

Reciclagem múltipla de betão

Desempenho em termos de durabilidade de betão produzido com recurso a agregados grossos reciclados provenientes de múltiplas reciclagens

Stefano Esteves da Silva

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Professor Doutor Luís Manuel da Rocha Evangelista

Júri:

Presidente: Professor Doutor Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro

Orientador: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Vogais: Professor Doutor António José da Silva Costa

Outubro de 2017

Resumo

Sendo a Construção uma das atividades mais exigentes para com o meio ambiente, é imperativo estudar novas formas de tornar os seus processos mais eficientes. Deste modo, a reciclagem múltipla de betão apresenta-se como uma possível alternativa para o reaproveitamento dos resíduos da construção e demolição.

Esta dissertação apresenta os resultados provenientes de uma campanha laboratorial realizada com o objetivo de estudar as propriedades e características dos agregados provenientes da reciclagem múltipla e o desempenho ao nível da durabilidade dos betões produzidos com os mesmos. Para o efeito, foram testados betões com 25 e 100% de taxas de incorporação de agregados grossos reciclados provenientes de um, dois e três ciclos de reciclagem.

Foram realizados diversos ensaios de caracterização dos agregados: análise granulométrica, absorção de água, massa volúmica, índice de forma, baridade e desgaste de Los Angeles. Adicionalmente, os betões em estado fresco foram avaliados quanto ao abaixamento e à massa volúmica, e em estado endurecido relativamente à absorção de água por imersão e capilaridade, à retração e às resistências à carbonatação e à penetração dos cloretos.

Os resultados dos diversos ensaios mostram que tanto os agregados grossos reciclados provenientes da reciclagem múltipla, como os betões produzidos com os mesmos, apresentam um desempenho inferior em função do aumento do número dos ciclos de reciclagem. Constatou-se ainda que esta perda de desempenho tende a diminuir com o número de ciclos, apresentando um comportamento assintótico. Todavia, não foi possível concluir que três ciclos de reciclagem se apresentam suficientes para a estabilização das propriedades.

Palavras chave: betão, reciclagem múltipla, durabilidade.

Abstract

Since Construction is one of the most environmental impacting activities in existence, it is important to study and develop solutions to make its processes more efficient. Thus, multiple-recycling of concrete presents itself as a possible alternative for the reutilization of construction and demolition waste.

This master's dissertation presents the results and conclusions obtained from an extensive experimental campaign intended to study the durability performance of concrete produced with aggregates obtained from multiple recycling cycles.

Concrete mixes with 25% and 100% of substitution of natural coarse aggregates for recycled coarse aggregate obtained from one, two and three recycling cycles were produced.

Tests such as sieve analysis, water absorption, particle density, shape index, particle bulk density and Los Angeles abrasion were performed to study the recycled coarse aggregates properties. Additionally, the workability and bulk density of fresh concrete were measured, and water absorption by immersion and capillarity, carbonation, chloride penetration and shrinkage were assessed to evaluate the durability performance of hardened concrete.

The results obtained in the various tests show that with the increase of the number of recycling cycles the recycled coarse aggregates demonstrate a quality decrease in their properties, resulting in a worse durability performance of the produced concrete. Furthermore, it is shown that the decrease in performance tends to slow down with the increase of the recycling cycles, thus presenting an asymptotic behaviour. However, in most cases, it was not possible to establish that three recycling cycles were enough to stabilize the properties.

Key-words: concrete, multiple recycling, durability.

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação marca um importante passo na minha vida, o finalizar do meu percurso académico. O atingir deste objetivo esteve longe de ser um esforço individual, sendo que diversas pessoas se mostraram fundamentais para o meu sucesso. Reservo este espaço para lhes poder expressar toda a minha gratidão.

Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador desta dissertação, por toda a disponibilidade, incentivo e contributo oferecidos. O conhecimento por ele transmitido, assim como o rigor exigido ao longo do trabalho desenvolvido, permitiram-me continuamente aprender e desenvolver ferramentas fundamentais tanto para a minha vida pessoal como para a minha futura vida profissional.

Ao Professor Doutor Luís Evangelista, coorientador desta dissertação, pelo apoio, conhecimento e conselhos.

Ao meu colega de investigação Vílson Abreu apresento o meu profundo agradecimento. A sua boa disposição, disponibilidade e disciplina mostraram-se fundamentais para ultrapassar incontáveis horas de trabalho e conseguirmos atingir os objetivos estipulados.

À empresa Secil por disponibilizar o cimento utilizado ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Aos técnicos do Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil do IST, Pedro Sanches, Pedro Costa e Leonel Silva, pelo apoio dado na realização da campanha experimental.

Aos colegas do IST João Pacheco, Rawaz Kurad, Diogo Semedo e Jorge Pontes, pela disponibilidade demonstradas desde o primeiro dia, pela sua incansável paciência e por todo o conhecimento que me transmitiram. Sem a sua ajuda o percurso teria sido infundavelmente mais complicado.

A todos os meus amigos, em especial ao Nuno Silvestre, ao João Sio, ao João Paulo e ao Sebastião Neves, pela riqueza de todos os momentos vividos em conjunto ao longo deste percurso de 6 anos. A sua amizade e espírito de camaradagem mostraram-se fundamentais para me encontrar nesta posição.

À Daniela Afonso por ser um dos grandes pilares da minha vida. A sua incessante compreensão, respeito e ajuda mostraram-se fundamentais para conseguir ultrapassar as dificuldades pessoais e académicas que emergiram. Foi com ela que muitas lições de vida aprendi! É com ela que muitas mais quero viver!

Um profundo agradecimento a toda a minha família. Um obrigado do fundo do coração aos meus pais por todos os sacrifícios suportados de modo a que eu e o meu irmão tivéssemos a possibilidade de completar os nossos cursos superiores. O seu espírito de perseverança, o seu sentido de família e a sua força serão sempre enormes referências para mim. É um orgulho ser vosso filho! Ao meu irmão agradeço todo o apoio, todos os momentos e todas as gargalhadas dadas. Obrigado por seres sempre não só um excelente irmão, como também um grande amigo!

Por último, um muito obrigado àqueles que, apesar de não ter referenciado, contribuíram de forma direta ou indireta para o meu sucesso escolar.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objetivos	2
2. Estado da arte sobre reciclagem múltipla.....	3
2.1. Propriedades dos agregados grossos reciclados	3
2.1.1. Massa volúmica e baridade.....	3
2.1.2. Absorção de água	5
2.1.3. Forma e textura das partículas	7
2.1.4. Desgaste de <i>Los Angeles</i>	9
2.2. Propriedades do betão produzido com agregados reciclados	11
2.2.1. Massa volúmica	11
2.2.2. Trabalhabilidade	13
2.2.3. Absorção de água	14
2.2.4. Resistência à carbonatação	17
2.2.5. Resistência à penetração dos cloretos	19
2.2.6. Retração	20
3. Procedimento laboratorial	22
3.1. Introdução	22
3.2. Planeamento da campanha experimental	22
3.2.1. Primeira fase.....	22
3.2.2. Segunda fase.....	23
3.2.3. Terceira fase.....	23
3.3. Formulação do betão de referência.....	23
3.3.1. Máxima dimensão dos agregados	24
3.3.2. Dosagem de cimento	25
3.3.3. Volume de vazios.....	25
3.3.4. Índice de vazios	26
3.3.5. Relação água / cimento (<i>a/c</i>).....	27
3.3.6. Volume de partículas sólidas.....	27
3.3.7. Volume das partículas de cimento.....	27
3.3.8. Percentagem do volume de cimento	27
3.3.9. Curva de Faury e proporção dos agregados.....	27
3.4. Betões com agregados reciclados	30
3.5. Volume de betão necessário para os ensaios a realizar	32
3.6. Determinação do volume dos betões de origem.....	33
3.7. Produção dos betões	35
3.8. Produção dos agregados reciclados	36
3.9. Ensaios realizados aos agregados.....	37

3.9.1.	Análise granulométrica.....	37
3.9.1.1.	Preparação da amostra	38
3.9.1.2.	Procedimento.....	38
3.9.2.	Massa volúmica e absorção de água	39
3.9.2.1.	Preparação da amostra	39
3.9.2.2.	Procedimento.....	39
3.9.3.	Baridade	41
3.9.3.1.	Preparação da amostra	41
3.9.3.2.	Procedimento.....	41
3.9.4.	Desgaste de Los Angeles	42
3.9.4.1.	Preparação da amostra	42
3.9.4.2.	Procedimento.....	42
3.9.5.	Índice de forma	43
3.9.5.1.	Preparação da amostra	43
3.9.5.2.	Procedimento.....	43
3.10.	Ensaio realizado ao betão em estado fresco.....	44
3.10.1.	Abaixamento.....	44
3.10.1.1.	Procedimento.....	44
3.10.2.	Massa volúmica	45
3.10.2.1.	Procedimento.....	45
3.11.	Ensaio realizado ao betão em estado endurecido	46
3.11.1.	Retração.....	46
3.11.1.1.	Preparação da amostra	46
3.11.1.2.	Procedimento.....	47
3.11.2.	Absorção por imersão	47
3.11.2.1.	Preparação da amostra	48
3.11.2.2.	Procedimento.....	48
3.11.3.	Absorção por capilaridade.....	49
3.11.3.1.	Preparação da amostra	49
3.11.3.2.	Procedimento.....	49
3.11.4.	Resistência à penetração dos cloretos	51
3.11.4.1.	Preparação da amostra	51
3.11.4.2.	Procedimento.....	51
3.11.5.	Resistência à carbonatação	53
3.11.5.1.	Preparação da amostra	53
3.11.5.2.	Procedimento.....	54
4.	Resultados da campanha experimental	55
4.1.	Ensaio aos agregados	55
4.1.1.	Análise granulométrica.....	55
4.1.2.	Massa volúmica e absorção de água	56

4.1.3.	Absorção de água ao longo de 24 horas	57
4.1.4.	Índice de forma	58
4.1.5.	Baridade	59
4.1.6.	Desgaste de Los Angeles	61
4.2.	Ensaio ao betão em estado fresco	62
4.2.1.	Abaixamento.....	62
4.2.2.	Massa volúmica do betão em estado fresco.....	63
4.3.	Ensaio ao betão em estado endurecido.....	64
4.3.1.	Resistência à compressão	64
4.3.2.	Absorção de água por imersão.....	64
4.3.3.	Absorção de água por capilaridade	66
4.3.4.	Retração.....	67
4.3.5.	Resistência à carbonatação	69
4.3.6.	Resistência à penetração dos cloretos	71
4.4.	Conclusões.....	73
4.4.1.	Propriedades dos agregados	73
4.4.2.	Propriedades do betão em estado fresco	74
4.4.3.	Propriedades em termos de durabilidade do betão endurecido.....	75
5.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	77
5.1.	Considerações finais	77
5.2.	Conclusões gerais	77
5.3.	Desenvolvimentos futuros.....	79
	Referências bibliográficas.....	81
	Artigos / Livros / Documentos / Dissertações.....	81
	Normas / Especificações de ensaios	84
	Sites consultados.....	85
	Anexo A - Composição dos betões produzidos.....	1
	Anexo B - Volume total de betão a betonar	2
	Anexo C - Caracterização dos agregados: análise granulométrica dos AGN	3
	Anexo D - Caracterização dos agregados: massa volúmica e absorção de água.....	4
	Anexo E - Caracterização dos agregados: absorção de água ao longo de 24 horas	5
	Anexo F - Caracterização dos agregados: índice de forma.....	6
	Anexo G - Caracterização dos agregados: baridade e volume de vazios.....	7
	Anexo H - Caracterização dos agregados: desgaste de Los Angeles	8
	Anexo I - Ensaio ao betão em estado fresco: abaixamento e razão de a/c efetiva e aparente	9
	Anexo J - Ensaio ao betão em estado fresco: abaixamento e massa volúmica	10
	Anexo K - Ensaio ao betão em estado endurecido: resistência à compressão	11
	Anexo L - Ensaio ao betão em estado endurecido: absorção por imersão	12
	Anexo M - Ensaio ao betão em estado endurecido: absorção por capilaridade	13
	Anexo N - Ensaio ao betão em estado endurecido: retração.....	15

Anexo O - Ensaios ao betão em estado endurecido: resistência à carbonatação.....	17
Anexo P - Ensaios ao betão em estado endurecido: resistência à penetração dos cloretos	18

Índice de figuras

Figura 1.1 - Constituição dos resíduos de construção e demolição.....	1
Figura 2.1 - Relação entre a argamassa aderida e a absorção de água.....	6
Figura 2.2 - Relação entre a massa volúmica e a absorção de água	6
Figura 2.3 - Evolução da absorção de água por parte de agregados grossos reciclados de betão.....	6
Figura 2.4 - Análise microscópica de AGN (a), AGRI (b), AGR II (c) e AGR III (d).....	7
Figura 2.5 - Microestrutura da interface de ligação entre agregados naturais e argamassa (imagem à esquerda foi ampliada 1000x; imagem à direita foi ampliada 5000x).....	8
Figura 2.6 - Microestrutura da interface de ligação entre agregados proveniente de betão de alta resistência e argamassa (imagem à esquerda foi ampliada 1000x; imagem à direita foi ampliada 5000x)	9
Figura 2.7 - Relação entre quantidade de argamassa aderida e valor de desgaste de Los Angeles...	10
Figura 2.8 - Relação entre a quantidade de argamassa aderida e o valor de desgaste de Los Angeles	10
Figura 2.9 - Relação entre a resistência mecânica à compressão e a massa volúmica do betão em estado endurecido para misturas com diferentes teores de cimento	12
Figura 2.10 - Relação entre a razão a/c e a massa volúmica do betão para diferentes misturas	13
Figura 2.11 - Absorção de água por imersão para betões com diferentes taxas de incorporação de AR ..	15
Figura 2.12 - Evolução da taxa de absorção de água por imersão com a taxa de incorporação de AGR	16
Figura 2.13 - Absorção de água do betão de referência comparativamente com misturas produzidas com agregados reciclados de betão	16
Figura 2.14 - Influência da introdução de superplastificantes na absorção de água por capilaridade de betões produzidos com agregados reciclados	17
Figura 2.15 - Influência do tempo de cura no coeficiente de absorção capilar	17
Figura 2.16 - Influência da taxa e incorporação de AR no coeficiente de absorção capilar	17
Figura 2.17 - Profundidade da frente de carbonatação obtida por Xiao et al. (2012a)	18
Figura 2.18 - Profundidade relativa da frente de carbonatação observada por Yuan et al. (2010)	18
Figura 2.19 - Evolução da profundidade de penetração dos cloretos com a taxa de incorporação de AGR (Rao et al., 2011)	19
Figura 2.20 - Profundidade de penetração dos cloretos para diferentes razões de a/c.....	19
Figura 2.21 - Coeficiente de difusão de cloretos	20
Figura 2.22 - Influência da taxa de incorporação de AGR	21
Figura 2.23 - Influência da humidade relativa do ambiente de cura.....	21
Figura 3.1 - Curvas de referência de Faury	29
Figura 3.2 - Distribuições granulométricas dos agregados.....	30
Figura 3.3 - Metodologia para a produção dos AGR dos diversos ciclos	34
Figura 3.4 - Moldes utilizados.....	36
Figura 3.5 - Cofragem dos betões de referência.....	36
Figura 3.6 - Vibração do betão	36
Figura 3.7 - Descofragem dos moldes.....	36
Figura 3.8 - “vigas” de betão de origem	37

Figura 3.9 - Blocos de betão de origem.....	37
Figura 3.10 - Trituradora de mandíbulas.....	37
Figura 3.11 - Máquina de peneiração.....	37
Figura 3.12 - Abaixamento verdadeiro.....	45
Figura 3.13 - Abaixamento deformado.....	45
Figura 3.14 - Colagem das pastilhas metálicas.....	47
Figura 3.15 - Definição da distância entre as pastilhas metálicas com o auxílio da barra padrão.....	47
Figura 3.16 - Primeira etapa de enchimento com água do recipiente.....	48
Figura 3.17 - Determinação da massa hidrostática do provete.....	48
Figura 3.18 - Enchimento do tabuleiro com água até uma altura de 5 ± 1 mm em relação à face do provete em contacto com a água.....	50
Figura 3.19 - Pesagem do provete no instante i.....	50
Figura 3.20 - Câmara de vácuo.....	52
Figura 3.21 - Colocação dos provetes dentro de mangas de borracha.....	52
Figura 3.22 - Ligação da fonte de alimentação ao reservatório plástico que contém os provetes.....	52
Figura 3.23 - Seccionamento dos provetes em duas metades.....	52
Figura 3.24 - Aplicação de uma película de borracha líquida isolante nas faces superior e inferior dos provetes.....	54
Figura 3.25 - Identificação da frente de carbonatação.....	54
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados naturais.....	55
Figura 4.2 - Massa volúmica seca das partículas saturadas com superfície seca em função do número de reciclagens.....	56
Figura 4.3 - Absorção de água dos agregados em função do número de reciclagens.....	56
Figura 4.4 - Comparação dos resultados obtidos para a massa volúmica seca com o estudo realizado por Huda e Alam (2014).....	57
Figura 4.5 - Comparação dos resultados obtidos para a massa volúmica seca com o estudo realizado por Huda e Alam (2014) e de Brito et al. (2011).....	57
Figura 4.6 - Evolução da absorção de água ao longo de 24 horas dos agregados reciclados.....	58
Figura 4.7 - Relação entre a massa volúmica seca e a baridade dos agregados.....	60
Figura 4.8 - Baridade em função do número de ciclos de reciclagem.....	60
Figura 4.9 - Desgaste de Los Angeles em função do tipo de agregado.....	61
Figura 4.10 - Massa volúmica dos betões em estado fresco com 100% de taxas de substituição em função da massa volúmica seca dos AGR.....	63
Figura 4.11 - Massa volúmica dos betões em estado fresco com 100% de taxas de substituição em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR.....	63
Figura 4.12 - Variação da absorção por imersão de betões com 25% de incorporação de AGR em função do número de reciclagens dos AGR.....	65
Figura 4.13 - Variação da absorção por imersão de betões com 100% de incorporação de AGR em função do número de reciclagens dos AGR.....	65
Figura 4.14 - Relação entre a absorção por imersão do betão com 25% de incorporação de AGR e a absorção dos AGR.....	66
Figura 4.15 - Relação entre a absorção por imersão do betão com 100% de incorporação de AGR e a absorção dos AGR.....	66

Figura 4.16 - Absorção capilar dos betões com 25% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR	67
Figura 4.17 - Absorção capilar dos betões com 100% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR	67
Figura 4.18 - Deformação devido à retração ao longo da duração do ensaio (91 dias).....	68
Figura 4.19 - Regressões logarítmicas das deformações por retração ao longo do tempo de todos os betões.....	69
Figura 4.20 - Deformação por retração nos betões com 25% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR.....	69
Figura 4.21 - Deformação por retração nos betões com 100% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR.....	69
Figura 4.22 - Evolução da frente de carbonatação dos betões em estudo	70
Figura 4.23 - Variação da profundidade da frente de carbonatação aos 91 dias em função do número de ciclos de reciclagem para betões com 25% de taxa de incorporação de AGR.....	71
Figura 4.24 - Variação da profundidade da frente de carbonatação aos 91 dias em função do número de ciclos de reciclagem para betões com 100% de taxa de incorporação de AGR.....	71
Figura 4.25 - Coeficiente de difusão dos iões de cloreto em betão com 28 dias de idade em função do número de ciclos de reciclagem	72
Figura 4.26 - Coeficiente de difusão dos iões de cloreto em betão com 91 dias de idade em função do número de ciclos de reciclagem	72

Índice de tabelas

Quadro 2.1 - Comparação da massa volúmica de agregados grossos naturais e reciclados.....	4
Quadro 2.2 - Massa volúmica de AGR com vários ciclos de reciclagem	4
Quadro 2.3 - Massa volúmica e percentagem de argamassa aderida de AGR com até três gerações de reciclagem	4
Quadro 2.4 - Capacidade de absorção de água de argamassa aderida.....	5
Quadro 2.5 - Capacidade de absorção de água de agregados reciclados provenientes de até três ciclos de reciclagem.....	5
Quadro 2.6 - Levantamento bibliográfico dos parâmetros de forma de agregados reciclados e agregados naturais	9
Quadro 2.7 - Relação entre a resistência mecânica do betão de origem e o desgaste de LA dos agregados reciclados.....	10
Quadro 2.8 - Desgaste de Los Angeles em função da razão a/c do betão de origem e valor de LA dos agregados naturais	10
Quadro 2.9 - Quantidade de argamassa aderida e desgaste de Los Angeles em função da granulometria e razão a/c do betão de origem.....	11
Quadro 2.10 - Levantamento bibliográfico sobre o desgaste de Los Angeles.....	11
Quadro 2.11 - Massa volúmica dos betões secos em estufa estudados por Salesa et al. (2017)	13
Quadro 2.12 - Abaixamento obtido por Zhu et al. (2016), Salesa et al. (2017) e Huda e Alam (2014).14	
Quadro 2.13 - Profundidade da frente de carbonatação observada por Kou e Poon (2012)	18
Quadro 3.1 - Betões produzidos para o estudo de durabilidade.....	22
Quadro 3.2 - Composição dos betões produzidos	24
Quadro 3.3 - Dimensão máxima admissível do agregado.....	25
Quadro 3.4 - Volume de vazios em função da máxima dimensão do agregado.....	25
Quadro 3.5 - Classes de consistência definidas a partir do ensaio de abaixamento de cone de Abrams	26
Quadro 3.6 - Valores de K e K' em função da trabalhabilidade do betão	26
Quadro 3.7 - Pontos da curva de referência de Faury.....	28
Quadro 3.8 - Valores de A e B para a definição da curva de referência de Faury.....	28
Quadro 3.9 - Pontos da curva de referência de Faury.....	29
Quadro 3.10 - Proporção dos agregados.....	30
Quadro 3.11 - Intervalos temporais entre medições ao longo da duração do ensaio	31
Quadro 3.12 - Volume para a realização dos ensaios propostos nas duas dissertações	34
Quadro 3.13 - Volumes a produzir dos diversos betões de origem	35
Quadro 3.14 - Massa mínima da amostra de acordo com $D_{máx}$	38
Quadro 3.15 - Massa mínima da amostra de acordo com $D_{máx}$	39
Quadro 3.16 - Massa mínima da amostra de acordo com $D_{máx}$	43
Quadro 4.1 - Médias das massas volúmicas e absorção de água dos diferentes tipos de agregados grossos.....	56
Quadro 4.2 - Absorção de água dos agregados reciclados no final de determinados intervalos temporais.....	58
Quadro 4.3 - Índice de forma obtidos para os agregados em estudo	59

Quadro 4.4 - Comparação do índice de forma do AGN e do AGR I obtidos e com os de diversos autores	59
Quadro 4.5 - Baridade e percentagem de vazios dos agregados analisados	60
Quadro 4.6 - Desgaste de Los Angeles obtido para os agregados.....	61
Quadro 4.7 - Abaixamento das amassaduras produzidas	62
Quadro 4.8 - Massa volúmica do betão em estado fresco para as amassaduras produzidas	63
Quadro 4.9 - Resistência à compressão aos 7,28 e 56 dias das amassaduras produzidas	64
Quadro 4.10 - Valores médios da absorção de água por imersão dos betões em estudo.....	65
Quadro 4.11 - Valores médios da absorção de água por capilaridade de cada tipo de betão em função do tempo do ensaio	66
Quadro 4.12 - Valores médios da profundidade da frente de carbonatação em todos os tempos do ensaio.....	70
Quadro 4.13 - Coeficiente de difusão médio obtido para os betões em estudo e comparação com o valor obtido para o betão de referência	72
Quadro 5.1 - Resultados obtidos nas propriedades dos agregados	78
Quadro 5.2 - Resultados obtidos nos ensaios de durabilidade efetuados aos betões.....	79
Quadro 5.3 - Comparação dos valores das assintotas traçadas com o modelo exponencial assintótico e os resultados experimentais obtidos para o BR	79

Lista de acrónimos

RCD	Resíduos de construção e demolição
AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
AFN	Agregados finos naturais
AFR	Agregados finos reciclados
AGN	Agregados grossos naturais
AGR	Agregados grossos reciclados
AGRI	Agregados grossos reciclados provenientes de um ciclo de reciclagem
AGRII	Agregados grossos reciclados provenientes de dois ciclos de reciclagem
AGRIII	Agregados grossos reciclados provenientes de três ciclo de reciclagem
BOI	Betão de origem produzido com agregados naturais
BOII	Betão de origem produzido com agregados grossos provenientes de um ciclo de reciclagem
BOIII	Betão de origem produzido com agregados grossos provenientes de dois ciclos de reciclagem
BR	Betão de referência produzido apenas com agregados naturais
B125%	Betão produzido com uma taxa de substituição de 25% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados provenientes de um ciclo de reciclagem
B1100%	Betão produzido com uma taxa de substituição de 100% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados provenientes de um ciclo de reciclagem
B225%	Betão produzido com uma taxa de substituição de 25% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados provenientes de dois ciclos de reciclagem
B2100%	Betão produzido com uma taxa de substituição de 100% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados provenientes de dois ciclos de reciclagem
B325%	Betão produzido com uma taxa de substituição de 25% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados provenientes de três ciclos de reciclagem
B3100%	Betão produzido com uma taxa de substituição de 100% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados provenientes de três ciclos de reciclagem

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

A construção é uma das atividades mais exigentes para o meio ambiente devido à sua abundante necessidade de recursos naturais e aos resíduos que a mesma gera associados à sua atividade.

Estima-se que, durante o ano de 2014, os 28 países da União Europeia produziram cerca de 2 500 milhões de toneladas de resíduos, sendo que 821 milhões de toneladas estão relacionados com a construção civil e 734 milhões de toneladas com a atividade mineira geral, perfazendo um total conjunto de 62% (Eurostat, 2016).

A indústria da construção cresceu ao longo dos anos sem preocupações com a sustentabilidade, conceito que começou a ganhar peso no final do século passado. A percepção de que os recursos disponíveis no Planeta são na realidade limitados e os efeitos secundários que se começam a agravar devido à crescente poluição gerada pela atividade humana estão a gerar uma reflexão e mudança de mentalidade, sendo fundamental que a indústria da construção civil, como qualquer outra, acompanhe a tendência.

Ao adotar uma mentalidade mais agressiva de reciclagem destes resíduos, promovida principalmente pelas autoridades europeias e nacionais, pode-se conseguir um melhor reaproveitamento dos recursos, sendo assim possível aliviar a pegada ecológica gerada. O tratamento e reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) foi identificado pela União Europeia como um ponto de importância crítica.

Foi com este objetivo que, de forma a estabelecer um regime de operação e gestão de RCD, foi publicado em Diário da República o Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março, alterado posteriormente pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho. Em paralelo, a União Europeia estabeleceu, com a Diretiva 2008/98/CE, de 19 de Novembro, que todos os membros da Comunidade Europeia devem proceder às medidas necessárias para que, até 2020, se consiga atingir um mínimo de 70% de reaproveitamento dos resíduos provenientes da demolição e construção.

Como constatado por Gonçalves (2007) ao realizarem um levantamento bibliográfico sobre a constituição dos RCD em diversos países, a diversidade de materiais utilizados na construção origina necessariamente um leque variado de tipos de resíduos (Figura 1.1).

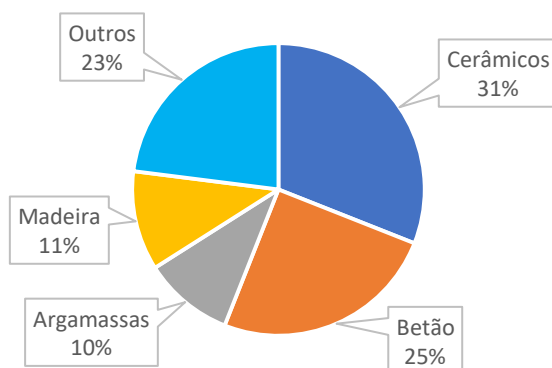


Figura 1.1 - Constituição dos resíduos de construção e demolição (Gonçalves, 2007)

A elevada percentagem de betão presente nos RCD abre a possibilidade de estes poderem ser utilizados como agregados reciclados para o fabrico de pavimentos rodoviários, betão estrutural ou não estrutural.

1.2. Objetivos

Ao longo dos últimos anos, têm sido desenvolvidos vários estudos, tanto no Instituto Superior Técnico como a nível mundial, sobre a viabilidade da utilização de agregados reciclados para a produção de betão estrutural, tendo-se, em geral, obtido resultados bastante promissores.

Apesar de existir uma extensa bibliografia de informação incidindo na variabilidade do desempenho em termos de comportamento mecânico e de durabilidade de betões fabricados com a introdução de diferentes taxas e granulometrias de agregados com um ciclo de reciclagem, a informação sobre a incorporação de agregados com vários ciclos de reciclagem é relativamente escassa.

Pretendendo contribuir para o desenvolvimento do conhecimento nessa área, esta dissertação tem como objetivo estudar a influência no desempenho em termos de durabilidade de betão fabricado com taxas de incorporação de 25% e 100% de agregados grossos provenientes de um, dois e três ciclos de reciclagem de betão.

É expectável que a introdução deste tipo de agregados reciclados conduza a um decréscimo das propriedades relacionadas com a durabilidade, devido sobretudo à maior porosidade do material produzido. É, no entanto, interessante abordar a possibilidade de existir um patamar inferior para o qual estas tendam independentemente do número de reciclagens associadas à natureza dos agregados utilizados.

Para o efeito, foi necessário produzir e analisar os seguintes tipos de betão:

- BR - betão de referência produzido utilizando apenas agregados naturais;
- Bi25 % - betão produzido com uma taxa de substituição de 25% de agregados grossos originários da i-ésima reciclagem;
- Bi100 % - betão produzido com uma taxa de substituição de 100% de agregados grossos originários da i-ésima reciclagem.

Por sua vez, as diversas misturas produzidas serão avaliadas no seu estado fresco em relação à massa volúmica e ao abaixamento, e em estado endurecido relativamente à absorção de água por capilaridade e imersão, à resistência à carbonatação, à resistência à penetração dos cloretos e à retração.

De modo a que seja realizada uma comparação qualitativamente correta, existem duas características fundamentais que devem ser tidas em consideração e mantidas, dentro das possibilidades associadas às dificuldades práticas, o mais próximas possível. Estas são a relação efetiva água/cimento e a trabalhabilidade medida pelo ensaio de abaixamento. Realça-se que a mesma composição a será utilizada em todos os betões produzidos, não sendo introduzido qualquer aditivo ou adjuvante na mistura.

Adicionalmente, destaca-se que, paralelamente a esta dissertação, será realizada uma dissertação com o objetivo de determinar o desempenho mecânico dos mesmos betões.

2. Estado da arte sobre reciclagem múltipla

O betão é uma pedra artificial na qual os seus constituintes têm uma presença devidamente ponderada com o objetivo de se obter a maior compacidade possível. Estes elementos constituintes são água, cimento e agregados de diferentes granulometrias, os últimos dos quais podem perfazer cerca de 70% da mistura. Pode-se adicionalmente introduzir produtos artificiais como adjuvantes e adições com o objetivo de modificar as propriedades do betão para determinados fins.

Os agregados podem possuir diferentes naturezas, sendo classificados como naturais, artificiais, reciclados ou originários de subprodutos industriais. Destacam-se em especial os agregados reciclados, os quais recentemente têm despertado um interesse crescente devido a motivações económicas e ambientais.

A reciclagem do betão para a obtenção de agregados é tipicamente efetuada através de um processo de trituração em que são utilizadas britadoras de mandíbulas. O material resultante é constituído por fragmentos de agregados naturais e argamassa aderida aos mesmos. Tendo em vista a viabilidade da utilização deste material para a produção de betão de qualidade, foram realizados vários estudos a nível internacional, chegando-se ao consenso geral de que a substituição parcial ou total dos agregados naturais por agregados reciclados resulta num betão de desempenho igual ou inferior.

A principal justificação para este fenómeno encontra-se na particular composição de um AR proveniente de betão, a qual é definida por uma mistura de partículas pétreas provenientes de agregados naturais e argamassa que lhes está aderida. De Juan e Gutiérrez (2009) realizaram um estudo sobre a relação da quantidade de argamassa aderida com algumas das principais características destes agregados, obtendo uma boa correlação entre as mesmas.

A utilização deste tipo de agregados na produção de betão implica que a quantidade de argamassa presente no mesmo aumente em função do número de ciclos de reciclagem que deu origem aos agregados (Liang et al., 2011). Torna-se, portanto, importante inferir a adequabilidade da sua utilização na produção de betão, recorrendo-se para o efeito à avaliação de propriedades como a massa volúmica, baridade, absorção de água, forma das partículas e resistência mecânica.

2.1. Propriedades dos agregados grossos reciclados

2.1.1. Massa volúmica e baridade

A massa volúmica pode ser definida como a relação entre a massa de um corpo e o seu volume, tratando-se esta de uma das principais propriedades que permite avaliar a qualidade dos agregados. Existem diferentes tipos de massa volúmica. A massa volúmica de partículas secas (ρ_{rd}) é definida como sendo a relação entre a massa do material seco e a soma dos seus volumes exteriores. O quociente entre a massa das partículas saturadas com superfície seca e o volume absoluto do material, incluindo os poros nos quais a água não conseguiu penetrar, é definida como sendo a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{sss}). Finalmente, a massa volúmica do material impermeável (ρ_a) é definida como sendo a relação entre a massa do material seco e o volume absoluto do mesmo incluindo os poros nos quais a água não penetrou (Coutinho, 1988).

Por sua vez, a baridade de um agregado é definida como a massa por unidade de volume do mesmo quando contido num recipiente. Este volume inclui os espaços existentes entre as partículas, sendo portanto influenciado pelo grau de compactação da amostra, forma das partículas e dimensão das mesmas (Coutinho, 1988).

Liang et al. (2011), com o intuito de avaliarem a possibilidade da reciclagem múltipla de agregados, realizaram um estudo sobre algumas das suas propriedades. Os autores constataram o menor valor da massa volúmica dos AGR (Quadro 2.1), o qual é explicado pela existência de uma percentagem significativa de argamassa aderida aos agregados. A maior porosidade e menor massa volúmica deste material influenciam diretamente as propriedades dos AGR.

Quadro 2.1 - Comparação da massa volúmica de agregados grossos naturais e reciclados (Liang et al., 2011)

Agregado	ρ_a [kg/m ³]
AGN	2680
AGR	2285-2676

A importância da resistência, qualidade e exposição ambiental do betão de origem são também referidas, as quais são traduzidas na significativa variabilidade de valores obtidos para a massa volúmica.

Huda e Alam (2014) realizaram um estudo sobre o comportamento mecânico de betão fabricado com recurso a agregados grossos reciclados provenientes de 1, 2 e 3 ciclos de reciclagens. A análise que realizaram aos agregados revelou que tanto a baridade como a massa volúmica do agregado reciclado decresciam com o número de reciclagens que lhes deu origem (Quadro 2.2). Em particular para a baridade, verificou-se uma diferença entre os AGRI, AGRII, AGRIII e os AGN de 13,9, 22,9 e 26,3 %. Os autores justificam este fenómeno através do aumento de argamassa aderida dos agregados com o número de ciclos de reciclagens e da menor densidade da mesma em comparação com as partículas pétreas dos agregados naturais. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhu et al. (2016) no estudo que realizaram sobre a perda de desempenho ao nível de durabilidade de betão produzido com 70% de substituição de AGN por AGR provenientes de até três gerações de reciclagem, os quais se encontram apresentados no Quadro 2.3.

Quadro 2.2 - Massa volúmica de AGR com vários ciclos de reciclagem (Huda & Alam, 2014)

Agregado	Baridade [kg/m ³]	ρ_{rd} [kg/m ³]	ρ_{sss} [kg/m ³]	ρ_a [kg/m ³]
AGN	1622	2670	2690	2730
AGRI	1396	2320	2550	2630
AGRII	1251	2170	2330	2570
AGRIII	1196	2030	2230	2520

Quadro 2.3 - Massa volúmica e percentagem de argamassa aderida de AGR com até três gerações de reciclagem (Zhu et al., 2016)

Agregado	ρ_a [kg/m ³]	Argamassa aderida [%]
AGN	2673	-
AGRI	2621	37,7
AGRII	2484	54,8
AGRIII	2260	61,9

2.1.2. Absorção de água

A capacidade de absorção de água dos agregados está diretamente relacionada com a porosidade da matriz que os constitui. Devido à presença de argamassa aderida na constituição dos agregados reciclados, a sua capacidade de absorção de água é significativamente superior à dos agregados naturais.

Hansen e Narud (1983) referem valores de absorção de água entre 15,6 e 17% para argamassa aderida, em comparação com valores entre 0,8 e 3,7% para agregados naturais. Valores essencialmente idênticos foram obtidos por de Juan (2004) que apresenta intervalos entre 16 e 17% para argamassa aderida e 0 e 4% para agregados naturais (Quadro 2.4).

Tendo em conta que, através da múltipla reciclagem de betões, são originados AR com quantidades de argamassa superiores, é expectável que a capacidade de absorção dos agregados aumente com o número de ciclos de reciclagem.

Quadro 2.4 - Capacidade de absorção de água de argamassa aderida [adaptado de Hansen (2004)]

a/c do betão de origem	Granulometria [mm]	ρ_{rd} [kg/m ³]	Absorção de água [%]
0,40	4-8	2036	17,0
	8-16	2060	17,0
	16-32	2148	15,6
0,70	4-8	2041	17,0
	8-16	2060	16,2
	16-32	2091	15,8
1,20	4-8	2070	16,5
	8-16	2068	16,6
	16-32	2081	16,5

Huda e Alam (2014), no estudo que realizaram sobre as características mecânicas de betões com a incorporação de agregados grossos reciclados provenientes de até três ciclos de reciclagem, apresentam valores de 5,2, 7,1 e 9,4% para AGR de primeiro, segundo e terceiro ciclo respetivamente. O mesmo comportamento foi verificado por de Brito et al. (2011) na análise efetuada a agregados grossos reciclados provenientes de até três ciclos. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Capacidade de absorção de água de agregados reciclados provenientes de até três ciclos de reciclagem

Autores	Nº. de ciclos de reciclagem	Absorção de água [%]
Huda e Alam (2014)	1	5,2
	2	7,1
	3	9,4
de Brito et al. (2011)	1	6,3
	2	7,6
	3	8,5

A dimensão das partículas ganha importância significativa na capacidade de absorção de água. Os agregados finos reciclados têm uma maior capacidade do que os agregados grossos devido à maior quantidade relativa de argamassa aderida que possuem e à maior área específica (de Brito & Saikia, 2012).

Como a argamassa apresenta uma massa volúmica inferior em relação às partículas de agregados naturais, é expectável que, quanto maior for a quantidade de argamassa aderida, menor será a massa volúmica do

agregado e simultaneamente maior a sua capacidade de absorção. As relações entre estas propriedades foram estabelecidas por de Juan e Gutiérrez (2009) e são apresentadas na Figura 2.1 e na Figura 2.2.

