

Resistência a ciclos gelo-degelo de betões fabricados com agregados finos reciclados de betão

Duarte Miguel Batarda Simão Lopes Ramos

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Professor Doutor Jorge Manuel Calço Lopes de Brito

Júri

Presidente: Professora Doutora Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira Pinto França de Santana

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Doutor António José da Silva Costa

Março 2014

RESUMO

Nos últimos séculos, o betão tem sido largamente utilizado pela civilização humana como material de construção. Com o crescimento populacional e a utilização desmedida dos recursos naturais presentes no Planeta, o conceito de sustentabilidade tem vindo a ganhar importância. Nesse sentido, tem sido desenvolvido um esforço para aumentar o conhecimento acerca deste material, de modo a descobrir uma forma mais sustentável de o utilizar. A incorporação de materiais reciclados no betão tem sido uma via para atingir esse objectivo, uma vez que toneladas de resíduos são produzidas todos os anos.

A presente investigação integra-se num projecto que se tem vindo a desenvolver no IST, cujo objectivo é aumentar o conhecimento acerca do comportamento de betões fabricados com agregados finos reciclados de betão (AFRB). Neste caso particular, é estudada a resistência a ciclos acelerados de gelo-degelo de betões fabricados com este tipo de agregados.

Foram produzidas 12 composições diferentes de modo a estudar a influência dos AFRB no betão, quando submetido a ciclos gelo-degelo. As composições correspondem a duas famílias de betões: betões de resistência corrente com quatro taxas de substituição (0%, 20%, 50% e 100%) de agregados finos naturais (AFN) por AFRB e betões de elevado desempenho, com as mesmas taxas de substituição, tendo sido adicionado um agente introdutor de ar (IA) em quatro composições, de modo a avaliar a sua influência em betões sujeitos a ciclos de gelo-degelo.

O presente estudo envolve a caracterização do betão no estado fresco, nomeadamente ao nível da trabalhabilidade e da massa volúmica, e no estado endurecido, tendo-se analisado a resistência à compressão e à tracção por flexão antes e depois da acção do gelo-degelo. A análise da durabilidade dos betões foi baseada no procedimento A da ASTM C666, tendo sido monitorizadas as variações de comprimento e do módulo de elasticidade dinâmico ao longo de vários ciclos de gelo-degelo.

Adicionalmente, foram produzidos provetes cilíndricos, de forma a avaliar o efeito da acção do gelo-degelo no módulo de elasticidade de betões produzidos com AFRB. Porém, devido à morosidade do ensaio, os resultados não são analisados no presente texto.

Em relação aos resultados analisados, o uso de AFRB provocou um decréscimo na resistência à compressão e à tracção do betão, quando não submetido a ciclos acelerados de gelo-degelo. Ainda assim, denotou-se que a resistência do betão à acção do gelo-degelo não é prejudicada pela incorporação de agregados finos reciclados de betão na sua constituição.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição; betão; agregados finos reciclados de betão; ciclos gelo-degelo; agente introdutor de ar; comportamento mecânico

ABSTRACT

Concrete has been largely used by human civilization as a construction material for many years. However, with populational growth and the unleashed use of natural resources, the concept of sustainability has been gaining importance. Therefore, an effort to expand the knowledge about concrete behaviour has been made in order to discover a more sustainable way of using it. Using recycled materials as aggregates has been seen as a good option to accomplish that objective, as tonnes of waste are produced every year.

The present investigation is framed within a research program, taking place at IST, which objective is to develop the knowledge of concrete behaviour when fine recycled concrete aggregates (FRCA) are used in its composition. In this particular case, the freeze-thaw resistance of FRCA concrete was studied.

Twelve mixes were produced in order to study the influence of FRCA on concrete when submitted to freeze-thaw cycles. Regular strength concrete was produced with four replacement rates (0%, 20%, 50% and 100%) of natural aggregates (NA) by FRCA. High-strength concrete behaviour was also studied with the same replacement rates and an air entraining agent was added in four mixes, in order to study its influence on concrete's resistance to freeze-thaw cycles.

Fresh concrete properties were analyzed such as workability and bulk density. Compressive and flexural strength were analyzed before and after the freeze-thaw cycles and a correlation between compressive strength in 150 mm and 100 mm cubes was found. The analysis of concrete durability was based on procedure A of ASTM C666. Length changes and dynamical modulus of elasticity were monitored during the freeze-thaw cycles in order to accomplish that objective.

Cylindrical specimens were also produced in order to evaluate the influence of freeze-thaw cycles on the modulus of elasticity of FRCA concrete. However, due to equipment breakdown, the results are not analyzed in the present text. Results are expected to be available in the second trimester of 2014.

As for the results analyzed, the use of FRCA has shown a decrease in compressive and flexural strength of concrete when not submitted to freeze-thaw cycles. Nevertheless, the use of FRCA proved not to be detrimental to concrete's resistance to freeze-thaw cycles, according to ASTM C666.

KEYWORDS: Construction and demolition waste; concrete; fine recycled concrete aggregates; freeze-thaw cycles; air entraining; mechanical behaviour.

Agradecimentos

Aos Professores Doutores José Alexandre de Brito Aleixo Bogas e Jorge Manuel Calição Lopes de Brito, por todo o apoio e pelo grande contributo prestado à presente dissertação, tanto pelo seu conhecimento científico abrangente, como também pelo facto de se terem mostrado sempre disponíveis para ajudar em qualquer situação.

À HCI e à Alves Ribeiro, pelo fornecimento de materiais, moldes e transporte de materiais, sem os quais o trabalho experimental teria sido de muito difícil execução, e à empresa Secil, que facilitou a realização dos ensaios de gelo-degelo nas suas instalações; sendo que, em conjunto com os meios fornecidos pelo Instituto Superior Técnico, foram atingidas todas as condições necessárias para a realização do trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Construção do IST, Sr. Leonel Silva e Sr. João Lopes, cujos conhecimentos e auxílio *in situ* foram indispensáveis para a realização do trabalho experimental, e também ao Sr. Eduardo Paixão, da Secil, pela ajuda prestada durante o processo de submissão dos provetes a ciclos de gelo-degelo.

Às pessoas que partilharam o espaço do laboratório comigo, nomeadamente ao Miguel Bravo e ao Diogo Pedro, por se terem mostrado sempre disponíveis para encomendar materiais quando precisei e pelo companheirismo.

Aos amigos que percorreram o percurso académico comigo desde o início (desde os 5 anos ou mais cedo), até ao fim (entenda-se fim como o "sítio" em que cada um decidiu esperar mais uns anos).

