9	570,7
4	1059,3	8,4	1003,5
2	72,1	1,1	68,8
1	1,8	0,2	1,9
0,5	0,8	0,2	1,0
0,25	0,6	0,6	1,2
0,125	0,3	0,5	0,7
0,063	0,1	0,4	0,5
Total	2342,0	3398,7	5395,4

ANEXO G

ENSAIO DE ABAIXAMENTO “CONE DE ABRAMS”

BETÕES MISTURADOS NA BETONEIRA

	Número do Provete	Data de Desmoldagem do Provete	Data de Realização do Ensaio	Idade de Cura (Dias)	Abaixamento (mm)
Betão Referência	1	27-01-2014	24-02-2014	28	4
	2				
	3				
	10	29-01-2014	05-02-2014	7	7
	11				
	12				
	19	18-02-2014	20-02-2014	2	23
	20				
	21				
Betão 25 % Betoneira	4	28-01-2014	25-02-2014	28	5
	5				
	6				
	13	29-01-2014	05-02-2014	7	11
	14				
	15				
	22	25-02-2014	27-02-2014	2	12
	23				
	24				
Betão 50 % Betoneira	7	28-01-2014	25-02-2014	28	10
	8				
	9				
	16	30-01-2014	06-02-2014	7	22
	17				
	18				
	25	25-02-2014	27-02-2014	2	5
	26				
	27				

BETÕES MISTURADOS MANUALMENTE

	Número do Provete	Data de Desmoldagem do Provete	Data de Realização do Ensaio	Idade de Cura (Dias)	Abaixamento (mm)
Betão 25 % Manual	28	06-02-2014	04-03-2014	28	12
	29				
	30				
	34	11-02-2014	18-02-2014	7	20
	35				
	36				
	40	17-02-2014	19-02-2014	2	17
	41				
	42				
Betão 50 % Manual	31	06-02-2014	04-03-2014	28	20
	32				
	33				
	37	11-02-2014	18-02-2014	7	23
	38				
	39				
	43	17-02-2014	19-02-2014	2	33
	44				
	45				

ANEXO H

MASSA VOLÚMICA APARENTE E QUANTIDADE DE ÁGUA QUE O BETÃO ACUMULA DURANTE A CONSERVAÇÃO

BETÕES MISTURADOS NA BETONEIRA

Betão	Número do Provete	Data de de Desmoldagem do Provete	Data de Realização do Ensaio	Idade de Cura (Dias)	Peso Inicial (g)	Média	Massa Volumica Aparente	Média	Peso Final (g)	Média	Diferença de pesos (g)	Média	% diferença de pesos	Média
Betão Refência	1	27-01-2014	24-02-2014	28	7959,1	7987,5	2,367	2,363	8008,5	8038,4	49,4	50,8	0,6%	0,01
	2				8000,6				8050,5		49,9		0,6%	
	3				8002,9				8056,1		53,2		0,7%	
	10	29-01-2014	05-02-2014	7	7930,4	7901,3	2,341		7970,1	7941,1	39,7	39,7	0,5%	0,01
	11				7932,8				7974,3		41,5		0,5%	
	12				7840,8				7878,8		38		0,5%	
	19	18-02-2014	20-02-2014	2	7983,4	7975,2	2,363		8021,5	8013,4	38,1	38,3	0,5%	0,00
	20				7975,2				8013,4		38,2		0,5%	
	21				7966,9				8005,4		38,5		0,5%	
Betão 25 % Betoneira	4	28-01-2014	25-02-2014	28	7995,6	7965,4	2,360	2,351	8047,4	8018,9	51,8	53,5	0,6%	0,01
	5				7976,8				8030,6		53,8		0,7%	
	6				7923,7				7978,7		55		0,7%	
	13	29-01-2014	05-02-2014	7	7878,5	7828,6	2,320		7923,3	7873,2	44,8	44,5	0,6%	0,01
	14				7792,6				7837,3		44,7		0,6%	
	15				7814,8				7858,9		44,1		0,6%	
	22	25-02-2014	27-02-2014	2	7924,4	7935,7	2,351		7962,3	7974,7	37,9	39,0	0,5%	0,00
	23				7998,5				8037,4		38,9		0,5%	
	24				7884,1				7924,4		40,3		0,5%	
Betão 50 % Betoneira	7	28-01-2014	25-02-2014	28	7885,7	7845,3	2,325	2,325	7936	7900,1	50,3	54,8	0,6%	0,01
	8				7830,1				7886,4		56,3		0,7%	
	9				7820,1				7877,8		57,7		0,7%	
	16	30-01-2014	06-02-2014	7	7932,3	7914,7	2,345		7973,7	7954,5	41,4	39,8	0,5%	0,01
	17				7849,4				7888,8		39,4		0,5%	
	18				7962,3				8001,0		38,7		0,5%	
	25	25-02-2014	27-02-2014	2	7782,1	7808,8	2,314		7821,1	7848,1	39	39,2	0,5%	0,01
	26				7837,2				7876,1		38,9		0,5%	
	27				7807,2				7847,0		39,8		0,5%	