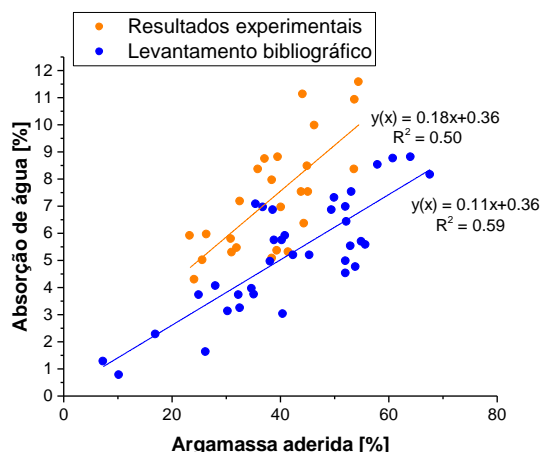


Figura 2.1 - Relação entre a argamassa aderida e a absorção de água (de Juan & Gutiérrez, 2009)

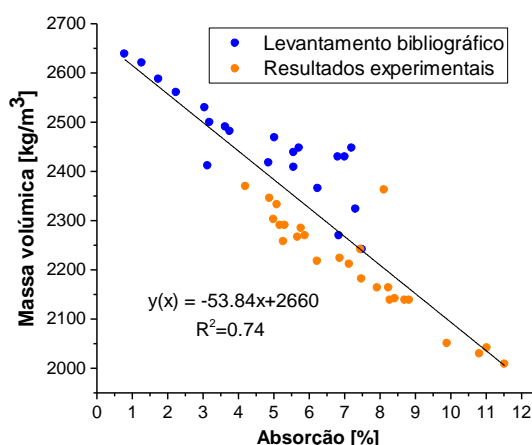


Figura 2.2 - Relação entre a massa volúmica e a absorção de água (de Juan & Gutiérrez, 2009)

Embora os agregados tenham uma significativa capacidade de absorção, esta não ocorre de forma constante ao longo do tempo. De Juan (2004), referido por de Brito e Saikia (2012), constata que 70 a 90% da capacidade de absorção dos agregados reciclados é atingida nos 10 primeiros minutos de imersão (Figura 2.3). Resultados semelhantes foram obtidos por Ferreira et al. (2011) e Fonseca et al. (2011), em que cerca de 90% da capacidade de absorção de água foi atingida pelos agregados grossos reciclados nos 5 minutos iniciais de imersão.

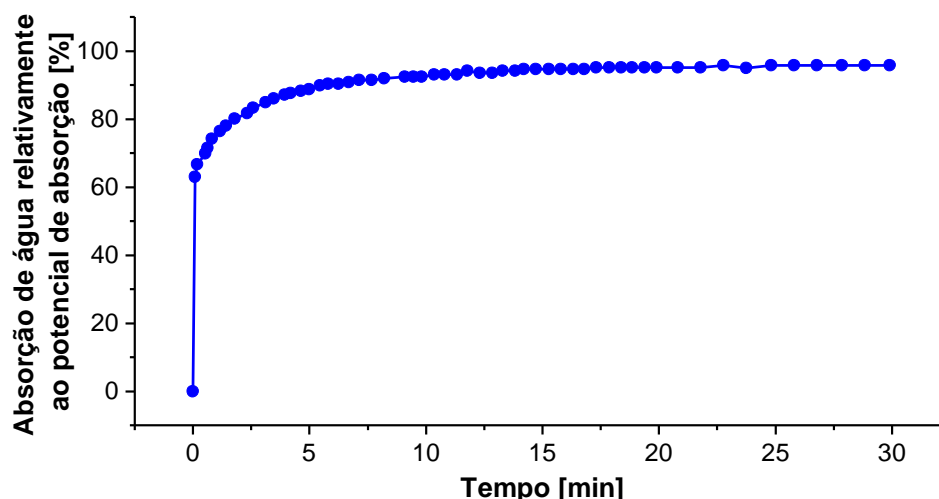


Figura 2.3 - Evolução da absorção de água por parte de agregados grossos reciclados de betão (Ferreira et al., 2011)

A correta consideração desta característica aquando da utilização de agregados reciclados para a produção de betão tem uma importância relevante para que não ocorra uma alteração da razão a/c considerada, levando à obtenção de um betão em que as suas propriedades em estado fresco e endurecido sejam distintas das desejadas.

Hansen e Narud (1983), citados por de Brito e Saikia (2012), referem que a razão a/c do betão que dá origem aos agregados reciclados é um fator de relevância para a qualidade dos mesmos. Betões com razões a/c inferiores possuem maiores resistência mecânica e menor porosidade, conseqüentemente,

os agregados a que darão origem possuem uma menor capacidade de absorção.

Padmini et al. (2009) obtiveram resultados contraditórios, verificando um aumento da capacidade de absorção de água com o aumento da resistência mecânica do betão de origem. Os autores justificaram este fenómeno com o facto de uma maior resistência mecânica do betão de origem proporcionar uma ligação agregado-argamassa mais forte e, conseqüentemente, durante a trituração, maiores quantidades de argamassa vão-se manter aderidas às partículas dos agregados naturais. Os autores também salientaram a importância da dimensão do agregado utilizado no fabrico do betão de origem. Quanto menor a máxima dimensão do agregado, maior será área de superfície por unidade de volume disponível para a adesão de argamassa e, conseqüentemente, maior a quantidade de argamassa aderida dos agregados reciclados.

Outro fator que pode contribuir para o aumento da porosidade da argamassa é o processo de trituração, o qual, devido ao esmagamento do betão, gera microfendas na argamassa. Zhu et al. (2016) realizaram uma análise microscópica de quatro tipos de agregados distintos: agregados naturais e agregados provenientes de um, dois e três ciclos de reciclagem. Nesta análise, os autores verificaram que as zonas de ligação entre os agregados reciclados e a argamassa apresentavam descontinuidades. Adicionalmente, foram verificadas fendas nos agregados provenientes de pelo menos um ciclo de reciclagem, as quais são inexistentes nos agregados naturais (Figura 2.4).

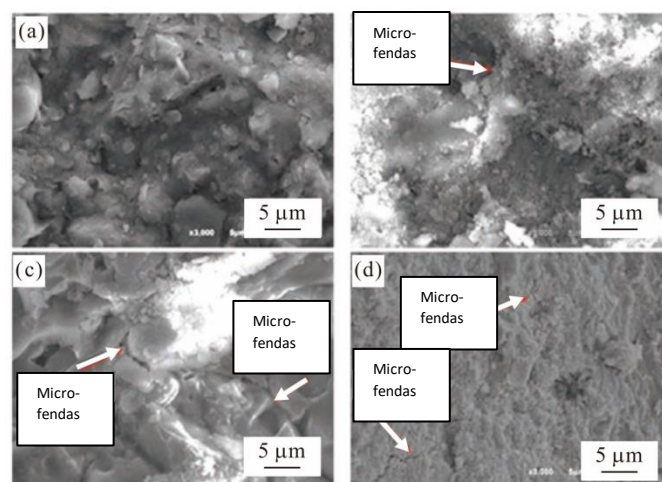


Figura 2.4 - Análise microscópica de AGN (a), AGRI (b), AGRII (c) e AGRIII (d) (Zhu et al., 2016)

2.1.3. Forma e textura das partículas

A forma das partículas tem uma importância relevante nas propriedades do betão em estado fresco e endurecido. Esta pode ser afetada não só pela natureza material das partículas como também pelo tipo de trituradora que foi utilizada.

A utilização de agregados com formas lamelares e achatadas origina uma significativa perda de trabalhabilidade, exigindo a consideração de uma quantidade de água mais elevada na mistura. Desta forma, será produzido um betão com uma razão a/c superior, obtendo-se desempenhos inferiores tanto ao nível da durabilidade como da resistência mecânica. Adicionalmente, o arranjo das partículas tende a ser no plano horizontal, afetando o ângulo de atrito interno e permitindo a acumulação de ar e água por baixo das mesmas (Martín-Morales et al., 2011).

A importância da rugosidade na qualidade da interface de ligação entre o agregado e a argamassa é realçada por Rao e Prasad (2002) no estudo que realizaram. Os autores evidenciaram que a resistência ao corte desta zona é essencialmente condicionada por três fatores: rugosidade do agregado, ângulo de aplicação da força em relação à interface e qualidade da argamassa.

Coutinho (1988) refere que, devido à forma mais esférica dos agregados rolados, com a sua utilização é possível obter um betão com melhor trabalhabilidade e arranjo das partículas. Devido à sua maior angularidade e rugosidade, os agregados de origem britada permitem obter um betão com uma melhor resistência mecânica, apesar de inferior trabalhabilidade.

Nos agregados reciclados, a sua forma é fundamentalmente determinada pelo equipamento de trituração (Martín-Morales et al., 2011). A argamassa aderida às partículas de agregados naturais explica uma diversidade de características como: a forma mais angular, a maior rugosidade e porosidade.

Malhotra (1976), citado por de Brito e Saikia (2012), realizou estudos de imagem com recurso a um microscópio eletrónico verificando que os agregados reciclados tendem a ser mais angulosos do que os naturais. Tanto Vieira et al. (2011) como Fonseca et al. (2011) verificaram um maior valor no índice de forma dos agregados grossos reciclados em relação aos naturais. Ao realizar a caracterização de agregados de vários ciclos de reciclagem, Huda e Alam (2014) constataram que a rugosidade e angularidade dos agregados com dois ciclos eram superiores às de um ciclo.

Poon et al. (2004) compararam a interface de ligação que se forma nos agregados reciclados com a dos agregados naturais. Para o efeito, foram considerados agregados reciclados provenientes de dois tipos de betões distintos, os denominados de resistência normal e os de alta resistência. Importa salientar que, no fabrico do betão de alta resistência, foram utilizadas cinzas volantes e sílica de fumo. Foi verificado que as interfaces de ligação dos agregados naturais e agregados provenientes de betão de resistência normal apresentavam porosidade semelhante (Figura 2.5). O mesmo não sucedeu com os agregados provenientes de betão de alta resistência, nos quais foi observada uma zona de transição interfacial de maior qualidade (Figura 2.6).

As propriedades geométricas dos agregados podem ser avaliadas com recurso a diversas metodologias, realçando-se a determinação dos índices de forma, de achatamento, de alongamento e volumétrico. No Quadro 2.6, apresenta-se um levantamento bibliográfico realizado por de Brito e Saikia (2012) sobre estas mesmas propriedades.

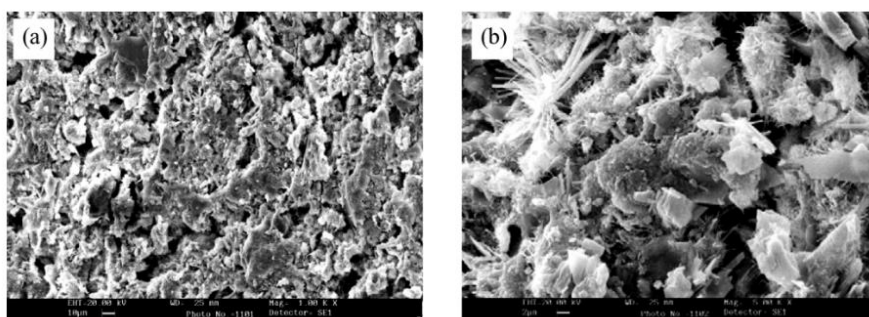


Figura 2.5 - Microestrutura da interface de ligação entre agregados naturais e argamassa (imagem à esquerda foi ampliada 1000x; imagem à direita foi ampliada 5000x) (Poon et al., 2004)

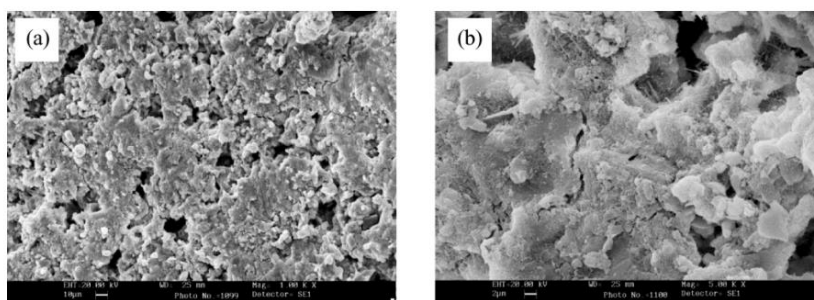


Figura 2.6 - Microestrutura da interface de ligação entre agregados proveniente de betão de alta resistência e argamassa (imagem à esquerda foi ampliada 1000x; imagem à direita foi ampliada 5000x) (Poon et al., 2004)

Quadro 2.6 - Levantamento bibliográfico dos parâmetros de forma de agregados reciclados e agregados naturais (de Brito & Saikia, 2012)

Referência	Parâmetro	Agregados reciclados	Agregados naturais
Etzeberria et al. (2007)	Índice de forma	28	25
Gómez-Soberón (2002)	Índice volumétrico	10-20 mm: 0,363	10-20 mm: 0,364
		5-12 mm: 0,444	5-12 mm: 0,576
	Índice de alongamento	10-20 mm: 6	10-20 mm: 15
		5-12 mm: 8	5-12 mm: 19
González-Fonteboa et al. (2011)	Índice de achatamento	4-12 mm: 7	8-20 mm: 7
			4-12 mm: 14
González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008)	Índice de achatamento	4-12 mm: 9	4-12 mm: 25
		10-25 mm: 7	10-25mm: 11
Tam et al. (2008)	Índice de achatamento	10 mm: 10,44-17,82	—
		20 mm: 5,70-12,96	
Vieira et al. (2011)	Índice de forma	22,3	14,0-18,3
Fonseca et al. (2011)	Índice de forma	24,3	11,1
Ferreira et al. (2011)	Índice de achatamento	10	9

2.1.4. Desgaste de Los Angeles

A resistência do agregado à deterioração na forma de abrasão, impacto e desgaste é medida com recurso ao ensaio de Los Angeles. Para a utilização do agregado no fabrico de betão estrutural, a norma LNEC E-373 estipula que não pode ocorrer uma perda superior a 50% da massa no fim do ensaio.

A abrasão obtida no ensaio de desgaste de Los Angeles é fundamentalmente condicionada pela resistência mecânica do agregado natural, pela quantidade de argamassa aderida ao agregado reciclado e pela respetiva qualidade. Uma vez que a tensão de rotura dos agregados naturais apresenta geralmente um valor substancialmente superior ao da argamassa, a resistência do betão é geralmente condicionada pela resistência mecânica da pasta cimentícia (Coutinho, 1988). Desta forma, é expectável que os agregados reciclados possuam um maior desgaste comparativamente com os agregados naturais.

Tanto de Juan e Gutiérrez (2009) como Zega et al. (2010) identificaram uma relação linear entre a quantidade de argamassa presente nos agregados e o valor de desgaste de Los Angeles obtido (Figura 2.7 e Figura 2.8). Verifica-se em ambos os casos que a perda de massa é tanto maior quanto maior for a quantidade de argamassa presente na constituição do agregado.

Como a qualidade da pasta cimentícia é diretamente dependente da qualidade do betão de origem, propriedades deste como a razão a/c e a resistência mecânica são fatores de preponderante importância. Yoshikane (1988), citado por Hansen (2004), constata como o aumento da resistência mecânica

do betão de origem melhora o desempenho do agregado em relação ao desgaste de Los Angeles (Quadro 2.7). Casuccio et al. (2008), em conformidade com Yoshikane (1988), obtiveram valores de 34% para agregados reciclados provenientes de betão de alta resistência e 39% para agregados reciclados provenientes de betão de resistência normal.

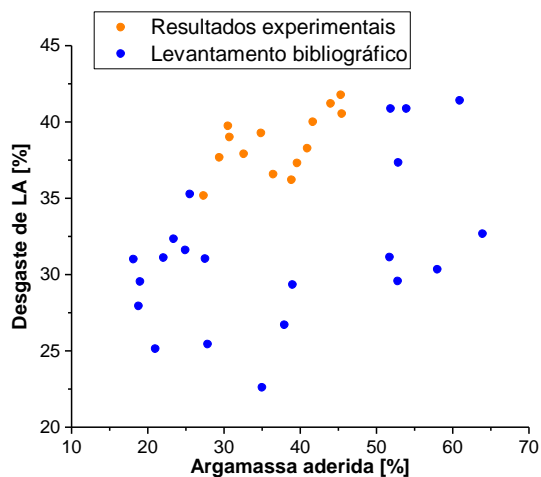


Figura 2.7 - Relação entre quantidade de argamassa aderida e valor de desgaste de Los Angeles (de Juan & Gutiérrez, 2009)

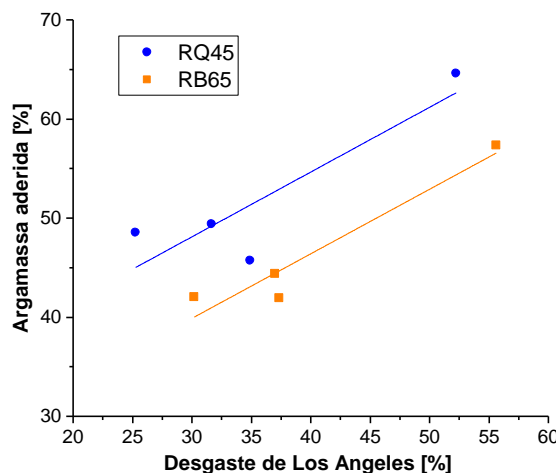


Figura 2.8 - Relação entre a quantidade de argamassa aderida e o valor de desgaste de Los Angeles (Zega et al., 2010)

Adicionalmente, a menor razão a/c na formulação do betão ordinário permite a obtenção de uma argamassa menos porosa e, conseqüentemente, de melhor qualidade. Por esta razão, os agregados originários de betões com menor razão a/c apresentam uma menor perda de massa quando submetidos ao ensaio de Los Angeles. Zega et al. (2010) confirmam esta tendência, realçando, no entanto, que a qualidade do agregado natural é também de significativa importância. De facto, os autores obtiveram valores de desgaste de LA superiores para agregados reciclados provenientes de betão com razão a/c de 0,45 mas com agregados naturais com valor de LA de 59,8%, do que para betões de razão a/c de 0,65 mas com agregados naturais com valor de LA de 9,1% (Quadro 2.8).

Quadro 2.7 - Relação entre a resistência mecânica do betão de origem e o desgaste de LA dos agregados reciclados (Yoshikane, 1988)

Amostra	C	A	B	E	F	D
Resistência mecânica do BO [MPa]	15	16	21	30	38	40
Desgaste de LA [%]	28,7	27,3	28,0	25,6	22,9	20,1

Quadro 2.8 - Desgaste de Los Angeles em função da razão a/c do betão de origem e valor de LA dos agregados naturais [adaptado de (Zega et al., 2010)]

Características	RQ45	RB65
a/c	0,45	0,65
Desgaste de LA do AN [%]	59,8	9,1
Desgaste de LA do AR [%]	52,2	30,6

Conclusão semelhante foi obtida por Hansen e Narud (1983), como é possível verificar através do estudo aos agregados reciclados realizados pelos autores e apresentados no Quadro 2.9. Agregados provenientes de betões de maior resistência mecânica e menor razão a/c apresentaram valores de desgaste de LA inferiores em relação aos demais.

Quadro 2.9 - Quantidade de argamassa aderida e desgaste de Los Angeles em função da granulometria e razão a/c do betão de origem [adaptado de Hansen e Narud (1983)]

Tipo de agregado	Granulometria [mm]	Argamassa aderida [%]	Desgaste de LA [%]
AN	4-8 mm	0	25,9
	8-16 mm	0	22,7
	16-32 mm	0	18,8
AR (BO com a/c de 0,40)	4-8 mm	58	30,1
	8-16 mm	38	26,7
	16-32 mm	35	22,4
AR (BO com a/c de 0,70)	4-8 mm	64	32,6
	8-16 mm	39	29,2
	16-32 mm	28	25,4
AR (BO com a/c de 1,20)	4-8 mm	61	41,4
	8-16 mm	39	37,0
	16-32 mm	25	31,5

Como referido no levantamento bibliográfico de de Brito e Saikia (2012) (Quadro 2.10), a grande maioria dos estudos realizados para agregados reciclados com apenas um ciclo de reciclagem apresenta valores de perda de massa na realização do ensaio de desgaste de LA compreendidos entre 0 e 50%.

Quadro 2.10 - Levantamento bibliográfico sobre o desgaste de Los Angeles [adaptado de de Brito e Saikia (2012)]

Referência	Granulometria [mm]	Desgaste de LA [%]	
		Agregados reciclados	Agregados naturais
González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008)	5-40	39,65	-
González-Fonteboa e Martínez-Abella (2007)	4-12	32	32
	10-25	34	27
Courard et al. (2010)	10-20	25	-
Chakradhara Rao et al. (2011)	4-20	37,1	21,56
Tangchirapat et al. (2008)	5-30	33,08	21,7
López-Gayarre et al. (2009)	4-20	37,2; 33,1	24; 26,4
Fonseca et al. (2011)	4-25,4	42,7	29,5
Gomes e de Brito (2009)	< 25,4	37,96	28,52
		65,47	

Com a múltipla reciclagem do betão, os agregados que são produzidos são caracterizados por possuírem simultaneamente uma progressiva menor quantidade de partículas de agregados naturais e maior quantidade de argamassa aderida. A argamassa aderida que os constitui é originária de diferentes ciclos de reciclagem, tendo consequentemente propriedades estritamente relacionadas com o betão do mesmo ciclo. É expectável que a sua qualidade, representada pela sua compacidade e resistência mecânica do betão de origem, tenha uma importância crescentemente preponderante à medida que os ciclos aumentam.

Salienta-se o facto de, com o maior número de reciclagens, a capacidade de os agregados respeitarem o limite máximo de 50% de desgaste de Los Angeles imposto pela norma LNEC E-397 para a produção de betão estrutural poderá ser posta em causa.

2.2. Propriedades do betão produzido com agregados reciclados

2.2.1. Massa volúmica

A massa volúmica do betão depende sobretudo da massa volúmica dos agregados, quantidade de ar presente na sua composição, razão a/c considerada na sua formulação e seu grau de compactação.

Diferentes propriedades do betão em estado endurecido encontram-se indiretamente relacionadas com a massa volúmica do betão em estado fresco. De facto, tendo em consideração a mesma quantidade de agregados e cimento para uma dada mistura, uma menor massa volúmica em estado fresco é indicadora de uma maior presença de água e vazios na sua composição e, conseqüentemente, uma menor resistência mecânica (de Brito & Saikia, 2012). Simultaneamente, a maior porosidade da matriz permite uma maior permeabilidade, prejudicando o desempenho ao nível da durabilidade.

Kreijger (1983), citado por Hansen (2004), traçou as relações lineares entre a resistência mecânica à compressão e a massa volúmica de betões em estado endurecido com diferentes quantidades de cimento por volume, as quais são apresentadas na Figura 2.9.

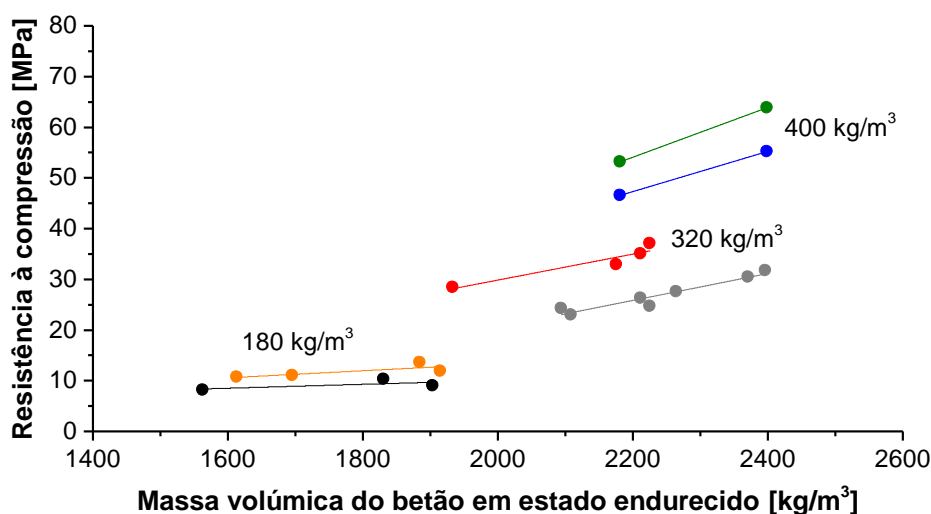


Figura 2.9 - Relação entre a resistência mecânica à compressão e a massa volúmica do betão em estado endurecido para misturas com diferentes teores de cimento (Kreijger, 1983)

Devido à elevada predominância dos agregados na constituição do betão, a sua massa volúmica tem importância relevante nesta propriedade. A menor massa volúmica dos agregados reciclados implica que a do betão produzido com recurso a estes seja inferior àquela obtida quando utilizados agregados naturais. Hansen e Narud (1983) referem que esta redução varia geralmente entre 5 e 15% em betões produzidos com agregados reciclados provenientes de um ciclo de reciclagem, afirmando que variações até 5% são perfeitamente normais em condições laboratoriais.

Em conformidade com os autores referidos, também López-Gayarre et al. (2009), Sri e Tam (1985), Fonseca et al. (2011) e Gomes e de Brito (2009) verificaram nos seus estudos variações na massa volúmica entre 4 e 5% em relação ao betão de referência.

Leite (2001), ao estudar a influência da incorporação de diferentes taxas de agregados reciclados para distintas razões de a/c, verificou uma diminuição máxima de 16% na massa volúmica do betão com 100% de substituição de agregados naturais grossos e finos (Figura 2.10). A autora salienta adicionalmente que o aumento da razão a/c implica betões com uma maior porosidade, originando um decréscimo nos resultados verificados.

Salesa et al. (2017) também verificaram uma diminuição da massa volúmica seca do betão em estado endurecido com o aumento do número de reciclagens de origem dos AR (Quadro 2.11). O betão de

referência apresentou um valor desta propriedade 2,78 e 4,14% superior em relação aos betões produzidos com recurso a AR provenientes de um e dois ciclos de reciclagem, respetivamente.

Katz (2003), citado por de Brito e Saikia (2012), explica que a idade do betão de origem da qual provêm os agregados reciclados tem pouca influência nesta propriedade. O autor baseia esta afirmação na constatação da pequena variação da massa volúmica de betão produzido com AR provenientes de betões com idades de 7, 14 e 28 dias, essencialmente devido a não existir uma grande diferença na quantidade de argamassa aderida entre os três tipos de agregados reciclados.

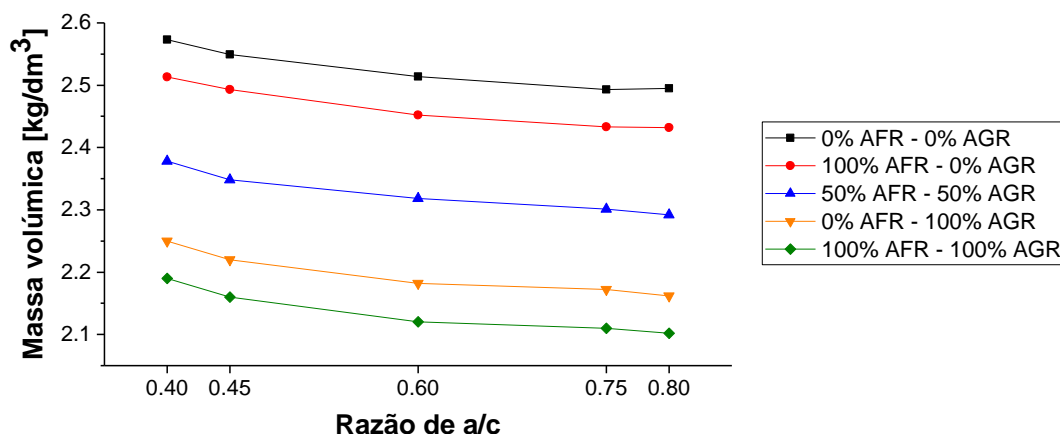


Figura 2.10 - Relação entre a razão a/c e a massa volúmica do betão para diferentes misturas (Leite, 2001)

Quadro 2.11 - Massa volúmica dos betões secos em estufa estudados por Salesa et al. (2017)

Mistura	Massa volúmica [kN/m³]	
	SSS	Seca
BR	23,43	22,13
BAGR1	23,09	21,53
BAGR2	22,84	21,25

2.2.2. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade tem uma importância relevante para a caracterização do betão produzido, controlando algumas das suas propriedades, como a massa volúmica, porosidade e resistência mecânica. É por esta razão fundamental que, para que seja possível proceder a uma comparação equitativa de diferentes betões, devem ser obtidas nas misturas valores de trabalhabilidade semelhantes. Apesar de existirem diversos métodos para a sua quantificação, o mais comumente utilizado é o ensaio do cone de Abrams.

Esta propriedade pode ser afetada por diferentes fatores, dos quais se destacam a forma das partículas, a sua textura, a razão a/c e a utilização de superplastificantes. Desta forma, as maiores rugosidade, angulosidade e absorção de água dos agregados reciclados afetam fortemente a trabalhabilidade do betão produzido, sendo expectável que esta diminuía com o aumento da taxa de incorporação de AR e com o aumento do número de reciclagens.

De Brito e Saikia (2012) referem que, de forma a tentar resolver a diminuição da trabalhabilidade devido à utilização de agregados reciclados, foram desenvolvidas diferentes metodologias. Estas podem ser sumariamente listadas como: aumento da quantidade de água na mistura tendo em consideração a absorção dos agregados reciclados em estado seco; pré-saturação em água dos agregados reciclados

durante um período de 10-20 minutos ou 24 horas; aumento da humidade relativa dos agregados reciclados para taxas entre 70 e 80% 24 horas antes da sua utilização, tendo os cuidados necessários para evitar oscilações destes valores até à sua utilização na amassadura; utilização de superplastificantes; aumento da quantidade de cimento da mistura.

Ferreira et al. (2011) realizou um estudo com o objetivo de comparar a utilização da metodologia de pré-saturação e a compensação através da introdução do volume de água correspondente à absorção durante a execução da amassadura. O autor concluiu que a utilização da primeira metodologia originava betões com menor resistência à compressão, menor módulo de elasticidade, maior retração e maior absorção por capilaridade e por imersão.

Huda e Alam (2014) verificaram um decréscimo na trabalhabilidade do betão em estado fresco com o aumento do número de reciclagens dos AR. Os betões produzidos com AGR provenientes de um, dois e três ciclos de reciclagens apresentaram valores de abaixamento de 100, 94 e 85 mm respetivamente. Os autores consideram que, com o maior número de reciclagens, os AR apresentam maior rugosidade, angulosidade e absorção de água, afetando significativamente a trabalhabilidade obtida. A mesma constatação foi feita por Salesa et al. (2017) e Zhu et al. (2016) nos trabalhos que desenvolveram, como pode ser observado através do Quadro 2.12.

Quadro 2.12 - Abaixamento obtido por Zhu et al. (2016), Salesa et al. (2017) e Huda e Alam (2014)

Autores	Mistura	Abaixamento [mm]
Zhu et al. (2016)	BR	148
	BAGR 1	147
	BAGR 2	143
	BAGR 3	132
Huda e Alam (2014)	BR	100
	BAGR 1	100
	BAGR 2	94
	BAGR 3	85
Salesa et al. (2017)	BR	100
	BAGR 1	100
	BAGR 2	94

Marie e Quiasrawi (2012), por sua vez, atestaram uma maior diminuição na trabalhabilidade no betão produzido com recurso a agregados reciclados provenientes de um ciclo de reciclagem em comparação com os de dois ciclos de reciclagem. A primeira mistura apresentou um decréscimo de 30% em relação ao betão de referência enquanto a segunda teve 12%.

2.2.3. Absorção de água

A capacidade de absorção de água é um indicador do desempenho à durabilidade do betão, sendo que esta medida é geralmente avaliada de duas formas distintas, por imersão e por capilaridade. Um elevado valor desta propriedade significa uma estrutura mais porosa acessível no betão, permitindo que agentes nocivos como dióxido de carbono e iões de cloreto penetrem afetando o seu equilíbrio químico.

A absorção de água por imersão pretende medir a capacidade de um líquido se infiltrar na estrutura porosa acessível do betão, dependendo conseqüentemente da sua humidade relativa e microestrutura. Apesar de ser de fácil determinação, de Schutter e Audenaert (2004) referem que a capacidade de absorção de água

por imersão não é um parâmetro fiável para estimar a resistência à penetração de cloretos ou carbonatação. Os autores afirmam que este tipo de fenómenos é influenciado pela permeabilidade do material e não pela sua estrutura porosa acessível.

A capilaridade é um fenómeno que ocorre devido a forças intermoleculares entre o líquido e o sólido com que este se encontra em contacto, sendo diretamente dependente da dimensão do poro. Na presença de um canal suficientemente estreito, o líquido ascende pelo mesmo até que um equilíbrio entre as forças adesivas e coesivas destas entidades seja estabelecido.

A presença de argamassa aderida na estrutura dos agregados reciclados torna-os inevitavelmente mais porosos do que os naturais, sendo conseqüentemente natural que betões produzidos com recurso a este tipo de agregados possuam maiores capacidades de absorção de água.

Katz (2003) verificou uma absorção de 3,8% para o betão de referência produzido com agregados naturais e 7,2% para o betão produzido com quase 100% de agregados reciclados. Malešev et al. (2010) analisaram a absorção de água em betão fabricado com recurso a agregados naturais, com 50 e 100% de substituição de agregados grossos naturais por reciclados, registando valores de 5,61, 6,87 e 8,05% respetivamente.

Kwan et al. (2012) verificaram uma tendência crescente no valor de absorção de água por imersão em função da maior taxa de presença de agregados reciclados (Figura 2.11). Apenas as misturas com menos do que 30% de AR apresentaram valores inferiores a 3%, considerados baixos. O betão com incorporação de 80% de AR apresentou o maior valor, sendo este cerca de 2,2 vezes superior ao do betão de referência.

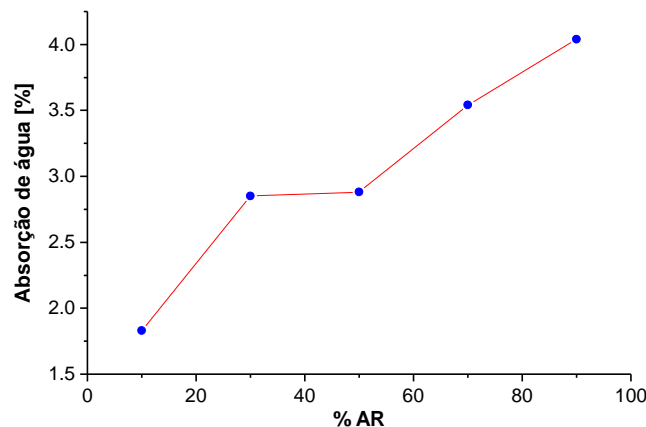


Figura 2.11 - Absorção de água por imersão para betões com diferentes taxas de incorporação de AR (Kwan et al., 2012)

Levy e Helene (2004) investigaram a variação da capacidade de absorção de água por imersão com diferentes taxas de substituição de agregados finos e grossos reciclados provenientes de betão e alvenaria. Betões com taxas de substituição de 100% de agregados naturais por reciclados registaram uma maior capacidade, com valores na ordem de 8,0 a 9,0% para o caso de agregados grossos reciclados de de betão (Figura 2.12). Realça-se o facto de a quantificação desta propriedade seguir uma ordem decrescente com o aumento da resistência mecânica do betão. Adicionalmente, foi notada uma diminuição na capacidade de absorção face ao betão de referência para a taxa de substituição de 20% de agregados grossos naturais por reciclados, fator que é explicado pelos autores pela possível melhor

compactação do betão em simultâneo com a presença de uma maior quantidade de pozolanas, as quais permitem proporcionar uma melhoria no desempenho do betão.

Sagoe-Crentsil et al. (2001) constataram uma absorção de água por imersão 25% superior nas misturas produzidas com recurso a agregados reciclados de betão (BAGR) comparativamente às produzidas com agregados naturais de natureza basáltica (BAGB). A cura das amostras foi efetuada em câmara húmida durante 6 dias e estas foram posteriormente deixadas em ambiente com 50% de humidade relativa e temperatura de 23 °C. Como se pode ver na Figura 2.13, os autores não verificaram nenhuma diferença significativa nesta propriedade com o acréscimo em 5% da quantidade de cimento (OPC +5%) ou a introdução de escórias na mistura.

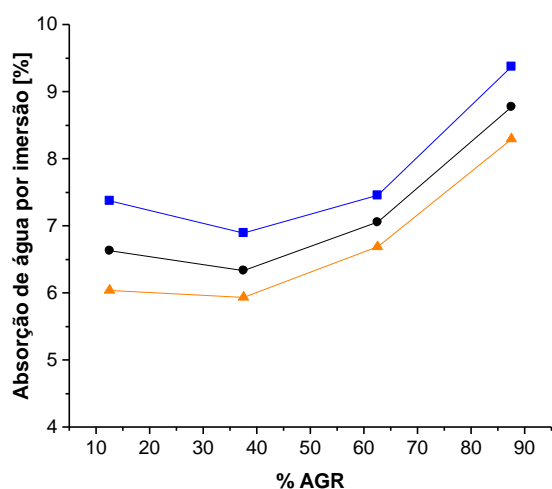


Figura 2.12 - Evolução da taxa de absorção de água por imersão com a taxa de incorporação de AGR (Levy & Helene, 2004)

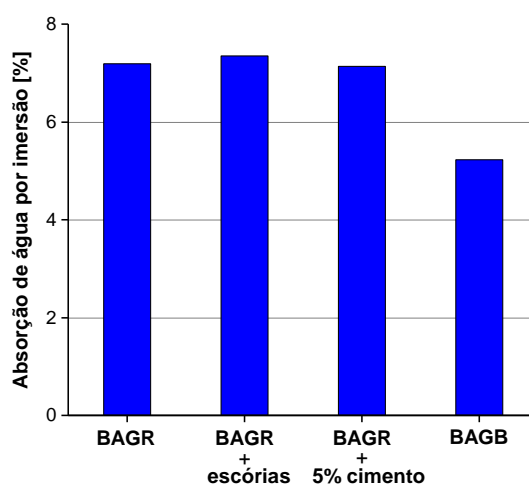


Figura 2.13 - Absorção de água do betão de referência comparativamente com misturas produzidas com agregados reciclados de betão (Sagoe-Crentsil et al., 2001)

Matias et al. (2014) realizaram o estudo sobre a influência da introdução de diferentes tipos de superplastificantes na mistura nas propriedades de durabilidade. Para o efeito foram produzidas três misturas com 100% de incorporação de AGR e um betão de referência produzido apenas com AGN (BR). A mistura produzida com a introdução de superplastificante ordinário foi designada de 100RACSP1, a produzida com a introdução de superplastificante de alto desempenho foi designada de RAC100SP2, e por fim a sem introdução de qualquer tipo de superplastificante de 100RACSP0. Nos ensaios de imersão realizados, observaram um aumento de cerca de 17% na absorção de água por parte dos betões com agregados grossos reciclados em relação ao de referência. Como esperado, todos os betões com incorporação de agregados reciclados na sua constituição apresentaram uma maior absorção de água por capilaridade. Foi, no entanto, verificado que o betão sem incorporação de superplastificantes (100RACSP0) apresentou um valor cerca de 30% inferior do que as misturas com adjuvante (100RACSP1 e 100RCASP2) (Figura 2.14). Os autores explicam este fenómeno com o facto de a introdução de superplastificante na mistura do betão causar a sedimentação do betão fresco simultaneamente a um atraso na sua hidratação, permitindo a formação de uma rede capilar mais extensa.