Aos meus pais, por tudo; à minha irmã e ao meu irmão por direcionarem a atenção dos meus pais para eles, quando fazem asneira; às minhas avós e tia, que desde os 5 meses de idade me dizem infinitas frases a começar por "Quando acabares o curso".

À Rita, por ter peneirado muitos quilos de areia comigo, por ter andado com betão às costas, por me ter levado o almoço ao laboratório, por ter ido comigo à Secil e por me acalmar quando estava menos calmo mas, acima de tudo, por não ter fugido entretanto, pela sinceridade e por ser uma grande mulher.

Índice Geral

1.	Introdução.....	1
1.1.	Considerações iniciais	1
1.2.	Objectivos da dissertação	2
1.3.	Metodologia e organização da dissertação	3
2.	Estado da Arte	5
2.1.	Introdução	5
2.2.	Descrição das principais campanhas.....	5
2.2.1.	Campanha de Zaharieva et al. (2004)	5
2.2.2.	Campanha de Topçu e Şengel (2004).....	7
2.2.3.	Campanha de Limbachiya et al. (2004).....	7
2.2.4.	Campanha de Boltryk et al. (2009).....	8
2.2.5.	Campanha de Richardson et al. (2011)	9
2.3.	Propriedades dos agregados reciclados de betão	9
2.3.1.	Introdução	9
2.3.2.	Massa volúmica	11
2.3.3.	Absorção de água	11
2.4.	Propriedades dos betões fabricados com agregados reciclados de betão	12
2.4.1.	Introdução	12
2.4.2.	Massa volúmica	13
2.4.3.	Trabalhabilidade.....	14
2.4.4.	Resistência à compressão	15
2.4.5.	Módulo de elasticidade.....	19
2.4.6.	Absorção de água	22
2.5.	Acção de introdutores de ar no betão	22
2.6.	Acção de superplastificantes no betão	23
2.7.	Acção do gelo-degelo no betão.....	24
2.7.1.	Acção do gelo em betões fabricados com ARB - resultados das principais campanhas	27
2.8.	Conclusões do capítulo	33
3.	Campanha experimental.....	35
3.1.	Introdução.....	35
3.2.	Ensaaios aos agregados.....	36

3.2.1.	Análise granulométrica	36
3.2.2.	Massa volúmica e absorção de água.....	39
3.2.3.	Baridade e volume de vazios.....	42
3.2.4.	Desgaste de <i>Los Angeles</i>	44
3.3.	Formulação dos betões	45
3.3.1.	Introdução	45
3.3.2.	Máxima dimensão do agregado.....	45
3.3.3.	Dosagem de cimento.....	46
3.3.4.	Dosagem de água	46
3.3.5.	Volume de vazios.....	46
3.3.6.	Índice de vazios	46
3.3.7.	Volume absoluto de matéria sólida	47
3.3.8.	Volume absoluto de agregados.....	47
3.3.9.	Definição dos parâmetros A e B da curva de Faury	48
3.3.10.	Curva de referência de Faury	48
3.3.11.	Composição dos betões	50
3.4.	Betão de origem e produção dos agregados reciclados	52
3.4.1.	Introdução	52
3.4.2.	Montagem da cofragem.....	52
3.4.3.	Recepção do BO	53
3.4.4.	Descofragem e preparação para a reciclagem.....	53
3.4.5.	Reciclagem	54
3.5.	Produção dos betões.....	55
3.5.1.	Introdução	55
3.5.2.	Moldes utilizados	55
3.5.3.	Amassadura.....	56
3.5.4.	Água de absorção dos AFRB.....	57
3.5.5.	Correção da relação a/c	58
3.5.6.	Superplastificante.....	59
3.5.7.	Introdutor de ar.....	59
3.5.8.	Preenchimento dos moldes	60
3.5.9.	Descofragem e cura.....	61
3.6.	Ensaio do betão no estado fresco	61
3.6.1.	Introdução	61

3.6.2.	Abaixamento do cone de Abrams	61
3.6.3.	Massa volúmica	63
3.7.	Ensaio do betão no estado endurecido	64
3.7.1.	Introdução	64
3.7.2.	Resistência à compressão	64
3.7.3.	Resistência à tracção por flexão.....	67
3.7.4.	Módulo de elasticidade	69
3.7.5.	Ensaio de medição de velocidade de propagação de ultrassons (UPV).....	71
3.7.6.	Medição da variação de comprimento ao longo do tempo.....	72
3.7.7.	Ensaio de resistência do betão aos ciclos acelerados de gelo-degelo	73
4.	Apresentação e análise dos resultados	77
4.1.	Introdução	77
4.2.	Ensaio aos agregados.....	77
4.2.1.	Análise granulométrica	78
4.2.2.	Massa volúmica e absorção de água.....	80
4.2.3.	Baridade e volume de vazios.....	82
4.2.4.	Desgaste de Los Angeles	82
4.3.	Ensaio ao betão no estado fresco.....	82
4.3.1.	Abaixamento do cone de Abrams	83
4.3.2.	Massa volúmica	83
4.4.	Ensaio no estado endurecido	85
4.4.1.	Resistência à compressão em cubos de 15 cm de aresta	85
4.4.2.	Resistência à compressão em cubos de 10 cm de aresta	91
4.4.3.	Relação entre as resistências à compressão de cubos de 10 e 15 cm de aresta	93
4.4.4.	Resistência à tracção por flexão aos 28 dias de idade	94
4.4.5.	Resistência à compressão das partes resultantes dos ensaios de tracção por flexão aos 28 dias	97
4.4.6.	Avaliação do descasque superficial de provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.....	99
4.4.7.	Avaliação da perda de massa ao longo do tempo de provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo	103
4.4.8.	Variação do comprimento de provetes submetidos a ensaios acelerados de gelo-degelo.....	106
4.4.9.	Ensaio de propagação de ultrassons em provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.....	110

4.4.10. Variação na resistência à tracção por flexão de provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo	113
4.4.11. Variação na resistência à compressão de provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo	117
4.4.12. Resistência a ciclos acelerados gelo-degelo com base na norma ASTM C666 .	120
4.5. Conclusões do capítulo	124
5. Conclusões gerais	127
5.1. Propriedades dos AFRB e sua influência nos betões produzidos.....	127
5.2. Resistência a ciclos acelerados de gelo-degelo de betões fabricados com AFRB	128
5.3. Propostas de desenvolvimento futuro.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
ANEXOS	133