BETÕES MISTURADOS MANUALMENTE

Betão	Número do Provete	Data de de Desmoldagem do Provete	Data de Realização do Ensaio	Idade de Cura (Dias)	Peso Inicial (g)	Média	Massa Volumica Aparente	Média	Peso Final (g)	Média	Diferença de pesos (g)	Média	% diferença de pesos	Média
Betão 25 % Manual	28	06-02-2014	04-03-2014	28	7964,4	7949,9	2,356	2,356	8023,6	8008,5	59,2	58,6	0,7%	0,01
	29				7970,1				8027,5		57,4		0,7%	
	30				7915,2				7974,5		59,3		0,7%	
	34	11-02-2014	18-02-2014	7	8088,6	8046,4	2,384		8136,4	8094,5	47,8	48,1	0,6%	0,01
	35				8048,3				8095,4		47,1		0,6%	
	36				8002,2				8051,7		49,5		0,6%	
	40	17-02-2014	19-02-2014	2	7890	7881,0	2,335		7918,4	7909,6	28,4	28,6	0,4%	0,00
	41				7863,2				7892,3		29,1		0,4%	
	42				7889,9				7918,1		28,2		0,4%	
Betão 50 % Manual	31	06-02-2014	04-03-2014	28	8016	7979,0	2,364	2,347	8068,4	8033,2	52,4	54,2	0,7%	0,01
	32				7977,3				8031,0		53,7		0,7%	
	33				7943,8				8000,2		56,4		0,7%	
	37	11-02-2014	18-02-2014	7	7873,4	7896,2	2,340		7917,3	7940,3	43,9	44,1	0,6%	0,01
	38				7954,3				7997,8		43,5		0,5%	
	39				7860,9				7905,7		44,8		0,6%	
	43	17-02-2014	19-02-2014	2	7891,2	7921,6	2,347		7919,2	7949,6	28	28,0	0,4%	0,00
	44				7929,6				7957,4		27,8		0,4%	
	45				7944,1				7972,2		28,1		0,4%	

ANEXO I

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Betão	Número do Provete	Data de da Desmoldagem do Provete	Data da Realização do Ensaio	Força (kN)	Resistência (MPa)	Dias	Valor Médio (MPa)	Desv. Pad	Dif. p/ Ref.	Ganho Res. MPa	Ganho Res. %
Betão Referência	1	27-01-2014	24-02-2014	787474	34,999	28	34,107	0,773	-	-	-
	2			756736	33,633						
	3			758013	33,689						
Betão 25 % Betoneira	4	28-01-2014	25-02-2014	746158	33,163	28	33,188	1,780	13,300	-0,919	0,97
	5			706972	31,421						
	6			787048	34,980						
Betão 50 % Betoneira	7	28-01-2014	25-02-2014	699589	31,093	28	31,590	0,623	11,702	-2,517	0,93
	8			706262	31,389						
	9			726494	32,289						
Betão Referência	10	29-01-2014	05-02-2014	438853	19,505	7	19,888	0,500	-	-	-
	11			443393	19,706						
	12			460201	20,453						
Betão 25 % Betoneira	13	29-01-2014	05-02-2014	460343	20,460	7	20,225	0,507	0,337	0,337	1,02
	14			441974	19,643						
	15			462896	20,573						
Betão 50 % Betoneira	16	30-01-2014	06-02-2014	457505	20,334	7	20,336	0,117	0,448	0,448	1,02
	17			460200	20,453						
	18			454951	20,220						