Olorunsogo e Padayachee (2002) constataram que o coeficiente de absorção capilar diminuía à medida que o tempo de cura aumentava, tendendo a estabilizar (Figura 2.15). Comparando os resultados obtidos para betão com 3 e 56 dias de cura, foi verificado que se obteve reduções de 35,9, 42,7 e 44,0%

para o betão de referência (agregados naturais), betão com 50% e 100% de AR, respetivamente. Também constataram um aumento linear desta propriedade com o aumento da taxa da taxa de substituição de agregados naturais por agregados reciclados (Figura 2.16).

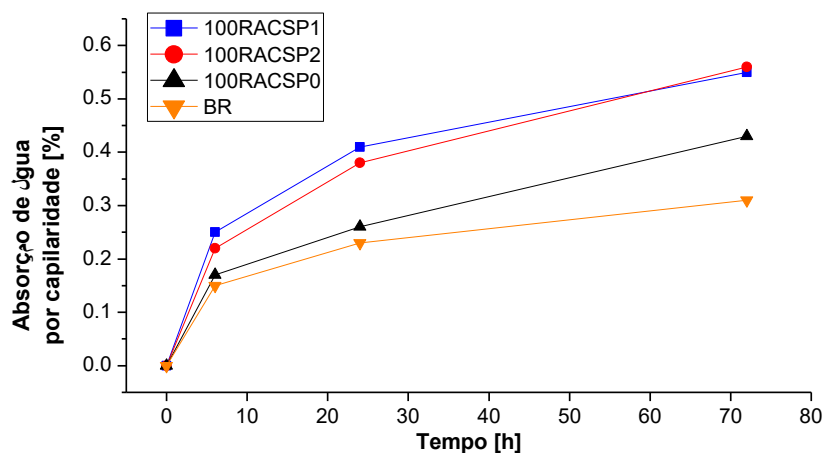


Figura 2.14 - Influência da introdução de superplastificantes na absorção de água por capilaridade de betões produzidos com agregados reciclados (Matias et al., 2014)

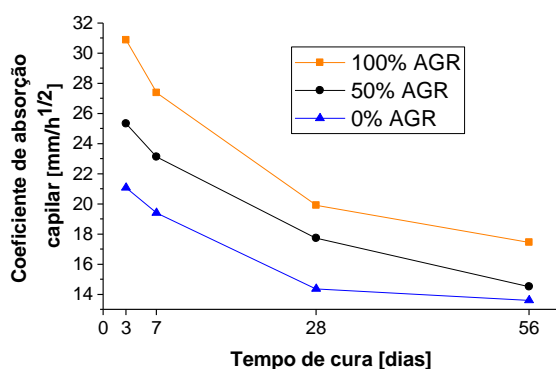


Figura 2.15 - Influência do tempo de cura no coeficiente de absorção capilar (Olorunsogo & Padayachee, 2002)

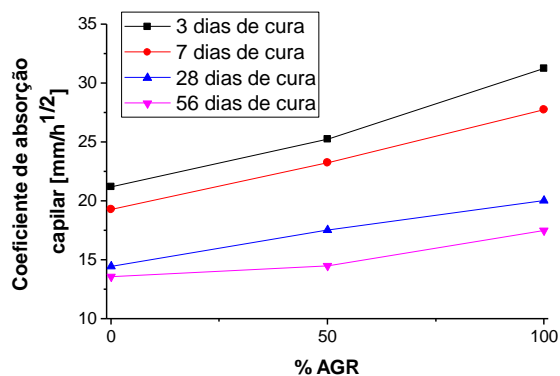


Figura 2.16 - Influência da taxa e incorporação de AR no coeficiente de absorção capilar (Olorunsogo & Padayachee, 2002)

2.2.4. Resistência à carbonatação

O betão não contaminado é caracterizado por ser um meio alcalino, mantendo valores de pH entre 12,5 e 13,5. Esta característica permite a formação de uma película passiva que protege a armadura da corrosão, proporcionando um correto funcionamento do betão armado. Por sua vez, a diminuição do pH devido a uma elevada concentração de dióxido de carbono viabiliza a destruição desta película protetora, potenciando o início do processo corrosivo da armadura.

Sendo a carbonatação essencialmente condicionada pela resistência à difusão do betão, quanto maior a compacidade e, conseqüentemente, menor o volume de vazios e porosidade, maior será a resistência a este fenómeno. Desta forma, devido à maior porosidade dos AR em relação aos AN, espera-se que, quanto maior for a taxa de introdução deste tipo de agregados menor será a resistência à carbonatação do betão produzido. Adicionalmente, prevê-se que a introdução de agregados provenientes de múltiplos ciclos de reciclagem acentue ainda mais esta tendência, devido à maior quantidade de argamassa que os constitui.

Realça-se também o facto de a obtenção dos agregados reciclados ser geralmente efetuada com recurso a demolição de elementos de betão armado pré-existentes, os quais, ao longo da sua vida útil, podem ter sofrido uma exposição ambiental que potenciou um nível de carbonatação já significativo.

BCS (1978), citado por Hansen e Narud (1983), estudou a velocidade de carbonatação em betão produzido com agregados reciclados exposto a uma temperatura de 20 °C, 60% HR e 20% de concentração de dióxido de carbono. O autor concluiu que a corrosão das armaduras presentes em betão produzido com AR ocorreu mais rapidamente do que no betão produzido com AN, sugerindo a consideração de uma razão a/c inferior para a mitigação do problema.

Kou e Poon (2012) verificaram um aumento da profundidade da frente de carbonatação em comparação com o betão de referência em betões com maior taxa de incorporação de AGR (Quadro 2.13). As amostras são provenientes de duas misturas e foram colocadas numa câmara com uma concentração 4 % de CO₂ durante um período de 90 dias.

Quadro 2.13 - Profundidade da frente de carbonatação observada por Kou e Poon (2012)

Misturas	Mistura 1		Mistura 2	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
BAN	5,7 mm	10,1 mm	4,1 mm	7,5 mm
BAGR 20%	6,1 mm	10,8 mm	4,7 mm	8,8 mm
BAGR 50%	6,8 mm	11,7 mm	5,9 mm	9,6 mm
BAGR 100%	7,9 mm	12,5 mm	6,6 mm	10,4 mm

Xiao et al. (2012a) referem que, em geral, a profundidade da frente de carbonatação é menor com o aumento da resistência à compressão do betão de origem dos agregados reciclados. Os mesmos autores constataram uma tendência decrescente para a frente de penetração quando uma taxa de substituição de AGR acima de 70% foi utilizada (Figura 2.17).

Yuan et al. (2010), referenciados por Xiao et al. (2012b), constataram que a resistência à penetração do CO₂ é tanto maior quanto menor for a taxa de agregados reciclados (Figura 2.18). Adicionalmente, os autores referem que a velocidade de penetração diminui com o aumento da idade do betão. Sagoe-Crentsil et al. (2001) constataram uma velocidade de penetração da frente de carbonatação 10% superior em betão produzidos com agregados reciclados em comparação com o betão de referência (produzido com agregados naturais).

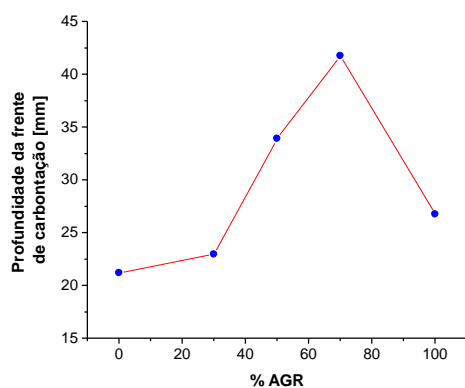


Figura 2.17 - Profundidade da frente de carbonatação obtida por Xiao et al. (2012a)

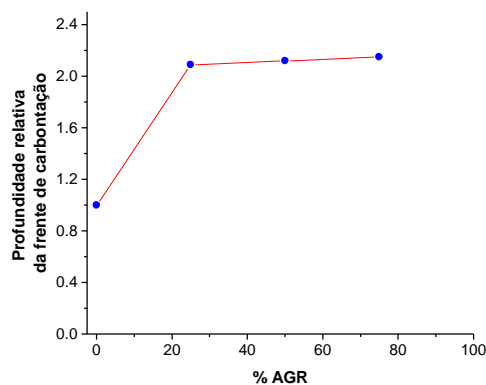


Figura 2.18 - Profundidade relativa da frente de carbonatação observada por Yuan et al. (2010) [adaptado de Xiao et al. (2012b)]

2.2.5. Resistência à penetração dos cloretos

A penetração dos íons de cloro promovem a corrosão da armadura através da formação de hidróxido de ferro e, à semelhança da carbonatação, potenciam a destruição da película passiva devido à formação de ácido clorídrico. Como referido, a substituição de agregados naturais por reciclados aumenta a porosidade do betão, diminuindo conseqüentemente a capacidade de resistir à penetração de agentes agressivos.

Segundo Xiao et al. (2012b), que sumarizaram os estudos realizados na China referentes a betões produzidos com agregados reciclados, é consensual para diversos autores que a resistência à penetração dos cloretos é inferior em betões com agregados reciclados do que em produzidos com agregados naturais. Rao et al. (2011) verificaram um aumento da profundidade de penetração dos cloretos com o aumento da taxa de incorporação de AGR. Os autores identificam a natureza mais porosa dos AGR como a principal causa do pior desempenho dos betões produzidos com agregados reciclados (Figura 2.19). A mesma conclusão é verificada por Otsuki et al. (2003) no estudo que realizaram de forma a comparar o desempenho de misturas produzidas com diferentes razões a/c (Figura 2.20).

Kou e Poon (2012) também constataram uma diminuição desta propriedade com o aumento da taxa de incorporação de AR. À semelhança de Otsuki et al. (2003) (Figura 2.20), os autores verificaram que a diminuição da razão a/c permitiu produzir um betão com menor porosidade e, conseqüentemente, mais impermeável à penetração dos íons de cloro. O tempo de cura também teve uma influência positiva nesta propriedade, possibilitando que um maior volume de produtos de hidratação se formasse na matriz constituinte do betão.

Adicionalmente, a utilização de cinzas volantes também potenciou o aumento da resistência à penetração dos cloretos. Segundo Leng et al. (2000), a utilização deste material tem um conjunto de benefícios para esta propriedade, sendo estes: potenciar a formação de um maior volume de produtos de hidratação; refinar a dimensão e forma dos poros no interior do betão; reduzir a razão a/c.

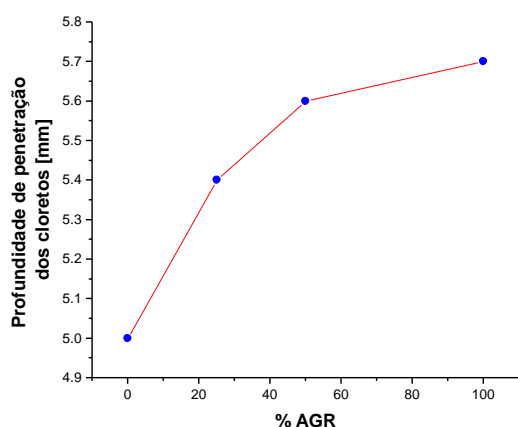


Figura 2.19 - Evolução da profundidade de penetração dos cloretos com a taxa de incorporação de AGR (Rao et al., 2011)

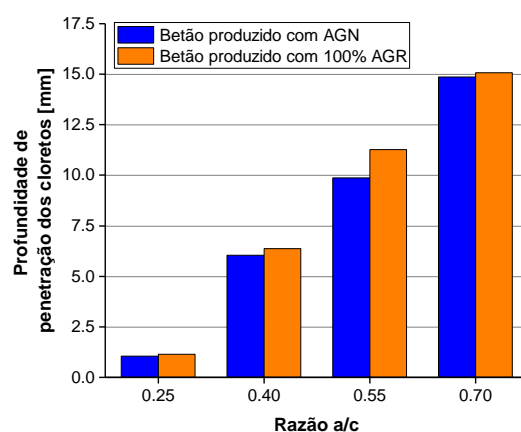


Figura 2.20 - Profundidade de penetração dos cloretos para diferentes razões de a/c (Otsuki et al., 2003)

Segundo Silva et al. (2015a), a consideração de dois processos de trituração para a obtenção dos agregados reciclados pode permitir uma redução significativa da quantidade de argamassa aderida. Simultaneamente, a forma dos agregados pode apresentar-se mais esférica, possibilitando um melhor

arranjo das partículas. O autor salienta também a importância da idade do betão nesta propriedade, afirmando que, 10 anos após a betonagem, a resistência à penetração dos íões de cloro no betão de referência é semelhante àquela apurada no betão produzido com recurso a AR.

Contrariamente ao esperado, Limbachiya et al. (2000) não verificaram uma significativa variação nesta propriedade em betões produzidos com até 100% de incorporação de agregados reciclados provenientes de betões com uma resistência superior a 50 MPa, sendo que a diferença do coeficiente de difusão dos cloretos entre todas as amostras da mesma idade foi inferior a $1,0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (Figura 2.21). Conclusão semelhante foi obtida por Kashino e Takahashi (1988).

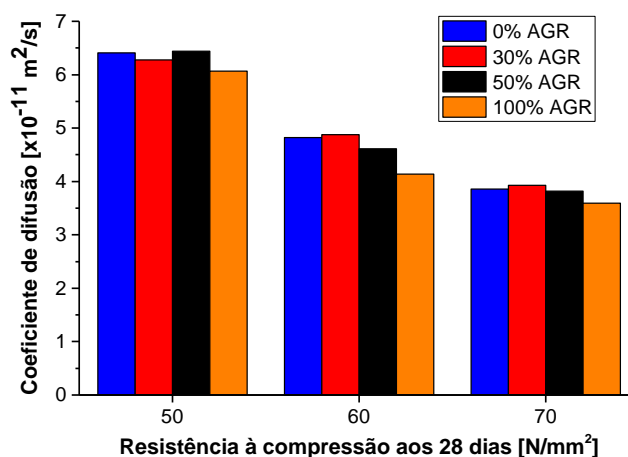


Figura 2.21 - Coeficiente de difusão de cloretos (Limbachiya et al., 2000)

2.2.6. Retração

A retração do betão impõe uma diminuição da dimensão de uma peça de betão no tempo, independentemente do estado de tensão da peça, portanto mesmo na ausência de outras ações, variações de temperatura ou cargas aplicadas (Appleton, J. et al., 2003). Devido à argamassa aderida, os AR apresentam uma menor rigidez em relação aos AP e, conseqüentemente, a sua capacidade de oposição a este fenómeno é previsivelmente menor. Quanto maior for a percentagem de argamassa e a taxa de substituição de AR, maior será o valor de retração obtido.

Silva et al. (2015b) realizaram uma extensa pesquisa bibliográfica sobre o tema, concluindo que a grande maioria dos estudos concorda que a retração aumenta linearmente com o aumento da taxa de incorporação dos agregados reciclados. Salienta-se o facto de alguns investigadores terem obtido resultados semelhantes entre o betão produzido com agregados naturais e betões com até 30% de AR. Por sua vez, a utilização de uma taxa de 100% de substituição demonstrou uma grande dispersão de resultados, obtendo-se variações entre 10 e 100% em relação ao betão produzido com agregados naturais.

Na Figura 2.22, está representado o levantamento bibliográfico efetuado por Silva et al. (2015b) sobre os valores de retração obtidos ao final de pelo menos 90 dias em diferentes estudos. As amostras possuem variadas razões a/c, condições de cura e quantidade de cimento.

Yanagibashi et al. (2002) concluíram na sua investigação que a utilização de AGR de elevada qualidade permitiu obter valores de retração muito próximos do valor do betão de referência constituído apenas por AN. O mesmo foi constatado por Yang et al. (2008), que realizaram o estudo para betões com

taxas de 100% de incorporação de AGR de classe de qualidade distintas. A utilização dos agregados de melhor qualidade permitiu obter valores de retração próximos do valor do betão de referência. Por outro lado, o betão fabricado com recurso a AGR da menor classe de qualidade registou um aumento da retração da ordem de 30% face ao betão de referência constituído unicamente por AN.

Pedro et al. (2015) aferiram a importância do processo de trituração do betão na qualidade dos agregados reciclados obtidos. Segundo os autores, a utilização de dois processos de trituração para a obtenção dos agregados reciclados permite diminuir a quantidade de argamassa aderida e, consequentemente, obter agregados com maior rigidez. A forma das partículas é também mais arredondada, contribuindo para a produção de um betão de maior qualidade.

Amorim et al. (2012), citados por Silva et al. (2015b), constataram a significativa importância das condições de cura na retração que o betão apresenta. No seu estudo, são apresentados resultados que indicam que, quanto menor for a humidade relativa do ambiente de cura do betão, maior será a retração que este apresentará. Esta característica aparenta ser mais significativa do que a percentagem de incorporação de AGR, como pode ser verificado na Figura 2.23.

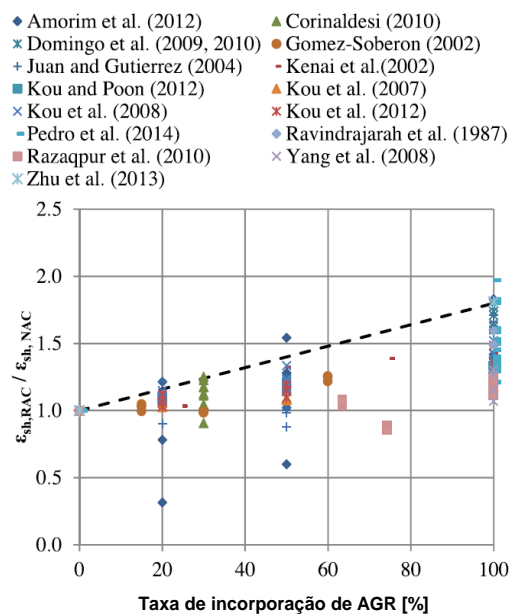


Figura 2.22 - Influência da taxa de incorporação de AGR (Silva et al., 2015b)

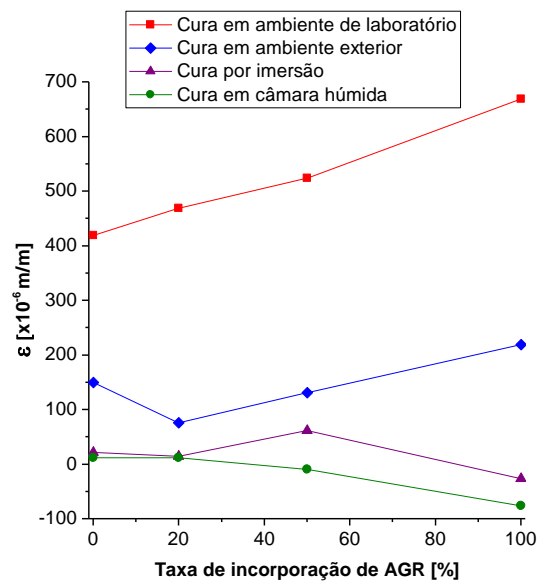


Figura 2.23 - Influência da humidade relativa do ambiente de cura (Amorim et al., 2012)

3. Procedimento laboratorial

3.1. Introdução

Esta dissertação tem como objetivo estudar o comportamento em termos de durabilidade de betões produzidos com a substituição total e parcial de agregados grossos naturais por agregados reciclados de múltiplos ciclos de reciclagens. Para o efeito, foram produzidos sete tipos de betões distintos, apresentados no Quadro 3.1, os quais foram alvo de múltiplos ensaios de durabilidade.

Quadro 3.1 - Betões produzidos para o estudo de durabilidade

Designação do betão	Taxa de substituição de AGN por AGR	Número de ciclos de reciclagem dos agregados grossos reciclados
BR	0%	-
B125%	25%	1
B1100%	100%	1
B225%	25%	2
B2100%	100%	2
B325%	25%	3
B3100%	100%	3

Neste capítulo, é apresentado o planeamento da campanha experimental, o qual se encontra dividido em três fases distintas. Adicionalmente, são identificados e descritos todos os ensaios realizados, determinada a composição do betão, descritos o processo de betonagem e os cuidados relativos à produção dos betões com incorporação de agregados reciclados.

3.2. Planeamento da campanha experimental

3.2.1. Primeira fase

A primeira fase da campanha experimental tem como objetivo a obtenção dos agregados reciclados dos diversos ciclos para a produção dos betões destinados ao estudo de durabilidade. A natureza do estudo proposto por esta dissertação implica que, para a produção do betão de origem do ciclo seguinte, seja necessário obter os agregados reciclados referentes ao betão de origem do ciclo anterior. A título exemplificativo, a betonagem do betão de origem do segundo ciclo (BOII) apenas é possível quando o betão de origem do primeiro ciclo (BOI) for triturado de modo a se obter os AGRII. A interdependência do processo origina a necessidade de que a determinação dos volumes a produzir dos diversos betões seja efetuada de forma inversa, ou seja, do terceiro para o primeiro ciclo. Este processo é detalhadamente explicitado nos capítulos 3.5 e 3.6.

Tendo como objetivo a produção dos betões, é simultaneamente necessário estudar a sua formulação e as características dos agregados a utilizar. O estudo da composição do betão foi efetuado com recurso à curva de referência de Faury, sendo apresentado no capítulo 3.3. Relativamente às características dos agregados, estas foram inferidas com recurso aos seguintes ensaios normalizados:

- análise granulométrica: normas NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999);
- massa volúmica e absorção de água: norma NP EN 1097-6 (2003);
- baridade: norma NP EN 1097-3 (2003);

- teor de humidade: norma NP EN 1097-5 (2002);
- desgaste de Los Angeles: norma NP EN 1097-2 (2011);
- índice de forma: norma NP EN 933-4 (2002).

Considerando que a maioria dos betões de origem foi produzida com agregados reciclados, é fundamental quantificar a sua absorção de água, especialmente durante os primeiros 15 minutos (intervalo temporal referente à amassadura). Devido à inexistência de qualquer ensaio normalizado para o efeito, foi seguido o procedimento descrito por Rodrigues et al. (2013). Embora o ensaio tenha sido elaborado para agregados finos reciclados, uma ligeira adaptação permite que seja também válido para agregados grossos reciclados. Adicionalmente, de modo a que em todos os betões produzidos apresentem uma trabalhabilidade semelhante, foi realizado o ensaio de abaixamento (ou cone de Abrams) ao betão fresco de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009).

Por fim, para se obter uma estimativa da qualidade do betão produzido, foram realizados ao betão em estado endurecido ensaios de compressão aos 28 dias, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2003).

3.2.2. Segunda fase

A segunda fase da campanha experimental prende-se fundamentalmente com o processo de betonagem de todos os provetes a utilizar para o estudo do desempenho ao nível da durabilidade. À semelhança do referido no ponto 3.2.1, foi tido o cuidado de controlar a trabalhabilidade de todos os betões produzidos através da realização do ensaio de abaixamento do cone de Abrams. Adicionalmente, foi determinada a massa volúmica do betão em estado fresco.

3.2.3. Terceira fase

Na última fase da campanha experimental, foi realizado o estudo em termos de durabilidade do betão de referência e dos betões com incorporação de agregados reciclados. Para o efeito, foram efetuados diversos ensaios ao longo de um espaço temporal de 91 dias, sendo estes:

- retração: especificação LNEC E 398 (1993);
- absorção por imersão: especificação LNEC E 394 (1993);
- absorção por capilaridade: especificação LNEC E 393 (1991);
- resistência à carbonatação: especificação LNEC E 391 (1993);
- resistência à penetração dos cloretos: especificação LNEC E463 (2004).

3.3. Formulação do betão de referência

A formulação dos betões foi baseada nas curvas de referência de Faury. Com o intuito de obter uma boa comparação entre os diferentes betões, a composição, razão de a/c efetiva e a trabalhabilidade foram, tanto quanto possível, mantidas inalteradas em todos os exemplares.

Assim, as principais características consideradas foram:

- classe de resistência: C30/37;
- classe de consistência: S3 (100 a 150 mm);

- classe de exposição: XC3;
- ligante: CEM I 42,5R, fornecido pela empresa Secil (cimenteira de Outão, Setúbal);
- tipo de agregados: agregados grossos britados, agregados grossos reciclados e areias roladas de origem calcária;
- máxima dimensão do agregado: 22,4 mm;
- água de amassadura: obtida a partir da rede de abastecimento pública;
- local de fabrico: Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico;
- adições e adjuvantes: não utilizados.

Além das características referidas, foram também consideradas para a formulação do betão as seguintes características:

- nível de controlo de produção: bom;
- método de compactação: vibração média com recurso a agulha vibratória;
- medição dos componentes: por pesagem.

O Quadro 3.2 apresenta a composição de todas as misturas produzidas.

Quadro 3.2 - Composição dos betões produzidos

Composição do betão em relação a 1 m ³ de betão								
Componentes	# [mm]	BR	B1100%	B125%	B2100%	B225%	B3100%	B325%
Agregados grossos naturais [kg/m ³]	4-5,6	97,2	-	72,9	-	72,9	-	72,9
	5,6-8	107,4	-	80,6	-	80,6	-	80,6
	8-11,2	116,0	-	87,0	-	87,0	-	87,0
	11,2-16	327,4	-	245,6	-	245,6	-	245,6
	16-22,4	327,4	-	245,6	-	245,6	-	245,6
Agregados grossos reciclados [kg/m ³]	4-5,6	-	86,8	21,7	81,3	20,3	79,4	19,9
	5,6-8	-	95,9	24,0	89,9	22,4	87,8	22,0
	8-11,2	-	103,4	25,9	97,0	24,2	94,8	23,7
	11,2-16	-	293,3	73,0	274,0	68,4	267,7	66,9
	16-22,4	-	293,3	73,0	274,0	68,4	267,7	66,9
Areia fina [kg/m ³]		250,7	250,7	250,7	250,7	250,7	250,7	250,7
Areia grossa [kg/m ³]		472,4	472,4	472,4	472,4	472,4	472,4	472,4
Cimento [kg/m ³]		350	350	350	350	350	350	350
Água [l/m ³]		193,6	193,6	193,6	193,6	193,6	193,6	193,6
Água de compensação [l/m ³]		-	40,33	10,11	48,56	12,11	54,89	13,67
a/c efetiva		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
a/c aparente		0,55	0,67	0,58	0,69	0,59	0,71	0,59

3.3.1. Máxima dimensão dos agregados

A definição da máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$) é importante para evitar dificuldades na vibração ou na ocorrência do efeito de parede. Este fenómeno consiste na concentração de partículas finas junto às armaduras e faces em contacto com as cofragens, alterando a homogeneidade da matriz interna do elemento de betão e, conseqüentemente, a sua compacidade. De acordo com Faury, em peças correntes de betão os efeitos de paredes podem ser desprezados desde que a condição (3.1) seja satisfeita (Nepomuceno, 1999a):

$$D_{m\acute{a}x} \leq \frac{4}{3} R_{m\acute{e}dio} \quad (3.1)$$

Sendo que o raio médio é traduzido por:

$$R_{m\acute{e}dio} = \frac{\text{Volume de bet\~{a}o confinado}}{\text{área da superfície confinante}} \quad (3.2)$$

No Quadro 3.3, apresenta-se a verificação da condição (3.1) para todos os provetes utilizados, constata-se que apenas os provetes cúbicos de aresta de 100 mm exigem um diâmetro máximo do agregado inferior a 22,4 mm. Todavia, devido à diferença ser mínima, optou-se por manter a dimensão máxima dos agregados como 22,4 mm.

Quadro 3.3 - Dimensão máxima admissível do agregado

Forma dos provetes	Dimensões dos provetes [mm]	Volume [cm ³]	área da superfície confinante [cm ²]	R _{médio} [mm]	D _{máx} [mm]
Prismáticos	100x100x450	4500,0	2000,0	22,5	30,0
Cilíndricos	Φ150x300	5301,4	1767,1	30,0	40,0
Cilíndricos	Φ100x250	1963,5	942,5	20,8	27,8
Cúbicos	150	3375,0	1350,0	25,0	33,3
Cúbicos	100	1000,5	600,0	16,7	22,2

3.3.2. Dosagem de cimento

Nesta dissertação foi considerada uma dosagem de cimento de 350 kg/m³. Este valor foi escolhido com base nos resultados obtidos em estudos experimentais realizados anteriormente no Instituto Superior Técnico, tendo-se revelado suficiente para obter um betão de classe de resistência C30/37. Este valor encontra-se também em conformidade com o valor mínimo de 300 kg/m³ exigidos pela especificação LNEC E 464 (2007) para um betão de classe de exposição XC3.

3.3.3. Volume de vazios

Tendo como referência a norma 613 do American Concrete Institute, o volume de vazios pode ser determinado em função da máxima dimensão dos agregados de acordo com o Quadro 3.4:

Quadro 3.4 - Volume de vazios em função da máxima dimensão do agregado

Dimensão máxima do agregado	Volume de vazios [l/m ³]
9,52	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,4	2

Para uma dimensão máxima do agregado de 22,4 mm e, realizando uma interpolação, o valor do volume de vazios resulta da expressão 3.3:

$$V_v = 15 - (15 - 20) \times \frac{(25,4 - 22,4)}{25,4 - 19,1} = 1,38 \text{ l/m}^3 \quad (3.3)$$

3.3.4. Índice de vazios

Considerando que, para o valor de abaixamento de cone de Abrams pretendido, se obtém uma classificação de trabalhabilidade “mole”, pode-se obter o valor do índice de vazios através da equação 3.4.

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (3.4)$$

- K e K' - parâmetros que dependem da natureza dos agregados, da trabalhabilidade pretendida e dos meios de compactação utilizados;
- D - máxima dimensão do agregado, 22,4 mm;
- R - raio médio do molde, o qual foi assumido conservativamente como igual à máxima dimensão do agregado (D).

São apresentados, no Quadro 3.5, os diferentes graus de trabalhabilidade do betão fresco em função do valor de abaixamento do cone de Abrams. Como se pretende que este valor seja de 125 ± 15 mm, a trabalhabilidade correspondente é a mole e o meio de compactação é o apiloamento. Definida a classe de trabalhabilidade, e com recurso ao Quadro 3.6, são obtidos os valores de K e K'.

Quadro 3.5 - Classes de consistência definidas a partir do ensaio de abaixamento de cone de Abrams (Coutinho, 1988)

Trabalhabilidade	Abaixamento do cone de Abrams [mm]	Meios de compactação
Terra húmida	-	Vibração muito potente e possível compressão
Seca	-	Vibração potente
Plástica	0 a 40	Vibração média
Mole	40 a 150	Apiloamento
Fluida	> 150	Sem nada

Quadro 3.6 - Valores de K e K' em função da trabalhabilidade do betão (Coutinho, 1988)

Valores de K e K'					
Trabalhabilidade	Meios de compactação	K			K'
		Natureza do agregado			
		Areia rolada		Areia britada	
		AG rolado	AG britado	AG britado	
Terra húmida	Vibração potente e compactação	0,24	0,25	0,27	0,002
Seca	Vibração potente	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 0,35	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

Considerando a hipótese conservativa de que o raio médio do molde é igual à máxima dimensão do agregado, a qual, segundo (Nepomuceno, 1999a), pode ser feita para agregados com dimensão máxima de 25,4 mm, o índice de vazios resulta da expressão (3.5).

$$I_v = \frac{0,37}{\sqrt[5]{22,4}} + \frac{0,003}{1 - 0,75} = 0,211 \quad (3.5)$$

3.3.5. Relação água / cimento (a/c)

A dosagem de cimento pode ser determinada através do volume de vazios e do índice de vazios. O volume de vazios representa o volume ocupado pelo ar no betão, enquanto o índice de vazios representa a percentagem de material não sólido (água e ar) na composição do mesmo. Pode-se, portanto, determinar a quantidade de água necessária para a amassadura através da expressão (3.6).

$$A = I_v - V_v = 0,211 \times 10^3 - 17,38 = 193,3 \frac{l}{m^3} \quad (3.6)$$

- A - dosagem de água de amassadura (l/m^3);
- I_v - índice de vazios (l/m^3);
- V_v - volume de vazios do betão (l/m^3).

Determinado o valor da dosagem de água a utilizar e, recorrendo ao valor da dosagem de cimento previamente calculado, é possível calcular a relação a/c através da razão entre a dosagem de água e de cimento por metro cúbico de betão (3.7).

$$a/c = \frac{\text{dosagem de água (l)}}{\text{dosagem de cimento (kg)}} = \frac{193,30}{350} = 0,55 \quad (3.7)$$

3.3.6. Volume de partículas sólidas

O volume de sólidos inclui o volume de agregados e de cimento. Assim, sabendo-se o índice de vazios, é possível determinar o seu valor através da expressão (3.8).

$$V_s = 1 - I_v = 1 - 0,211 = 0,789 \frac{m^3}{m^3} \quad (3.8)$$

3.3.7. Volume das partículas de cimento

O volume das partículas de cimento em $1 m^3$ de betão resulta do quociente entre a dosagem e a massa volúmica de cimento por metro cúbico (3.9).

$$V_c = \frac{\text{dosagem de cimento} \left(\frac{kg}{m^3} \right)}{\text{massa volúmica do cimento} \left(\frac{kg}{m^3} \right)} = \frac{350}{3100} = 0,113 \frac{m^3}{m^3} \quad (3.9)$$

3.3.8. Percentagem do volume de cimento

A percentagem do volume de cimento é determinada de acordo com a expressão (3.10).

$$C_{\%} = \frac{V_c \left(\frac{m^3}{m^3} \right)}{V_s \left(\frac{m^3}{m^3} \right)} \times 100 = \frac{0,113}{0,789} \times 100 = 14,3\% \quad (3.10)$$

3.3.9. Curva de Faury e proporção dos agregados

A composição granulométrica do betão influencia diretamente a sua compacidade e, portanto, as suas propriedades em estado fresco e endurecido. Por conseguinte, neste estudo, recorreu-se à

curva de referência de Faury de forma a determinar as quantidades de cada um dos agregados a utilizar. Esta curva tem em consideração apenas as partículas sólidas na composição do betão, pelo que as percentagens obtidas são referentes ao volume total de sólidos.

A curva de referência de Faury é definida pelos três pontos apresentados no Quadro 3.7, sendo que as abcissas são referentes às dimensões das aberturas das malhas dos peneiros e as ordenadas da percentagem de material passante pelas mesmas.

É necessário definir o material passante na malha com uma abertura de metade da dimensão máxima dos agregados (ponto número dois), recorrendo-se para o efeito à expressão 3.11 e ao Quadro 3.8.

Quadro 3.7 - Pontos da curva de referência de Faury

Ponto	Abcissa [mm]	Ordenada [%]
1	0,0065	0
2	$\frac{D_{m\acute{a}x}}{2}$	$P_{D/2}$
3	22,4	100

$$P_{D/2} = A + 17 \times \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (3.11)$$

Em que:

- A e B - parâmetros determinados de acordo com o Quadro 3.8;
- R - raio médio do molde (conservativamente considerado como igual à máxima dimensão do agregado);
- D - máxima dimensão do agregado.

Quadro 3.8 - Valores de A e B para a definição da curva de referência de Faury (Coutinho, 1988)

Trabalhabilidade	Meios de compactação	A			B
		Natureza do agregado			
		Areia rolada		Areia e agregado grosso britado	
Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado				
Terra húmida	Vibração potente e compressão	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente	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

Definidos os parâmetros A e B, resulta que:

$$P_{D/2} = 30 + 17 \times \sqrt[5]{22,4} + \frac{2}{1 - 0,75} = 69,7 \% \quad (3.12)$$

A definição deste ponto permite completar o traçado da curva de referência de Faury, a qual pode também ser considerada sem as partículas de cimento. No Quadro 3.9, apresenta-se os valores das ordenadas de abscissas dos pontos necessários para a definição das curvas, as quais são apresentadas na Figura 3.1.

A determinação das percentagens dos agregados no volume de betão é efetuada com recurso ao método de ajuste gráfico da curva de referência de Faury. Este método consiste no traçado de retas verticais que interceam uma curva granulométrica em dois pontos distintos, tendo o cuidado de que as áreas limitadas por esta linha vertical e as curvas granulométricas sejam iguais. Através desta metodologia é possível obter as distribuições granulométricas dos agregados que constam na Figura 3.2.

Como referido, as percentagens obtidas referem-se ao volume total de sólidos, sendo necessário determinar a proporção em relação ao volume total de betão através da expressão 3.13.

$$Proporção_{0,1\text{ m}^3 \text{ de betão}} = (V_s - V_c) \times p_i \quad (3.13)$$

Quadro 3.9 - Pontos da curva de referência de Faury

Ponto	Malha do peneiro [mm]	Material passante [%]	
		Considerando as partículas de cimento	Desprezando as partículas de cimento
1	0,065	0	-16,7
2	11,2	69,7	64,7
3	22,4	100	100

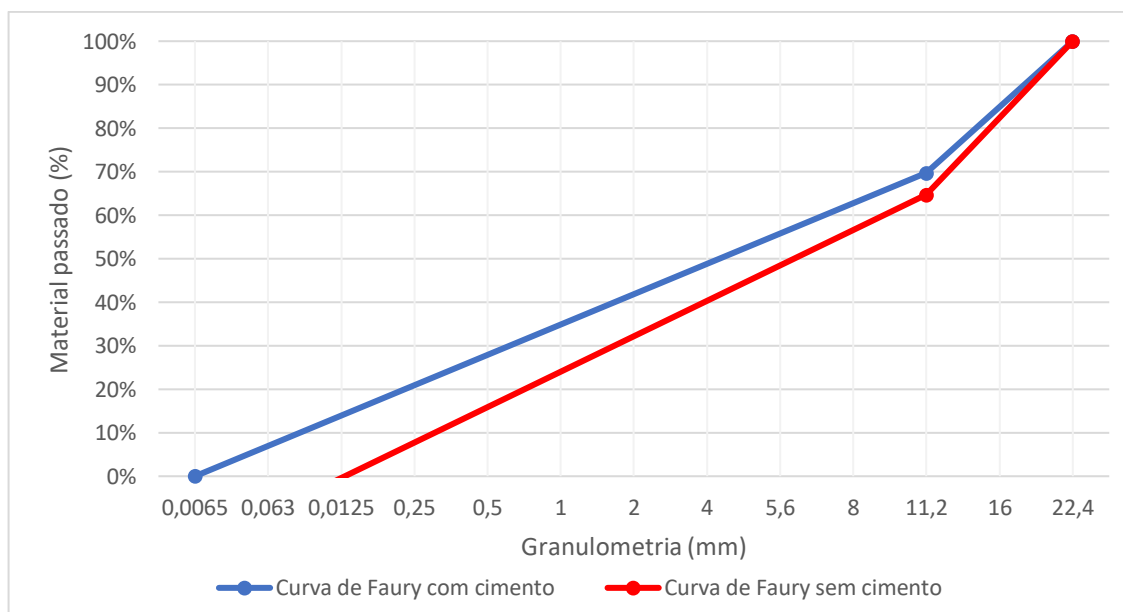


Figura 3.1 - Curvas de referência de Faury

Onde:

- p_i - proporção de um dado agregado em relação ao volume de sólidos [%]
- V_s - volume de partículas sólidas [m^3/m^3];
- V_c - volume das partículas de cimento [m^3/m^3].

A proporção de cada agregado é apresentada no Quadro 3.10.