Índice de figuras

Figura 1.1 - Resíduos sectoriais	2
Figura 2.1 - Ciclos gelo-degelo adoptados na campanha de Zaharieva et al. (2004).....	7
Figura 2.2 - Génese dos agregados reciclados de betão	10
Figura 2.3 - Tempo de propagação de ultrassons em função da taxa de substituição de AN por AR	13
Figura 2.4 Relação entre a taxa de substituição de agregados grossos reciclados de betão por naturais e a massa volúmica do betão (Topçu e Şengel, 2004).....	13
Figura 2.5 - Relação entre a taxa de substituição de agregados grossos naturais por reciclados do betão e o valor do abaixamento do betão (Topçu e Şengel 2004).....	15
Figura 2.6 - Resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de idade de betões fabricados com diferentes taxas de substituição de AN por ARB (Topçu et al., 1997).	16
Figura 2.7 - Resistência à compressão de diferentes betões: NAC - betão fabricado só com agregados naturais, RAC1, RAC2 e RAC3 - betões com taxas de substituição de AGRB por AGN de 25, 50 e 75% respectivamente (Boltryk et al., 2009).	16
Figura 2.8 - Relação entre a resistência à compressão e a percentagem de substituição de agregados naturais grossos por reciclados de betão (Topçu et al., 2004).....	17
Figura 2.9 - Influência da taxa de substituição de AGN por AGRB na resistência à compressão do betão (Limbachiya et al., 2004) NOTA: As composições diferem apenas na relação a/c à excepção da composição 3 que possui IA na sua constituição.	18
Figura 2.10 - Variação da resistência à compressão com diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação a/c = 0,60 (Cabral et al., 2010).	18
Figura 2.11 - Variação da resistência à compressão com diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação a/c = 0,74 (Cabral et al., 2010)	19
Figura 2.12 - Resistência à compressão dos mesmos betões em função da idade de ensaio: RC - betão só com AN. C30R e C100R - betões com taxas de substituição de 30 e 100% de AFN por AFRB respetivamente (Evangelista e Brito, 2007).	19
Figura 2.13 - Gráfico tensão - deformação para várias taxas de substituição de AGN por AGRB (Topçu et al., 1994).	20
Figura 2.14 - Variação do valor do módulo de elasticidade para diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação a/c = 0,46 (Cabral et al., 2010).....	20
Figura 2.15 - Variação do valor do módulo de elasticidade para diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação a/c = 0,74 (Cabral et al., 2010).....	21
Figura 2.16 - Absorção de água de vários betões (Boltryk et al., 2009): NAC - betão fabricado só com agregados naturais. RAC1, RAC2 e RAC3 - betões com taxas de substituição de AGRB por AGN de 25, 50 e 75%, respectivamente.	22
Figura 2.17 - Representação esquemática da introdução de ar (Bogas, 2011).	23
Figura 2.18 - Repulsão electroestática (Mehta e Monteiro 2008).	23

Figura 2.19 - Molécula de policarboxilato (esquerda). Manutenção da trabalhabilidade através do efeito de repulsão estérica (direita) (BASF, 2013).	24
Figura 2.20 - a) Formação de gelo nos poros presentes na matriz cimentícia. b) formação de gelo nos vazios dentro da matriz cimentícia (Mehta e Monteiro, 2008).....	25
Figura 2.21 - Contração do vazio e consequentemente da matriz cimentícia (Mehta e Monteiro 2008,).....	25
Figura 2.22 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico (calculado com base na frequência transversal fundamental) ao longo do tempo, para os vários tipos de betão (ver §2.2.1) e condições de saturação (Zaharieva et al., 2004).....	28
Figura 2.23 - Factor de durabilidade para cada tipo de betão (Zaharieva et al., 2004).....	28
Figura 2.24 - Resistência à compressão inicial, ao fim de N ciclos e ao fim de 300 ciclos (Zaharieva et al., 2004). NOTA: N ciclos corresponde ao número de ciclos necessários para que o valor limite (60%) de aceitação do factor de durabilidade seja atingido.	29
Figura 2.25 - Resistência à tracção por flexão em função da percentagem de substituição de AGN por AGRB (Topçu et al., 2004).....	30
Figura 2.26 - Factor de durabilidade em função da taxa de substituição de AGN por AGRB (Limbachiya et al., 2004).	31
Figura 2.27 - Velocidade de propagação de ultrassons após 56 ciclos gelo-degelo (Richardson et al., 2011)	32
Figura 2.28 - Perdas de massa após 56 ciclos gelo-degelo (Richardson et al., 2011)	32
3.1 - Sacos com areia calibrada (esquerda). Agregados reciclados, obtidos através da britagem de betão (direita).....	37
Figura 3.2 - Peneiros na máquina de vibração (esquerda) . Coluna de peneiros normalizados (direita).....	38
Figura 3.3 - Picnómetro.....	40
Figura 3.4 - Secagem da superfície de agregados grossos (esquerda). Secagem da superfície de agregados finos (direita).	40
Figura 3.5 - Guia para obtenção de um agregado fino saturado com superfície seca - NP EN 1097-6 (2003).	41
Figura 3.6 - Esquerda: obtenção da massa M_3 . Direita: obtenção da massa M_2	41
Figura 3.7 - Recipientes para medição da baridade (esquerda). enchimento do recipiente com Brita 1 (direita).	43
Figura 3.8 - Máquina para realização do ensaio (esquerda). Esferas metálicas (direita).	44
Figura 3.9 - Curvas de referência com e sem cimento de Faury e curva granulométrica real.	49
Figura 3.10 - Montagem da cofragem para recepção do BO.	52
Figura 3.11 - Cubos produzidos com BO.	53
Figura 3.12 - Fracturação da laje de BO em blocos.....	53