Betão	Número do Provete	Data de da Desmoldagem do Provete	Data da Realização do Ensaio	Força (kN)	Resistência (MPa)	Dias	Valor Médio (MPa)	Desv. Pad	Dif. p/ Ref.	Ganho Res. MPa	Ganho Res. %
Betão Referência	19	18-02-2014	20-02-2014	309981	13,777	2	13,993	0,662	-	-	-
	20			302967	13,465						
	21			331548	14,735						
Betão 25 % Betoneira	22	25-02-2014	27-02-2014	362613	16,116	2	15,310	1,174	1,318	1,318	1,09
	23			314173	13,963						
	24			356656	15,851						
Betão 50 % Betoneira	25	25-02-2014	27-02-2014	392330	17,437	2	17,435	0,103	2,125	2,125	1,14
	26			394599	17,538						
	27			389947	17,331						
Betão 25 % Manual	28	06-02-2014	04-03-2014	810404	36,018	28	36,350	0,581	2,243	18,915	2,08
	29			832979	37,021						
	30			810262	36,012						
Betão 50 % Manual	31	06-02-2014	04-03-2014	623561	27,714	28	27,338	0,831	-9,012	-9,012	0,75
	32			628104	27,916						
	33			593678	26,386						
Betão 25 % Manual	34	11-02-2014	18-02-2014	619016	27,512	7	26,364	1,140	6,476	6,476	1,33
	35			592824	26,348						
	36			567718	25,232						
Betão 50 % Manual	37	11-02-2014	18-02-2014	513321	22,814	7	23,618	0,940	3,730	-2,746	1,19
	38			554668	24,652						
	39			526228	23,388						
Betão 25 % Manual	40	17-02-2014	19-02-2014	218169	9,696	2	9,846	0,181	-10,042	-4,146	0,70
	41			220375	9,794						
	42			226067	10,047						
Betão 50 % Manual	43	17-02-2014	19-02-2014	194758	8,656	2	8,883	0,205	-11,006	-0,964	0,63
	44			203724	9,054						
	45			201091	8,937						

ANEXO J

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

Betão	Número do Provete	Dias	Medidas													Valor Médio (µs)	Velocidade (km/s)
			1		2		3		4		5		6		Média		
			Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real			
Betão Referência	1	28	39	32,6	39,6	33,2	39,4	33	40,3	33,9	40	33,6	39,8	33,4	33,283	33,43	0,45
	2		39,6	33,2	40,1	33,7	39,7	33,3	40,2	33,8	39,8	33,4	40,1	33,7	33,517		
	3		39,9	33,5	39	32,6	39,8	33,4	39,7	33,3	40,1	33,7	40,8	34,4	33,483		
Betão 25 % Betoneira	4	28	39,7	33,3	39,9	33,5	40,2	33,8	40,1	33,7	40,3	33,9	40,7	34,3	33,750	33,49	0,45
	5		39,7	33,3	39,1	32,7	39,9	33,5	40,2	33,8	40	33,6	39,5	33,1	33,333		
	6		40	33,6	40,2	33,8	39,6	33,2	39,9	33,5	38,8	32,4	40,3	33,9	33,400		
Betão 50 % Betoneira	7	28	39,5	33,1	39,6	33,2	40,5	34,1	40,6	34,2	38,8	32,4	38,6	32,2	33,200	33,49	0,45
	8		40,7	34,3	40,8	34,4	39,3	32,9	39,6	33,2	39,9	33,5	40,2	33,8	33,683		
	9		39,4	33	39,5	33,1	40,2	33,8	40,1	33,7	40	33,6	40,8	34,4	33,600		
Betão Referência	10	7	37,2	30,8	38,1	31,7	37,9	31,5	40,1	33,7	39,4	33	38,7	32,3	32,167	33,32	0,45
	11		40	33,6	39,6	33,2	40,8	34,4	39,3	32,9	39,9	33,5	40,4	34	33,600		
	12		41,5	35,1	40,3	33,9	40,3	33,9	39,9	33,5	40,7	34,3	40,9	34,5	34,200		
Betão 25 % Betoneira	13	7	40,8	34,4	40,7	34,3	40,7	34,3	40,7	34,3	40,8	34,4	41	34,6	34,383	34,54	0,43
	14		41,1	34,7	40,2	33,8	41,8	35,4	40,9	34,5	41,2	34,8	40,6	34,2	34,567		
	15		41,2	34,8	41,1	34,7	41,1	34,7	40,8	34,4	40,6	34,2	41,6	35,2	34,667		
Betão 50 % Betoneira	16	7	38,4	32,2	38,4	32,2	40,2	34	39,4	33,2	39,7	33,5	39,5	33,3	33,067	33,71	0,44
	17		41,1	34,9	41,3	35,1	40,3	34,1	40	33,8	40,1	33,9	39,3	33,1	34,150		
	18		41	34,8	40,1	33,9	39	32,8	39,6	33,4	40,6	34,4	40,4	34,2	33,917		