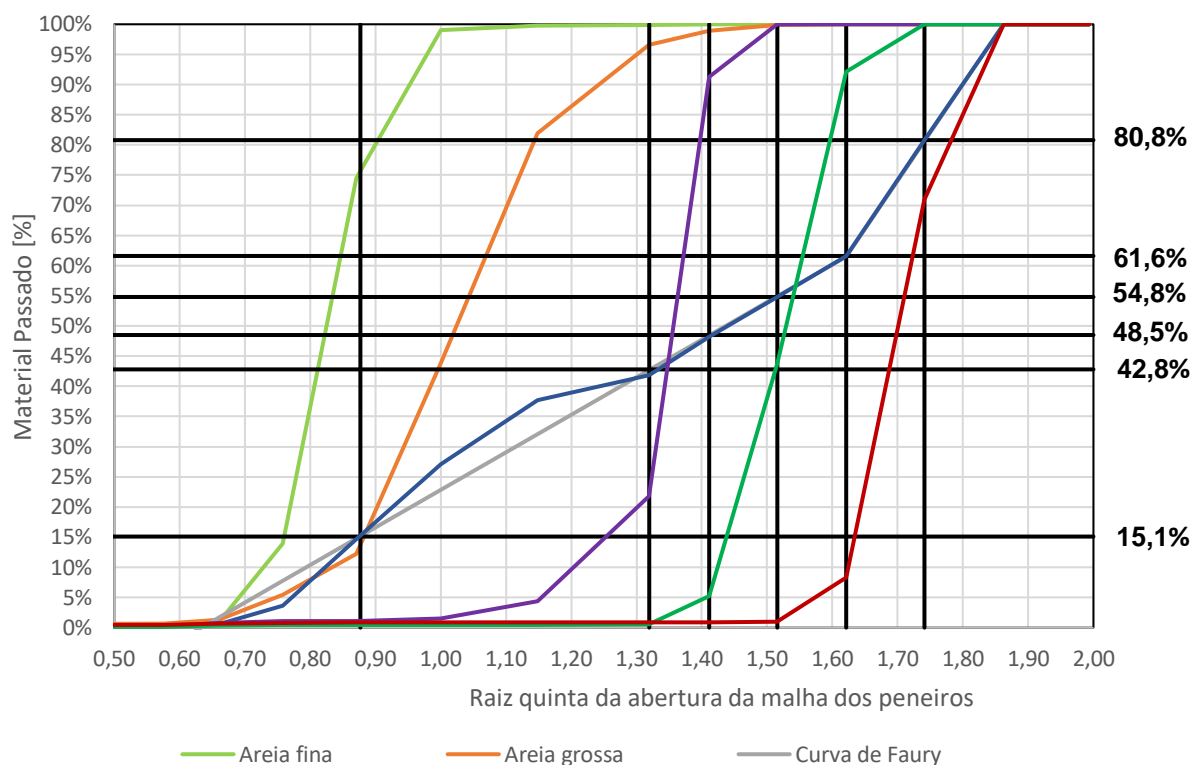


Figura 3.2 - Distribuições granulométricas dos agregados

Quadro 3.10 - Proporção dos agregados

Tipos de agregados	Intervalos granulométricos [mm]	Proporção em relação ao volume total de sólidos [%]	Proporção em relação a 1 m ³ de betão [%]
Agregados grossos	22,4-16	19,2	13
	11,2-16	19,2	13
	8-11,2	6,8	4,6
	5,6-8	6,3	4,3
	4-5,6	5,7	3,9
Areia grossa		27,7	18,7
Areia fina		15,1	10,2

3.4. Betões com agregados reciclados

De acordo com os objetivos propostos por esta dissertação, foram consideradas taxas de substituição de 25% e 100% de agregados naturais por agregados reciclados provenientes de um, dois e três ciclos de reciclagem. A substituição foi efetuada em volume, tendo em consideração as percentagens constituintes no volume de betão de cada intervalo granulométrico entre 4 e 22,4 mm (Quadro 3.10).

Ao contrário dos agregados naturais, em que pode ser considerada desprezável, a absorção de água dos agregados reciclados é relevante. Esta característica, quando não devidamente considerada, origina significativas perdas de trabalhabilidade e alteração da razão de a/c desejada. Para resolver esta problemática, e tendo em consideração que as conclusões de Ferreira et al. (2011) apontam para significativas desvantagens na pré-saturação dos agregados, nesta dissertação opta-se por realizar a compensação de água durante o processo de amassadura. Este procedimento exige a determinação da absorção de água por parte dos agregados ao longo do tempo definido para amassadura, o qual foi considerado de 15 minutos. Para o efeito, foi utilizada uma adaptação da metodologia sugerida por

Rodrigues et al. (2013) para agregados finos reciclados. Uma amostra com as mesmas proporções granulométricas do que as presentes no betão foi seca no forno à temperatura 100 ± 5 °C até atingir massa constante, tendo sido posteriormente submersa em água dentro de um recipiente com fundo estanque e topo impermeável, tendo-se em seguida registado a sua variação da massa hidrostática com recurso a uma balança com precisão de 0,1 g. Dado o comportamento não linear da taxa de absorção de água por parte dos agregados reciclados, as medições foram efetuadas com intervalos temporais distintos ao longo de toda a duração do ensaio (Quadro 3.11), sendo esta de 24 horas.

Quadro 3.11 - Intervalos temporais entre medições ao longo da duração do ensaio

Intervalo temporal ao longo da duração do ensaio	Intervalos temporais entre medições
0-10 minutos	2 minutos
10-30 minutos	5 minutos
30-60 minutos	10 minutos
1-2 horas	15 minutos
2-9 horas	1 hora
24 horas	Última leitura

Salienta-se que, nos instantes iniciais de submersão da amostra, é extremamente difícil obter uma leitura estável do valor da massa hidrostática. Desta forma, e atendendo ao facto de o valor da absorção de água mais relevante ser o referente aos 15 minutos (tempo preconizado para a duração do processo de amassadura), optou-se por não se registar os valores correspondentes aos primeiros 2 minutos. A determinação da massa hidrostática no instante inicial foi efetuada com recurso à expressão 3.14, enquanto a absorção de água e a quantidade de água absorvida no instante i foram obtidas com recurso às expressões 3.15 e 3.16.

$$m_{inicial} = \frac{m_{24h}}{1 + \frac{WA_{24h}}{100}} \quad (3.14)$$

$$WA_i = \frac{A_i}{A_{24h}} \times 100 \quad (3.15)$$

$$A_i = m_i - m_{inicial} \quad (3.16)$$

Em que,

- $m_{inicial}$ - massa hidrostática no instante inicial [g];
- m_{24h} - massa hidrostática 24 horas após imersão da amostra [g];
- m_i - massa hidrostática no instante i [g];
- WA_{24h} - absorção de água por imersão ao fim de 24 horas [%];
- WA_i - absorção de água no instante i [%];
- A_i - quantidade de água absorvida no instante i [g]
- A_{24h} - quantidade de água absorvida ao fim de 24 horas [g].

Devido à espectável diferença entre a absorção de água dos agregados reciclados provenientes de ciclos distintos, este teste foi efetuado para os AGRI, AGRII e AGRIII. Realça-se o facto de os agregados reciclados dos diversos ciclos absorverem entre 70 e 80% da água nos primeiros 15 minutos.

A quantidade de água a acrescentar na amassadura deve ter em consideração a humidade relativa que os agregados possuem. Devido às condições climatéricas características da estação invernal, ao facto de o betão ter sido armazenado no exterior antes da britagem e à variabilidade do teor de humidade dos agregados, preferiu-se proceder à sua secagem. Para o efeito, foi utilizado um forno à temperatura de 100 ± 5 °C, tendo os AGR sido posteriormente armazenados dentro de barricas em sacos plásticos devidamente fechados. De modo a garantir uma maior fiabilidade, este processo foi apenas efetuado duas semanas antes das betonagens.

Determinada a absorção de água dos agregados reciclados ao longo do tempo, a quantidade de água a acrescentar na mistura foi calculada com recurso à expressão 3.17. Realça-se o facto de que, devido aos AGR terem sofrido um processo de secagem, o seu teor de humidade foi considerado muito próximo de zero e conseqüentemente desprezado.

$$A_a = Q_{AGR} \times (WA_{15min} \times WA_{24h} - w) \quad (3.17)$$

Em que,

- A_a - quantidade de água a adicionar à mistura [kg/m³];
- Q_{AGR} - quantidade de agregados grossos reciclados [kg/m³];
- WA_{15min} - absorção de água dos agregados grosso reciclados aos 15 minutos (duração considerada para a amassadura) [%];
- W_{24h} - absorção de água por imersão ao fim de 24 horas [%];
- w - teor de humidade dos agregados reciclados [%].

A consideração da compensação de água para contemplar a absorção por parte dos agregados reciclados origina a necessidade de definição de dois tipos distintos de razão de a/c. A razão de a/c efetiva é aquela que não contempla a água de compensação, mantendo-se inalterada em qualquer dos betões produzidos e sendo simultaneamente igual à do BR. Por sua vez, a razão de a/c aparente é aquela que tem em consideração a água adicionada no processo de compensação, sendo necessariamente superior à razão de a/c efetiva nos betões produzidos com agregados reciclados. A quantidade de cada constituinte por m³ de betão, a quantidade de água de compensação adicionada, a razão a/c efetiva e aparente, podem ser consultadas no Anexo A.

3.5. Volume de betão necessário para os ensaios a realizar

De forma a determinar a quantidade de materiais utilizados para a produção dos diversos betões, é fundamental definir o número e tipo de provetes a utilizar para os diferentes ensaios.

Apesar de esta dissertação se focar no desempenho em termos de durabilidade, os valores apresentados no Quadro 3.12 têm em consideração o volume de betão que o aluno Vílson Abreu necessitou para desenvolver os estudos sobre o comportamento mecânico propostos na sua dissertação.

3.6. Determinação do volume dos betões de origem

A produção dos betões de origem prende-se com a necessidade da obtenção dos AGR a utilizar na produção dos betões com incorporação de agregados reciclados. Desta forma, foram produzidos três betões de origem: o BO, BOI e BOII. O primeiro betão de origem (BOI) tem uma composição igual à do BR, enquanto o segundo (BOII) e terceiro (BOIII) têm composições iguais aos BAGRI100% e BAGRII100%, respetivamente. Realça-se que os níveis de trabalhabilidade e razão de a/c efetiva serão, tanto quanto possível, mantidos inalterados em relação ao BR.

A determinação do volume necessário produzir para cada um dos BO baseia-se num planeamento inverso, em que o ponto de partida será a quantidade de betão necessária para a realização dos ensaios aos betões de terceiro ciclo (B3100% e B325%). Por conseguinte, à exceção do BOII, os restantes betões de origem devem não só permitir a obtenção dos agregados necessários para os betões do seu respetivo ciclo, como também para o betão de origem subsequente. No Quadro 3.12 encontra-se apresentado o volume necessário para a realização dos ensaios a cada família de betão, enquanto que na Figura 3.3 apresenta-se esquematicamente o raciocínio enunciado.

Sumariamente, a um determinado volume de betão a produzir está associada uma determinada quantidade de agregados reciclados que é obtida com recurso à trituração de um determinado volume de BO. As expressões matemáticas 3.18 e 3.19 permitem traduzir este raciocínio.

$$massa_{AGR} = \%_{AGR} \times Vol_{BAGR\ i} \times m_{vol_{AGR}} \quad (3.18)$$

Em que,

- $\%_{AGR}$ - percentagem de agregados grossos no volume de betão (40%);
- $Vol_{BAGR\ i}$ - volume de betão do ciclo i necessário para a realização dos ensaios;
- $m_{vol_{AGR}}$ - massa volúmica média dos agregados reciclados (admitiu-se 2,25 kg/m³).

$$Volume\ de\ BO = \frac{massa_{AGR} \times \gamma_{Fauy} \times \gamma_{trabalhabilidade}}{\gamma_{trituração} \times m_{vol_{betão}}} \quad (3.19)$$

Em que,

- $\gamma_{trituração}$ - percentagem de aproveitamento dos AGR após a trituração com recurso à trituradora de mandíbulas (considerado igual a 0,66);
- γ_{Fauy} - perdas associadas ao ajuste das curvas granulométricas dos AGR à curva de Faury (considerado igual a 1,38);
- $\gamma_{trabalhabilidade}$ - fator de ajuste da trabalhabilidade (considerado igual a 1,15);

- $m_{vol_{betão}}$ - massa volúmica do betão (admitiu-se um valor de 2,4 kg/m³).

Quadro 3.12 - Volume para a realização dos ensaios propostos nas duas dissertações

Ensaio de durabilidade					
Tipo de ensaio	Idade [dias]	Dim. Provede [mm]	N.º prove-tes	Dimensões co-fragem [mm]	Vol. total [dm ³]
Retração	0-90	Prismas, 100x100x500	2	Prismas, 100x100x500	10
Absorção por capilaridade	28	Cilindros, Φ150x100	3	Cilindros, Φ150x300	5,30
Absorção por imersão	28	Cubos, 100	3	Cubos, 100	3,0
Resistência à carbonatação	7	Cilindros, Φ100x40	2	Cilindros, Φ100x250	3,93
	28		2		
	56		2		
	90		2		
Resistência à penetração dos cloretos	28	Cilindros, Φ100x50	3	Cilindros, Φ100x250	3,93
	90		3		
Ensaio de resistência mecânica					
Tipo de ensaio	Idade [dias]	Dim. Provede [mm]	N.º prove-tes	Dimensões co-fragem [mm]	Vol. total [dm ³]
Compressão	7	Cubos, 150	3	Cubos, 150	10,13
	28		3		10,13
	56		3		10,13
Tração	28	Cilindros, Φ150x300	2	Cilindros, Φ150x300	10,60
Módulo de elasticidade	28	Cilindros, Φ150x300			
Resistência à abrasão	91	Prismas, 71x71x50	3	Cubos, 100	3,0
Total [I]					70,14

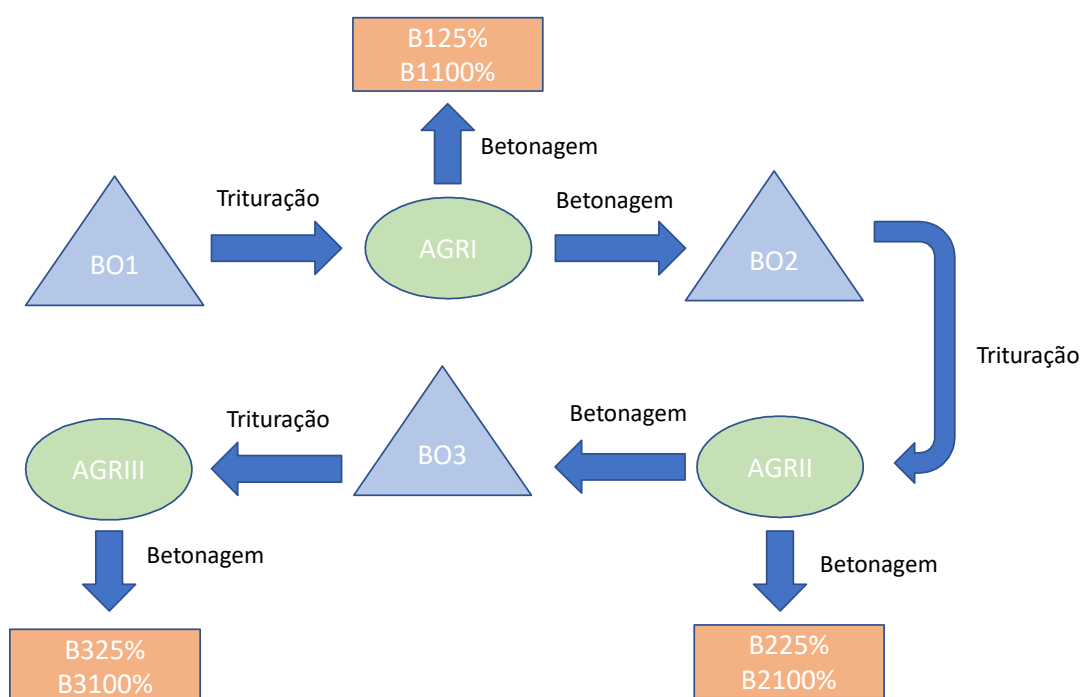


Figura 3.3 - Metodologia para a produção dos AGR dos diversos ciclos

Com o intuito de ter em consideração as perdas relativas à amassadura e a diminuição de volume devido à vibração, os volume obtidos devem ser afetados por um coeficiente de majoração (γ) com o valor de 1,25.

Os cálculos efetuados para a determinação dos volumes de cada um dos betões de origem encontram-se disponíveis no Anexo A, enquanto os valores finais a betonar são apresentados no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 - Volumes a produzir dos diversos betões de origem

Tipo de BO	Quantidade [l]
BOI	307,44
BOI	240,66
BOIII	113,11

3.7. Produção dos betões

Para o início do processo de betonagem, é necessário preparar todos os materiais e equipamento a utilizar na produção do betão. Enquanto nos betões para os estudos de durabilidade as cofragens utilizadas foram os moldes descritos no Quadro 3.12 (Figura 3.4), os betões de origem, tendo uma finalidade distinta, requereram que fosse montada uma cofragem própria. Para o efeito, foram utilizadas tábuas de solho aparafusadas entre si, de modo a criar volumes de confinamento com dimensões de paralelepípedos (Figura 3.5).

Finalizada a preparação das cofragens, foi necessário proceder à lubrificação das suas faces internas com óleo descofrante. Este procedimento é efetuado no próprio dia previsto para a betonagem, sendo fundamental para garantir a desmoldagem dos provetes sem a danificação dos mesmos ou dos moldes.

Em seguida, foram determinadas as massas dos agregados, do cimento e da água. A pesagem ocorreu na ordem descrita de modo a minimizar o contacto do cimento com a humidade relativa ambiente e evitar perdas de volume de água por evaporação. Posteriormente, iniciou-se a amassadura, processo que pode ser dividido em três fases distintas:

- com a betoneira previamente humidificada, são introduzidos no seu interior todos os agregados grossos e 2/3 da água preconizada para o processo de amassadura (na betonagem de betões com agregados reciclados, esta água inclui a água de compensação); este processo tem uma duração aproximada de cinco minutos;
- em seguida, foram introduzidos todos os agregados finos, aguardando-se cerca de três minutos de modo a que a mistura se tornasse mais homogénea;
- por fim, introduziu-se o cimento e a restante água, aguardando-se cerca de 7 minutos de modo a que o betão adquirisse a trabalhabilidade pretendida.

Terminados os 15 minutos referentes a este processo, a adequabilidade da trabalhabilidade apresentada pelo betão fresco foi testada com recurso ao ensaio de abaixamento de cone de Abrams (NP EN 12350-2 (2009)). Quando o resultado não se inseria no intervalo de abaixamento pretendido (125 ± 15 mm) a amassadura era rejeitada e o processo até agora descrito era reiniciado. Caso contrário, o betão era colocado nas devidas cofragens / moldes, iniciando-se de imediato a vibração com recurso a um vibrador de agulha (Figura 3.6), permitindo desta forma libertar o ar retido no interior do betão e, conseqüentemente, proporcionando-lhe uma maior compacidade. Adicionalmente, foi realizado o ensaio para a determinação da massa volúmica do betão em estado fresco como descrito na norma NP EN

12350-6 (2011). A desmoldagem ocorreu aproximadamente 24 horas após o término da betonagem, tendo sido realizada com o auxílio de uma pistola de ar comprimido (Figura 3.7). Por fim, a cura dos provetes foi efetuada de acordo com o ensaio para o qual são destinados. É importante realçar que, devido à finalidade dos betões de origem, a sua cura foi menos cuidada do que a dos provetes com a finalidade de utilização em ensaios, tendo sido efetuada através da rega regular do betão com recurso a uma mangueira ligada à rede de abastecimento pública de água.



Figura 3.4 - Moldes utilizados



Figura 3.5 - Cofragem dos betões de referência



Figura 3.6 - Vibração do betão



Figura 3.7 - Descofragem dos moldes

3.8. Produção dos agregados reciclados

Aproximadamente sete dias após a data da betonagem, as “vigas” de betão de origem (Figura 3.8) foram segmentadas em blocos (Figura 3.9), permitindo conseguir um armazenamento mais eficiente e obter fragmentos de betão de dimensões menores para uma maior facilidade no processo de britagem. Os blocos foram, posteriormente, armazenados até que fossem perfeitos 28 dias desde a data da betonagem, altura em que, com recurso à trituradora de mandíbulas (Figura 3.10), foram triturados. Depois de se ter procedido à britagem dos blocos de betão de origem, os agregados reciclados foram separados por granulometrias com recurso à máquina de peneiração (Figura 3.11) e armazenados em barricas devidamente identificadas.



Figura 3.8 - "vigas" de betão de origem



Figura 3.9 - Blocos de betão de origem



Figura 3.10 - Trituradora de mandíbulas



Figura 3.11 - Máquina de peneiração

De modo a que fosse possível obter agregados das granulometrias desejadas em quantidades suficientes foi necessário regular o afastamento das mandíbulas da britadora. Para o efeito, foi realizada uma análise granulométrica dos agregados provenientes da britagem de apenas alguns blocos de betão, a qual foi posteriormente comparada com as quantidades de cada granulometria que seriam necessárias nas betonagens seguintes. No caso de os agregados reciclados apresentarem uma granulometria demasiado fina, as mandíbulas eram afastadas de modo a que fosse possível obter agregados com granulometrias maiores. Se a situação fosse a oposta, então as mandíbulas eram aproximadas.

3.9. Ensaios realizados aos agregados

No presente subcapítulo, pretende-se listar os ensaios realizados aos agregados, descrevendo sumariamente os procedimentos e cuidados adotados. Realça-se que, devido à presente dissertação apenas contemplar a substituição de agregados de granulometria grossa, a análise dos agregados finos foi considerada desnecessária, recorrendo-se aos valores presentes nas respetivas fichas técnicas.

3.9.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados consiste na determinação da percentagem de massa retida de uma dada amostra numa série normalizada de aberturas de peneiros. Este estudo permite caracterizar a geometria das partículas do agregado e elaborar a sua curva granulométrica, a qual é utilizada para a determinação das quantidades de cada agregado na constituição do betão. O ensaio foi executado em conformidade com a norma NP EN 933-1 (2000) e as especificações relativas às dimensões nominais dos peneiros utilizados foram obtidas na norma NP EN 933-2 (1999).

3.9.1.1. Preparação da amostra

De acordo com a norma, as massas das amostras a analisar dependem da dimensão máxima do agregado em questão, sendo esta definida de acordo com o Quadro 3.14. Quando a dimensão máxima do agregado se encontrar compreendida entre os valores apresentados no quadro, a massa mínima pode ser obtida com recurso a uma interpolação.

Posteriormente à definição da massa mínima da amostra, deve-se proceder à sua lavagem seguida de uma secagem em estufa. Este processo deve ser efetuado a uma temperatura de 110 ± 5 °C até que seja atingida massa constante.

Quadro 3.14 - Massa mínima da amostra de acordo com $D_{m\acute{a}x}$

$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	Massa mínima da amostra [kg]
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

3.9.1.2. Procedimento

O procedimento do ensaio pode ser descrito nas seguintes fases:

- constituição da amostra respeitando a massa mínima definida pela norma;
- lavar a amostra, seguida de secagem em estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C até que seja atingida massa constante;
- retirar os provetes da estufa e proceder a sua pesagem registando o valor como m_1 ;
- montar os peneiros de acordo com série normalizada pretendida e a dimensão máxima do agregado a ensaiar;
- colocar a amostra no topo da coluna dos peneiros e depois agitá-los durante 90 segundos;
- desligar o agitar e retirar os peneiros de cima do mesmo; de seguida, retirar os peneiros um por um de cima para baixo;
- pesar a massa retida em cada peneiro e registar o valor como R_i ;
- pesar a massa do material retido no fundo e registar como P;
- verificar se a soma da massa do material retido e do material no fundo dos peneiros teve uma variação superior a 1,0%. Em caso afirmativo, o processo de peneiração deve ser repetido.

A percentagem retida em cada peneiro pode ser determinada de acordo com a expressão:

$$R_{i\%} = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad (3.20)$$

sendo que:

- $R_{i\%}$ - percentagem de material retido no peneiro i [%];
- R_i - massa retida do peneiro i [g];
- M_1 - massa total da amostra seca [g].

A obtenção destas percentagens permite efetuar o traçado da curva granulométrica, a qual é caracterizada por apresentar nas abcissas a raiz quinta da abertura dos peneiros e nas ordenadas a percentagem do material retido.

3.9.2. Massa volúmica e absorção de água

A determinação da massa volúmica e absorção de água dos agregados é efetuada em conformidade com a norma NP EN 1097-6 (2003). Realça-se que, devido a apenas terem sido analisados agregados com granulometria grossa, o procedimento descrito refere-se apenas ao intervalo granulométrico de 4 a 31,5 mm, o qual difere daquele a realizar para o intervalo 0,064 a 4 mm.

A realização deste ensaio permite determinar três massas volúmicas distintas, sendo estas:

- massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a);
- massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd});
- massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}).

A absorção de água tem especial importância para os agregados reciclados, pois é fundamental para a determinação do valor de compensação de água necessário durante o processo de amassadura. Pode também ser um indicador da qualidade do agregado, permitindo de forma indireta inferir a sua porosidade acessível.

3.9.2.1. Preparação da amostra

A massa mínima da amostra dos agregados grossos foi definida por interpolação de acordo com o Quadro 3.15, tendo em consideração que a máxima dimensão do agregado é de 22,4 mm.

Quadro 3.15 - Massa mínima da amostra de acordo com $D_{m\acute{a}x}$

$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	Massa mínima da amostra [kg]
31,5	5
16	2
8	1

3.9.2.2. Procedimento

O ensaio de massa volúmica e absorção de água para agregados com granulometria contida no intervalo de 4 mm a 31,5 mm assenta nos seguintes passos:

- compor a amostra a analisar tendo o cuidado de respeitar a massa mínima exigida; na composição da amostra, a proporção de cada intervalo granulométrico foi mantida igual à proporção do mesmo intervalo em relação ao volume total de sólidos no betão;
- imergir a amostra num picnómetro com água a 22 ± 3 °C;

- agitar e inclinar o picnómetro de modo a libertar o ar ocluído;
- deixar a amostra repousar durante $24 \pm 0,5$ horas;
- encher o picnómetro até este transbordar;
- secar o exterior do picnómetro e proceder à sua pesagem, registando a massa como M_2 ; adicionalmente, medir a temperatura da água;
- retirar os agregados do interior do picnómetro e escorre-los durante alguns minutos;
- voltar a encher o picnómetro com água e pesar, registando a massa como M_3 ; confirmar que a variação da temperatura da água nas pesagens de M_2 e M_3 é inferior a $2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- secar a superfície das partículas da amostra com um pano absorvente;
- pesar a amostra saturada com a superfície seca e registar a sua massa como M_1 ;
- secar o provete em estufa ventilada à temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ até que a variação da massa entre leituras intervaladas de 24 h seja inferior a 1% (massa constante);
- pesar a amostra seca em estufa e registar a sua massa como M_4 .

Completado este procedimento, é possível determinar: a massa volúmica do material impermeável das partículas, a massa volúmica das partículas secas em estufa e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca através das expressões 3.21, 3.22 e 3.23.

$$\rho_a = \frac{M_4}{\frac{M_4 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad (3.21)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad (3.22)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad (3.23)$$

em que:

- ρ_w - massa volúmica da água [kg/dm^3];
- ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas [kg/dm^3];
- ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa [kg/dm^3];
- ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca [kg/dm^3];
- M_1 - massa da amostra saturada com superfície seca [g];
- M_2 - massa do picnómetro cheio de água com a amostra saturada no seu interior [g];

- M_3 - massa do picnómetro cheio sem amostra no seu interior [g];
- M_4 - massa da amostra seca em estufa [g].

Adicionalmente, a absorção de água ao fim de 24 horas pode ser calculada pela expressão 3.24:

$$WA_{24h} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} [\%] \quad (3.24)$$

3.9.3. Baridade

O ensaio de determinação da baridade, ou massa volúmica aparente dos agregados, assenta na norma NP EN 1097-3 (2002). A baridade, ao contrário da massa volúmica, tem em consideração os vazios existentes entre as partículas, sendo uma propriedade fundamental quando as medições dos materiais são efetuadas em volume. Embora nesta campanha experimental todas as medições dos materiais tenham sido realizadas em massa, considerou-se importante definir esta propriedade.

3.9.3.1. Preparação da amostra

Para a realização deste ensaio, foram preparadas três amostras distintas por tipo de agregado, tendo-se feito a média dos resultados para a obtenção do resultado final. As amostras foram preparadas tendo em atenção a posologia do betão.

Para uma máxima dimensão do agregado de 22,4 mm, a norma especifica que o recipiente a utilizar deve possuir um volume de 10 litros e que a quantidade mínima da amostra a preparar deve representar 120 a 150% da quantidade necessária para preencher o recipiente. Finalmente, os agregados devem ser secos em estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C até que massa constante seja atingida.

3.9.3.2. Procedimento

O procedimento do ensaio pode ser descrito nos seguintes passos:

- retirar os provetes da estufa ventilada e deixa-los arrefecer;
- pesar o recipiente metálico e registar a sua massa como m_1 ; antes da pesagem, certificar-se de que o mesmo se encontra vazio e limpo;
- colocar o recipiente sobre uma superfície horizontal e preencher a sua totalidade com a amostra;
- remover o excedente da amostra agregado tendo o cuidado de não a compactar; certificar-se de que o topo do recipiente se encontra nivelado;
- pesar o recipiente cheio e registar a sua massa como m_2 .

A baridade da amostra pode ser obtida de acordo com a expressão 3.25:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.25)$$

em que:

- ρ_b - baridade da amostra [kg/dm^3];

- m_1 - massa do recipiente vazio [g];
- m_2 - massa do recipiente preenchido com a amostra [g];
- V - volume do recipiente [l].

3.9.4. Desgaste de Los Angeles

O ensaio de desgaste de Los Angeles pretende medir a resistência à abrasão dos agregados grossos através da sua perda de massa devido ao contacto com uma carga abrasiva. A aferição desta característica permite estimar a resistência mecânica dos agregados, a qual está por sua vez diretamente relacionada com a resistência mecânica do betão.

A realização do ensaio foi efetuada de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 1097-2 (2011).

3.9.4.1. Preparação da amostra

A amostra constituída deve possuir uma massa de 5 kg e deve apresentar uma granulometria compreendida entre 10 e 14 mm. Adicionalmente, as duas seguintes condições devem ser satisfeitas:

- o provete deve ser constituído de forma a que 30% das suas partículas devem passar no peneiro com malha de abertura de 11,2 mm e ficar retidas no peneiro com malha de abertura de 10 mm;
- o provete deve ser constituído de forma a que 70% das suas partículas devem passar no peneiro com malha de abertura de 14 mm e ficar retidas no peneiro com malha de abertura de 11,2 mm.

A amostra, após ter sido constituída, foi seca em estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C até ser atingida massa constante.

3.9.4.2. Procedimento

O procedimento do ensaio pode ser descrito nos seguintes passos:

- retirar a amostra da estufa e deixar arrefecer;
- pesar a amostra registando a sua massa como M_1 ;
- verificar se o tambor da máquina de ensaio se encontra devidamente limpo;
- colocar as esferas de abrasão e a amostra de forma uniforme ao longo do comprimento do cilindro da máquina de ensaio;
- realizar 500 rotações do tambor da máquina de ensaio a uma velocidade compreendida entre 30 e 33 rotações por minuto;
- retirar cuidadosamente a amostra do interior da máquina de ensaio procedendo à sua peneiração e lavagem com um peneiro com malha de abertura de 1,6 mm;
- colocar a porção retida na estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C até que atinja massa constante;

- retirar do forno a porção retida e, após se encontrar à temperatura ambiente, pesar e registar a sua massa como M_2 .

O resultado do ensaio é obtido com recurso à expressão 3.26, a qual traduz a percentagem de material que passou pelo peneiro com malha de abertura de 1,6 mm.

$$LA = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.26)$$

em que:

- M_1 - massa do provete [g];
- M_2 - massa do material retido no peneiro com malha de abertura de 1,6 mm [g];

3.9.5. Índice de forma

O ensaio de determinação do índice de forma baseia-se na norma NP EN 933-4 (2002) e tem por objetivo determinar a forma dos agregados grossos, classificando-os como cúbicos ou não cúbicos. A forma dos agregados afeta principalmente a trabalhabilidade do betão, sendo geralmente preferível que estes apresentem uma forma mais arredondada. A realização deste ensaio toma relevante importância nesta campanha experimental devido ao processo utilizado para a obtenção dos agregados reciclados.

3.9.5.1. Preparação da amostra

Segundo a norma, a massa mínima da amostra a utilizar é definida pelo Quadro 3.16. Como a dimensão máxima do agregado de 22,4 mm não se encontra diretamente contemplada, foi realizada uma interpolação para a sua determinação.

Quadro 3.16 - Massa mínima da amostra de acordo com $D_{m\acute{a}x}$

$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	Massa mínima da amostra [kg]
63	45
32	6
16	1
8	0,1

As amostras devem ser secas em estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C até atingirem massa constante. São de seguida peneiradas e separadas em frações granulométricas que respeitam a condição $D_i \leq 2d_i$, ou seja, que a dimensão máxima do agregado presente nessa fração granulométrica não seja superior a duas vezes a dimensão mínima do agregado presente na mesma fração. Realça-se que, a amostra foi preparada tendo simultaneamente em consideração as especificações já referidas e a proporção de cada granulometria na composição do betão.

3.9.5.2. Procedimento

O procedimento do ensaio pode ser descrito nos seguintes passos:

- pesar a amostra total e registar a sua massa como M_d ;
- peneirar a amostra separando o provete em frações granulométricas que respeitem a condição $D_i \leq 2d_i$;

- pesar as frações granulométrica e registar a sua massa como M_i e a sua percentagem em relação à massa total da amostra como V_i ;
- desprezar as frações granulométricas que representam menos de 10% da massa total da amostra;
- reduzir a dimensão das frações granulométricas de acordo com a norma NP EN 933-2, mantendo um mínimo de 100 partículas em cada uma;
- registar a massa M_i das frações granulométricas a ensaiar;
- com o auxílio de uma craveira eletrónica, medir a espessura (E) e o comprimento (L) das partículas, separando as que têm uma relação $L/E > 3$ (partículas não cúbicas);
- pesar as partículas não cúbicas em cada uma das frações granulométricas e registar a sua massa como M_{2i} .

O índice de forma (SI) é determinado de acordo com a expressão 3.27, sendo que o seu valor deve ser apresentado arredondado às unidades.

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 \quad (3.27)$$

em que:

- $\sum M_{1i}$ - soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas [g];
- $\sum M_{2i}$ - soma das massas das partículas não cúbicas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas [g].

3.10. Ensaios realizados ao betão em estado fresco

3.10.1. Abaixamento

O ensaio de abaixamento do cone de Abrams permite estimar a trabalhabilidade do betão, a qual, nesta dissertação, foi fixada no intervalo de 125 ± 15 mm para todas as amassaduras. Esta propriedade controla algumas das propriedades do betão produzido, sendo fundamental obter valores de trabalhabilidade semelhantes nas diversas misturas de modo a efetuar uma comparação direta.

Para a realização deste ensaio, foi seguido o procedimento descrito na norma NP EN 12350-2 (2009).

3.10.1.1. Procedimento

O procedimento do ensaio assenta na realização dos seguintes passos:

- humedecer todo o equipamento a utilizar;
- colocar a placa num local relativamente bem nivelado horizontalmente;
- colocar o molde por cima da placa pressionando-o com os pés contra a mesma de modo a evitar vazamento do betão;

- encher o molde em três camadas, procedendo à realização de 25 pancadas com a vareta metálica em cada camada; deve-se iniciar a realização das pancadas na periferia do molde gradualmente progredindo para o centro; as pancadas devem ser realizadas após o enchimento de cada camada, tentando não afetar a camada colocada anteriormente;
- proceder à nivelção da boca do molde, colocando uma quantidade adicional de betão se necessário;
- remover o molde com um movimento gradual e vertical, evitando movimentos horizontais e permitindo o escorregamento do betão das paredes do molde;
- medir a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do betão deformado, após a remoção do molde;
- rejeitar a amassadura na situação de o valor registado não estar dentro do intervalo estipulado (125 ± 15 mm).

De acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009), o ensaio apenas é válido se, após a retirada do molde, o provete se mantiver substancialmente intacto e simétrico (Figura 3.12), sendo que, na situação de o provete apresentar uma forma deformada (Figura 3.13), torna-se necessário realizar novamente o ensaio.

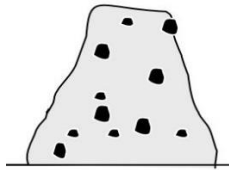


Figura 3.12 - Abaixamento verdadeiro

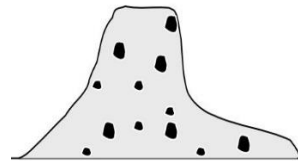


Figura 3.13 - Abaixamento deformado

3.10.2. Massa volúmica

A massa volúmica do betão em estado fresco é um indicador da qualidade do betão produzindo, pelo que a determinação desta propriedade assume alguma importância. De facto, uma menor massa volúmica do betão em estado fresco, tendo em consideração a mesma quantidade de agregados e cimento para uma dada mistura, indica uma maior presença de água e vazios na sua composição, afetando diretamente as propriedades de resistência mecânica e durabilidade do betão.

O ensaio de determinação da massa volúmica do betão em estado fresco foi realizado de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 12350-6 (2011).

3.10.2.1. Procedimento

A amostra foi recolhida assim que o resultado do abaixamento de cone de Abrams confirmou a adequabilidade da amassadura produzida, tendo-se o cuidado de evitar qualquer tipo de contaminação. Em seguida, foi executado o seguinte procedimento:

- pesar o recipiente a utilizar para a determinação da massa volúmica do betão em estado fresco e registar a sua massa como m_1 ;

- encher o recipiente com a amostra de betão em estado fresco recolhida após o término da amassadura;
- proceder a uma cuidada vibração do betão, tendo especial atenção a duração do processo;
- nivelar o topo do recipiente com uma colher de pedreiro e posteriormente rasar a superfície com a rasoira;
- limpar e secar o exterior do recipiente;
- pesar o recipiente cheio e registar a sua massa como m_2 .

O resultado do ensaio pode ser obtido com recurso à expressão 3.28 e o resultado apresentado deve ser aproximado à décima de unidade de volume ($0,1 \text{ kg/m}^3$).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.28)$$

em que:

- D - massa volúmica do betão em estado fresco [kg/m^3];
- m_1 - massa do recipiente vazio [kg];
- m_2 - massa do recipiente cheio [kg]
- V - volume do recipiente [m^3].

3.11. Ensaio realizado ao betão em estado endurecido

3.11.1. Retração

A retração do betão pode ser definida como a variação de volume devida principalmente à evaporação de água e hidratação do cimento. O ensaio preconizado na especificação LNEC E398 (1993) infere esta propriedade através da determinação da variação de comprimento de um provete de betão entre o momento da sua desmoldagem e a sua secagem em condições específicas ao fim de uma duração predefinida (considerada de 91 dias).

3.11.1.1. Preparação da amostra

Para a realização deste ensaio, e tendo em atenção os requisitos impostos pela especificação, foram utilizados dois provetes de betão com forma paralelepipedal, com comprimento de 450 mm e aresta de 100 mm. Após a desmoldagem dos provetes, aproximadamente 24 horas após o término da amassadura, procedeu-se à colagem de duas pastilhas metálicas que têm a função de fixar o aparelho de leitura (Figura 3.14). A colagem foi efetuada a igual distância das faces do provete com o auxílio de uma barra padrão (Figura 3.15), tendo sido utilizada cola de secagem rápida na base e uma bucha química no contorno das pastilhas metálicas. A barra padrão define uma distância entre as pastilhas metálicas, permitindo obter uma referência de leitura das extensões. Os provetes são depois colocados numa câmara que garanta uma temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa de $50 \pm 5 \%$.