Figura 3.13 - Blocos de betão prontos para reciclagem.....	54
Figura 3.14 - Britadeira utilizada para a reciclagem de betão.	54
Figura 3.15 - Moldes em contraplacado marítimo para execução de provetes prismático 100 x 100 x 300 mm.	55
Figura 3.16 - Dimensões dos moldes utilizados (a vermelho) - adaptado da NP EN 12390-1 (2003).	56
Figura 3.17 - Superplastificante (esquerda). Introdutor de ar (direita).	60
Figura 3.18 - Moldes correspondentes a uma betonagem preenchidos.	60
Figura 3.19 - Câmara húmida para cura dos provetes.	61
Figura 3.20 - Material para execução do ensaio de abaixamento (esquerda) . Execução do ensaio (direita).	62
Figura 3.21 - Abaixamentos verdadeiros e deformados segundo a NP EN 12350-2 (2002)..	62
Figura 3.22 - Medição do abaixamento (esquerda). Medição do abaixamento segundo a NP EN 12350-2 (2002) (direita).	63
Figura 3.23 - Máquina para ensaio à compressão (esquerda). Ensaio à compressão de um cubo de aresta igual a 150 mm (direita).	65
Figura 3.24 - Esquerda: metades resultantes do ensaio à flexão dos provetes prismáticos, prontas a serem ensaiadas à compressão. Direita: pratos auxiliares para ensaio à compressão de cubos de 100mm de aresta e partes resultantes dos provetes prismáticos.	65
Figura 3.25 - Roturas satisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2003).	66
Figura 3.26 - Roturas insatisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2003).	66
3.27 - Esquema de ensaio à tracção por flexão - NP EN 12390-5 (2003).	68
Figura 3.28 - Ensaio de resistência à tracção por flexão.	68
Figura 3.29 - Gaiola metálica acoplada ao provete para medição das deformações. Equipamento de ensaio para determinação do módulo de elasticidade (direita).	69
Figura 3.30 - Calibração do equipamento (esquerda). Medição do tempo de propagação de ultrassons (direita).	71
Figura 3.31 - Réguas de calibração do comparador (esquerda). "Pastilhas" coladas nos provetes prismáticos para medição da variação de comprimento ao longo do tempo (direita).	73
Figura 3.32 - Esquerda: comparador. Direita: medição da variação de comprimento ao fim de n ciclos.	73
Figura 3.33 - Inspeção visual com recurso a lupa para detecção de cristais de gelo.	74
Figura 3.34 - Ciclo gelo-degelo adoptado.	74
Figura 3.35 - Esquema da colocação dos provetes dentro das caixas metálicas (Bogas, 2011).	75
Figura 3.36 - Câmara gelo-degelo (esquerda). Provetes colocados dentro das caixas metálicas no interior da câmara (direita).	75

Figura 4.1 - Curva granulométrica da brita 2.	79
Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita 1.	80
Figura 4.3 - Resultados da absorção de água para AFRB de vários estudos realizados.	81
Figura 4.4 - Relação entre a massa volúmica seca e a absorção de água ao fim de 24 h para várias campanhas.	81
Figura 4.5 - Variação da massa volúmica no estado fresco com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB.	85
Figura 4.6 - Família de betões correntes - resistência à compressão de cubos de 15 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.	87
Figura 4.7 - Família de betões de elevado desempenho - resistência à compressão de cubos de 15 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.	87
Figura 4.8 - Família de betões de elevado desempenho com introdução de ar - resistência à compressão de cubos de 15 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.	88
Figura 4.9 - Resistência à compressão em função da idade para todos os tipos de betão.	89
Figura 4.10 - Variação do coeficiente de eficiência estrutural com o aumento da taxa de substituição de AN por AFRB.	90
Figura 4.11 - Família de betões correntes - resistência à compressão de cubos de 10 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.	92
Figura 4.12 - Família de betões de elevado desempenho - resistência à compressão de cubos de 10 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.	92
Figura 4.13 - Família de betões de elevado desempenho com introdução de ar - resistência à compressão de cubos de 10 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.	92
Figura 4.14 - Relação entre a resistência à compressão aos 7 dias de idade entre cubos de 10 e 15 cm de aresta.	94
Figura 4.15 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de idade entre cubos de 10 e 15 cm de aresta.	94
Figura 4.16 - Resistência à tracção por flexão em função da taxa de substituição de AN por AFRB para as várias famílias de betão.	95
Figura 4.17 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tracção por flexão dos betões produzidos.	97
Figura 4.18 - Excentricidade causada pelo desalinhamento dos pratos auxiliares.	98
Figura 4.19 - Resistência à compressão das partes resultantes do ensaio de resistência à tracção por flexão dos betões produzidos.	99
Figura 4.20 - Betão BR - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).	100

Figura 4.21 - Betão B20R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	100
Figura 4.22 - Betão B50R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	100
Figura 4.23 - Betão B100R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	100
Figura 4.24 - Betão HBR - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	101
Figura 4.25 - Betão HB20R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	101
Figura 4.26 - Betão HB50R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	101
Figura 4.27 - Betão HB100R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	101
Figura 4.28 - Betão HBRIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	102
Figura 4.29 - Betão HB20RIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	102
Figura 4.30 - Betão HB50RIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	102
Figura 4.31 - Betão HBRIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).....	102
Figura 4.32 - Descasque superficial do betão devido à presença de agregados porosos (Rønning, 2001).	103
Figura 4.33 - Variação da massa ao longo do tempo para a família BR.	104
Figura 4.34 - Variação de massa ao longo do tempo para a família HBR.....	105
Figura 4.35 - Variação de massa ao longo do tempo para a família HBRIA.	106
Figura 4.36 - Variação do comprimento ao longo do tempo para a família BR.	108
Figura 4.37 - Variação do comprimento ao longo do tempo para a família HBR.	108
Figura 4.38 - Variação do comprimento ao longo do tempo para a família HBRIA.	108
Figura 4.39 - Velocidade residual de propagação dos ultrassons ao longo do tempo para a família BR.	111
Figura 4.40 - Velocidade residual de propagação dos ultrassons ao longo do tempo para a família HBR.	112
Figura 4.41 - Velocidade residual de propagação dos ultrassons ao longo do tempo para a família HBRIA.....	112
Figura 4.42 - Ensaio à tracção por flexão de um provete da composição B50R.	114

Figura 4.43 - Variação da resistência à tracção por flexão, em termos de valor absoluto, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB de provetes prismáticos, ensaiados sem sofrer a acção do gelo-degelo.	115
Figura 4.44 - Variação da resistência à tracção por flexão, em termos de valor relativo, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB de provetes prismáticos, ensaiados sem sofrer a acção do gelo-degelo.	115
Figura 4.45 - Variação da resistência à tracção por flexão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB de provetes prismáticos, ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo.	116
Figura 4.46 - Valor residual da resistência à tracção por flexão, em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, ao fim de 300 ciclos.	116
Figura 4.47 - Ensaio de resistência à compressão de um provete do tipo B50R após 300 ciclos de gelo-degelo (esquerda). Ensaio de resistência à compressão de um provete do tipo HBR após 300 ciclos de gelo-degelo (direita).	118
Figura 4.48 - Variação da resistência à compressão de provetes prismáticos ensaiados após 300 ciclos gelo-degelo, sem sofrerem a acção de ciclos gelo-degelo.	118
Figura 4.49 - Variação da resistência à compressão de provetes prismáticos ensaiados após 300 ciclos gelo-degelo.	119
Figura 4.50 - Valor residual da resistência à compressão ao fim de 300 ciclos gelo-degelo.	119
Figura 4.51 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB no início do ensaio.	121
Figura 4.52 - Módulo de elasticidade dinâmico residual (%) ao longo de vários ciclos de gelo-degelo para a família BR.	122
Figura 4.53 - Módulo de elasticidade dinâmico residual (%) ao longo de vários ciclos de gelo-degelo para a família HBR.	122
Figura 4.54 - Módulo de elasticidade dinâmico residual (%) ao longo de vários ciclos de gelo-degelo para a família HBRIA.	123
Figura 4.55 - Factor de durabilidade para os vários betões de elevado desempenho analisados.	123