Betão	Número do Provete	Dias	Medidas												Média	Valor Médio (µs)	Velocidade (km/s)
			1		2		3		4		5		6				
			Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real	Leit.	Leit. Real			
Betão Referência	19	2	41,4	37,4	41,3	37,3	40,7	36,7	42,8	38,8	44,4	40,4	43,3	39,3	38,317	38,62	0,39
	20		42,5	38,5	41,3	37,3	43,1	39,1	42,1	38,1	44,2	40,2	40,7	36,7	38,317		
	21		43,5	39,5	43,3	39,3	44,2	40,2	43,9	39,9	42,3	38,3	42,2	38,2	39,233		
Betão 25 % Betoneira	22	2	41,7	35,5	42	35,8	41,7	35,5	41,5	35,3	42,2	36	42	35,8	35,650	35,75	0,42
	23		43,7	37,5	43,1	36,9	42,8	36,6	42,8	36,6	43,4	37,2	43,6	37,4	37,033		
	24		41,1	34,9	40,5	34,3	41,9	35,7	40,5	34,3	40,4	34,2	40,2	34	34,567		
Betão 50 % Betoneira	25	2	42	36,2	39,9	35,9	40,7	35,9	42,6	42,6	39,8	39,8	40,4	40,4	38,467	40,14	0,37
	26		41,8	41,8	40,9	40,9	41,5	41,5	40,8	40,8	41,7	41,7	40,6	40,6	41,217		
	27		40,7	40,7	40,3	40,3	40,9	40,9	40,5	40,5	41,2	41,2	40,9	40,9	40,750		
Betão 25 % Manual	28	28	36,3	32,3	36,6	32,6	37,8	33,8	38,1	34,1	37,5	33,5	36,8	32,8	33,183	33,71	0,44
	29		38,2	34,2	37,9	33,9	38	34	38,3	34,3	37,8	33,8	37,8	33,8	34,000		
	30		37,5	33,5	38,1	34,1	38,4	34,4	37,9	33,9	38,3	34,3	37,5	33,5	33,950		
Betão 50 % Manual	31	28	37,7	33,7	37,3	33,3	37,8	33,8	38,6	34,6	38,2	34,2	39,6	35,6	34,200	34,52	0,43
	32		38,6	34,6	39,1	35,1	38,7	34,7	39,2	35,2	38,3	34,3	37,8	33,8	34,617		
	33		39,1	35,1	37,9	33,9	39,4	35,4	38,1	34,1	38,5	34,5	39,4	35,4	34,733		
Betão 25 % Manual	34	7	37,9	32,4	38,2	32,7	37,2	31,7	38,4	32,9	37,6	32,1	38,6	33,1	32,483	33,08	0,45
	35		40,4	34,9	38,5	33	39	33,5	38,9	33,4	38,6	33,1	39,9	34,4	33,717		
	36		39,1	33,6	38,7	33,2	38,1	32,6	38,7	33,2	38,4	32,9	38,2	32,7	33,033		
Betão 50 % Manual	37	7	40,4	34,9	39	33,5	39,5	34	40,3	34,8	39,1	33,6	39,5	34	34,133	34,09	0,44
	38		39,5	34	40,2	34,7	39,9	34,4	40,8	35,3	39,1	33,6	39,2	33,7	34,283		
	39		38,9	33,4	39,8	34,3	39,9	34,4	38,7	33,2	39,5	34	39,3	33,8	33,850		
Betão 25 % Manual	40	2	46,8	41	46,3	40,5	47,3	41,5	47	41,2	46,6	40,8	45,6	39,8	40,800	41,05	0,37
	41		46,6	40,8	46,2	40,4	46,7	40,9	47,5	41,7	46,6	40,8	46,8	41	40,933		
	42		47,7	41,9	46,7	40,9	46	40,2	46,9	41,1	47,7	41,9	48,3	42,5	41,417		
Betão 50 % Manual	43	2	46,7	40,5	47,1	40,9	47,8	41,6	46,9	40,7	47	40,8	46,6	40,4	40,817	39,37	0,38
	44		43,7	38	44,4	38,7	44,1	38,4	44,2	38,5	44,7	39	44,5	38,8	38,567		
	45		44,9	39,2	44,7	39	44,2	38,5	44,8	39,1	44,4	38,7	43,5	37,8	38,717		