Figura 3.14 - Colagem das pastilhas metálicas



Figura 3.15 - Definição da distância entre as pastilhas metálicas com o auxílio da barra padrão

3.11.1.2. Procedimento

O procedimento do ensaio assenta nos seguintes passos:

- calibrar do aparelho de leitura (defletómetro) com o auxílio de uma barra padrão;
- realizar a 1ª medição (d_0), a qual será utilizada como referência para leituras de extensões realizadas posteriormente;
- realizar as medições seguintes (d_i), sendo que a sua frequência temporal é definida pela idade do betão.

Devido à manifestação da retração ser mais acentuada nas idades iniciais do betão, optou-se por realizar medições diárias nos primeiros 8 dias após a desmoldagem dos provetes, aumentando progressivamente os intervalos temporais com o aumento da idade do betão. A extensão de retração dos provetes pode ser calculada de acordo com a expressão 3.29.

$$\varepsilon_i = \frac{d_i - d_0}{d} \quad (3.29)$$

em que:

- ε_i - extensão de retração dos provetes na idade i do betão [%];
- d_0 - 1ª medição que define a distância entre as pastilhas metálicas no dia da desmoldagem do provete [mm];
- d_i - medição efetuada à idade i do betão [mm];
- d - comprimento da barra padrão [mm].

3.11.2. Absorção por imersão

A realização do ensaio para a determinação da capacidade de absorção de água, por parte do betão em estado endurecido, foi efetuada de acordo com o definido pela especificação LNEC E 394-1993. Devido à capacidade de absorção estar diretamente relacionada com a porosidade acessível, esta propriedade é um indicador da qualidade em termos de durabilidade do betão. A sua determinação

é conseguida através da quantificação da diferença entre um provete seco e um provete saturado de betão em estado endurecido.

3.11.2.1. Preparação da amostra

De acordo com as imposições de dimensão colocada pela especificação LNEC E 394 (1993), os provetes a ensaiar são caracterizados por possuírem uma forma cúbica com uma aresta de dimensão de 100 mm. Aproximadamente 24 horas após a betonagem, os provetes foram desmoldados e colocados numa câmara húmida a uma temperatura de aproximadamente 20 °C e humidade relativa de 95 ± 5 %. O ensaio foi iniciado 28 dias após a produção do betão.

3.11.2.2. Procedimento

O procedimento do ensaio realizado assenta nos seguintes passos:

- colocar os provetes dentro de um recipiente estanque;
- encher o recipiente com água proveniente da rede pública; este processo deve ser efetuado em três etapas distintas, intervaladas de 1 hora cada uma; na primeira etapa, coloca-se água até 1/3 da altura do provete (Figura 3.16), na segunda até 2/3 da altura dos provetes e na terceira, coloca-se água a uma altura máxima de 20 mm da face superior dos provetes, garantindo que a totalidade dos provetes se encontra submersa;
- realizar pesagens do provete intervaladas de 24 horas; antes da pesagem deve proceder-se à remoção da água superficial através da secagem da superfície do provete com um pano absorvente;
- realizar medições sucessivas intervaladas de 24 horas; a imersão do provete acaba quando a massa do mesmo não apresenta uma variação superior a 0,1% entre medições sucessivas;
- determinar a massa hidrostática do provete, quando finalizada a imersão (Figura 3.17);
- colocar o provete em estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C até que em medições sucessivas intervaladas de 24 horas a sua massa não apresente uma variação superior a 0,1%;
- proceder à pesagem do provete e registar a massa como m_3 .



Figura 3.16 - Primeira etapa de enchimento com água do recipiente



Figura 3.17 - Determinação da massa hidrostática do provete

Finalmente, a capacidade de absorção de água é determinada de acordo com a expressão 3.30, sendo que o resultado deve ser apresentado com uma aproximação de 0,1%.

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (3.30)$$

em que:

- A - quantidade de água absorvida pelo provete relativamente à sua massa [%];
- m_1 - massa do provete saturado [g];
- m_2 - massa hidrostática do provete [g];
- m_3 - massa do provete seco [g];

3.11.3. Absorção por capilaridade

A determinação da absorção por capilaridade do betão em estado endurecido foi efetuada segundo a especificação LNEC E393 (1993). O ensaio consiste na determinação da variação de massa de um provete de betão em que uma das faces se encontrou em contacto com a água durante um determinado período. Adicionalmente, é possível determinar os coeficientes de absorção capilar, os quais traduzem a velocidade à qual ocorre o fenómeno de capilaridade ao longo de um determinado período.

3.11.3.1. Preparação da amostra

A especificação seguida para a realização do ensaio exige que os provetes utilizados respeitem determinada forma, volume e dimensões. Não estando disponíveis moldes que respeessem estas características, os provetes considerados tinham forma cilíndrica, altura de 100 mm e raio de 75 mm, tendo sido obtidos com recurso ao corte de cilindros de betão com altura de 300 mm e raio de 75 mm. O corte foi efetuado ao fim de 28 dias de cura em câmara húmida, com condições de temperatura de 20 °C e humidade relativa de 95 ± 5%.

Posteriormente ao corte, e antes de iniciar o ensaio, procedeu-se à secagem dos provetes em estufa ventilada com temperatura de 60 ± 5 °C, ao longo de 14 dias.

3.11.3.2. Procedimento

O procedimento do presente ensaio pode ser descrito nos seguintes passos:

- retirar os provetes da estufa ventilada ao fim de 14 dias, proceder à sua pesagem e registar a massa como M_0 ;
- colocar um tabuleiro estanque numa superfície horizontal, certificando-se com recurso a um nível que se encontra nivelado;
- colocar suportes no interior do tabuleiro de modo a garantir que a face inferior do provete de encontre em contacto com a água;
- posicionar a face inferior dos provetes por cima dos suportes;
- encher o tabuleiro com água até que uma altura de 5 ± 1 mm a contar da face inferior do provete se encontrem submersa (Figura 3.18);

- cobrir o tabuleiro com uma campânula de vidro, evitando a evaporação da água;
- realizar pesagens dos provetes ao fim de determinados períodos temporais: 3, 6, 24 e 72 horas a contar desde o primeiro contacto com a água (Figura 3.19); antes da pesagem, deve-se deixar escorrer a água da face inferior dos provetes durante um período de aproximadamente 60 segundos;
- voltar a colocar os provetes no tabuleiro ao fim de cada medição, garantindo que a água se mantem a uma altura de 5 ± 1 mm da face inferior do provete.

A absorção capilar pode ser determinada com recurso à expressão 3.31.

$$A_{cap} = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (3.31)$$

Em que:

- A_{cap} - absorção capilar [g/mm^2];
- M_i - massa do provete do instante i [g];
- M_0 - massa do provete seco [g];
- A - área da face do provete em contacto com a água [mm^2].

O coeficiente de absorção capilar referente a determinado período pode ser determinado de acordo com a expressão 3.32:

$$K_c = \frac{A_{cap}}{\sqrt{t}} \quad (3.32)$$

em que:

- K_c - coeficiente de absorção capilar [$\text{g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{t}^{1/2})$];
- A_{cap} - absorção capilar [g/mm^2];
- t - tempo [h].



Figura 3.18 - Enchimento do tabuleiro com água até uma altura de 5 ± 1 mm em relação à face do provete em contacto com a água



Figura 3.19 - Pesagem do provete no instante i

3.11.4. Resistência à penetração dos cloretos

A resistência à penetração dos cloretos é determinada através do procedimento descrito pela especificação LNEC E463 (2004). O ensaio baseia-se na determinação do coeficiente de difusão dos cloretos no betão, sendo que, quanto maior for o seu valor, menor será a resistência oferecida pelo betão à penetração destes iões.

O coeficiente de difusão está diretamente relacionado com a distância entre a face exterior do provete e a zona até onde, através da aplicação de nitrato de prata, é possível verificar a penetração dos iões de cloreto. Esta distância pode ser definida como profundidade de penetração.

3.11.4.1. Preparação da amostra

Os provetes utilizados para a realização do presente ensaio são caracterizados por possuírem uma forma cilíndrica, com 50 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Estas dimensões respeitam as condições exigidas pela especificação, e foram conseguidas através do corte, 14 dias antes da realização do ensaio, de provetes de forma cilíndrica com dimensões de 300 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Até à data do corte, os provetes de betão foram curados em câmara húmida em condições de temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $95 \pm 5\%$. Adicionalmente, as extremidades do provete original foram rejeitadas, apenas se aproveitando três amostras provenientes da zona central.

Após o corte, procedeu-se ao armazenamento dos provetes na câmara seca, a uma temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $50 \pm 5\%$ até à data da realização do ensaio, o qual ocorreu aos 28 e 91 dias após a produção do betão.

3.11.4.2. Procedimento

O procedimento do presente ensaio assenta nos seguintes passos:

- retirar os provetes da câmara seca e coloca-los dentro da câmara de vácuo durante 24 horas (Figura 3.20), realizando os seguintes passos:
 - com recurso a uma bomba de vácuo, sujeitar os provetes a uma pressão correspondente a uma altura de 20 cm de mercúrio, durante 3 horas;
 - decorridas as 3 horas, adicionar, através de uma válvula, uma solução de NaOH até a uma altura suficiente para submergir os provetes;
 - desligar a corrente ao fim de 1 hora, deixando os provetes submersos na câmara de vácuo as restantes 20 horas;
- inserir os provetes em mangas de borracha (Figura 3.21);
- com recurso a braçadeiras metálicas, apertar os provetes dentro das mangas, de modo a garantir que não ocorra a passagem de solução;
- colocar as mangas com os provetes dentro dos reservatórios plásticos utilizados para a realização do ensaio, adicionando de seguida as soluções de NaCl e NaOH;

- ligar a fonte de alimentação ao reservatório plástico e aplicar uma corrente de 30 V (Figura 3.22); a corrente irá gerar um potencial elétrico entre a face superior e inferior do provete, forçando a migração dos iões de cloretos;
- registar a corrente inicial que passa nos provetes;
- corrigir a corrente aplicada aos provetes, de acordo com a especificação seguida;
- registar os valores de voltagem, amperagem e da temperatura da solução anódica (T_i);
- decorridas 24 horas, desligar a fonte de alimentação e registar os valores de voltagem, amperagem e da temperatura da solução anódica (T_i);
- retirar os provetes das mangas e, com recurso ao martelo e ao escopro, secciona-los em duas partes (Figura 3.23);
- aplicar uma solução de nitrato de prata nas metades do provete;
- medir a profundidade de penetração dos iões de cloretos quando o precipitado branco do cloreto de prata se tornar visível; a medição deve ser realizada com intervalos de 10 mm, com o auxílio de um esquadro graduado que permita leituras com precisão de 0,1 mm.



Figura 3.20 - Câmara de vácuo



Figura 3.21 - Colocação dos provetes dentro de mangas de borracha



Figura 3.22 - Ligação da fonte de alimentação ao reservatório plástico que contém os provetes



Figura 3.23 - Seccionamento dos provetes em duas metades

O coeficiente de penetração dos cloretos pode ser obtido com recurso à expressão 3.32.

$$D_{nssm} = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \frac{x_d - \sqrt{x_d}}{t} \quad (3.32)$$

em que:

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (3.33)$$

$$\alpha = 2 \times \sqrt{\frac{R \times T}{z \times F \times E}} \times \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2 \times c_d}{c_0}\right) \quad (3.34)$$

sendo que:

- D_{nssm} - coeficiente de migração em regime não estacionário (mf²/s);
- z - valor absoluto de valência do ião de cloreto ($z \approx 1$);
- F - coeficiente de Faraday ($F = 9,648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$);
- R - constante dos gases ($R = 8,314 \text{ J}/\text{mol}^{-1}$);
- T - temperatura média da solução anódica entre o início e o fim do ensaio (K);
- U - voltagem aplicada no circuito (V);
- L - espessura do provete (m);
- x_d - valor médio da profundidade de penetração (m);
- t - tempo de duração do ensaio (s);
- erf^{-1} - inverso da função erro;
- c_d - concentração de cloretos para a qual o nitrato de prata reage ($c_d = 0,07N$);
- c_0 - concentração de cloretos no cátodo ($c_0 = 2N$).

3.11.5. Resistência à carbonatação

O presente ensaio baseia-se na especificação LNEC E391 (1993) e tem por objetivo determinar a resistência à carbonatação de betão em estado endurecido. Para o efeito, os provetes são expostos a uma determinada concentração de CO₂ durante um designado período de tempo, no final do qual se determina a profundidade da frente de carbonatação. A frente de carbonatação é detetada com recurso ao marcador de fenolftaleína e pode ser definida pela zona de betão em que, devido ao processo de carbonatação, os valores de pH se apresentam entre 8 a 10. Devido à frente de carbonatação muitas vezes não se apresentar regular, a profundidade de carbonatação é a distância média entre a superfície do betão e a frente de carbonatação.

3.11.5.1. Preparação da amostra

Neste ensaio, foram utilizados provetes com forma cilíndrica, com altura de 40 mm e raio de 50 mm, sendo que a obtenção dos provetes foi conseguida através do corte de cilindros de betão com um comprimento original de 250 mm. Realça-se que o corte foi apenas realizado 14 dias após a betonagem, sendo que durante este período temporal os provetes estavam submersos em água. Seguidamente, os provetes foram colocados em câmara seca a condições de temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $50 \pm 5\%$, tendo sido, posteriormente, aplicada uma película de borracha líquida isolante de modo a permitir apenas a entrada de CO₂ pelas faces laterais (Figura 3.24).

3.11.5.2. Procedimento

O procedimento do presente ensaio assenta nos seguintes passos:

- introduzir os provetes na câmara de carbonatação, que se deve encontrar com uma concentração de CO_2 de $5 \pm 1 \%$, uma temperatura de $23 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa de $60 \pm 5\%$;
- retirar os provetes à idade definida e proceder à sua segmentação com o auxílio do martelo e do escopro;
- aplicar a solução de fenolftaleína nos fragmentos dos provetes;
- medir a profundidade da frente de carbonatação (Figura 3.25); na situação de a frente de carbonatação apresentar um aspeto irregular, deve-se ler o seu valor médio.



Figura 3.24 - Aplicação de uma película de borracha líquida isolante nas faces superior e inferior dos provetes



Figura 3.25 - Identificação da frente de carbonatação

A resistência à carbonatação é obtida através da média da profundidade da frente de carbonação medida nas quatro faces não repetidas dos fragmentos em que o provete foi dividido.

4. Resultados da campanha experimental

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos ao longo da campanha experimental realizada, os quais são comparados com o levantamento bibliográfico efetuado no capítulo 2.

É aferida a influência dos diversos ciclos de reciclagem nas propriedades dos agregados reciclados, bem como o seu impacto no desempenho do betão tanto em estado fresco como em estado endurecido. Adicionalmente, é analisada a importância da taxa de substituição de agregados naturais por agregados reciclados com taxas de substituição de 25 e 100%.

De modo a organizar e expor a informação, este capítulo é subdividido em três subcapítulos. Primeiramente, são abordados os resultados relativos à caracterização dos agregados. Em seguida, são analisados os referentes aos estudos efetuados ao betão em estado fresco, sendo por fim estudados os resultados obtidos nos ensaios relacionados com o estudo da durabilidade efetuados ao betão em estado endurecido.

4.1. Ensaios aos agregados

4.1.1. Análise granulométrica

Com o objetivo de diminuir a variabilidade entre a curva granulométrica dos agregados do betão produzido e a determinada através da curva de Faury, todos os agregados grossos foram separados nos devidos intervalos granulométricos. Este procedimento permitiu que nas amassaduras as quantidades de agregados de cada granulometria sofressem uma variação desprezável, eliminando simultaneamente a necessidade de efetuar uma análise granulométrica aos agregados grossos.

Quanto aos agregados finos, foi efetuada uma análise granulométrica através do método da peneiração em conformidade com a norma NP EN 933-1 (2000), sendo apresentadas na Figura 4.1 as curvas granulométricas obtidas. Todos os resultados obtidos no ensaio podem ser consultados no Anexo C.

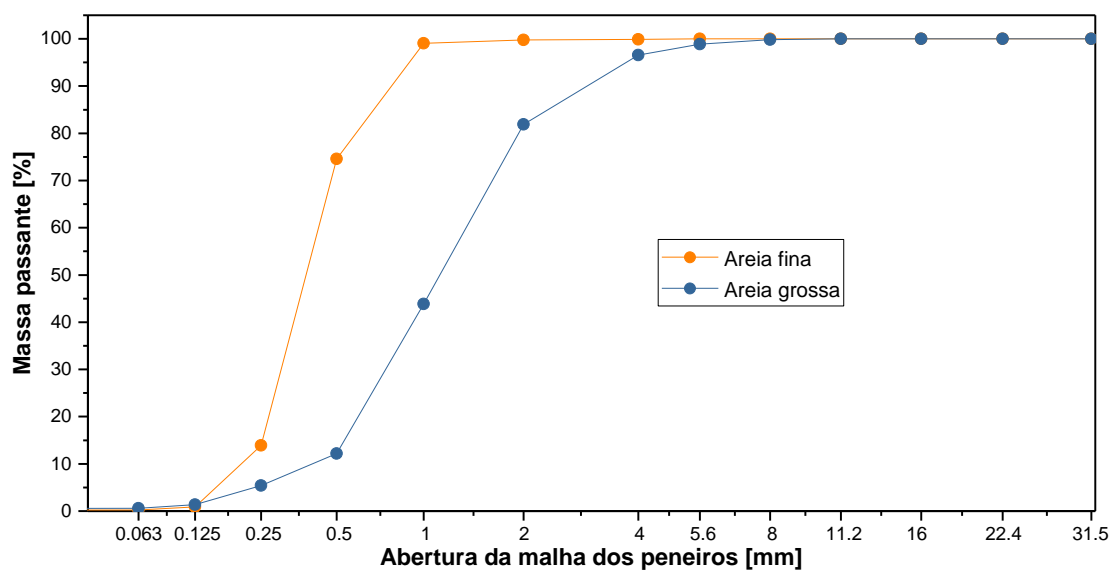


Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados naturais

4.1.2. Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica e a absorção de água dos agregados grossos foram estimadas de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 1097-6 (2003). As amostras foram preparadas tendo em atenção a posologia do betão, ou seja, a percentagem de cada intervalo granulométrico presente na amostra é igual à percentagem que os mesmos apresentam no volume de agregados grossos da composição do betão. O Quadro 4.1 apresenta, de forma resumida, os resultados auferidos para as massas volúmicas e absorção de água, sendo que todos os valores obtidos neste estudo se encontram presentes no Anexo D.

Quadro 4.1 - Médias das massas volúmicas e absorção de água dos diferentes tipos de agregados grossos

Tipo de agregado	Massa volúmica do material impermeável das partículas ρ_a [kg/m ³]	Massa volúmica das partículas secas ρ_{rd} [kg/m ³]	Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ρ_{sss} [kg/m ³]	Absorção de água (24 h) [%]
AGN	2668,40	2593,04	2621,28	1,09
AGRI	2668,06	2319,28	2450,00	5,64
AGRII	2629,87	2175,01	2347,97	7,95
AGRIII	2672,23	2124,80	2329,65	9,64

Analisando o Quadro 4.1, é possível concluir que tanto a massa volúmica das partículas secas (ρ_{rd}) como a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{sss}) tendem a diminuir com o aumento do número de ciclos de reciclagem. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento de argamassa aderida presente na constituição dos agregados. É interessante verificar que a diminuição destas massas volúmicas não apresenta um comportamento linear, constatando-se que, quanto maior o número de reciclagens, menor a variação destas propriedades. Este fenómeno é demonstrado pelo comportamento assintótico das curvas de regressão na Figura 4.2.

Relativamente à absorção de água, pode-se verificar um comportamento semelhante ao referido. De facto, apesar de a capacidade de absorção de água aumentar com o número de reciclagens, a sua variação tende a ser cada vez menos acentuada (Figura 4.3).

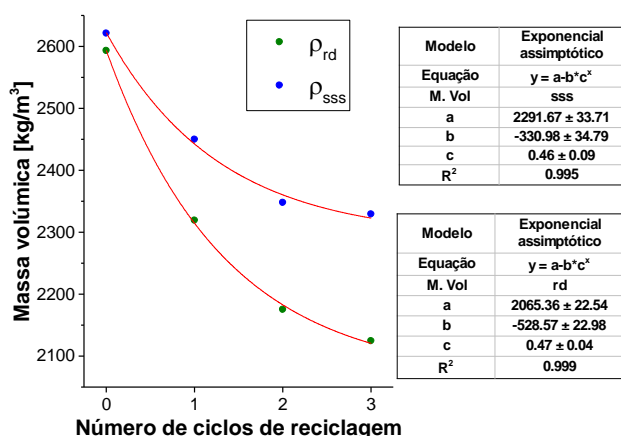


Figura 4.2 - Massa volúmica seca das partículas saturadas com superfície seca em função do número de reciclagens

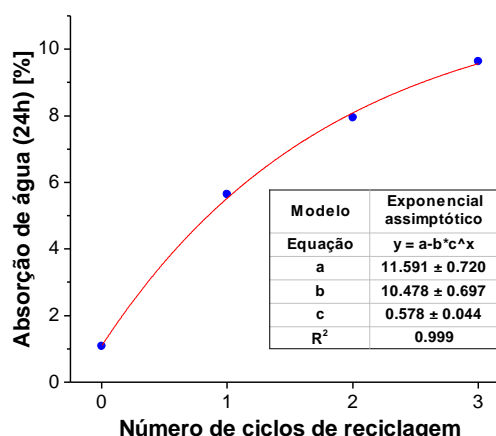


Figura 4.3 - Absorção de água dos agregados em função do número de reciclagens

A quantidade de argamassa aderida presente na constituição do agregado é novamente o principal fator para explicar este comportamento. Com o aumento do número de reciclagens, as partículas pétreas características dos agregados naturais tendem a ser divididas em fragmentos progressivamente menores devido aos sucessivos processos de trituração, resultando que o volume total ocupado por

estas na matriz do agregado reciclado seja sucessivamente menor, em oposição à quantidade de argamassa aderida que tende a aumentar. A utilização deste tipo de agregados na composição do betão implica inevitavelmente que os agregados provenientes da sua trituração apresentem uma quantidade ainda maior de argamassa aderida. Uma vez que esta argamassa é mais desagregável e se solta com mais facilidade após cada reciclagem, a sua quantidade presente na constituição dos agregados reciclados tende a estabilizar com o aumento do número de ciclos de reciclagens. Esta estabilização origina um comportamento semelhante em algumas das suas características, como a massa volúmica e a capacidade de absorção de água.

De acordo com a especificação LNEC E 471 (2009), apenas agregados reciclados com uma massa volúmica superior a 2200 kg/m^3 e capacidade de absorção de água inferior a 7% podem ser utilizados na produção de betão estrutural. Segundo os resultados obtidos na campanha experimental, apenas os agregados reciclados provenientes de um ciclo de reciclagem respeitam a especificação. Os AGRII apresentaram uma massa volúmica seca 1,14% inferior e uma capacidade de absorção de água 13,57% superior em relação aos valores especificados. Por sua vez, os AGRIII apresentaram uma massa volúmica seca 3,5% inferior e uma capacidade de absorção de água 27,4% superior.

Como se pode analisar através da Figura 4.4 e da Figura 4.5, os resultados obtidos tanto para a capacidade de absorção de água como para a massa volúmica seca encontram-se em concordância com o levantamento bibliográfico referente à reciclagem múltipla efetuado nos capítulos 2.1.1 e 2.1.2.

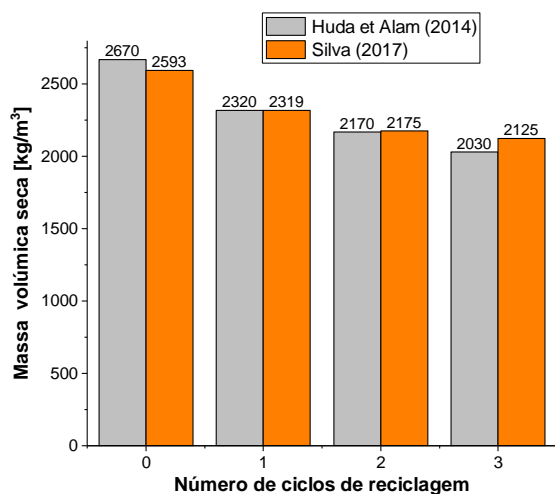


Figura 4.4 - Comparação dos resultados obtidos para a massa volúmica seca com o estudo realizado por Huda e Alam (2014)

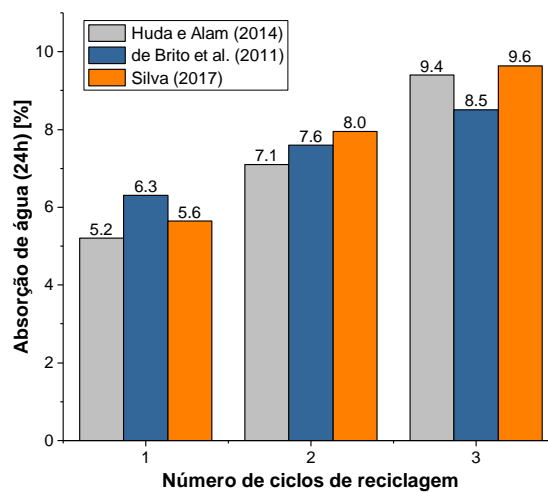


Figura 4.5 - Comparação dos resultados obtidos para a massa volúmica seca com o estudo realizado por Huda e Alam (2014) e de Brito et al. (2011)

4.1.3. Absorção de água ao longo de 24 horas

Devido à significativa capacidade de absorção de água por parte dos agregados reciclados e às indesejadas consequências associadas a este fenómeno, a compensação de água durante a amassadura é de extrema importância. A quantidade de água a adicionar durante este período, estabelecido como 15 minutos, foi calculada tendo por base a metodologia explicitada no capítulo 3.4. Os resultados completos obtidos neste estudo são apresentados no Anexo E, sendo apresentados no Quadro 4.2 os valores referentes a apenas alguns intervalos temporais. A evolução da absorção de água de todos os AGR é apresentada na Figura 4.6 para toda a duração do ensaio.

Quadro 4.2 - Absorção de água dos agregados reciclados no final de determinados intervalos temporais

Intervalo temporal	Absorção de água [%]		
	AGRI	AGR II	AGR III
6 min	75,0	58,4	47,6
10 min	79,5	65,8	62,5
15 min	82,2	74,8	71,4
30 min	85,2	83,8	84,8
24 h	100	100	100

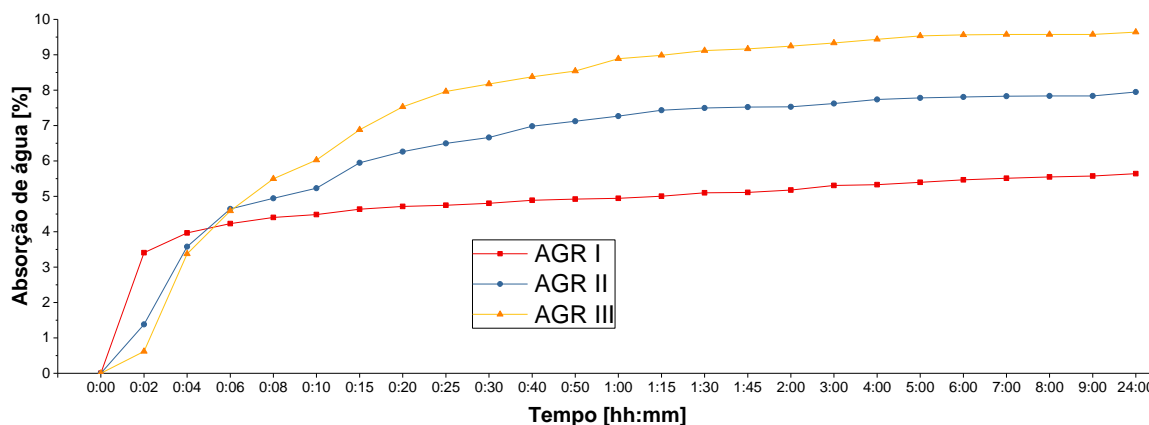


Figura 4.6 - Evolução da absorção de água ao longo de 24 horas dos agregados reciclados

Através da análise do Quadro 4.2, verifica-se que os agregados reciclados esgotam grande parte da sua capacidade de absorção nos primeiros 15 minutos. Adicionalmente, constata-se que quanto menor for o ciclo de reciclagem associado ao agregado, maior é a sua absorção nos primeiros instantes. Uma possível explicação para este fenómeno poderá ser que, apesar da capacidade de absorção total ao fim de 24 horas do agregado aumentar em função do número de ciclos de reciclagem, a sua porosidade não é tão facilmente acessível, o que pode dever-se à estrutura dos poros se prolongar até a uma maior profundidade no agregado, levando mais tempo a que o seu preenchimento seja efetuado. De facto, um agregado AGRI possui uma matriz essencialmente caracterizada por partículas pétreas de AGN e argamassa aderida aos mesmos. O aumento do número de reciclagens diminui a quantidade de partículas de AGN e a sua dimensão, formando-se uma matriz constituída essencialmente por argamassa. Desta forma, a matriz porosa do AGRI poderá ser mais superficial e mais facilmente acessível do que a matriz porosa dos AGR II ou AGR III, que provavelmente se prolongará mais para o interior do agregado. A partir dos 30 minutos a discrepância existente na absorção de água dos diversos agregados reciclados torna-se praticamente inexistente, sendo que, até às 24 horas o seu comportamento é essencialmente igual.

A absorção de água até às 24 horas dos AGR I assume um comportamento semelhante ao observado na bibliografia analisada, não tendo sido encontrada qualquer bibliografia sobre os AGR II e AGR III.

4.1.4. Índice de forma

A realização do ensaio para a determinação do índice de forma dos agregados foi efetuada de acordo com a norma NP EN 933-4 (2002), tendo sido a sua metodologia explicitada no capítulo 3.9.5. A preparação das amostras referentes aos AGR teve em consideração, adicionalmente aos requisitos especificados pela norma, a proporção dos intervalos granulométricos dos agregados em relação à composição do betão. Os resultados completos referentes ao estudo podem ser visualizados no Anexo F, sendo apresentados os valores no índice de forma dos diversos agregados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Índice de forma obtidos para os agregados em estudo

Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	AGRI	AGRII	AGRIII
17	20	18	18	19	18

Analisando os resultados obtidos para o índice de forma dos diversos agregados, verifica-se que são bastante semelhantes entre si. Devido aos diferentes métodos de trituração associados aos agregados, ou seja, os AGN sofrem uma trituração industrial com britagem primária e secundária enquanto os AGR foram obtidos com recurso a trituração através de uma trituradora de mandíbulas, esta semelhança não era expectável. Adicionalmente, constata-se que a perda de rigidez associada ao aumento da argamassa aderida não afetou de forma significativa a forma dos agregados aquando da fragmentação do betão devido ao processo de trituração.

No entanto, uma análise mais cuidada de todos os dados apresentados no Anexo F permite chegar a algumas conclusões adicionais. Primeiramente, o índice de forma de todos os AGR é superior nas granulometrias mais pequenas do que nas maiores. Ou seja, quanto menores as partículas mais lamelares são, sendo que esta diferença é mais acentuada nos AGRII e AGRIII que nos AGRI. Este fator é inevitavelmente diluído pela composição da amostra que, ao ter sido construída tendo em consideração a proporção dos diferentes intervalos granulométricos dos agregados grossos na composição do betão (as porções dos intervalos granulométricos em função do volume de sólidos pode ser consultada no Quadro 3.10), apresenta um considerável maior número de agregados com maior dimensão.

Esta diferença no índice de forma entre as partículas de maiores e menores dimensões não é tão acentuada nos agregados naturais, porque a maior parte dos agregados grossos naturais com granulometrias entre 4 e 8 mm provém do bago de arroz, que apresenta um valor de índice de forma relativamente semelhante aos da brita 1 e brita 2.

No Quadro 4.4, apresenta-se, adicionalmente aos obtidos neste estudo, os resultados obtidos por diversos autores referidos no capítulo 2.1.3 para o índice de forma de AGN e AGRI. Verifica-se que os agregados naturais ensaiados apresentam um índice de forma inferior. A grande diversidade de valores apresentados para os agregados reciclados torna a realização de uma comparação impossível. Infelizmente não foi possível encontrar qualquer bibliografia referente a AGRII e AGRIII.

Quadro 4.4 - Comparação do índice de forma do AGN e do AGR I obtidos e com os de diversos autores

Autor	Tipo de agregado					
	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	AGRI	AGRII	AGRIII
Silva (2017)	17	20	18	18	19	18
Autor	Tipo de agregado					
	Agregados naturais			Agregados reciclados		
Etxeberria et al. (2007)	28			25		
Vieira et al. (2011)	22,3			14-18,3		
Fonseca et al. (2011)	24,3			11,1		

4.1.5. Baridade

A baridade dos agregados foi determinada de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2002). A preparação das amostras em estudo teve em consideração a posologia dos betões a preparar, tendo sido formulada de acordo com a percentagem de cada intervalo granulométrico no volume total de

agregados grossos presentes no betão. Foram analisadas três amostras distintas, determinando-se o valor final da baridade com recurso à respetiva média dos resultados. Simultaneamente à baridade, e devido à interdependência existente entre as duas propriedades, é também possível determinar o volume de vazios. No Anexo G, encontram-se apresentados todos os resultados correspondentes a este estudo e no Quadro 4.5 são apresentados os resultados para os agregados analisados.

Quadro 4.5 - Baridade e percentagem de vazios dos agregados analisados

Tipo de agregado	Baridade [kg/m ³]	% de vazios [%]
AGN	1355,1	47,06
AGR I	1132,1	55,2
AGR II	1034,4	59,3
AGR III	990,1	62,7

Uma primeira análise dos valores permite concluir que esta propriedade diminui em função do número de ciclos de reciclagens. Este resultado era expectável pois a baridade encontra-se diretamente relacionada com a massa volúmica e a forma dos agregados. Como o estudo do índice de forma indicou uma semelhança muito próxima entre todos os tipos de agregados, espera-se que esta propriedade não tenha uma influência muito significativa na baridade apresentada pelos mesmos. Por sua vez, como apresentado em 4.1.2, a massa volúmica dos agregados diminui com o aumento do número de ciclos de reciclagem, pelo que se considerou importante tentar estabelecer uma relação entre estas duas propriedades. Na Figura 4.7, é apresentada a evolução da baridade em função da massa volúmica dos agregados, verificando-se uma excelente correlação entre as duas ($R^2 = 0,999$).

Adicionalmente, através da análise da Figura 4.8, é possível verificar que à semelhança da massa volúmica dos agregados, também a baridade tende a estabilizar com o aumento do número de ciclos de reciclagem. Ao se estabelecer uma correlação através do modelo exponencial assintótico, é possível obter um R^2 de 1,0, indicador de uma correlação perfeita.

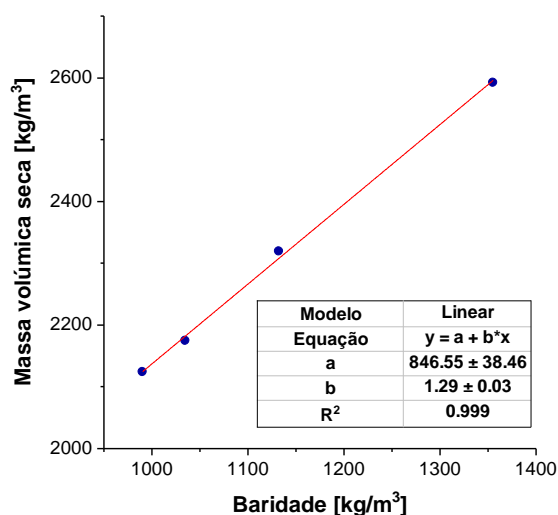


Figura 4.7 - Relação entre a massa volúmica seca e a baridade dos agregados

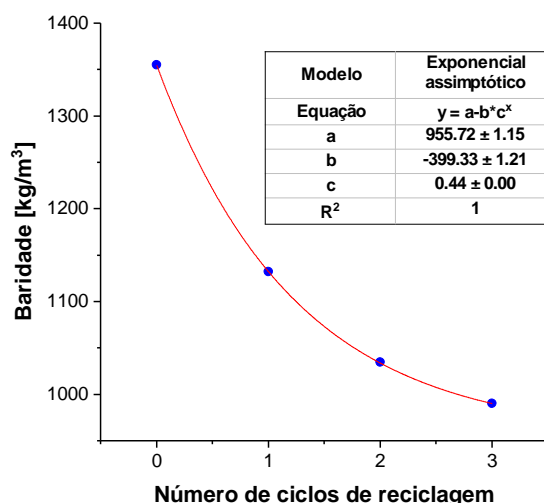


Figura 4.8 - Baridade em função do número de ciclos de reciclagem

Pode-se portanto concluir que, à semelhança do que foi verificado para a massa volúmica dos agregados reciclados, o aumento da quantidade de argamassa aderida é o principal fator para este tipo de comportamento. Salienta-se, no entanto, que três ciclos de reciclagem não são suficientes para se

verificar a estabilização desta propriedade, como pode ser observado pelo facto de a baridade apresentada pelos AGR III ($990,1 \text{ kg/m}^3$) se encontrar fora da margem de erro do declive da assíntota horizontal ($955,72 \pm 1,15$).

4.1.6. Desgaste de Los Angeles

A determinação da resistência à abrasão dos agregados foi efetuada através do ensaio de Los Angeles em concordância com a norma NP EN 1097-2 (2011). Foram ensaiadas três amostras por cada família de agregados (AGN, AGRI, AGRII e AGRIII), sendo o resultado final do ensaio determinado através da média dos resultados das amostras. No Anexo H, estão disponíveis todos os elementos relevantes que resultaram deste estudo, apresentando-se no Quadro 4.6 os valores médios de desgaste de Los Angeles para cada tipo de agregado.

Ao se ter realizado a compensação de água de forma a controlar a significativa absorção por parte dos agregados reciclados, evitou-se uma alteração da razão a/c efetiva do betão, o que implica que a argamassa cimentícia que constitui os agregados reciclados provenientes de diferentes ciclos de reciclagem apresenta uma qualidade e resistência muito semelhantes, permitindo que seja efetuada uma comparação qualitativamente correta.

Analisando os resultados apresentados no Quadro 4.6, verifica-se que os agregados naturais apresentam uma maior resistência ao desgaste por abrasão. Este resultado é expectável devido à presença de argamassa aderida nos agregados reciclados, a qual é consideravelmente menos resistente do que as partículas pétreas dos agregados naturais. É também possível constatar que a diferença nos valores obtidos para os agregados reciclados é relativamente pequena, verificando-se inclusivamente uma diminuição do desgaste de Los Angeles dos AGRII para os AGRIII. Devido à pequena variação desta propriedade para estes dois tipos de agregados e estando o valor dentro do possível erro associado ao ensaio, considera-se que este resultado pode indicar uma tendência de estabilização da resistência à abrasão dos AGR em função do aumento do número de ciclos. Esta conclusão é comprovada pelo bom ajuste do modelo exponencial assintótico (Figura 4.9), verificando-se inclusivamente que os resultados de desgaste de Los Angeles obtidos para os AGRII e AGRIII se encontram dentro da margem de erro associada ao declive da assíntota ($41,23 \pm 0,41$).