Índice de quadros

Quadro 2.1 - Composição e características dos betões fabricados por Zaharieva et al. (2004).	6
Quadro 2.2 - Composição dos betões fabricados por Topçu e Şengel (2004) - adaptado de Topçu e Şengel (2004).	7
Quadro 2.3 - Local de origem dos vários tipo de betão reciclado utilizados por Limbachiya et al. (2004).	8
Quadro 2.4 - Características dos betões produzidos por Boltryk et al. (2009).	8
Quadro 2.5 - Composição dos betões produzidos por Boltryk et al (2009).....	9
Quadro 2.6 - Massas volúmicas de agregados naturais e reciclados para várias campanhas.	11
Quadro 2.7 - Absorção de água de AN e AR para vários estudos.	12
Quadro 2.8 - Massa volúmicas dos betões de vários estudos em função das taxas de substituição de agregados naturais por reciclados.	14
Quadro 2.9 - Resistência à compressão aos 28 dias.	17
Quadro 2.10 - Valores obtidos por Limbachiya et al. (2004) para o módulo de elasticidade em função das diferentes taxas de substituição de agregados naturais por reciclados.	20
Quadro 2.11 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade em função de várias taxas de substituição de AFN por AFRB.	21
Quadro 2.12 - Resultados da campanha de Boltryk et al. (2009)	31
Quadro 2.13 - Resistência à compressão de cubos com dimensões 100 x 100 x 100 mm, após 56 ciclos gelo-degelo (Richardson et al., 2011).	32
Quadro 3.1 - Ensaio de caracterização dos agregados e respetivas normas	36
Quadro 3.2 - Massa mínima da amostra em função de $D_{máx}$, para análise granulométrica - NP EN 933-1 (2000).	38
Quadro 3.3 - Volume de vazios em função de $D_{máz}$ - adaptado de Pinto et al. (2009)	46
Quadro 3.4 - Parâmetros A e B da curva de Faury (Pinto et al., 2009).	48
Quadro 3.5 - Percentagens passadas nas malhas para os vários tipos de agregado bem como para a curva granulométrica real.	50
Quadro 3.6 - Composição dos vários tipos de betão.	51
Quadro 3.7 - Quantidade de SP e IA utilizados para cada tipo de composição	51
Quadro 3.8 - Ensaio de resistência mecânica no estado endurecido do betão e respetivas normas.	64
Quadro 3.9 - Ensaio para avaliação da durabilidade dos betões aos ciclos gelo-degelo.	64
Quadro 4.1 - Análise granulométrica da brita 2.	78
Quadro 4.2 - Análise granulométrica da brita 1.	79
Quadro 4.3 - Valores das massa volúmicas aparente (ρ_a), seca (ρ_{rd}) e com superfície seca (ρ_{ssd}) dos agregados utilizados, bem como da absorção de água ao fim de 24 h (WA_{24}).	80

Quadro 4.4 - Baridade e volume de vazios dos vários agregados utilizados.	82
Quadro 4.5 - Valores do ensaio do desgaste de Los Angeles para os agregados grossos (brita 2 e brita 1).	82
Quadro 4.6 - Valores do abaixamento obtidos para as várias misturas produzidas.....	83
Quadro 4.7 - Massas volúmicas teóricas e no estado fresco dos betões produzidos e respectivo erro e desvio percentual em relação aos betões de referência BR, HBR e HBRIA.	84
Quadro 4.8 - Resistência dos betões à compressão aos 7, 28 e 90 dias de idade para cubos de 150 mm de aresta.	86
Quadro 4.9 - Eficiência estrutural dos vários betões produzidos.	90
Quadro 4.10 - Valores de resistência à compressão em cubos de 10 cm de aresta aos 7 e 28 dias de idade.	91
Quadro 4.11 - Desvio percentual do valor da resistência à compressão entre cubos de 10 e 15 cm de aresta, aos 7 e aos 28 dias.	93
Quadro 4.12 - Resistência à tracção por flexão dos vários betões produzidos, aos 28 dias de idade.....	95
Quadro 4.13 - Relação entre as resistências à tracção por flexão e compressão dos betões produzidos.....	96
Quadro 4.14 - Resistência à compressão das partes resultantes do ensaio à tracção por flexão.....	98
4.15- Variação de massa ao longo do tempo de provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.	104
Quadro 4.16 - Variação de comprimento ao longo do tempo de provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.....	107
Quadro 4.17 - Variação ao longo do tempo do tempo de propagação de ultrassons em provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.	111
Quadro 4.18 - Resistência à tracção por flexão de provetes prismáticos aos 28 dias e ao fim de 300 ciclos gelo-degelo sem sofrer a acção do gelo-degelo e a sofrer essa mesma acção.	114
Quadro 4.19 - Resistência à compressão de metades resultantes de provetes prismáticos aos 28 dias e no fim do ensaio de gelo-degelo, sem sofrer a acção do gelo-degelo e a sofrer essa mesma acção.....	117
Quadro 4.20 - Valor residual do módulo de elasticidade dinâmico ao fim de vários ciclos gelo-degelo.....	120
Quadro 4.21 - Valor residual do módulo de elasticidade dinâmico, em percentagem, para os vários tipos de betão, ao fim de determinados ciclos de gelo-degelo.	122
Quadro 5.1 - Comparação das propriedades obtidas para os AFRB com as obtidas para os AFN.	127

Quadro 5.2 - Variações e tendências obtidas para os vários betões produzidos em termos de massa volúmica, resistência à compressão aos 28 dias de idade, resistência à tracção aos 28 dias de idade e velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias de idade. 128

Quadro 5.3 - Variações obtidas, ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, no ensaio de resistência à tracção por flexão, variação de massa, variação de comprimento e factor de durabilidade dos betões de elevado desempenho 129

Simbologia

a/c	Relação água cimento efectiva ou aparente, conforme descrito no texto;
RCD	Resíduos de construção e demolição;
AN	Agregados naturais;
AFN	Agregados finos naturais;
AGN	Agregados grossos naturais;
ARB	Agregados reciclados de betão;
AFRB	Agregados finos reciclados de betão,
AGRB	Agregados grossos reciclados de betão;
BO	Betão de origem;
SP	Superplastificante;
IA	Introdutor de ar;
BR	Betão de referência de resistência corrente fabricado apenas com AN;
BΔR	Betão de resistência corrente fabricado com uma taxa de substituição de Δ % de AFN por AFRB;
HBR	Betão de referência de elevado desempenho com SP e sem IA, fabricado apenas com AN;
HBAΔR	Betão de elevado desempenho com SP e sem IA, fabricado com uma taxa de substituição de Δ % de AFN por AFRB;
HBRIA	Betão de referência de elevado desempenho com SP e IA, fabricado apenas com AN;
HBAΔRIA	Betão de elevado desempenho com SP e IA, fabricado com uma taxa de substituição de Δ % de AFN por AFRB.