ANEXO L

ENSAIO DO ESCLERÓMETRO

Betão	Número do Provete	Dias	Leituras									Mediana	Valor Médio da Mediana(Mpa)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Betão Referência	1	28	14	14	12	14	10	11	10	11	10	11,0	12,3
	2		12	11	12	16	11	12	11	10	12	12,0	
	3		10	14	10	15	11	10	19	17	15	14,0	
Betão 25 % Betoneira	4	28	25	19	16	16	17	16	16	15	17	16,0	18,0
	5		17	22	17	19	17	17	17	17	15	17,0	
	6		24	24	21	26	24	20	17	21	16	21,0	
Betão 50 % Betoneira	7	28	21	17	16	21	19	26	22	20	17	20,0	19,7
	8		17	20	21	19	17	17	29	24	20	20,0	
	9		20	22	19	16	24	19	17	17	19	19,0	
Betão Referência	10	7	12	8	8	15	14	12	11	8	10	11,0	9,0
	11		8	12	8	8	10	8	8	8	8	8,0	
	12		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8,0	
Betão 25 % Betoneira	13	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8,0	9,7
	14		20	15	14	12	11	11	11	11	12	12,0	
	15		12	12	12	8	8	11	9	9	9	9,0	
Betão 50 % Betoneira	16	7	12	17	20	12	12	15	14	12	12	12,0	10,7
	17		8	8	10	11	10	12	12	11	11	11,0	
	18		8	8	9	10	9	8	9	10	10	9,0	

Betão	Número do Provete	Dias	Leituras									Mediana	Valor Médio da Mediana(Mpa)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Betão Referência	19	2	Superficie muito macia										
	20		Superficie muito macia										
	21		Superficie muito macia										
Betão 25 % Betoneira	22	2	Superficie muito macia										
	23		Superficie muito macia										
	24		Superficie muito macia										
Betão 50 % Betoneira	25	2	14	12	8	8	12	8	8	11	11	11,0	9,0
	26		8	8	12	14	8	8	19	10	8	8,0	
	27		17	14	8	12	8	8	8	8	8	8,0	
Betão 25 % Manual	28	28	19	15	19	16	16	16	16	16	16	16,0	19,0
	29		16	17	16	26	22	25	22	21	20	21,0	
	30		20	16	19	19	19	20	20	22	22	20,0	
Betão 50 % Manual	31	28	20	21	21	19	16	20	19	19	20	20,0	19,0
	32		21	16	20	21	21	19	17	20	17	20,0	
	33		20	16	20	17	21	20	15	16	16	17,0	
Betão 25 % Manual	34	7	11	12	14	14	14	12	11	11	10	12,0	12,3
	35		10	19	21	16	15	14	14	14	12	14,0	
	36		12	12	14	12	11	10	10	10	10	11,0	
Betão 50 % Manual	37	7	8	12	11	10	9	10	10	10	9	10,0	10,3
	38		20	10	11	10	10	10	11	11	11	11,0	
	39		8	11	10	9	10	10	10	10	10	10,0	
Betão 25 % Manual	40	2	Superficie muito macia										
	41		Superficie muito macia										
	42		Superficie muito macia										
Betão 50 % Manual	43	2	Superficie muito macia										
	44		Superficie muito macia										
	45		Superficie muito macia										