Quadro 4.6 - Desgaste de Los Angeles obtido para os agregados

Tipo de agregado	$\Delta \text{LA}_{\text{médio}} [\%]$
AGN	27,93
AGRI	38,81
AGRII	41,18
AGRIII	40,89

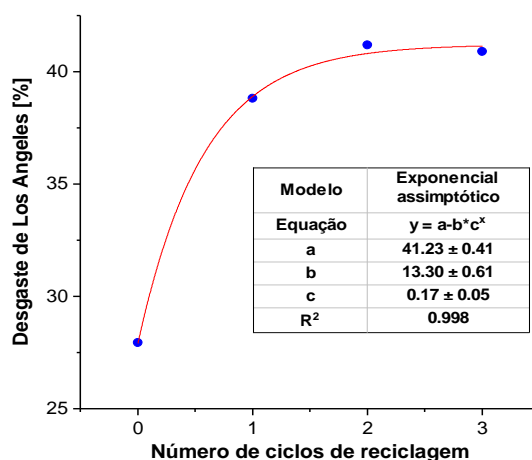


Figura 4.9 - Desgaste de Los Angeles em função do tipo de agregado

Este comportamento pode ser explicado pelo facto de o acréscimo de argamassa aderida dos AGR II para os AGR III ser relativamente pequeno e, conseqüentemente, não influenciar a resistência à abrasão do agregado, originando uma estabilização desta propriedade.

Adicionalmente, constata-se que todos os agregados analisados respeitam o requisito de 50% de desgaste máximo estipulado na especificação LNEC E-373 para a sua possível utilização na produção de betão estrutural.

4.2. Ensaio ao betão em estado fresco

Neste capítulo, pretende-se apresentar os resultados obtidos nos ensaios realizados ao betão em estado fresco, nomeadamente os de abaixamento e da massa volúmica em estado fresco. A determinação destas propriedades é fundamental para o controlo da produção dos betões, garantindo a não existência de uma significativa discrepância entre as diferentes amassaduras e uma adequada qualidade do produto final.

4.2.1. Abaixamento

O ensaio de abaixamento do cone de Abrams foi realizado em concordância com o especificado na norma NP EN 12350-2 (2009). Esta propriedade é medida exatamente após o término da amassadura, permitindo estimar a trabalhabilidade do betão produzido.

Nesta campanha experimental, de modo a que fosse possível efetuar uma comparação válida entre as diferentes propriedades dos diversos betões produzidos, a trabalhabilidade foi um parâmetro previamente fixado. Definiu-se que as amassaduras produzidas deveriam apresentar um abaixamento de 125 ± 15 mm, rejeitando-se qualquer exemplar que não cumprisse esta exigência. O intervalo de abaixamento de 125 ± 15 mm encontra-se compreendido na classe de consistência S3 (100 - 150 mm), a qual foi definida aquando da formulação da composição do betão.

Por cada betão produzido, foram realizadas duas amassaduras, tendo-se executado o ensaio para cada um das duas. No Quadro 4.7 encontram-se sumarizados os resultados de abaixamento obtidos, enquanto que no Anexo I encontram-se adicionalmente disponíveis as razões de a/c efetiva e aparente para cada uma das misturas.

Quadro 4.7 - Abaixamento das amassaduras produzidas

Abaixamento [mm]	BR	B1100%	B125%	B2100%	B225%	B3100%	B25%
1	132,0	135,0	130,0	125,0	125,0	127,0	114,0
2	117,0	122,0	122,0	117,0	114,0	130,0	126,0
Média	124,5	126,0	126,0	121,0	119,5	128,5	120,0

A variabilidade apresentada nos resultados entre amassaduras deve-se fundamentalmente à sensibilidade mostrada pelo betão aquando da sua produção, especialmente relativamente às condições climáticas (uma amassadura efetuada no período matinal, especialmente num dia de temperaturas quentes, apresenta variações significativas de trabalhabilidade em relação a uma amassadura efetuada no período da tarde). Apesar das dificuldades da índole experimental, verifica-se que em todos os betões produzidos foi satisfeito o intervalo de abaixamento fixado.

4.2.2. Massa volúmica do betão em estado fresco

A massa volúmica do betão em estado fresco foi determinada tendo em conta a norma NP EN 123506 (2002), em concordância com o procedimento apresentado em 3.10.2. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.8, sendo todos os cálculos intermédios apresentados no Anexo J.

Quadro 4.8 - Massa volúmica do betão em estado fresco para as amassaduras produzidas

Massa volúmica [kg/m ³]	BR	B1100%	B125%	B2100%	B225%	B3100%	B325%
1	2415,80	2313,80	2382,80	2285,80	2379,80	2261,80	2377,80
2	2411,80	2324,80	2387,80	2273,80	2387,80	2267,80	2373,80
Média	2413,80	2319,30	2385,30	2279,80	2383,80	2264,80	2375,80

A massa volúmica do betão em estado fresco diminui com o aumento da taxa de substituição de AGR por AGN e com o aumento do número de ciclos de reciclagem dos agregados reciclados. Para uma taxa de incorporação de 100% AGR, verifica-se que o B1100%, o B2100% e o B3100% apresentam respetivamente massas volúmicas em estado fresco 3,90%, 5,52% e 6,14% inferiores à do BR. Relativamente aos betões produzidos com 25% de taxas de incorporação de AGR, houve valores para a massa volúmica fresca 1,15%, 1,30% e 1,55% inferiores à do BR.

Como a massa volúmica do betão depende diretamente dos seus constituintes, era esperado que, com a maior taxa de incorporação de AGR, os quais apresentam uma menor massa volúmica do que os AGN, a massa volúmica do betão em estado fresco diminuísse. De facto, ao se estabelecer uma correlação linear entre a massa volúmica seca dos agregados e a massa volúmica fresca do betão, foi possível obter um R² de 0,997, indicador de uma excelente correlação (Figura 4.10). Como os agregados reciclados provenientes de ciclos de reciclagem superiores apresentam uma menor massa volúmica seca, é expectável que, quanto maior for o número de ciclos de reciclagem associado aos AGR, menor será a massa volúmica do betão em estado fresco. À semelhança do sucedido com a massa volúmica seca dos agregados, este comportamento apresenta uma tendência assintótica (Figura 4.11).

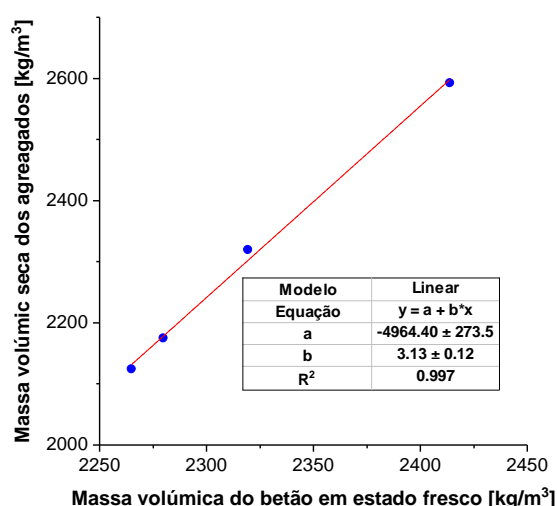


Figura 4.10 - Massa volúmica dos betões em estado fresco com 100% de taxas de substituição em função da massa volúmica seca dos AGR

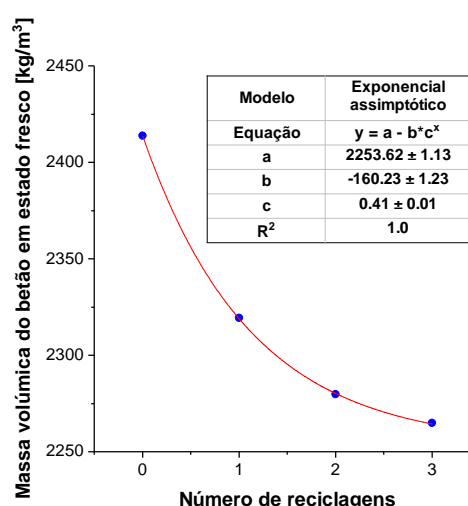


Figura 4.11 - Massa volúmica dos betões em estado fresco com 100% de taxas de substituição em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR

Como é possível verificar pelo modelo de correlação exponencial assintótico apresentado, existe uma correlação praticamente perfeita entre estas duas propriedades. Pode-se também concluir que três ciclos

de reciclagem não são suficientes para verificar uma estabilização desta propriedade, pois a massa volúmica do betão em estado fresco com 100% de taxa de incorporação de AGRIII (2264,90 kg/m³) não se encontra compreendida no valor do declive da assíntota (2253,62 ± 1,13).

Todos os betões produzidos apresentaram uma massa volúmica fresca compreendida no intervalo de 2000-2600 kg/m³ estabelecido pela norma NP EN 206-1 (2007) para betões normais.

4.3. Ensaio ao betão em estado endurecido

No presente subcapítulo, pretende-se apresentar os resultados dos estudos de desempenho em termos de durabilidade realizados ao betão em estado endurecido. São tratadas as seguintes propriedades: resistência à compressão, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, retração, resistência à carbonatação e resistência à penetração dos cloretos, e é feita uma comparação dos resultados para os diversos tipos de betão estudados. Por fim, este estudo tem como objetivo aferir a influência da reciclagem múltipla no desempenho em termos de durabilidade do betão e a respetiva viabilidade da utilização deste método para a produção de AGR para a produção de betão.

4.3.1. Resistência à compressão

Embora esta dissertação se foque no desempenho em termos de durabilidade, a resistência à compressão revela-se um parâmetro fundamental para a avaliação da qualidade do betão. Deste modo, são apresentados no Quadro 4.9 os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão realizados aos 7, 28 e 56 dias às diversas misturas em estudo. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011) e todos os resultados obtidos podem ser consultados no Anexo K.

Quadro 4.9 - Resistência à compressão aos 7,28 e 56 dias das amassaduras produzidas

Resistência à compressão [MPa]			
Betão	7 dias	28 dias	56 dias
BR	46,2	55,9	63,8
B125%	47,6	59,7	65,0
B225%	47,0	55,9	60,7
B325%	45,2	55,9	62,7
B1100%	44,0	54,1	59,0
B2100%	43,3	53,3	57,6
B3100%	40,3	48,6	56,2

4.3.2. Absorção de água por imersão

A determinação da capacidade de absorção por parte do betão foi estimada respeitando a especificação LNEC E 394 (1993). O ensaio foi realizado a três provetes de cada tipo de betão, sendo o resultado final aferido pela média dos resultados individuais. No Anexo L, podem ser encontrados todos os valores resultantes do estudo realizado.

A capacidade de absorção de água por imersão é influenciada principalmente pela porosidade aberta que o betão apresenta. Por sua vez, a porosidade aberta é função da porosidade do material utilizado para a produção do betão, pelo excesso de água existente na amassadura e pelo ar que fica retido no interior do betão. Devido à maior porosidade dos AGR, assim como à maior quantidade de água utilizada para a produção de betões com este tipo de agregados, espera-se que a absorção dos betões aumente com a taxa de incorporação e o número de reciclagens dos AGR. Todavia, pretende-se aferir

se, à semelhança de algumas das propriedades dos agregados reciclados, esta propriedade tende a estabilizar com o aumento do número de ciclos de reciclagem.

Os valores médios da absorção por imersão de cada tipo de betão, assim como a sua comparação com o do betão de referência (%_{BR}), são apresentados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Valores médios da absorção de água por imersão dos betões em estudo

Tipo de betão	Valor médio da absorção por imersão [%]	% _{BR} [%]
BR	13,45	-
B125%	15,26	13,46
B225%	15,69	16,65
B325%	16,06	19,41
B1100%	18,60	38,29
B2100%	21,67	61,12
B3100%	21,72	61,49

Através da sua análise, é possível verificar que, como esperado, esta propriedade aumenta com a taxa de incorporação de AGR e o número de ciclos de reciclagem. Constata-se que, nos betões com 100% de incorporação de AGR, a variação da capacidade de absorção diminui à medida que o número de ciclos de reciclagem aumenta. O betão B2100% apresenta uma absorção 3,07% superior à do betão B1100%, enquanto que o betão B3100% apresenta uma absorção apenas 0,05% superior à do B2100%. Verifica-se um comportamento semelhante nos betões com taxas de incorporação de 25% de AGR, existindo uma diferença de 0,43% do betão B125% para o B225% e de 0,37% do B225% para o B325%. Estes valores indiciam a tendência de estabilização desta propriedade em função do número de ciclos de reciclagem, a qual é confirmada pelos excelentes coeficientes de correlação obtidos aquando da utilização do modelo de correlação exponencial assintótico (Figura 4.12 e Figura 4.13). De facto, verifica-se que tanto o B325% como o B3100% apresentam valores de absorção compreendidos nos intervalos das respetivas assíntotas dos modelos de regressão, evidenciando que três ciclos de reciclagem são suficientes para que se verifique uma estabilização desta propriedade.

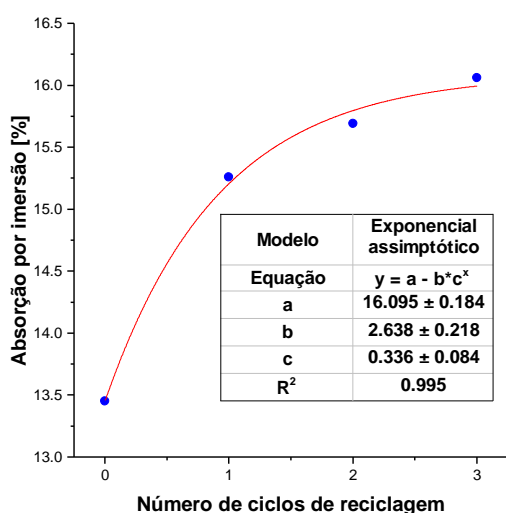


Figura 4.12 - Variação da absorção por imersão de betões com 25% de incorporação de AGR em função do número de reciclagens dos AGR

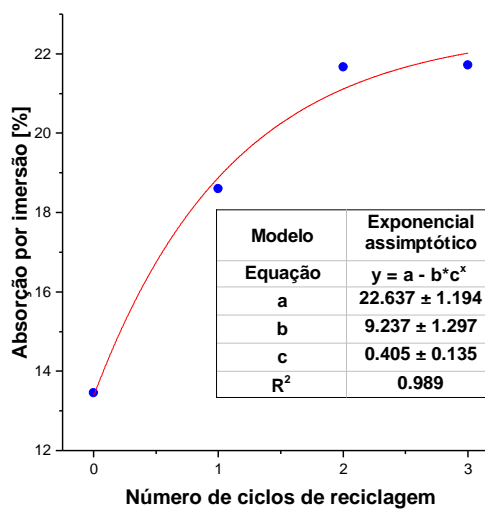


Figura 4.13 - Variação da absorção por imersão de betões com 100% de incorporação de AGR em função do número de reciclagens dos AGR

Também a absorção de água dos agregados apresentou um comportamento assintótico e, devido a esta propriedade permitir indiretamente aferir a porosidade acessível dos agregados, é possível que se verifique uma forte interdependência entre a absorção por imersão do betão e a absorção dos AGR.

Na Figura 4.14 e na Figura 4.15, é apresentada a influência da absorção de água dos AGR na absorção por imersão do betão com 25% e 100% de taxa de incorporação de AGR. A muito boa correlação obtida através do uso do modelo linear demonstra a esperada forte interdependência destas propriedades.

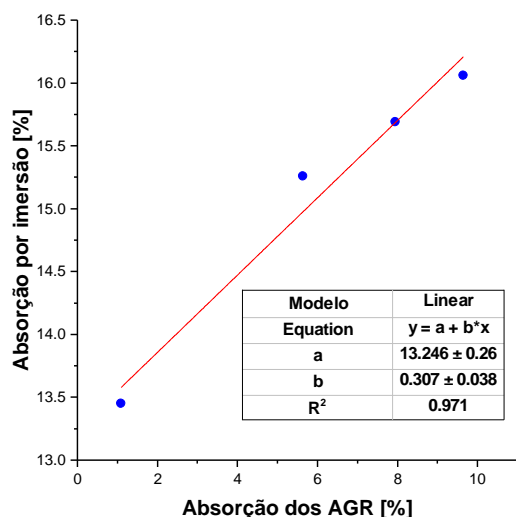


Figura 4.14 - Relação entre a absorção por imersão do betão com 25% de incorporação de AGR e a absorção dos AGR

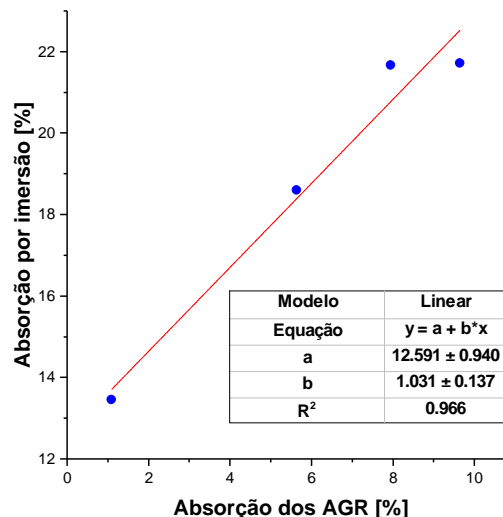


Figura 4.15 - Relação entre a absorção por imersão do betão com 100% de incorporação de AGR e a absorção dos AGR

4.3.3. Absorção de água por capilaridade

A capacidade de absorção de água por capilaridade foi determinada de acordo com a especificação LNEC E393 (1993), tendo sido o procedimento detalhado em 3.11.3.

No Quadro 4.11, são apresentados os resultados das absorções capilares por intervalo temporal de leitura (3, 6, 24, 48 e 72 horas), assim como as diferenças de grandeza entre os diversos betões e o betão de referência (%(72h)_{BR}). Todos os resultados obtidos por provete podem ser consultados no Anexo M.

Quadro 4.11 - Valores médios da absorção de água por capilaridade de cada tipo de betão em função do tempo do ensaio

Absorção de água por capilaridade [$\times 10^{-3}$ g/mm ²]					
Tipo de betão	3 horas	6 horas	24 horas	72 horas	%(72h) _{BR}
BR	1,00E-03	1,35E-03	2,36E-03	3,43E-03	-
B125%	1,84E-03	2,40E-03	4,09E-03	5,84E-03	70,26
B225%	1,86E-03	2,43E-03	4,15E-03	6,25E-03	82,22
B325%	1,95E-03	2,54E-03	4,33E-03	6,57E-03	91,55
B1100%	2,55E-03	3,40E-03	5,32E-03	7,53E-03	119,53
B2100%	3,06E-03	4,11E-03	6,55E-03	9,21E-03	168,51
B3100%	3,23E-03	4,30E-03	7,10E-03	10,70E-03	211,95

Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que todos os betões com AGR na sua composição apresentam uma absorção de água superior à do betão de referência. À semelhança da absorção por imersão, também a absorção por capilaridade é afetada pela quantidade adicional de água na

amassadura e pela porosidade dos agregados, originando-se uma perda de desempenho do betão ao nível desta propriedade com a incorporação de AGR na sua composição.

Na Figura 4.16 e na Figura 4.17, são apresentadas as representações gráficas da absorção por capilaridade em função do número de ciclos de reciclagem dos betões com 25% e 100% de taxas de incorporação de AGR. Da mesma forma que a absorção por imersão, obteve-se coeficientes de correlação muito bons para o modelo exponencial assintótico, evidenciando o mesmo comportamento.

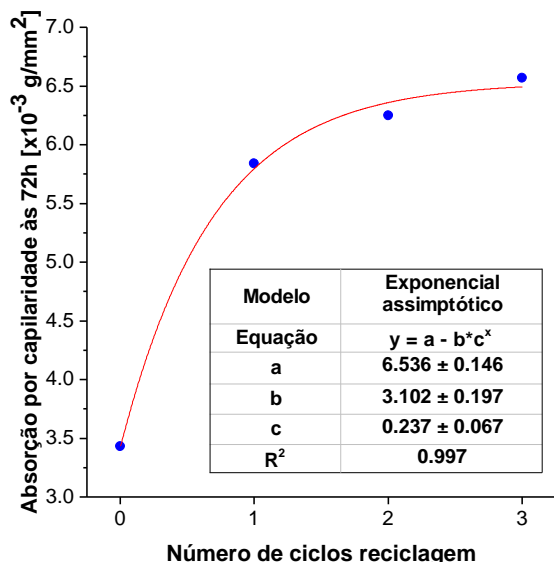


Figura 4.16 - Absorção capilar dos betões com 25% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR

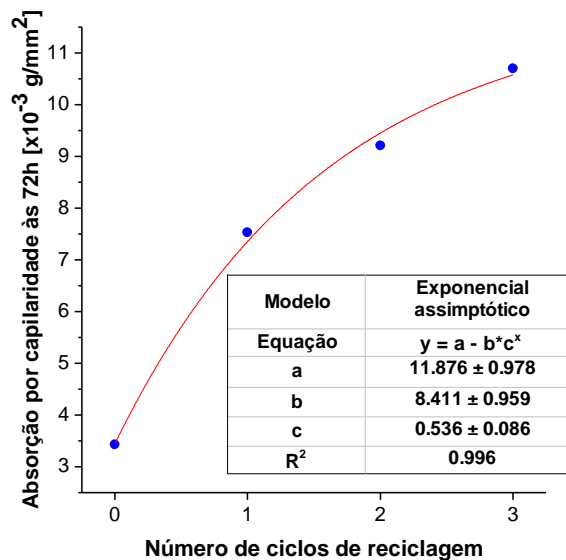


Figura 4.17 - Absorção capilar dos betões com 100% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR

Para os betões com taxas de incorporação de 25% de AGR, o valor de absorção capilar às 72 horas do betão B325% ($6,57 \times 10^{-3}$) encontra-se dentro do intervalo de erro da assíntota ($6,536 \times 10^{-3} \pm 0,146 \times 10^{-3}$), sugerindo a inexistência de variações significativas desta propriedade com a utilização de AGR originários de um número superior de ciclos de reciclagem. Todavia, constata-se que o mesmo fenómeno não ocorre para betões com 100% de incorporação de AGR na sua composição.

4.3.4. Retração

A avaliação da deformação por retração dos betões foi realizada de acordo com a metodologia definida pela especificação LNEC E 398 (1993), com base no procedimento apresentado em 3.11.1. As medições foram iniciadas no dia da desmoldagem do betão e foram efetuadas ao longo de uma duração de 91 dias. Não sendo o intervalo temporal entre medições definido pela especificação, considerou-se adequado realizar medições suficientes de modo a se possuir uma boa caracterização do andamento desta propriedade ao longo do tempo, tendo em atenção a sua maior variabilidade nos primeiros dias posteriormente à descofragem. No Anexo N, encontram-se todos os valores obtidos neste estudo e, na Figura 4.18, apresenta-se a deformação devida à retração de todos os betões em estudo ao longo dos 91 dias de duração do ensaio.

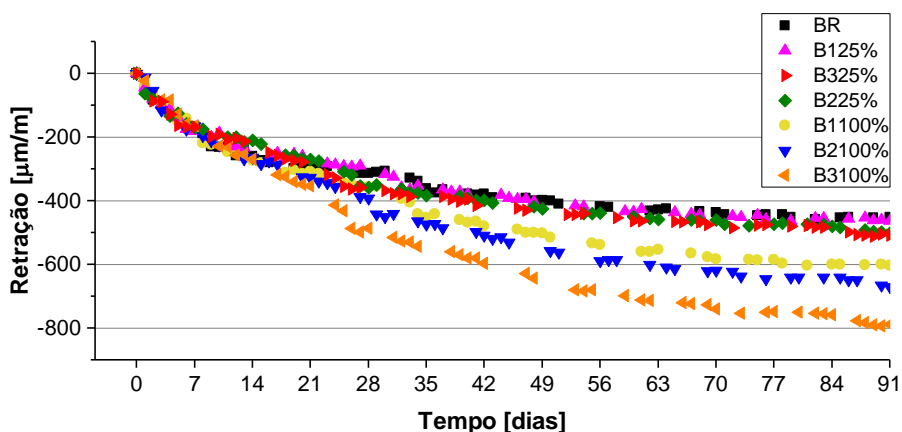


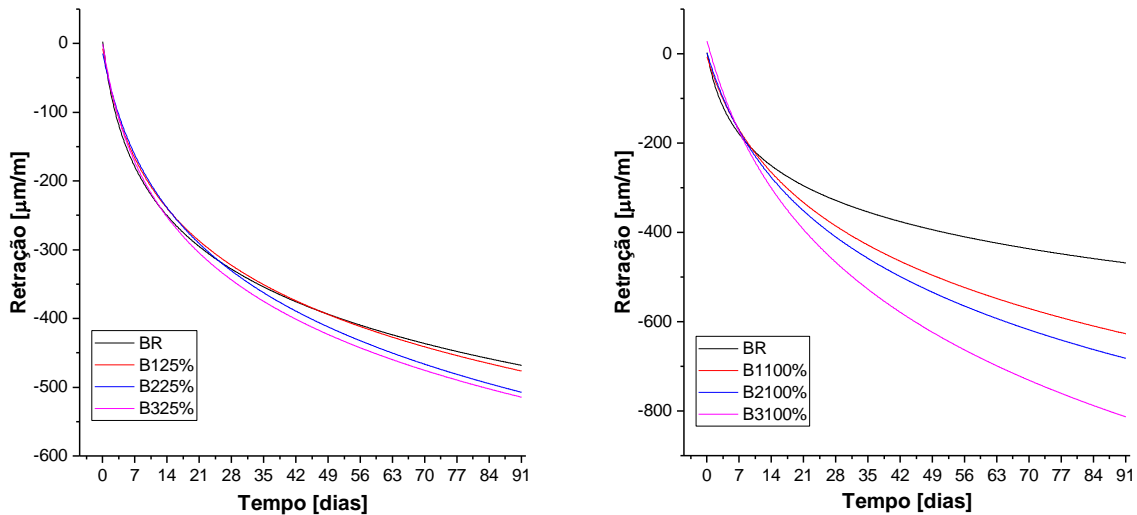
Figura 4.18 - Deformação devido à retração ao longo da duração do ensaio (91 dias)

A deformação por retração é essencialmente causada pela perda de água devido à secagem e à hidratação do cimento. A qualidade da matriz constituinte do betão possui uma forte influência nesta propriedade, pois quanto maior a sua rigidez maior será a sua capacidade de opor-se à deformação. A utilização de AGR na composição do betão implica não só uma diminuição da rigidez devido à maior quantidade de argamassa aderida como também a utilização de água adicional de modo a compensar a significativa absorção e perda de trabalhabilidade causada por este tipo de agregados. Deste modo, é expectável que esta propriedade apresente valores superiores em função do número de ciclos de reciclagem e da taxa de incorporação dos AGR.

Como pode ser observado na Figura 4.18, esta propriedade mostra uma evolução não linear em função do tempo, apresentando uma significativa variação nas primeiras idades do betão e uma tendência de estabilização com a evolução do ensaio. É também possível constatar que, como esperado, betões com AGR provenientes de um maior número de ciclos de reciclagem e com taxas de substituição superiores apresentam maiores valores de retração. Verifica-se que o B1100%, B2100% e B3100% apresentaram valores de retração 33,64%, 48,46% e 74,62% superiores ao BR. Simultaneamente, os betões B125%, B225% e B325% apresentaram uma diferença de 2,6%, 11,21% e 12,45% relativamente ao BR. Realça-se que a retração obtida nos primeiros 7 dias de idade foi essencialmente igual independentemente do tipo de betão. Tal ocorrência pode dever-se ao facto de os AGR, com a sua maior porosidade, reterem alguma água nos seus poros, libertando-a gradualmente nos primeiros dias e desta forma contribuindo para uma cura interna do provete.

Devido à natureza do andamento apresentado por esta propriedade, o melhor ajuste aos dados registados foi obtido com recurso ao modelo logarítmico, tendo sido obtidas correlações muito boas para todos os betões em estudo, como é possível verificar na Figura 4.19. O andamento das regressões obtidas permite também constatar que os 91 dias de duração do ensaio não foram suficientes para obter uma estabilização da evolução da deformação por retração.

Na Figura 4.20 e na Figura 4.21, são apresentadas as variações da retração em função do número de ciclos de reciclagem para betões com taxas de 25% e 100% deste tipo de agregados. Constata-se que bons coeficientes de correlação foram obtidos com o modelo exponencial assintótico. Todavia, é claro que o patamar de estabilização está longe de ser atingido, evidenciado que três ciclos de reciclagem não são suficientes para verificar a estabilização desta propriedade.



Tipo de betão	Equação	R ²
BR	$y = 92,964 - 123,699 \times \ln(x + 2,071)$	0,990
B125%	$y = 155,919 - 139,027 \times \ln(x + 3,221)$	0,990
B225%	$y = 243,876 - 164,585 \times \ln(x + 4,803)$	0,988
B325%	$y = 190,081 - 154,854 \times \ln(x + 3,427)$	0,988
B1100%	$y = 445,374 - 233,822 \times \ln(x + 6,921)$	0,992
B2100%	$y = 540,875 - 266,278 \times \ln(x + 7,571)$	0,993
B3100%	$y = 782,902 - 346,597 \times \ln(x + 8,818)$	0,991

Figura 4.19 - Regressões logarítmicas das deformações por retração ao longo do tempo de todos os betões

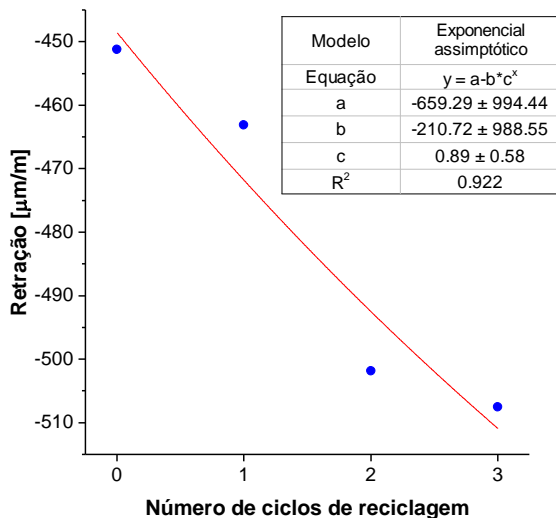


Figura 4.20 - Deformação por retração nos betões com 25% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR

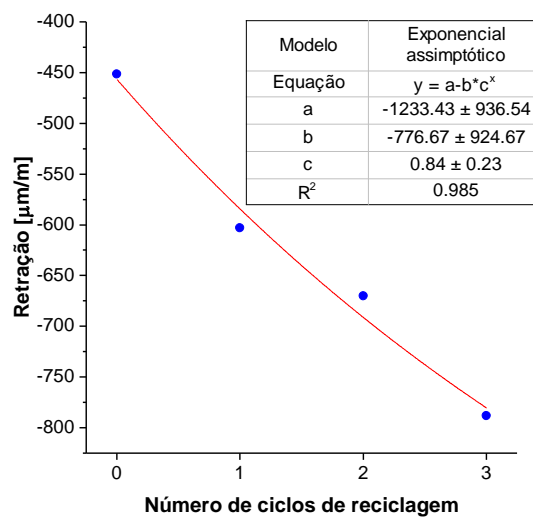


Figura 4.21 - Deformação por retração nos betões com 100% de taxa de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR

4.3.5. Resistência à carbonatação

Para a avaliação da resistência ao fenómeno de carbonatação, seguiu-se a metodologia apresentada na especificação LNEC E 391 (1993). O ensaio baseia-se na exposição acelerada de provetes de betões através de uma câmara com um teor de concentração de CO₂ de 5 ± 0,1 %, uma temperatura de 23 ± 3 °C e uma humidade relativa de 50 ± 5%. Os resultados dos ensaios foram determinados aos 7, 28, 56 e 91 dias de exposição.

Todos os resultados obtidos ao longo deste estudo são apresentados no Anexo O, encontrando-se no

Quadro 4.12 os valores médios da profundidade de carbonatação para os diversos betões em estudo.

Quadro 4.12 - Valores médios da profundidade da frente de carbonatação em todos os tempos do ensaio

Profundidade média da frente de carbonatação [mm]				
Tipo de betão	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
BR	1,34	2,29	4,30	5,91
B125%	2,07	2,49	4,72	6,73
B225%	1,89	2,38	4,38	7,18
B325%	2,49	2,77	5,11	7,33
B1100%	2,60	3,67	6,00	8,12
B2100%	3,22	5,24	6,93	9,74
B3100%	2,84	3,96	7,25	10,74

Como é possível verificar pela análise do quadro, e especialmente aos 91 dias, foi lida uma maior profundidade de carbonatação nos betões com a incorporação de AGR, em particular nos betões com 100% de incorporação. Este resultado era expectável, essencialmente devido à resistência à carbonatação ser condicionada pela resistência à difusão do betão, a qual é tanto maior quanto menor for a porosidade da matriz que o constitui. Novamente, o acréscimo da argamassa aderida aos agregados devido ao processo da reciclagem múltipla é a principal explicação para a redução de desempenho constatada.

No entanto, destaca-se que, aos 28 dias, o betão B2100% apresentou uma considerável maior profundidade da frente de carbonatação do que o B3100%. Não se encontrando uma explicação lógica para o sucedido, e tendo em consideração os resultados obtidos aos 56 e 91 dias, considera-se que possivelmente terá ocorrido uma anomalia experimental.

Como é possível verificar através da Figura 4.22, a velocidade de penetração apresenta-se superior nos primeiros 7 dias do ensaio. No entanto, ao contrário do afirmado por Yuan et al. (2010), não se observou uma diminuição da velocidade de penetração com o aumento da idade do betão, o que se poderá dever a uma deficiência do equipamento.

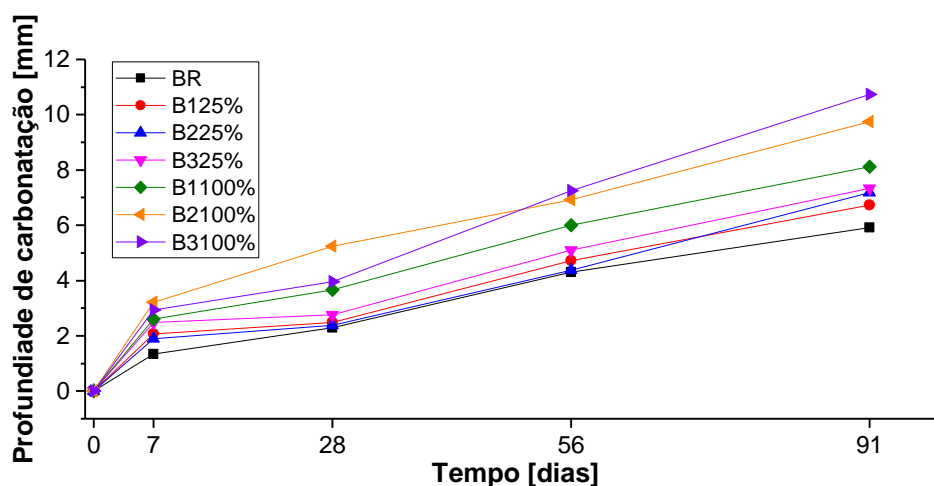


Figura 4.22 - Evolução da frente de carbonatação dos betões em estudo

Com o intuito de aferir a influência do aumento do número de ciclos de reciclagem na propriedade em estudo, procurou-se estabelecer uma correlação para os betões com 25% e 100% de taxa de incorporação de AGR. Na Figura 4.23 e na Figura 4.24, apresenta-se a variação da profundidade de carbonatação aos 91 dias em função do número de ciclos de reciclagem. A excelente correlação obtida através

da utilização do modelo exponencial assintótico evidencia uma tendência de estabilização desta propriedade. Todavia, nem o valor obtido para o B325%, nem o obtido para o B3100%, se encontram compreendidos dentro do intervalo de erro das respectivas assíntotas. Destaca-se que, à semelhança do sucedido para a absorção por capilaridade, os betões com 25% de taxa de incorporação de AGR evidenciam um comportamento mais acentuadamente assintótico do que os betões com 100% de incorporação de AGR, possivelmente sugerindo que se possa atingir uma variação desprezável da resistência à carbonatação com um menor número de ciclos de reciclagem.

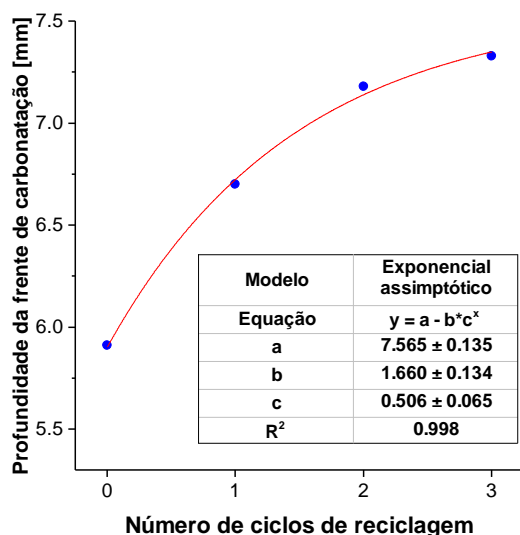


Figura 4.23 - Variação da profundidade da frente de carbonatação aos 91 dias em função do número de ciclos de reciclagem para betões com 25% de taxa de incorporação de AGR

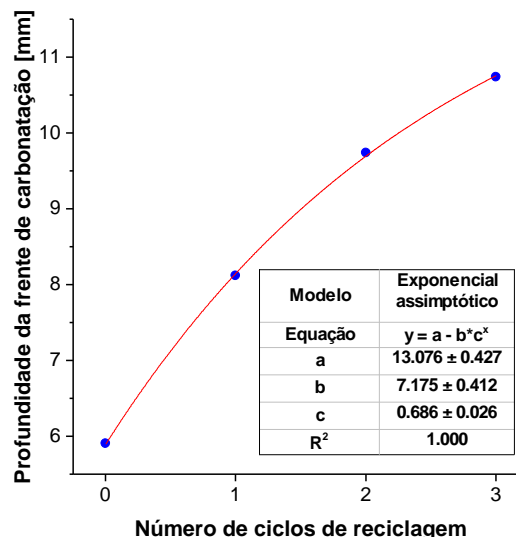


Figura 4.24 - Variação da profundidade da frente de carbonatação aos 91 dias em função do número de ciclos de reciclagem para betões com 100% de taxa de incorporação de AGR

4.3.6. Resistência à penetração dos cloretos

A avaliação da resistência à penetração dos cloretos por parte dos betões foi realizada de acordo com o processo descrito na especificação LNEC E 463 (2004). Esta propriedade é quantificada pelo coeficiente de difusão, o qual permite auferir a velocidade de penetração dos iões de cloro no betão. Foram ensaiados dois provetes por cada tipo de betão, aos 28 e 91 dias de idade, encontrando-se apresentados no Anexo P todos os resultados obtidos no estudo.

No Quadro 4.13, podem ser observados os valores médios do coeficiente de difusão de iões cloreto resultantes dos ensaios realizados. Em concordância com o levantamento bibliográfico, a resistência à penetração dos cloretos diminui em função da taxa de incorporação de AGR, tanto para 28 como para 91 dias de idade. Aos 28 e 91 dias de idade, betões com 25% de incorporação de AGR apresentaram coeficientes de difusão 6,5-15,0 % e 16,1-22,5 % superiores ao betão de referência. Simultaneamente, os betões com 100% de incorporação de AGR apresentaram resultados aos 28 dias e aos 91 dias 26,1-47,4 % e 22,7-43,6 % superiores relativamente ao betão de referência.