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

Nos últimos 100 anos, a população mundial aumentou de 1,5 para 6 mil milhões de habitantes, sendo que cerca de 3 mil milhões vivem dentro e nos arredores de grandes cidades. Este crescimento natural, a urbanização e a modernização da população deram origem a um aumento exponencial da actividade da indústria e da construção civil. O principal material utilizado de modo a satisfazer estas necessidades é o betão, sendo que, em termos de volume, é o material manufacturado com maior produção no mundo inteiro. Desta forma, é natural que haja uma preocupação constante em expandir o conhecimento acerca das suas propriedades físicas, mecânicas e em termos de durabilidade, de modo a tirar melhor proveito deste e a descobrir novas fronteiras para a sua utilização (Topçu et al., 1995; Mehta e Monteiro, 2006).

Todos os dias edifícios velhos são demolidos e edifícios novos são construídos. Roa et al. (2006), citando Chandra (2004, 2005), referem que o acumular de vários anos de construção e de demolição de edifícios resultou no aparecimento de dois grandes problemas: exploração descontrolada dos agregados naturais (AN), não renováveis, e aumento dos resíduos de construção e demolição (RCD), que normalmente possuem na sua composição vários elementos, entre os quais alvenaria, aço e betão. Para além da reciclagem dos RCD se mostrar uma solução mais sustentável, em comparação com o uso descontrolado de AN, Brito (2005) refere que a envolvente económica em alguns países, sob a forma de incentivos e diminuição de taxas e outros impostos, bem como uma fiscalização económica eficaz, pode levar a que seja economicamente viável a utilização de agregados reciclados de betão (ARB) face a AN. São exemplos; a Polónia, em que a regulamentação prevê este tipo de situação, obrigando à reutilização de desperdícios provenientes da construção por parte dos produtores desse resíduo (Boltryk et al., 2009), e o Reino Unido, em que existe também um enquadramento legal que encoraja à utilização de agregados reciclados de betão em detrimento dos agregados naturais (Limbachiya et al., 2004). A reciclagem de betão, para obtenção de agregados, pode ainda tornar-se economicamente viável em determinadas situações, como por exemplo no caso de não haver agregados naturais na proximidade do local de construção, minimizando os custos de transporte de resíduos, sendo estes aproveitados no próprio local (Topçu, 1995).

Segundo dados do INE, o sector da construção representou, em 2010, 34% do volume total de resíduos produzidos em termos sectoriais, correspondendo esta percentagem a um valor de cerca de 11 milhões de toneladas. O mesmo instituto afirma que a quantidade de resíduos encaminhados para valorização, comparativamente com aqueles encaminhados para eliminação, tem vindo a decrescer. Segundo Brito (2005), em Portugal, ainda não há uma consciencialização suficientemente grande no que diz respeito à reutilização de recursos, sendo este facto agravado, no caso do sector da construção, pelas grandes reservas de agregados naturais disponíveis no país,

permitindo assim um esquecimento da necessidade de reciclar. Ainda segundo dados apresentados pelo INE (Figura 1.1), a fatia de resíduos pertencentes à indústria da construção corresponde a aproximadamente 3 milhões de toneladas com potencial de valorização em termos de reciclagem, sendo que a restante percentagem de resíduos pertencente a este sector tem como destino a eliminação ou a valorização energética.

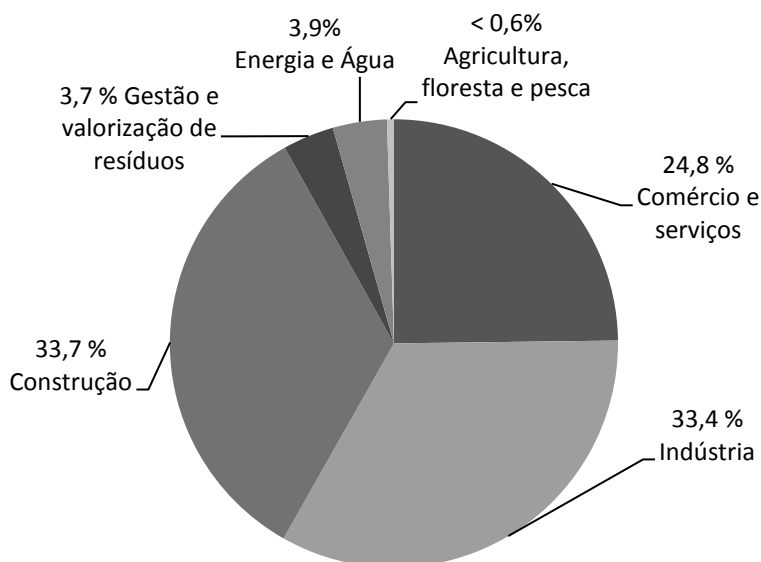


Figura 1.1 - Resíduos sectoriais (INE 2010)

Os desperdícios provenientes da reutilização de betão são frequentemente utilizados em estradas ou em bases de pavimentos para parques de estacionamento (Zaharieva et al., 2004; Boltryk et al., 2009), sendo que a maior parte da bibliografia existente se foca nestes casos. Este tipo de material pode no entanto ser utilizado no fabrico de betão estrutural, através da substituição de agregados naturais por reciclados, tanto grossos como finos. Assim, têm vindo a desenvolver-se nos últimos anos várias campanhas experimentais em diversos países, nomeadamente em Portugal e no IST, cujo objectivo é compreender a influência que os agregados reciclados de betão têm no fabrico deste, analisando as suas vantagens e desvantagens, com o principal objectivo de descobrir uma forma mais sustentável de utilizar betão como material de construção.

Appleton (2013) reitera a importância do desenvolvimento sustentável ao nível da engenharia civil, sendo que a reciclagem de resíduos de construção e demolição pode ser um passo importante neste sentido.

1.2.Objectivos da dissertação

A presente dissertação insere-se num projecto científico que se tem vindo a desenvolver no Instituto Superior Técnico e que tem como objectivo expandir o conhecimento científico existente acerca de betões fabricados com ARB, tendo, neste caso, como objectivo principal, avaliar a resistência ao gelo-degelo de betões fabricados com agregados finos reciclados de betão (AFRB), com base na norma ASTM C666, que

prevê a exposição de provetes prismáticos de betão a 300 ciclos acelerados de gelo-degelo.

De forma a atingir este objectivo foram estudados três tipos distintos de betão: um betão corrente, produzido sem adjuvantes (relação a/c efectiva de 0,54); um betão de elevado desempenho (relação a/c efectiva de 0,35) com superplastificante (SP) e sem agente introdutor de ar (IA) e um betão de elevado desempenho com SP e IA. Foram utilizadas taxas de substituição de 0, 20, 50 e 100% de AFN por AFRB em cada família de betão, perfazendo um total de 12 composições produzidas. Com base nas composições fabricadas, pretende-se aferir a influência dos AFRB nas propriedades do betão e identificar as vantagens ou desvantagens da utilização de IA em betões reciclados submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.

Para além do ensaio de durabilidade a ciclos acelerados gelo-degelo, que abrange a monitorização de variações de massa ao longo do tempo, de velocidade de propagação de ultrassons e de comprimento dos espécimes produzidos, foram ainda realizados ensaios de resistência à compressão e tracção, antes e após a acção do gelo-degelo, de modo a caracterizar a resistência mecânica dos betões produzidos.

Assim, pretende-se caracterizar os betões estudados, com o objectivo de concluir acerca dos seguintes pontos:

- influência dos AFRB na durabilidade de betões submetidos a ciclos gelo-degelo;
- influência do IA na durabilidade de betões reciclados submetidos a ciclos gelo-degelo;
- influência dos AFRB na resistência mecânica e propriedades físicas dos betões produzidos;
- influência do IA na resistência mecânica e propriedades físicas dos betões produzidos.

1.3. Metodologia e organização da dissertação

A presente dissertação tem por base um extenso trabalho experimental, através do qual foi possível a obtenção de resultados práticos. Assim sendo, foi, inicialmente, realizada uma vasta pesquisa bibliográfica incidente nos assuntos estudados, de modo a analisar, compreender e comparar os resultados obtidos com os existentes. Com base nessa pesquisa, foram ajustados os objectivos da dissertação, tendo-se decidido quais os ensaios experimentais a realizar, o tipo de ARB a utilizar (finos ou grossos) e outros pormenores, como por exemplo, a composição dos betões ou a quantidade de IA e SP a utilizar em cada composição. Foi, de seguida, realizada uma vasta campanha experimental, durante a qual foram produzidos os AFRB e os betões a estudar, tendo sido realizados os ensaios experimentais necessários à sua caracterização. Por fim, com base em toda a informação recolhida, foram analisados e discutidos os resultados.

Desta forma, o presente texto divide-se em 5 capítulos distintos:

- Capítulo 1: consiste numa pequena introdução aos temas abordados na dissertação e aos objectivos da mesma, explicando a sua estrutura;
- Capítulo 2: consiste no levantamento bibliográfico, i.e, estado da arte, referente aos temas abordados. São estudadas as principais campanhas experimentais levadas a cabo na área da durabilidade a ciclos gelo-degelo com betões fabricados com ARB e são analisadas as propriedades dos ARB bem como as de betões produzidos com esses agregados;
- Capítulo 3: é uma descrição da campanha experimental e seus pressupostos, sendo crucial a sua consulta durante a análise dos resultados, uma vez que é nele que estão descritos os procedimentos experimentais bem como as composições dos betões fabricados;
- Capítulo 4: consiste na apresentação e análise dos resultados, procurando chegar a conclusões verosímeis, bem como na sua comparação com aqueles obtidos por outros autores;
- Capítulo 5: são expostas as conclusões gerais da dissertação, com base na bibliografia existente e nos resultados experimentais obtidos. São ainda propostos temas para desenvolvimento futuro.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas, bem como a lista de anexos referidos ao longo do texto.

2. Estado da Arte

2.1.Introdução

O presente capítulo destina-se à apresentação do Estado da Arte relativo às principais propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados de betão, dos betões produzidos com esses agregados e da sua resistência à acção gelo-degelo.

Torna-se importante a aquisição de um conhecimento científico o mais abrangente possível na área que se pretende estudar, de modo a poder compreender os resultados experimentais obtidos. É também através da comparação dos estudos passados com o agora realizado que se pode contribuir para o desenvolvimento científico na área da engenharia civil, de uma forma coerente e progressiva.

Pretende-se destacar a importância do fabrico de betões com agregados reciclados e do estudo do comportamento deste material compósito quando sujeito à acção do gelo-degelo. Inicialmente, é apresentada a descrição das principais campanhas experimentais realizadas que envolvem o comportamento aos ciclos gelo-degelo de betões fabricados com agregados reciclados. Esta descrição torna-se imprescindível visto que, dependendo do autor, são utilizados materiais e normas variados. Ao longo deste capítulo, são também apresentados resultados de outras campanhas que não as supracitadas, explicando-se de uma forma geral os trâmites desses estudos.

Em seguida, são analisadas as propriedades dos agregados reciclados de betão (ARB), tais como a massa volúmica e a absorção de água, com relevância na formulação e produção dos betão. Posteriormente, são analisadas algumas propriedades no estado fresco e endurecido de betões fabricados com ARB, tais como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Visto terem sido utilizados adjuvantes no presente trabalho, nomeadamente introdutores de ar (IA) e superplastificantes (SP), optou-se também por abordar o mecanismo de acção destes na produção de betão, de modo a poder analisar de uma forma mais correcta os resultados obtidos.

Finalmente, é analisado o mecanismo de degradação do betão devido à acção do gelo-degelo e são apresentados os resultados das principais campanhas experimentais.

2.2.Descrição das principais campanhas

São apresentadas de seguida as principais campanhas experimentais relativas à durabilidade a ciclos gelo-degelo de betões fabricados com agregados reciclados. Os estudos estão organizados por ordem cronológica da sua realização, de modo a melhor avaliar a evolução do conhecimento ao longo do tempo.

2.2.1.Campanha de Zaharieva et al. (2004)

Zaharieva et al. (2004) utilizaram agregados finos e grossos reciclados obtidos industrialmente, tendo os primeiros dimensões entre 0 e 6 mm e os segundos entre 6 e 20 mm.