Analisando mais detalhadamente os valores obtidos, verifica-se que a resistência à penetração dos cloretos decresce com o aumento do número de ciclos de reciclagem dos AGR. Este resultado era expectável, tendo em consideração o aumento de argamassa aderida nos agregados.

Quadro 4.13 - Coeficiente de difusão médio obtido para os betões em estudo e comparação com o valor obtido para o betão de referência

Coeficiente de difusão médio [$\times 10^{-12}$ m ² /s]				
Tipo de betão	28 dias	%(28 dias) BR	91 dias	%(91 dias) BR
BR	13,60	-	12,55	-
B125%	14,85	6,5 %	14,57	16,1 %
B225%	15,59	14,6 %	14,77	17,7 %
B325%	15,64	15,0 %	15,38	22,5 %
B1100%	17,15	26,1 %	15,45	22,7 %
B2100%	19,06	40,1 %	17,29	37,8 %
B3100%	20,04	47,4 %	18,02	43,6 %

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados aos 91 dias de idade, nota-se uma melhoria no desempenho em relação aos 28 dias de idade. Este resultado está em concordância com o constatado por Kou e Poon (2012), que explicam este fenómeno através da maior quantidade de cimento hidratado presente num betão com um maior tempo de cura, consequentemente aumentando a resistência oferecida à penetração dos cloretos.

Na Figura 4.25 e na Figura 4.26 é apresentada a evolução do coeficiente de difusão para betões com taxas de 25% e 100 % de incorporação de AGR em função do número de ciclos de reciclagem, aos 28 e 91 dias de idade.

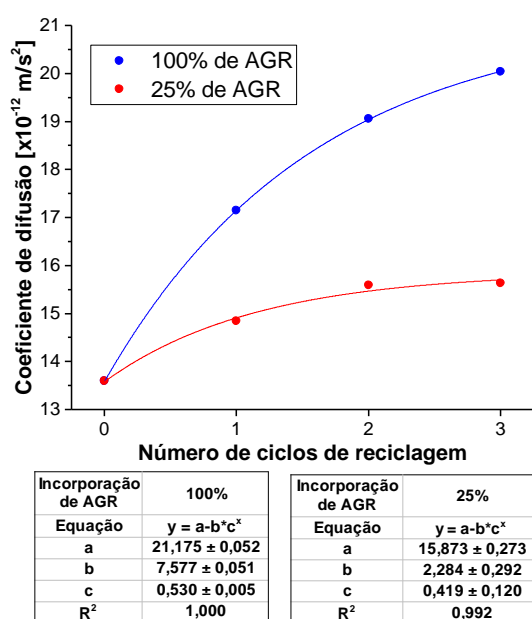


Figura 4.25 - Coeficiente de difusão dos iões de cloreto em betão com 28 dias de idade em função do número de ciclos de reciclagem

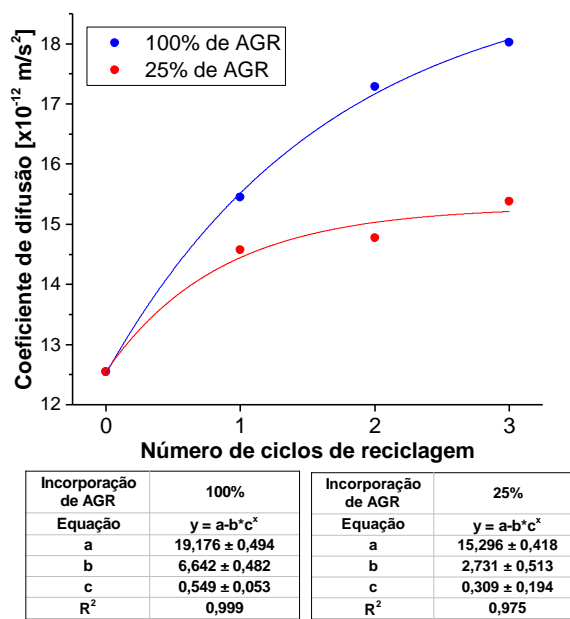


Figura 4.26 - Coeficiente de difusão dos iões de cloreto em betão com 91 dias de idade em função do número de ciclos de reciclagem

É novamente possível constatar uma tendência de estabilização, comportamento que é comprovado pelos muito bons coeficientes de correlação obtidos através da utilização do modelo exponencial assintótico. Inclusivamente, aos 28 dias constata-se que o resultado obtido para o B325% ($15,6 \times 10^{-12}$ m²/s) se encontra dentro do intervalo compreendido para o valor da assíntota ($15,873 \pm 0,273 \times 10^{-12}$). O mesmo é verificado para o B325% ($15,296 \pm 0,418 \times 10^{-12}$ m²/s) aos 91 dias, o que permite comprovar que três ciclos de reciclagem se mostraram suficientes para ocorrer a estabilização desta propriedade para betões produzidos com 25% de taxa de incorporação de AGR.

4.4. Conclusões

4.4.1. Propriedades dos agregados

Este estudo tem como principal objetivo auferir a influência da reciclagem múltipla do betão nas propriedades do AGR e do betão produzido com recurso a estes agregados. Tendo em consideração a perda de desempenho de betões produzidos com agregados reciclados e a natureza dos agregados provenientes do processo de reciclagem múltipla, não é expectável que os betões produzidos possam ser preconizados para a utilização em ambientes de exposição ambiental agressiva.

Adicionalmente, importa referir que o processo de trituração dos betões de origem ocorreu aproximadamente 28 dias após a sua betonagem. Este é um fator de elevada importância para as diversas características em estudo, tanto dos agregados como dos betões. De facto, quando os agregados reciclados provêm de betões submetidos a um maior tempo de cura, apresentam uma maior rigidez, menor porosidade e maior resistência, pelo que inevitavelmente os resultados obtidos tenderiam a melhorar.

Tendo em atenção a informação recolhida no levantamento bibliográfico realizado no capítulo 2, era esperado que os AGR apresentassem um desempenho, ao nível das suas características, inferior ao dos AGN. A principal explicação para esta tendência reside na constituição dos agregados grossos reciclados, que inclui partículas de AN com argamassa aderida. A menor massa volúmica e maior porosidade apresentada por esta pasta cimentícia têm uma forte influência na qualidade dos agregados, influenciando também o desempenho do betão produzido. Como, de acordo com a informação recolhida, a reciclagem múltipla origina agregados constituídos por partículas sucessivamente menores de agregados naturais e quantidades de argamassa aderida sucessivamente maiores, era expectável que a introdução deste tipo de agregados reduzisse ainda mais o desempenho. Todavia, com o acréscimo de reciclagens a quantidade de argamassa aderida tende a ser a mesma, devido ao facto de se desagregar mais facilmente durante a trituração, podendo-se refletir nas propriedades dos agregados e do betão.

Relativamente à massa volúmica, registou-se um menor valor para os AGR do que para os AGN. Os AGRI, AGRII e AGRIII apresentaram uma massa volúmica seca 10,56%, 16,12% e 18,06% inferior à dos AGN. Verifica-se que a diminuição do valor desta propriedade não apresenta um comportamento linear, constatando-se que, quanto maior o número de reciclagem, menor é a variação. Através do modelo de correlação efetuado, constata-se, no entanto, que três ciclos de reciclagem não são suficientes para garantir uma variação desprezável desta propriedade. Adicionalmente, salienta-se que apenas os AGRI apresentaram uma massa volúmica superior a 2200 kg/m³, valor mínimo estipulado pela especificação LNEC E 471 (2009) para a produção de betão estrutural.

Com o aumento da quantidade de argamassa aderida, a absorção de água apresentou-se superior em função do número de ciclos de reciclagem. Foi registada uma capacidade de absorção às 24 horas de 5,64 %, 7,95% e 9,64% para os AGRI, AGRII e AGRIII, respetivamente. A maior capacidade de absorção implica a necessidade de utilizar uma maior quantidade de água na amassadura de modo a que se possa manter a trabalhabilidade e a razão a/c efetiva. À semelhança da massa volúmica, apenas os

AGRI apresentaram uma absorção inferior a 7%, valor máximo estipulado pela especificação LNEC E 471 (2009) para a produção de betão estrutural.

O índice de forma revelou-se muito semelhante entre os AGN e AGR. Devido aos diferentes métodos de trituração dos agregados, era esperado que ocorresse uma diferença significativa. No entanto, salienta-se que os AGR apresentaram partículas de granulometrias inferiores mais lamelares do que os AGN. Devido à forma como a preparação da amostra a ensaiar foi feita (tendo em atenção a percentagem de cada granulometria dos AG na composição do betão), a maior presença de agregados de granulometrias maiores não permitiu que esta diferença se destacasse, resultando um índice de forma geral muito semelhantes entre todos os agregados reciclados e os agregados naturais.

A baridade, à semelhança da massa volúmica, apresentou-se menor em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR. A excelente correlação linear obtida ao se relacionar estas duas propriedades indica a forte interdependência existente. Também a baridade mostrou um comportamento assintótico em função do número de ciclos de reciclagem, verificando-se, no entanto, que três ciclos de reciclagem não se apresentam suficientes para conseguir a estabilização desta propriedade.

Relativamente ao desgaste de *Los Angeles*, expectavelmente os agregados reciclados apresentaram um desempenho inferior ao dos agregados naturais. O AGN, o AGRI, o AGRII e o AGRIII apresentam um valor de desgaste médio de 27,93%, 38,81%, 41,18% e 40,89%. Constatou-se que a diferença nos valores obtidos para os agregados reciclados, em particular entre os AGRII e os AGRIII, é relativamente pequena. Este resultado pode indicar uma tendência de estabilização da variação desta propriedade em função do número de ciclos de reciclagem. Esta conclusão é corroborada pelo excelente coeficiente de correlação ($R^2=0,998$) obtido com recurso ao modelo exponencial assintótico, revelando inclusivamente que os valores de LA obtidos para os AGRII e AGRIII se encontram dentro do intervalo da assíntota. Deste modo, conclui-se que três ciclos de reciclagem são suficientes para ocorrer a estabilização desta propriedade.

De uma forma geral, foi constatado um pior desempenho dos agregados reciclados em estudo relativamente aos AGN. Também foi possível constatar uma clara tendência de estabilização das propriedades analisadas em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR. No entanto, realça-se que apenas no caso do desgaste de *Los Angeles* é que três ciclos de reciclagem foram suficientes para verificar a estabilização da propriedade em estudo.

4.4.2. Propriedades do betão em estado fresco

Nesta campanha experimental, de modo a que fosse possível efetuar uma comparação válida entre as diferentes propriedades dos betões produzidos, fixou-se a trabalhabilidade pretendida em cada amassadura. Para o efeito, considerou-se um valor de abaixamento de cone de Abrams de 125 ± 15 mm, o qual foi respeitado em todas as amassaduras produzidas.

De modo a compensar a significativa absorção de água apresentada pelos AGR e evitar uma significativa perda de trabalhabilidade ou alteração da razão a/c efetiva, foi adicionada água à amassadura. A quantidade de água adicionada foi determinada em função da absorção dos AGR durante o tempo de duração considerado para a amassadura (15 minutos).

A massa volúmica do betão em estado fresco apresentou uma relação inversamente proporcional tanto à taxa de substituição de AGN por AGR, como ao número de ciclos de reciclagem. Este comportamento segue a tendência apresentada pela massa volúmica seca dos AGR, a qual é confirmada pela muito boa correlação linear ($R^2=0,997$) apresentada entre estas duas propriedades. À semelhança de algumas das propriedades dos agregados, também a massa volúmica do betão em estado fresco apresenta uma tendência assintótica. Não foi, no entanto, possível constatar uma estabilização desta propriedade com apenas três ciclos de reciclagem.

4.4.3. Propriedades em termos de durabilidade do betão endurecido

No que diz respeito ao desempenho em termos de durabilidade do betão, verificou-se que todas as propriedades foram afetadas pela incorporação de AGR na sua composição. Inclusivamente observou-se que, em geral, quanto maior for o número de ciclos de reciclagem dos AGR, maior será a perda de desempenho apresentada pelo betão.

A absorção de água por imersão apresentou valores significativamente superiores para betões com 100% de taxa de incorporação de AGR do que para 25%. O B125%, o B225% e o B325% apresentam valores de absorção 13,46%, 16,65% e 19,41% superiores relativamente ao BR. Por sua vez, o B1100%, o B2100% e o B3100% apresentaram absorções 38,29%, 61,12% e 61,49% superiores relativamente ao BR. Adicionalmente, o modelo de correlação exponencial assintótico constatou que os valores de absorção por imersão dos betões B325% e B3100% se encontram dentro dos intervalos das respetivas assíntotas, evidenciando que três ciclos de reciclagem são suficientes para que esta propriedade estabilize.

À semelhança da absorção por imersão, a absorção por capilaridade apresentou piores resultados para betões produzidos com a utilização de AGR. O número de ciclos de reciclagem também teve uma forte influência na capacidade de absorção apresentada pelo betão, obtendo-se sempre resultados superiores para superiores números de ciclos de reciclagem. Destaca-se que, apesar de tanto os betões com 25% como os com 100% de taxa de incorporação de AGR apresentaram comportamentos assintóticos em função do número de ciclos de reciclagem, apenas o B325% apresenta um valor de absorção capilar compreendido dentro da assíntota obtida através do modelo de correlação.

Ao nível da retração, observou-se que três ciclos de reciclagem não se demonstraram suficientes para verificar a estabilização desta propriedade em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR.

Como esperado, esta propriedade apresentou um andamento logarítmico, evidenciado as maiores deformações devido a este fenómeno nas primeiras idades do betão. À medida que o tempo passa, um equilíbrio higrométrico é atingido, resultando numa estabilização das deformações por retração. Observou-se também que as deformações nos primeiros dias de idade dos betões produzidos com agregados reciclados apresentaram valores praticamente iguais aos do betão de referencia. Este fenómeno pode ser explicado pelo processo de cura interno desencadeado pela maior quantidade de água absorvida pelo AGR.

Relativamente à resistência à carbonatação, observa-se que a taxa de incorporação de AGR na constituição do betão afeta o desempenho do mesmo. Inclusivamente, foram lidos maiores valores médios de profundidades da frente de carbonatação em betões com a incorporação de AGR provenientes de um superior número de ciclos de reciclagem do betão. Salienta-se que, contrariamente ao verificado no levantamento bibliográfico efetuado, não se constatou uma diminuição de velocidade de penetração com o aumento da idade do betão. Adicionalmente, ao se analisar a influência do número de ciclos de reciclagem dos AGR nesta propriedade, concluiu-se que três ciclos de reciclagem não são suficientes para se conseguir uma estabilização da resistência à carbonatação.

Em relação à resistência à penetração dos cloretos constatou-se que betões produzidos com AGR provenientes de um ciclo de reciclagem superior apresentaram um coeficiente de difusão superior. A taxa de incorporação de AGR também teve influência na qualidade apresentada pelo betão, verificando-se que betões com 100% de taxa de substituição de AGN apresentaram um desempenho inferior relativamente a betões com 25% de taxa de substituição de AGN. Adicionalmente constata-se que todos os betões estudados apresentam uma melhoria de desempenho com o aumento da idade de cura. Este resultado encontra-se em concordância com o constatado por Kou e Poon (2012), que explicam este fenómeno através da maior quantidade de cimento hidratado presente num betão com um maior tempo de cura, conseqüentemente aumentando a resistência oferecida à penetração dos cloretos.

Por fim, constata-se que o coeficiente de difusão dos cloretos apresenta uma evolução assintótica em função do número de ciclos de reciclagem dos AGR. Inclusivamente, tanto aos 28 como aos 91 dias, o B325% apresenta resultados compreendidos no intervalo de erro da assíntota obtida com recurso ao modelo exponencial assintótico.

De uma forma geral é consensual que a utilização de AGR na constituição do betão diminui o seu desempenho em termos de durabilidade. Neste trabalho, também se constatou que o aumento da quantidade de argamassa aderida em função do número de ciclos de reciclagens amplifica este problema. Adicionalmente, era pretendido constatar se, a partir dos três ciclos de reciclagem, o incremento de argamassa aderida que constitui os agregados se revelava desprezável, originando a estabilização das propriedades e características do betão. Este resultado apenas foi verificado na absorção por imersão, na resistência à penetração dos cloretos e na absorção capilar e para os betões com 25% de taxa de incorporação de AGR.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Considerações finais

O grande desenvolvimento tecnológico e industrial experienciado nas últimas décadas tem sido acompanhado por uma utilização irresponsável dos recursos naturais disponíveis no planeta. A atividade da Construção apresenta-se como uma das atividades mais impactantes para com o meio ambiente, tanto pelos recursos energéticos que os seus processos exigem como pelos desperdícios que gera. A União Europeia, identificando o problema em causa, estabeleceu em 2008 a Diretiva 2008/98/CE, estipulando que até 2020 todos os membros da Comunidade Europeia devem atingir um mínimo de 70% de reaproveitamento de resíduos da construção e demolição. É, portanto, de extrema importância estudar e desenvolver soluções que permitam um reaproveitamento mais eficiente dos resíduos da construção e demolição, apresentando-se a reciclagem múltipla como uma possível solução.

Face à muito escassa bibliografia disponível sobre a temática, esta dissertação foi desenvolvida com o intuito de aferir, em termos de desempenho de durabilidade, a influência da utilização de agregados grossos de betão provenientes da reciclagem múltipla na produção do betão. Para o efeito foram efetuados três ciclos de betonagem e reciclagem, permitindo obter agregados reciclados provenientes de um, dois e três ciclos de reciclagem. Estes agregados foram posteriormente utilizados para produzir 6 misturas distintas de betão as quais foram avaliadas em termos de desempenho de durabilidade e comparadas com um betão de referência produzido exclusivamente com agregados naturais.

Posto isto, neste último capítulo pretende-se evidenciar as principais conclusões retiradas do estudo experimental desenvolvido.

5.2. Conclusões gerais

Ao longo desta campanha experimental foram realizados diversos ensaios com o intuito de estudar os agregados utilizados e as diferentes misturas de betões produzidas. É importante realçar que a inexistência de bibliografia sobre este tema tornou a comparação dos resultados obtidos extremamente difícil ou mesmo impossível em alguns dos casos.

Relativamente aos agregados foram realizados os seguintes ensaios: análise granulométrica, absorção de água, massa volúmica, baridade, índice de forma e desgaste de Los Angeles. Previsivelmente, constatou-se que os agregados reciclados apresentaram um desempenho inferior relativamente aos agregados naturais. A menor qualidade apresentada por estes tipos de agregados deve-se essencialmente à argamassa aderida que os constitui, que ao apresentar uma maior porosidade influencia diretamente propriedades como a massa volúmica, baridade, capacidade de absorção de água e desgaste de Los Angeles. Adicionalmente, verificou-se que esta perda de desempenho aumenta com o número de ciclos de reciclagem, evidenciando a maior quantidade de argamassa aderida existente na constituição de agregados provenientes de ciclos de reciclagem superiores. Todavia, constata-se que a variação das propriedades apresenta um comportamento assintótico, essencialmente devido à estabilização da quantidade de argamassa aderida presente nos agregados reciclados.

Isto porque os agregados reciclados provenientes de um ciclo de reciclagem apresentam fragmentos de agregados naturais com argamassa aderida. A produção de betões com 100% de taxas de incorporação deste tipo de agregado gera um betão com uma matriz constituída por uma maior quantidade de argamassa e por fragmentos de agregados grossos naturais de menores dimensões. Por sua vez, a trituração deste betão irá originar os agregados de segundo ciclo, os quais, em relação aos agregados de primeiro ciclo, possuem fragmentos de agregados grossos naturais mais pequenos e uma maior quantidade de argamassa aderida. A continuação deste processo de reciclagem-betonagem irá conduzir à estabilização da quantidade de argamassa aderida, e conseqüentemente à estabilização das propriedades dos agregados reciclados obtidos.

Apesar deste fenómeno ser comum a todas as propriedades estudadas, apenas no Desgaste de Los Angeles foi possível constatar que três ciclos de reciclagem foram suficientes para se conseguir a estabilização do valor de abrasão obtido. No Quadro 5.1 são apresentados de forma resumida os resultados dos ensaios realizados aos agregados.

Quadro 5.1 - Resultados obtidos nas propriedades dos agregados

Propriedade	AGN	AGRI	AGR II	AGR III
Massa volúmica do material impermeável [kg/m ³]	2668,40	2668,06	2629,87	2672,23
Massa volúmica seca [kg/m ³]	2593,04	2319,28	2175,01	2124,80
Massa volúmica saturada com superfície seca [kg/m ³]	2621,28	2450,00	2347,97	2329,65
Baridade [kg/m ³]	1355,1	1132,1	1034,4	990,1
Absorção de água (24h) [%]	1,09	5,64	7,95	9,64
Desgaste de LA [%]	27,93	38,81	41,18	40,89
Índice de forma [%]	18	18	19	18

O betão em estado fresco foi avaliado relativamente ao abaixamento e à massa volúmica. A trabalhabilidade do betão foi um parâmetro previamente definido, tendo-se fixado o intervalo de abaixamento de 125 ± 15 mm para cada amassadura produzida. Todos os betões produzidos cumpriram este requisito. Relativamente à massa volúmica do betão em estado fresco, à semelhança da massa volúmica dos agregados reciclados, apresentou um comportamento decrescente assintótico em função do aumento do número de ciclos de reciclagem. No entanto, não foi possível identificar a estabilização desta propriedade com apenas três ciclos de reciclagem.

Em relação ao betão em estado endurecido foram efetuados ensaios para determinar a capacidade de absorção de água por capilaridade e imersão, a retração, a resistência à carbonatação e a resistência à penetração dos cloretos. Os resultados obtidos encontram-se sumarizados no Quadro 5.2.

Verificou-se que em todas as misturas produzidas, o desempenho em termos de durabilidade de betões com taxas de incorporação de agregados reciclados apresentou-se inferior ao betão de referência (produzido exclusivamente com agregados naturais). A perda de qualidade em termos de durabilidade demonstrou-se tanto maior quanto maior a taxa de substituição de agregado grossos naturais. Adicionalmente, à semelhança dos agregados reciclados, também nos betões produzidos constatou-se uma maior perda de qualidade nas misturas com incorporação de agregados reciclados provenientes de ciclos de reciclagem superiores.

Quadro 5.2 - Resultados obtidos nos ensaios de durabilidade efetuados aos betões

Propriedade	BR	B125%	B225%	B325%	B1100%	B2100%	B3100%
Massa volúmica [kg/m ³]	2413,80	2385,30	2383,30	2377,80	2319,30	2279,80	2264,80
Absorção por imersão [%]	13,45	15,26	15,69	16,06	18,60	21,67	21,72
Absorção por capilaridade, 72 h [x10 ⁻³ g/mm ²]	3,43	5,84	6,25	6,57	7,53	9,21	10,70
Retração aos 91 dias [µm/m]	-451,3	-463,1	-501,9	-507,5	-603,1	-670,0	-788,1
Profundidade de carbonatação aos 91 dias [mm]	5,91	6,73	7,18	7,33	8,12	9,74	10,74
Coefficiente difusão dos cloretos aos 91 dias [x10 ⁻¹² m ² /s]	12,55	14,57	14,77	15,38	15,45	17,29	18,02

Em todas as propriedades estudadas é possível verificar o mesmo comportamento assintótico verificado nos estudos realizados aos agregados. De facto, constatou-se que três ciclos de reciclagem foram suficientes para verificar a estabilização de propriedades como a capacidade de absorção de água por imersão para betões com 25 e 100% de taxa de substituição de agregados naturais, a absorção capilar e a resistência à penetração dos cloretos para betões com 25% de taxa de substituição de agregados naturais.

O Quadro 5.3 apresenta, para cada um dos estudos realizados, a razão entre o valor da assíntota traçada com recurso ao modelo de regressão exponencial assintótico e o resultado experimental obtido para o betão de referência. Esta comparação permite quantificar, de acordo com os resultados experimentais obtidos, a diminuição de desempenho esperada quando a propriedade estudada atingir um patamar de estabilização em função do número de ciclos de reciclagem.

Quadro 5.3 - Comparação dos valores das assíntotas traçadas com o modelo exponencial assintótico e os resultados experimentais obtidos para o BR

Ensaio	Taxa de incorporação de AGR III	
	25%	100%
Absorção por imersão	1,19	1,61
Absorção por capilaridade	1,92	3,46
Retração [91 dias]	1,30	1,57
Resistência à carbonatação [91 dias]	1,03	1,22
Resistência à penetração dos cloretos [91 dias]	1,23	1,53

5.3. Desenvolvimentos futuros

Este estudo permitiu obter um conhecimento mais profundo sobre a influência da reciclagem múltipla nas propriedades dos agregados grossos e dos betões produzidos com os mesmos. Face à muito escassa bibliografia existente sobre este tema, considera-se que este trabalho foi pioneiro nessa vertente. No entanto, admite-se que este é apenas “o primeiro passo” na averiguação da viabilidade desta solução para o reaproveitamento de resíduos da construção e demolição, realçando-se a importância de prosseguir com novas investigações.

Neste contexto, as seguintes propostas são apresentadas como possíveis desenvolvimentos futuros:

- influência da quantidade e qualidade da argamassa aderida nas propriedades dos AGR provenientes da reciclagem múltipla do betão;

- análise microscópica e mineralógica de agregados provenientes de múltiplos ciclos de reciclagem de betão;
- influência da utilização de super-plastificante, sílica de fumo e cinzas volantes na produção de betão com recurso a AGR provenientes da reciclagem múltipla do betão;
- estudo da viabilidade económica da reciclagem múltipla do betão;
- estudo da viabilidade económica da produção de betão com super-plastificante, sílica de fumo e agregados grossos reciclados provenientes da reciclagem múltipla do betão;
- qualidade dos AGR provenientes da reciclagem múltipla de betão estrutural de alta resistência;
- desempenho mecânico e de durabilidade de betões produzidos com recurso a agregados finos reciclados provenientes da reciclagem múltipla de betão.

Referências bibliográficas

Artigos / Livros / Documentos / Dissertações

- Amorim, P., de Brito, J., & Evangelista, L., *Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability*, ACI Materials Journal, 109, nº 2, pp. 195-204, 2012.
- Appleton, J., Marchão, C., Camara, J., Almeida, J., Costa, A. & Cruz, S., *Apontamentos de apoio às aulas de Betão Armado e Pré-esforçado*, IST, Lisboa, 2003.
- BCS, J., *Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete*, Concrete Journal, 16, nº 7, pp. 18-31, 1978.
- Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R., *Failure mechanism of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, 22, nº 7, pp. 1500-6, 2008.
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V., *Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load*, Construction and Building Materials, 25, nº 1, pp. 69-80, 2011.
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P., *Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete*, Construction and Building Materials, 24, nº 3, pp. 390-5, 2010.
- Coutinho, A. S., *Fabrico e propriedades do betão*, Vol. I e II, 2ª edição, LNEC, Lisboa, 1988.
- De Brito, J., Gonçalves, A. P., & dos Santos, J. R., *Recycled concrete production. Multiple recycling of concrete coarse aggregates*, Revista Ingeniería de Construcción, 21, nº 1, pp. 33-40, 2011.
- De Brito, J., & Saikia, N., *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste*, 1ª edição, Springer Science & Business Media, 2012, 1447145402.
- De Juan, M. S., *Study on the use of recycled aggregate in structural concrete production*, Dissertação para a obtenção de grau de Doutoramento, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.
- De Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A., *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*, Construction and Building Materials, 23, nº 2, pp. 872-7, 2009.
- De Schutter, G., & Audenaert, K., *Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration*, Materials and Structures, 37, nº 9, pp. 591-6, 2004.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M., *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*, Cement and Concrete Research, 37, nº 5, pp. 735-42, 2007.
- Ferreira, L., Brito, J. d., & Barra, M., *Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties*, Magazine of Concrete Research, 63, nº 8, pp. 617-27, 2011.
- Fonseca, N., de Brito, J., & Evangelista, L., *The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste*, Cement and Concrete Composites, 33, nº 6, pp. 637-43, 2011.
- Gomes, M., & de Brito, J., *Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance*, Materials and Structures, 42, nº 5, pp. 663-75, 2009.
- Gómez-Soberón, J. M. V., *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study*, Cement and Concrete Research, 32, nº 8, pp. 1301-11, 2002.
- Gonçalves, P. C. M., *Betão com agregados reciclados. Análise comentada da legislação existente*, Dissertação para a obtenção de grau de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

- González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F., *Shear strength of recycled concrete beams*, Construction and Building Materials, 21, nº 4, pp. 887-93, 2007.
- González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F., *Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties*, Building and Environment, 43, nº 4, pp. 429-37, 2008.
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Eiras-López, J., & Seara-Paz, S., *Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete*, Materials and Structures, 44, nº 10, p. 1759, 2011.
- Hansen, & Narud, *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate*, Concrete International, 5, nº 01, pp. 79-83, 1983.
- Hansen, *Recycling of demolished concrete and masonry*, Vol. 6, 2ª edição, CRC Press, 2004, 0419158200.
- Huda, S. B., & Alam, M. S., *Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete*, Construction and Building Materials, 65, pp. 574-82, 2014.
- Kashino, N., & Takahashi, Y. (1988). *Experimental studies on placement of recycled aggregate concrete*. Paper presented at the Proceedings of the second international RILEM symposium on reuse of demolition waste, Tokyo.
- Katz, A., *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*, Cement and Concrete Research, 33, nº 5, pp. 703-11, 2003.
- Kou, S. C., & Poon, C. S., *Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate*, Construction and Building Materials, 35, pp. 69-76, 2012.
- Kreijger, P. C., *Hergebruik van bouw-en sloopafval als toeslagmateriaal in beton*, 1983.
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z., *Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties*, Construction and Building Materials, 26, nº 1, pp. 565-73, 2012.
- Leite, M. B., *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*, Dissertação para a obtenção de grau de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- Leng, F., Feng, N., & Lu, X., *An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete*, Cement and Concrete Research, 30, nº 6, pp. 989-92, 2000.
- Levy, S. M., & Helene, P., *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*, Cement and Concrete Research, 34, nº 11, pp. 1975-80, 2004.
- Liang, J., Wu, W., & Tian, Y. (2011). *Study on the recycling of recycled aggregated concrete*. Paper presented at the International Conference on Remote Sensing, Nanjing Shuguang International Hotel, Nanjing.
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K., *Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete*, Materials and Structures, 33, nº 9, p. 574, 2000.
- López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M. A., & López-Colina, C., *Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties*, Waste management, 29, nº 12, pp. 3022-8, 2009.
- Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S., *Recycled concrete as aggregate for structural concrete production*, Sustainability, 2, nº 5, pp. 1204-25, 2010.

- Malhotra, V. M., *Testing hardened concrete: nondestructive methods*, edição, American Concrete Institute Monograph 9, Detroit, Michigan, 1976.
- Marie, I., & Quiasrawi, H., *Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates*, Journal of Cleaner Production, 37, pp. 243-8, 2012.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I., *Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08*, Construction and Building Materials, 25, nº 2, pp. 742-8, 2011.
- Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., & Pedro, D., *Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers*, Journal of materials in civil engineering, 26, nº 7, 2014.
- Olorunsogo, F. T., & Padayachee, N., *Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes*, Cement and Concrete Research, 32, nº 2, pp. 179-85, 2002.
- Otsuki, N., Miyazato, S.-i., & Yodsudjai, W., *Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete*, Journal of materials in civil engineering, 15, nº 5, pp. 443-51, 2003.
- Padmini, A. K., Ramamurthy, K., & Mathews, M. S., *Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, 23, nº 2, pp. 829-36, 2009.
- Pedro, D., de Brito, J., & Evangelista, L., *Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process*, Materials and Structures, 48, nº 12, pp. 3965-78, 2015.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L., *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates*, Construction and Building Materials, 18, nº 6, pp. 461-8, 2004.
- Rao, G. A., & Prasad, B. K. R., *Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength*, Cement and Concrete Research, 32, nº 2, pp. 253-7, 2002.
- Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V., *Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete*, Materials and Structures, 44, nº 1, pp. 205-20, 2011.
- Rodrigues, F., Evangelista, L., & Brito, J. d., *A new method to determine the density and water absorption of fine recycled aggregates*, Materials Research, 16, nº 5, pp. 1045-51, 2013.
- Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T., & Taylor, A. H., *Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate*, Cement and Concrete Research, 31, nº 5, pp. 707-12, 2001.
- Salesa, Á., Pérez-Benedicto, J. A., Colorado-Aranguren, D., López-Julián, P. L., Esteban, L. M., Sanz-Baldúz, L. J., Sáez-Hostaled, J. L., Ramis, J., & Olivares, D., *Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry*, Journal of Cleaner Production, 141, pp. 248-55, 2017.
- Silva, R. V., de Brito, J., Neves, R., & Dhir, R., *Prediction of chloride ion penetration of recycled aggregate concrete*, Materials Research, 18, nº 2, pp. 427-40, 2015a.
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K., *Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review*, Construction and Building Materials, 77, pp. 327-39, 2015b.
- Sri, R., & Tam, C. T., *Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate*, Magazine of Concrete Research, 37, nº 130, 1985.

- Tam, V. W. Y., Wang, K., & Tam, C. M., *Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis*, Journal of Hazardous Materials, 152, nº 2, pp. 703-14, 2008.
- Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P., *Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates*, Construction and Building Materials, 22, nº 8, pp. 1812-9, 2008.
- Vieira, J. P. B., Correia, J. R., & de Brito, J., *Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates*, Cement and Concrete Research, 41, nº 5, pp. 533-41, 2011.
- Xiao, J., Lei, B., & Zhang, C., *On carbonation behavior of recycled aggregate concrete*, Science China Technological Sciences, 55, nº 9, pp. 2609-16, 2012a.
- Xiao, J., Li, W., Fan, Y., & Huang, X., *An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011)*, Construction and Building Materials, 31, pp. 364-83, 2012b.
- Yanagibashi, K., Yonezawa, T., Arakawa, K., & Yamada, M. (2002). *A new concrete recycling technique for coarse aggregate regeneration process*. Paper presented at the Sustainable concrete construction, University of Dundee, Dundee.
- Yang, K.-H., Chung, H.-S., & Ashour, A. F., *Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties*, ACI Materials Journal, 105, nº 3, pp. 289-96, 2008.
- Yoshikane, T., *Present status of recycling waste cement concrete in Japan*, Private Communication Research Laboratory, Taiyu Kensetsu Co. Ltd, 1988.
- Yuan, C. F., Luo, Z., Ding, T. F., Wang, H., Hao, Y., & Zhang, H. L., *Orthogonal experiment of carbonation resistance for recycled aggregate concrete*, Journal of Wuhan University of Technology, 21, pp. 9-12, 2010.
- Zega, C. J., Villagran-Zaccardi, Y. A., & Di Maio, A. A., *Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates*, Materials and Structures, 43, nº 1-2, pp. 195-202, 2010.
- Zhu, P., Zhang, X., Wu, J., & Wang, X., *Performance degradation of the repeated recycled aggregate concrete with 70% replacement of three-generation recycled coarse aggregate*, Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 31, nº 5, pp. 989-95, 2016.

Normas / Especificações de ensaios

- NP EN 933-1 (2000)** - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração”, IPQ.
- NP EN 933-2 (1999)** - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica - Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas”, IPQ.
- NP EN 933-4 (2002)** - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma”, IPQ.
- NP EN 1097-2 (2011)** - “Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 2: Método de determinação da resistência à fragmentação”, IPQ.
- NP EN 1097-3 (2002)** - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios”, IPQ.

NP EN 1097-6 (2003) - *“Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”*, IPQ.

NP EN 12350-2 (2009) - *“Ensaaios do betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento”*, IPQ.

NP EN 12350-6 (2011) - *“Ensaaios do betão fresco - Parte 6: Massa volúmica”*, IPQ.

NP EN 12390-3 (2011) - *“Ensaaios do betão em estado endurecido - Part 3: Resistência à compressão”*, IPQ.

LNEC E391 (1993) - *“Betões: Determinação da resistência à carbonatação”*, LNEC, Lisboa.

LNEC E393 (1993) - *“Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade”*, LNEC, Lisboa.

LNEC E394 (1993) - *“Betões: determinação da absorção de água por imersão”*, LNEC, Lisboa.

LNEC E398 (1993) - *“Betões: determinação da retracção e da expansão”*, LNEC, Lisboa.

LNEC E463 (2004) - *“Betões: determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário”*, LNEC, Lisboa

Sites consultados

Eurostat - Environment and Energy. Waste statistics in Europe 2014. Disponível em: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics, consultado no dia 30 de Novembro de 2016.

Anexo A - Composição dos betões produzidos

Composição do betão em relação a 1 m ³ de betão								
Componentes	# [mm]	BR	B1100%	B125%	B2100%	B225%	B3100%	B325%
Agregados grossos naturais [kg/m ³]	4-5,6	97,2	-	72,9	-	72,9	-	72,9
	5,6-8	107,4	-	80,6	-	80,6	-	80,6
	8-11,2	116,0	-	87,0	-	87,0	-	87,0
	11,2-16	327,4	-	245,6	-	245,6	-	245,6
	16-22,4	327,4	-	245,6	-	245,6	-	245,6
Agregados grossos reciclados [kg/m ³]	4-5,6	-	86,8	21,7	81,3	20,3	79,4	19,9
	5,6-8	-	95,9	24,0	89,9	22,4	87,8	22,0
	8-11,2	-	103,4	25,9	97,0	24,2	94,8	23,7
	11,2-16	-	293,3	73,0	274,0	68,4	267,7	66,9
	16-22,4	-	293,3	73,0	274,0	68,4	267,7	66,9
Areia fina [kg/m ³]		250,7	250,7	250,7	250,7	250,7	250,7	250,7
Areia grossa [kg/m ³]		472,4	472,4	472,4	472,4	472,4	472,4	472,4
Cimento [kg/m ³]		350	350	350	350	350	350	350
Água [l/m ³]		193,6	193,6	193,6	193,6	193,6	193,6	193,6
Água de compensação [l/m ³]		-	40,33	10,11	48,56	12,11	54,89	13,67
a/c efetiva		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
a/c aparente		0,55	0,67	0,58	0,69	0,59	0,71	0,59

Anexo B - Volume total de betão a betonar

- **Volume de BOIII a betonar:**

$$Vol_{B3100\%+B325\%} = 80,28 \times 1,25 = 100,35 \text{ litros de betão}$$

$$M_{AGRIII} = 100,35 \times 0,40 \times 2,25 = 90,32 \text{ kg de AGRIII}$$

$$Vol_{BOIII}^* = \frac{90,32 \times 1,38 \times 1,15}{0,66 \times 2,4} = 90,49 \text{ litros}$$

$$Vol_{BOIII} = 90,49 \times 1,25 = 113,11 \text{ litros de BOIII}$$

- **Volume de BOII a betonar**

$$Vol_{BAGR2100\%+BAGR225\%} = 80,28 \times 1,25 = 100,35 \text{ litros de betão}$$

$$M_{AGRII}^1 = 100,35 \times 0,40 \times 2,25 = 90,32 \text{ kg de AGRII}$$

$$Vol_{BOII}^1 = \frac{90,32 \times 1,38 \times 1,15}{0,66 \times 2,4} = 90,49 \text{ litros}$$

$$M_{AGRII}^2 = 113,11 \times 0,40 \times 2,25 = 101,80 \text{ kg de AGRII}$$

$$Vol_{BOII}^2 = \frac{101,80 \times 1,38 \times 1,15}{0,66 \times 2,4} = 101,99 \text{ litros}$$

$$Vol_{BOII} = (90,49 + 101,99) \times 1,25 = 240,60 \text{ litros e BOII}$$

- **Volume de BOI a betonar**

$$Vol_{BAGR1100\%+BAGR125\%} = 80,28 \times 1,25 = 100,35 \text{ litros de betão}$$

$$M_{AGRI}^1 = 100,35 \times 0,40 \times 2,25 = 90,32 \text{ kg de AGRI}$$

$$Vol_{BOI}^1 = \frac{90,32 \times 1,38 \times 1,15}{0,66 \times 2,4} = 90,49 \text{ litros}$$

$$M_{AGRI}^2 = 240,60 \times 0,40 \times 2,25 = 216,54 \text{ kg de AGRI}$$

$$Vol_{BOI}^2 = \frac{216,54 \times 1,38 \times 1,15}{0,66 \times 2,4} = 216,95 \text{ litros}$$

$$Vol_{BOI} = (90,49 + 216,95) = 307,44 \text{ litros e BOI}$$

Anexo C - Caracterização dos agregados: análise granulométrica dos AGN

Areia grossa				
Massa [g]			3142,90	
Peneiro [mm]	Massa retida		Massa acumulada	
	[g]	[%]	Retida	Passada
			[g]	[%]
31,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
22,4	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
16	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
11,2	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
8	4,90	0,16%	0,16%	99,84%
5,6	29,70	0,94%	1,10%	98,90%
4	73,45	2,34%	3,44%	96,56%
2	460,85	14,66%	18,10%	81,90%
1	1194,80	38,02%	56,12%	43,88%
0,5	995,85	31,69%	87,80%	12,20%
0,25	213,60	6,80%	94,60%	5,40%
0,125	127,10	4,04%	98,64%	1,36%
0,063	23,25	0,74%	99,38%	0,62%
Refugo	5,40	0,17%	99,55%	0,45%
Total	3128,90	99,55%	-	-

Areia fina				
Massa [g]			3142,90	
Peneiro [mm]	Massa retida		Massa acumulada	
	[g]	[%]	Retida	Passada
			[g]	[%]
31,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
22,4	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
16	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
11,2	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
8	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
5,6	0,05	0,00%	0,00%	100,00%
4	2,95	0,09%	0,09%	99,91%
2	4,30	0,13%	0,23%	99,77%
1	23,10	0,72%	0,94%	99,06%
0,5	790,05	24,51%	25,45%	74,55%
0,25	1954,50	60,63%	86,08%	13,92%
0,125	419,05	13,00%	99,08%	0,92%
0,063	22,75	0,71%	99,79%	0,21%
Refugo	1,45	0,04%	99,83%	0,17%
Total	3218,20	99,83%	-	-

Anexo D - Caracterização dos agregados: massa volúmica e absorção de água

AGN				
Variável	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Desvio padrão
M ₁ [g]	3327,45	3341,45	3338,35	-
M ₂ [g]	7089,40	7100,95	7068,30	
M ₃ [g]	5022,00	5035,25	5012,00	
M ₄ [g]	3301,90	3296,90	3300,50	
M ₂ - M ₃ [g]	2067,40	2065,70	2056,30	
ρ _a [kg/m ³]	2674,69	2677,79	2652,71	13,67
ρ _{rd} [kg/m ³]	2620,45	2584,28	2574,39	24,25
ρ _{sss} [kg/m ³]	2640,73	2619,20	2603,92	18,49
WA _{24h}	0,77%	1,35%	1,15%	0,29%

AGRI				
Variável	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Desvio padrão
M ₁ [g]	3415,70	3413,60	3428,45	-
M ₂ [g]	7137,00	7033,50	7048,25	
M ₃ [g]	5114,75	5012,00	5021,10	
M ₄ [g]	3237,00	3233,60	3239,80	
M ₂ - M ₃ [g]	2022,25	2021,50	2027,15	
ρ _a [kg/m ³]	2664,75	2667,77	2671,67	3,47
ρ _{rd} [kg/m ³]	2323,01	2322,82	2312,00	6,31
ρ _{sss} [kg/m ³]	2451,25	2452,12	2446,62	2,96
WA _{24h}	5,52%	5,57%	5,82%	0,16%

AGRII				
Variável	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Desvio padrão
M ₁ [g]	3565,30	3608,40	3599,10	-
M ₂ [g]	7085,80	7105,65	7109,35	
M ₃ [g]	5035,25	5038,40	5042,55	
M ₄ [g]	3307,75	3335,15	3336,25	
M ₂ - M ₃ [g]	2050,55	2067,25	2066,80	
ρ _a [kg/m ³]	2631,05	2630,45	2628,11	1,55
ρ _{rd} [kg/m ³]	2183,69	2164,07	2177,28	10,01
ρ _{sss} [kg/m ³]	2353,72	2341,37	2348,82	6,22
WA _{24h} [%]	7,79%	8,19%	7,88%	0,21%

AGRIII				
Variável	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Desvio padrão
M ₁ [g]	3618,90	3688,90	3645,65	-
M ₂ [g]	7163,80	7128,20	7113,30	
M ₃ [g]	5099,60	5023,25	5030,75	
M ₄ [g]	3304,20	3363,70	3322,35	
M ₂ - M ₃ [g]	2064,20	2104,95	2082,55	
ρ _a [kg/m ³]	2664,68	2672,25	2679,75	7,53
ρ _{rd} [kg/m ³]	2125,30	2123,62	2125,49	1,03
ρ _{sss} [kg/m ³]	2327,72	2328,92	2332,32	2,39
WA _{24h} [%]	9,52%	9,67%	9,73%	0,11%

Anexo E - Caracterização dos agregados: absorção de água ao longo de 24 horas

AGRI			
Tempo	m _{hidroestática} [g]	m _{real} [g]	Absorção [%]
0:00	3248,0	871,1	0,0%
0:02	3410,6	900,6	60,4%
0:04	3415,4	905,4	70,3%
0:06	3417,7	907,7	75,0%
0:08	3419,2	909,2	78,1%
0:10	3419,9	909,9	79,5%
0:15	3421,2	911,2	82,2%
0:20	3421,9	911,9	83,6%
0:25	3422,2	912,2	84,2%
0:30	3422,7	912,7	85,2%
0:40	3423,4	913,4	86,7%
0:50	3423,7	913,7	87,3%
1:00	3423,9	913,9	87,7%
1:15	3424,4	914,4	88,7%
1:30	3425,2	915,2	90,4%
1:45	3425,3	915,3	90,6%
2:00	3425,9	915,9	91,8%
3:00	3427,0	917,0	94,1%
4:00	3427,2	917,2	94,5%
5:00	3427,8	917,8	95,7%
6:00	3428,4	918,4	96,9%
7:00	3428,8	918,8	97,7%
8:00	3429,1	919,1	98,4%
9:00	3429,3	919,3	98,8%
24:00	3429,9	919,9	100,0%

AGRII			
Tempo	m _{hidroestática} [g]	m _{real} [g]	Absorção [%]
0:00	3068,7	749,0	0,0%
0:02	3286,5	760,6	17,4%
0:04	3304,9	779,0	45,0%
0:06	3313,8	787,9	58,4%
0:08	3316,3	790,4	62,2%
0:10	3318,7	792,8	65,8%
0:15	3324,7	798,8	74,8%
0:20	3327,4	801,5	78,8%
0:25	3329,3	803,4	81,7%
0:30	3330,7	804,8	83,8%
0:40	3333,4	807,5	87,8%
0:50	3334,6	808,7	89,6%
1:00	3335,8	809,9	91,4%
1:15	3337,2	811,3	93,5%
1:30	3337,7	811,8	94,3%
1:45	3337,9	812,0	94,6%
2:00	3338,0	812,1	94,7%
3:00	3338,8	812,9	95,9%
4:00	3339,7	813,8	97,3%
5:00	3340,1	814,2	97,9%
6:00	3340,3	814,4	98,2%
7:00	3340,5	814,6	98,5%
8:00	3340,6	814,7	98,6%
9:00	3340,6	814,7	98,6%
24:00	3341,5	815,6	100,0%

AGRIII			
Tempo	m _{hidroestática} [g]	m _{real} [g]	Absorção [%]
0:00	3196,3	876,9	0,0%
0:02	3400,6	881,7	6,4%
0:04	3422,2	903,3	35,0%
0:06	3431,7	912,8	47,6%
0:08	3438,8	919,9	57,0%
0:10	3442,9	924,0	62,5%
0:15	3449,6	930,7	71,4%
0:20	3454,7	935,8	78,1%
0:25	3458,1	939,2	82,6%
0:30	3459,7	940,8	84,8%
0:40	3461,3	942,4	86,9%
0:50	3462,6	943,7	88,6%
1:00	3465,3	946,4	92,2%
1:15	3466,1	947,2	93,2%
1:30	3467,1	948,2	94,6%
1:45	3467,5	948,6	95,1%
2:00	3468,1	949,2	95,9%
3:00	3468,8	949,9	96,8%
4:00	3469,6	950,7	97,9%
5:00	3470,4	951,5	98,9%
6:00	3470,6	951,7	99,2%
7:00	3470,7	951,8	99,3%
8:00	3470,7	951,8	99,3%
9:00	3470,7	951,8	99,3%
24:00	3471,2	952,3	100,0%

Anexo F - Caracterização dos agregados: índice de forma

Bago de arroz						
Peneiros [mm]	M ₁ [g]	% M ₁	M ₂ [g]	L/E > 3	SI _{intervalo}	SI
4 - 5,6	230,1	79,6%	230,1	38,5	17	17
5,6 - 8	59,0	20,4%	59,0	11,3	19	
8 - 11,2	0,0	0,0%	-	0,0	-	
11,2 -16	0,0	0,0%	-	0,0	-	
16 - 22,4	0,0	0,0%	-	0,0	-	

Brita 1						
Peneiros [mm]	M ₁ [g]	% M ₁	M ₂ [g]	L/E > 3	SI _{intervalo}	SI
4 - 5,6	84,2	4,0%	-	-	-	20
5,6 - 8	840,7	40,0%	840,7	203,8	24	
8 - 11,2	936,7	1112,4%	936,7	172,9	18	
11,2 -16	239,8	284,7%	239,75	19,2	8	
16 - 22,4	0,0	0,0%	-	-	-	

Brita 2						
Peneiros [mm]	M ₁ [g]	% M ₁	M ₂ [g]	L/E > 3	SI _{intervalo}	SI
4 - 5,6	2,8	0,1%	-	-	-	18
5,6 - 8	14,8	0,4%	-	-	-	
8 - 11,2	425,2	10,9%	425,2	112,2	26	
11,2 -16	2701,1	69,0%	2701,1	478,6	18	
16 - 22,4	771,3	19,7%	771,3	96,5	13	

AGRI						
Peneiros [mm]	M ₁ [g]	% M ₁	M ₂ [g]	L/E > 3	SI _{intervalo}	SI
4 - 5,6	232,6	10,0%	232,6	54,3	23	18
5,6 - 8	256,9	11,0%	277,4	64,3	23	
8 - 11,2	277,4	11,9%	277,4	69,4	25	
11,2 -16	783,2	33,6%	783,2	116,8	15	
16 - 22,4	783,2	33,6%	783,2	117,8	15	

AGRII						
Peneiros [mm]	M ₁ [g]	% M ₁	M ₂ [g]	L/E > 3	SI _{intervalo}	SI
4 - 5,6	224,7	10,0%	224,3	61,0	27	19
5,6 - 8	248,7	11,0%	248,7	82,8	33	
8 - 11,2	268,5	11,9%	268,5	79,4	30	
11,2 -16	758,2	33,6%	758,2	94,3	12	
16 - 22,4	758,2	33,6%	758,2	102,9	14	

AGRIII						
Peneiros [mm]	M ₁ [g]	% M ₁	M ₂ [g]	L/E > 3	SI _{intervalo}	SI
4 - 5,6	330,2	10,0%	330,2	110,3	33	18
5,6 - 8	364,7	11,0%	364,7	125,8	35	
8 - 11,2	393,8	11,9%	393,8	103,0	26	
11,2 -16	1111,8	33,6%	1111,8	160,3	14	
16 - 22,4	1111,8	33,6%	1111,8	104,2	9	

Anexo G - Caracterização dos agregados: baridade e volume de vazios

AGN			
Amostra	1	2	3
Volume [l]	10,0	10,0	10,0
M1 [g]	9,0	9,0	9,0
M2 [g]	22,6	22,6	22,6
ρ_b [kg/m ³]	1357,2	1355,3	1352,8
$\rho_{b, \text{média}}$ [kg/m ³]	1355,1		
ρ_{rd} [kg/m ³]	2559,8		
% de vazios	47,06%		

AGRI			
Amostra	1	2	3
Volume [l]	10,0	10,0	10,0
M1 [g]	9,0	9,0	9,0
M2 [g]	20,3	20,3	20,4
ρ_b [kg/m ³]	1126,7	1130,1	1139,8
$\rho_{b, \text{média}}$ [kg/m ³]	1132,2		
ρ_{rd} [kg/m ³]	2524,9		
% de vazios	55,2%		

AGRII			
Amostra	1	2	3
Volume [l]	10,0	10,0	10,0
M1 [g]	9,0	9,0	9,0
M2 [g]	19,4	19,4	19,4
ρ_b [kg/m ³]	1038,8	1032,1	1032,3
$\rho_{b, \text{média}}$ [kg/m ³]	1034,4		
ρ_{rd} [kg/m ³]	2539,2		
% de vazios	59,3%		

AGRIII			
Amostra	1	2	3
Volume [l]	10,0	10,0	10,0
M1 [g]	9,0	9,0	9,0
M2 [g]	18,9	19,0	18,9
ρ_b [kg/m ³]	989,2	993,5	987,5
$\rho_{b, \text{média}}$ [kg/m ³]	990,1		
ρ_{rd} [kg/m ³]	2653,5		
% de vazios	62,7%		

Anexo H - Caracterização dos agregados: desgaste de Los Angeles

AGN			
Desgaste de Los Angeles			
Amostra	1	2	3
M ₁ [g]	5000	5000	5000
M ₂ [g]	3591,40	3638,75	3580,95
Δ LA	28,17%	27,23%	28,38%
Δ LA médio	27,93%		
Desvio padrão	0,62		

AGRI			
Desgaste de Los Angeles			
Amostra	1	2	3
M ₁ [g]	5000	5000	5000
M ₂ [g]	3024,00	3057,40	3097,00
Δ LA	39,52%	38,85%	38,06%
Δ LA médio	38,81%		
Desvio padrão	0,73		

AGRII			
Desgaste de Los Angeles			
Amostra	1	2	3
M ₁ [g]	5000	5000	5000
M ₂ [g]	2918,20	2980,40	2924,90
Δ LA	41,64%	40,39%	41,50%
Δ LA médio	41,18%		
Desvio padrão	0,68		

AGRIII			
Desgaste de Los Angeles			
Amostra	1	2	3
M ₁ [g]	5000	5000	5000
M ₂ [g]	2980,40	2924,90	2918,20
Δ LA	40,39%	41,50%	41,64%
Δ LA médio	40,89%		
Desvio padrão	0,63		

Anexo I - Ensaio ao betão em estado fresco: abaixamento e razão de a/c efetiva e aparente

Betão	Betonagem	Abaixamento [mm]	Relação a/c efetiva	Relação a/c aparente
BR	1	132,0	0,55	0,55
	2	117,0		
	Média	124,5		
B1100%	1	135,0	0,55	0,67
	2	122,0		
	Média	126,0		
B125%	1	130,0	0,55	0,58
	2	122,0		
	Média	126,0		
B2100%	1	125,0	0,55	0,69
	2	117,0		
	Média	121,0		
B225%	1	125,0	0,55	0,59
	2	114,0		
	Média	119,5		
B3100%	1	127,0	0,55	0,71
	2	130,0		
	Média	128,5		
B325%	1	114,0	0,55	0,59
	2	126,0		
	Média	120,0		

Anexo J - Ensaios ao betão em estado fresco: abaixamento e massa volúmica

Tipo de betão	Amassadura	Abaixamento [mm]	M ₁ [g]	M ₂ [g]	Volume [l]	Massa volúmica [kg/m ³]
BR	1	132,0	9,03	33,19	10,00	2415,80
	2	117,0	9,03	33,15	10,00	2411,80
	Valor médio	124,5	9,03	33,17	10,00	2413,80
B1100%	1	135,0	9,03	32,17	10,00	2313,80
	2	122,0	9,03	32,28	10,00	2324,80
	Valor médio	126,0	9,03	32,23	10,00	2319,30
B125%	1	130,0	9,03	32,86	10,00	2382,80
	2	122,0	9,03	32,91	10,00	2387,80
	Valor médio	126,0	9,03	32,89	10,00	2385,30
B2100%	1	125,0	9,03	31,89	10,00	2285,80
	2	117,0	9,03	31,77	10,00	2273,80
	Valor médio	121,0	9,03	31,83	10,00	2279,80
B225%	1	125,0	9,03	32,83	10,00	2379,80
	2	114,0	9,03	32,91	10,00	2387,80
	Valor médio	119,5	9,03	32,87	10,00	2383,80
B3100%	1	127,0	9,03	31,65	10,00	2261,80
	2	130,0	9,03	31,71	10,00	2267,80
	Valor médio	128,5	9,03	31,68	10,00	2264,80
B325%	1	114,0	9,03	32,81	10,00	2377,80
	2	126,0	9,03	32,77	10,00	2373,80
	Valor médio	120,0	9,03	32,79	10,00	2375,80

Anexo K - Ensaio ao betão em estado endurecido: resistência à compressão

7 dias de cura					
Tipo de betão	Resistência à compressão [MPa]			Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]
	Provete 1	Provete 2	Provete 3		
BR	47,0	46,9	44,8	46,2	1,3
B1100%	45,8	42,7	43,6	44,0	1,6
B125%	47,3	47,5	48,0	47,6	0,3
B2100%	42,5	43,2	44,1	43,3	0,8
B225%	47,8	47,1	46,1	47,0	0,9
B3100%	39,8	41,2	39,8	40,3	0,8
B325%	44,9	45,6	45,1	45,2	0,4

28 dias de cura					
Tipo de betão	Resistência à compressão [MPa]			Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]
	Provete 1	Provete 2	Provete 3		
BR	55,1	53,7	58,8	55,9	2,7
B1100%	52,8	56,0	53,4	54,1	1,7
B125%	60,2	58,7	60,2	59,7	0,8
B2100%	54,3	52,1	53,5	53,3	1,1
B225%	56,8	54,8	56,0	55,9	1,0
B3100%	52,1	47,6	45,9	48,6	3,2
B325%	57,9	54,7	55,1	55,9	1,7

56 dias de cura					
Tipo de betão	Resistência à compressão [MPa]			Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]
	Provete 1	Provete 2	Provete 3		
BR	63,2	65,3	62,9	63,8	1,3
B1100%	59,7	57,8	59,5	59,0	1,0
B125%	64,0	65,5	65,5	65,0	0,9
B2100%	58,3	55,8	58,9	57,6	1,6
B225%	59,7	55,6	61,7	60,7	1,4
B3100%	56,0	56,4	49,8	56,2	0,3
B325%	61,9	62,7	63,6	62,7	0,9

* Nota: face à grande discrepância nos resultados apresentada pelo provete 2 do betão B225% e pelo provete 3 do betão B3100%, optou-se por não considerar estes provetes na análise.

Anexo L - Ensaio ao betão em estado endurecido: absorção por imersão

Provete	Massa SSD [g]	Massa hidrostática [g]	Massa seca [g]	Absorção [%]	Valor médio de absorção [%]	Desvio padrão [%]
BR						
1	2450,60	1441,70	2315,30	13,41	13,45	0,09
2	2449,10	1438,40	2313,80	13,39		
3	2451,20	1438,00	2313,90	13,55		
B1100%						
1	2312,95	1306,40	2126,25	18,55	18,60	0,08
2	2333,90	1322,70	2144,95	18,69		
3	2320,65	1314,40	2133,95	18,55		
B125%						
1	2412,90	1400,30	2260,00	15,10	15,26	0,32
2	2389,35	1383,20	2332,15	15,62		
3	2401,50	1395,70	2250,05	15,06		
B2100%						
1	2299,55	1281,40	2078,40	21,72	21,67	0,04
2	2285,05	1274,80	2066,35	21,65		
3	2284,40	1274,70	2065,75	21,65		
B225%						
1	2412,75	1392,60	2251,05	15,85	15,69	0,14
2	2399,55	1387,50	2241,35	15,63		
3	2409,40	1391,15	2250,60	15,60		
B3100%						
1	2295,05	1275,80	2074,55	21,63	21,72	0,13
2	2278,65	1265,10	2059,15	21,66		
3	2280,80	1267,30	2059,20	21,86		
B325%						
1	2416,85	1394,00	2254,05	15,92	16,06	0,18
2	2401,10	1383,60	2235,80	16,26		
3	2411,60	1390,70	2248,30	16,00		

Anexo M - Ensaio ao betão em estado endurecido: absorção por capilaridade

Tempo de ensaio [h]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			Abs, Cap, média [g/mm ²]	Desvio padrão
	M [g]	Abs, Cap, [g/mm ²]	Kc [g/mm ² h ^{1/2}]	M [g]	Abs, Cap, [g/mm ²]	Kc [g/mm ² h ^{1/2}]	M [g]	Abs, Cap, [g/mm ²]	Kc [g/mm ² h ^{1/2}]		
BR											
0	4120,3	0,00E+00	0,00E+00	3989,8	0,00E+00	0,00E+00	3999,5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	4137,0	9,45E-04	5,46E-04	3998,8	5,09E-04	2,94E-04	4018,3	1,06E-03	6,14E-04	1,00E-03	8,40E-05
6	4143,2	1,30E-03	5,29E-04	4001,7	6,73E-04	2,75E-04	4024,2	1,40E-03	5,71E-04	1,35E-03	7,20E-05
24	4160,9	2,30E-03	4,69E-04	4014,0	1,37E-03	2,80E-04	4042,2	2,42E-03	4,93E-04	2,36E-03	8,40E-05
48	4172,6	2,96E-03	4,27E-04	4025,5	2,02E-03	2,92E-04	4056,1	3,20E-03	4,62E-04	3,08E-03	1,72E-04
72	4179,2	3,33E-03	3,93E-04	4030,2	2,29E-03	2,69E-04	4061,9	3,53E-03	4,16E-04	3,43E-03	1,40E-04
B1100%											
0	3805,1	0,00E+00	0,00E+00	3750,7	0,00E+00	0,00E+00	3710,9	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	3846,5	2,35E-03	1,35E-03	3800,4	2,81E-03	1,62E-03	3755,1	2,50E-03	1,45E-03	2,55E-03	2,37E-04
6	3861,2	3,18E-03	1,30E-03	3814,3	3,60E-03	1,47E-03	3771,4	3,43E-03	1,40E-03	3,40E-03	2,12E-04
24	3894,1	5,04E-03	1,03E-03	3848,3	5,52E-03	1,13E-03	3806,4	5,41E-03	1,10E-03	5,32E-03	2,53E-04
48	3917,0	6,34E-03	9,14E-04	3871,6	6,84E-03	9,87E-04	3831,1	6,80E-03	9,82E-04	6,66E-03	2,82E-04
72	3932,7	7,22E-03	8,51E-04	3885,3	7,62E-03	8,98E-04	3848,0	7,76E-03	9,15E-04	7,53E-03	2,78E-04
B125%											
0	3812,7	0,00E+00	0,00E+00	3986,0	0,00E+00	0,00E+00	3917,1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	3844,3	1,79E-03	1,03E-03	4017,0	1,75E-03	1,01E-03	3952,0	1,98E-03	1,14E-03	1,84E-03	1,20E-04
6	3853,4	2,31E-03	9,41E-04	4027,9	2,37E-03	9,68E-04	3961,6	2,52E-03	1,03E-03	2,40E-03	1,10E-04
24	3883,7	4,02E-03	8,21E-04	4055,9	3,96E-03	8,07E-04	3992,9	4,29E-03	8,76E-04	4,09E-03	1,79E-04
48	3903,6	5,15E-03	7,43E-04	4074,2	4,99E-03	7,20E-04	4012,4	5,40E-03	7,79E-04	5,18E-03	2,04E-04
72	3916,6	5,88E-03	6,93E-04	4084,9	5,60E-03	6,60E-04	4023,7	6,04E-03	7,11E-04	5,84E-03	2,23E-04
B2100%											
0	3678,3	0,00E+00	0,00E+00	3753,6	0,00E+00	0,00E+00	3600,5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	3734,0	3,15E-03	1,82E-03	3805,0	2,91E-03	1,68E-03	3655,5	3,12E-03	1,77E-03	3,06E-03	1,32E-04
6	3752,6	4,21E-03	1,72E-03	3822,7	3,91E-03	1,60E-03	3675,0	4,22E-03	1,68E-03	4,11E-03	1,75E-04
24	3789,9	6,32E-03	1,29E-03	3875,7	6,91E-03	1,41E-03	3713,9	6,42E-03	1,34E-03	6,55E-03	3,16E-04
48	3817,2	7,86E-03	1,13E-03	3902,1	8,40E-03	1,21E-03	3742,6	8,04E-03	1,17E-03	8,10E-03	2,75E-04
72	3837,8	9,03E-03	1,06E-03	3919,9	9,41E-03	1,11E-03	3763,0	9,20E-03	1,09E-03	9,21E-03	1,91E-04

Tempo de ensaio [h]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			Abs, Cap, média [g/mm ²]	Desvio padrão
	M [g]	Abs, Cap, [g/mm ²]	Kc [g/mm ² h ^{1/2}]	M [g]	Abs, Cap, [g/mm ²]	Kc [g/mm ² h ^{1/2}]	M [g]	Abs, Cap, [g/mm ²]	Kc [g/mm ² h ^{1/2}]		
B225%											
0	3930,1	0,00E+00	0,00E+00	3962,2	0,00E+00	0,00E+00	3822,8	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	3964,1	1,92E-03	1,11E-03	3994,1	1,81E-03	1,04E-03	3855,4	1,84E-03	1,07E-03	1,86E-03	6,05E-05
6	3974,4	2,51E-03	1,02E-03	4003,9	2,36E-03	9,63E-04	3865,7	2,43E-03	9,91E-04	2,43E-03	7,36E-05
24	4006,7	4,33E-03	8,85E-04	4031,0	3,89E-03	7,95E-04	3897,4	4,22E-03	8,62E-04	4,15E-03	2,29E-04
48	4029,2	5,61E-03	8,09E-04	4053,1	5,14E-03	7,42E-04	3919,8	5,49E-03	7,92E-04	5,41E-03	2,41E-04
72	4043,2	6,40E-03	7,54E-04	4068,6	6,02E-03	7,10E-04	3934,7	6,33E-03	7,46E-04	6,25E-03	2,02E-04
B3100%											
0	3665,2	0,00E+00	0,00E+00	3625,2	0,00E+00	0,00E+00	3573,9	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	3722,7	3,25E-03	1,88E-03	3683,2	3,28E-03	1,89E-03	3629,5	3,15E-03	1,82E-03	3,23E-03	7,17E-05
6	3742,2	4,36E-03	1,78E-03	3701,6	4,32E-03	1,77E-03	3648,7	4,23E-03	1,73E-03	4,30E-03	6,44E-05
24	3792,8	7,22E-03	1,47E-03	3753,5	7,26E-03	1,48E-03	3694,3	6,81E-03	1,39E-03	7,10E-03	2,47E-04
48	3831,6	9,42E-03	1,36E-03	3794,3	9,57E-03	1,38E-03	3728,9	8,77E-03	1,27E-03	9,25E-03	4,24E-04
72	3856,2	1,08E-02	1,27E-03	3820,4	1,10E-02	1,30E-03	3755,7	1,03E-02	1,21E-03	1,07E-02	3,88E-04
B325%											
0	3883,2	0,00E+00	0,00E+00	3944,9	0,00E+00	0,00E+00	3834,3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	3916,6	1,89E-03	1,09E-03	3979,2	1,94E-03	1,12E-03	3869,8	2,01E-03	1,16E-03	1,95E-03	5,96E-05
6	3926,7	2,46E-03	1,00E-03	3989,9	2,55E-03	1,04E-03	3880,7	2,63E-03	1,07E-03	2,54E-03	8,21E-05
24	3960,0	4,35E-03	8,87E-04	4019,8	4,24E-03	8,65E-04	3912,4	4,42E-03	9,02E-04	4,33E-03	9,11E-05
48	3982,8	5,64E-03	8,14E-04	4038,2	5,28E-03	7,62E-04	3939,6	5,96E-03	8,60E-04	5,62E-03	3,40E-04
72	3998,3	6,51E-03	7,68E-04	4055,4	6,25E-03	7,37E-04	3957,2	6,95E-03	8,20E-04	6,57E-03	3,55E-04

* Nota: face à grande discrepância nos resultados apresentada pelo provete 2 do betão BR, optou-se por não considerar este provete na análise,

Anexo N - Ensaio ao betão em estado endurecido: retração

Tempo [dias]	Retração [µm/m]						
	BR	B1100%	B125%	B2100%	B225%	B3100%	B325%
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	-52,5	-37,5	-45,0	-11,9	-63,1	-23,1	
2	-82,5	-62,5	-80,0	-53,1	-81,3		-86,3
3	-97,5	-90,0	-97,5	-115,6		-83,1	-87,5
4	-122,5	-112,5	-113,1	-130,6	-133,8	-82,5	-128,8
5	-132,5	-149,4	-138,8		-124,4	-127,5	-162,5
6	-150,0	-141,9	-175,6	-174,4	-158,8	-157,5	-168,8
7	-166,3	-172,5	-181,9	-164,4	-169,4	-165,6	-168,8
8	-188,8	-217,5		-195,6	-175,0		
9	-230,6	-222,5	-200,6	-211,3			-197,5
10	-231,9		-186,9	-225,0		-227,5	-191,3
11		-246,3	-217,5		-200,0	-229,4	-206,3
12	-257,5	-231,3	-230,0		-199,4	-256,9	-205,0
13	-235,6	-260,0	-233,8	-268,1	-214,4	-255,6	-212,5
14	-259,4	-273,1		-263,1	-210,0	-270,6	
15	-273,8	-281,9		-282,5	-221,9		
16	-280,6		-264,4	-274,4			-248,8
17			-250,6	-285,6		-317,5	-257,5
18		-311,3	-265,0		-256,3	-324,4	-267,5
19	-297,5	-303,8	-253,8		-257,5	-340,0	-272,5
20	-287,5	-315,0	-260,0	-324,4	-268,1	-347,5	-278,8
21	-297,5	-307,5		-326,9	-270,6	-353,1	
22	-288,1	-315,0		-338,8	-275,6		
23	-291,3		-282,5	-343,8			-317,5
24			-286,9	-354,4		-413,1	-328,8
25		-343,8	-291,3		-308,8	-431,9	-355,0
26	-310,6	-347,5	-292,5		-318,8	-486,3	-362,5
27	-313,1	-356,3	-290,0	-386,3	-353,1	-497,5	-357,5
28	-312,5	-356,3		-391,9	-358,1	-486,9	
29	-310,0	-355,6		-441,3	-350,6		
30	-306,3		-316,3	-450,6			-368,8
31			-325,0	-439,4		-515,6	-377,5
32		-393,8	-358,1		-363,1	-526,9	-378,8
33	-328,1	-405,0	-364,4		-375,0	-530,6	-386,3
34	-338,8	-441,3	-353,1	-462,5	-375,6	-542,5	
35	-361,9	-452,5		-473,8	-382,5		
36	-375,6	-441,3		-471,9			
37	-365,0		-365,6	-485,6			-386,3
38			-371,3			-560,6	-395,0
39		-460,0	-371,9		-384,4	-570,6	-401,3
40	-377,5	-467,5	-380,6		-391,3	-579,4	-395,0
41	-381,9	-465,6		-496,3	-398,1	-579,4	-415,0
42	-378,1	-480,6		-508,1	-398,1	-596,9	
43	-389,4			-517,5	-406,3		
44			-381,3	-513,8			
45			-391,9	-530,6			
46		-490,0	-395,6				-422,5
47	-391,9	-500,6	-395,0			-628,8	-430,0
48	-400,0	-499,4	-403,8		-417,5	-643,8	
49	-398,8	-501,9			-425,0		
50	-400,0	-515,0		-556,3			

51	-410,0			-561,3			
52							-442,5
53			-415,6			-680,6	-443,8
54			-418,8		-439,4	-682,5	-440,0
55		-533,8			-440,6	-680,6	
56	-418,8	-537,5		-588,1	-438,1		
57	-420,6			-585,0			
58				-585,6			-452,5
59			-433,8			-697,5	
60			-434,4		-449,4		-462,5
61		-560,6	-426,3			-711,9	-463,8
62	-431,3	-559,4		-599,4	-454,4	-712,5	
63	-428,8	-553,1			-458,8		
64	-425,6			-608,1			
65			-436,3	-613,1			-465,0
66						-720,6	-466,3
67		-565,6	-441,9		-460,6	-722,5	
68	-433,1		-445,6		-463,8		-466,3
69		-576,3		-619,4		-726,3	-475,0
70	-436,9	-582,5		-618,8	-460,6	-740,6	
71	-443,8				-473,1		
72			-447,5	-621,3			-485,0
73			-451,3	-636,3		-753,8	
74		-585,0			-478,1		
75	-446,3	-586,3	-445,6				-476,3
76	-443,8		-458,8	-645,0		-749,4	-475,0
77		-585,6			-473,1	-747,5	
78	-443,1	-596,3			-470,6		
79	-451,3		-463,1	-640,0			-480,0
80				-640,0		-749,4	
81		-603,1			-473,1		-477,5
82	-458,8		-455,6			-753,1	-483,8
83			-455,6	-640,6	-474,4	-755,0	-482,5
84		-600,0			-480,6	-758,8	
85	-452,5	-600,6		-640,6	-482,5		
86	-451,3		-456,9	-647,5			-497,5
87				-648,8		-776,3	-506,3
88		-601,3	-453,8		-491,9	-783,8	-508,8
89	-453,1		-461,9		-496,3	-789,4	-511,3
90		-600,0	-460,0	-664,4	-498,8	-793,8	-505,0
91	-451,3	-603,1	-463,1	-670,0	-501,9	-788,1	-507,5

* Nota: as células não preenchidas representam dias em que não foram efetuadas leituras

Anexo O - Ensaio ao betão em estado endurecido: resistência à carbonatação

Profundidade da frente de carbonatação [mm]													
Tipo de betão	Provete	7 dias			28 dias			56 dias			91 dias		
		Valor médio [mm]	Média geral [mm]	Desvio padrão	Valor médio [mm]	Média geral [mm]	Desvio padrão	Valor médio [mm]	Média geral [mm]	Desvio padrão	Valor médio [mm]	Média geral [mm]	Desvio padrão
BR	1	1,36	1,34	0,02	2,33	2,29	0,06	4,28	4,30	0,03	6,03	5,91	0,17
	2	1,33			2,25			4,32			5,80		
B125%	1	1,97	2,07	0,14	2,47	2,49	0,03	3,98	4,72	1,04	6,39	6,73	0,49
	2	2,17			2,51			5,45			7,08		
B225%	1	1,99	1,89	0,13	2,58	2,38	0,29	4,27	4,38	0,16	7,01	7,18	0,25
	2	1,80			2,18			4,49			7,35		
B325%	1	2,58	2,49	0,13	2,65	2,77	0,17	5,18	5,11	0,11	7,62	7,33	0,40
	2	2,40			2,90			5,03			7,05		
B1100%	1	2,50	2,60	0,13	3,87	3,67	0,28	5,87	6,00	0,19	8,46	8,12	0,48
	2	2,69			3,47			6,14			7,78		
B2100%	1	2,98	3,22	0,33	5,28	5,24	0,06	7,35	6,93	0,60	9,34	9,74	0,56
	2	3,45			5,20			6,51			10,14		
B3100%	1	2,49	2,94	0,63	4,26	3,96	0,42	7,28	7,25	0,03	11,40	10,74	0,93
	2	3,38			3,66			7,23			10,08		

Anexo P - Ensaio ao betão em estado endurecido: resistência à penetração dos cloretos

28 dias								
Betão	Provete	U [Volts]	T [K]	t [s]	L [m]	x_d [m]	D [m ² /s]	D _{médio} [m ² /s]
BR	1	25	293,90	86400	0,047	0,0227	1,3566E-11	1,3595E-11
	2	25	293,90		0,049	0,0224	1,3889E-11	
	3	25	293,90		0,047	0,0221	1,3329E-11	
B1100%	1	20	293,80		0,048	0,0217	1,6916E-11	1,7145E-11
	2	20	293,80		0,048	0,0213	1,6755E-11	
	3	20	293,80		0,048	0,0226	1,7764E-11	
B125%	1	25	294,25		0,049	0,0249	1,5673E-11	1,4848E-11
	2	25	294,25		0,048	0,0248	1,5165E-11	
	3	25	294,25		0,047	0,0228	1,3705E-11	
B2100%	1	15	294,50		0,050	0,0165	1,8722E-11	1,9059E-11
	2	15	294,50		0,050	0,0169	1,9179E-11	
	3	15	294,50		0,050	0,0169	1,9278E-11	
B225%	1	25	296,26		0,050	0,0241	1,5553E-11	1,5591E-11
	2	25	296,50		0,050	0,0246	1,5925E-11	
	3	25	294,51		0,051	0,0236	1,5297E-11	
B3100%	1	15	294,70		0,052	0,0179	2,1064E-11	2,0424E-11
	2	15	294,62		0,050	0,0174	1,9623E-11	
	3	15	296,67		0,052	0,0175	2,0586E-11	
B325%	1	25	293,45		0,048	0,0255	1,5713E-11	1,5643E-11
	2	25	293,24		0,054	0,0223	1,5418E-11	
	3	25	294,05		0,053	0,0235	1,5798E-11	

91 dias								
Betão	Provete	V [Volts]	T [K]	t [s]	L [m]	x_d [m]	D [m ² /s]	D _{médio} [m ² /s]
BR	1	25	295,75	86400	0,0479	0,0203	1,2433E-11	1,2551E-11
	2	25	295,75		0,0479	0,0196	1,2066E-11	
	3	25	295,75		0,0482	0,0213	1,3155E-11	
B1100%	1	25	297,05		0,0460	0,0255	1,5107E-11	1,5453E-11
	2	25	297,05		0,0471	0,0249	1,5085E-11	
	3	25	297,05		0,0481	0,0261	1,6168E-11	
B125%	1	25	295,80		0,0479	0,0246	1,51E-11	1,4573E-11
	2	25	295,80		0,0487	0,0237	1,481E-11	
	3	25	295,80		0,0481	0,0224	1,3809E-11	
B2100%	1	20	295,80		0,04989	0,0203	1,66E-11	1,7292E-11
	2	20	295,80		0,05023	0,0215	1,7669E-11	
	3	20	295,80		0,05046	0,0213	1,7606E-11	
B225%	1	25	296,35		0,04968	0,0226	1,4414E-11	1,4767E-11
	2	25	296,35		0,05059	0,0226	1,467E-11	
	3	25	296,35		0,05098	0,0232	1,5216E-11	
B3100%	1	15	295,85		0,04971	0,0160	1,8067E-11	1,8023E-11
	2	15	295,85		0,05203	0,0155	1,8312E-11	
	3	15	295,85		0,05111	0,0152	1,769E-11	
B325%	1	20	296,10		0,05016	0,0189	1,5522E-11	1,5383E-11
	2	20	296,10		0,05106	0,0184	1,5422E-11	
	3	20	296,10		0,05074	0,0183	1,5205E-11	