Foram produzidos quatro tipos de betão, denominados pelos autores como NA (fabricado apenas com agregados naturais), RAC1 (fabricado com agregados grossos reciclados e finos naturais), RAC2 (fabricado só com agregados reciclados e pré-saturados) e RAC3 (fabricado só com agregados reciclados e não pré-saturados). Foi adicionado superplastificante com o nome comercial de "*Sikament 10*", não tendo sido adicionados quaisquer introdutores de ar, de forma a minimizar o número de variáveis. No Quadro 2.1, são apresentadas as composições dos betões fabricados neste estudo.

Quadro 2.1 - Composição e características dos betões fabricados por Zaharieva et al. (2004).

Betão	NAC	RAC1	RAC2	RAC3
Cimento [kg/m ³]	400	400	400	400
Superplastificante, 22% da matéria seca [dm ³ /m ³]	4	4	4	4
Água total [dm ³ /m ³]	171	200	262	245
Água efectiva calculada [dm ³ /m ³]	150	135	130	109
Areia natural 0/5 mm [kg/m ³]	685	787	-	-
Agregado fino reciclado 0/6 mm [kg/m ³]	-	-	659	675
Agregado grosso reciclado 6/20 mm [kg/m ³]	-	824	846	865
a/c total	0,43	0,5	0,66	0,61
a/c efectiva	0,37	0,34	0,33	0,27
Abaixamento [cm]	4,5	5,5	9,0	5,0

A temperatura a que os provetes (com dimensões 70 x 70 x 280 mm) foram submetidos e a duração dos ciclos gelo-degelo foram baseados na norma francesa NF P 18-424 e ajustados de modo a reproduzir condições reais. Os autores não especificam exatamente os ciclos gelo-degelo que adoptaram, mas não deverão ser muito diferentes do apresentado na Figura 2.1.

O comportamento aos ciclos gelo-degelo dos betões produzidos foi analisado em quatro condições de saturação distintas, nomeadamente saturação completa (provetes totalmente emersos), inicial (evaporação inicial de água de amassadura dificultada), cíclica (provetes sujeitos a ciclos de molhagem / secagem) e Hirschwald (por absorção capilar), tendo sido utilizados como critérios de avaliação da resistência aos ciclos gelo-degelo a variação do comprimento segundo a NF P 18-424 e o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico relativo, para obtenção do factor de durabilidade segundo a ASTM C666 (definido em §3.7.7.4). O referido módulo de elasticidade foi obtido de duas formas distintas: através da velocidade de propagação de ultrassons e através da frequência transversal fundamental.

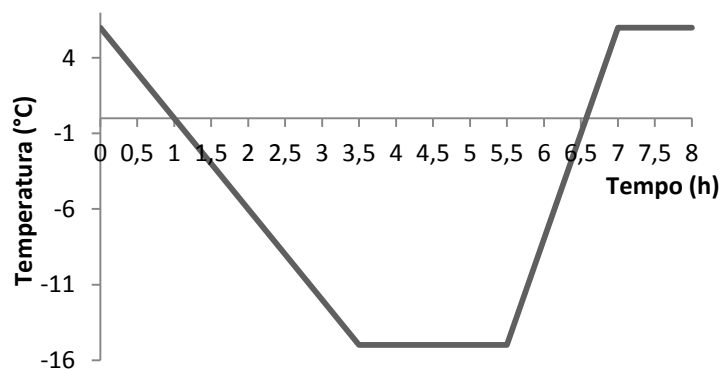


Figura 2.1 - Ciclos gelo-degelo adoptados na campanha de Zaharieva et al. (2004)

2.2.2. Campanha de Topçu e Şengel (2004)

O objectivo do estudo levado a cabo por Topçu et Şengel (2004) foi a produção de betões C16 e C20 (resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias, em cilindros), utilizando agregados reciclados provenientes da britagem de provetes laboratoriais, da classe de resistência C14. Foram substituídos AGN por AGRB nas seguintes percentagens: 0, 30, 50, 70 e 100%. São apresentados no Quadro 2.2 as composições dos betões produzidos por estes autores.

Quadro 2.2 - Composição dos betões fabricados por Topçu e Şengel (2004) - adaptado de Topçu e Şengel (2004).

Variável	C16					C20				
	Taxa de substituição de AGN por AGRB [%]									
	0	30	50	70	100	0	30	50	70	100
Cimento [kg/m ³]	327	316	310	307	289	209	202	197	196	184
Água [kg/m ³]	209	202	197	196	184	209	202	197	196	184
a/c	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
AFN [kg/m ³]	901	549	370	371	-	885	539	363	365	-
AGN [kg/m ³]	914	743	564	188	-	898	730	553	185	-
AGRB [kg/m ³]	-	510	860	1205	1764	-	501	844	1185	1738

Em todas as misturas, os ARB foram pré-saturados de modo a facilitar o controlo da absorção durante a mistura e assim minimizar as perdas de trabalhabilidade.

Os ciclos gelo-degelo tiveram uma duração de 24 h durante 8 dias consecutivos, sendo a temperatura mínima atuante de -20 °C durante 8 h e a máxima de 16 °C durante 16 h.

2.2.3. Campanha de Limbachiya et al. (2004)

Limbachiya et al. (2004) analisaram betão reciclado, proveniente de quatro fontes distintas conforme especificado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Local de origem dos vários tipo de betão reciclado utilizados por Limbachiya et al. (2004).

Local de origem	Características / (Resistência à compressão [MPa])
Betão fabricado em laboratório	Constituído totalmente por betão, com pouca contaminação e homogéneo (10 - 70 MPa)
Pavimentos de aeroporto	Consistência relativamente regular, com pouca contaminação (40 MPa)
Betão estrutural rejeitado	Constituído totalmente por betão, com pouca contaminação e homogéneo, pasta cimentícia altamente hidratada (50 - 60 MPa)
Betão proveniente da demolição de estruturas	Com contaminação elevada, consistência irregular e materiais constituintes desconhecidos (30 - 40 MPa)

Os agregados reciclados foram produzidos e utilizados com dimensões entre 5 e 20 mm. Foi utilizado cimento 42,5N conforme definido na BS 12 (1996). De forma a atingir um abaixamento de 75 mm, foi utilizado superplastificante. De modo a garantir a resistência à acção de gelo-degelo, foi ainda adicionado às amassaduras um introdutor de ar baseado em sulfato de éter numa dosagem de 400 ml/100 kg de modo a obter entre 5 e 6% de teor de ar no betão. Foi fabricado betão com resistência à compressão média de 35 MPa, tendo-se recorrido a taxas de substituição de AGN por AGRB de 20, 30, 50 e 100%.

2.2.4. Campanha de Boltryk et al. (2009)

Boltryk et al. (2009) utilizaram CEM I 32.5 R na produção de betões com agregados reciclados provenientes da britagem de antigos provetes laboratoriais, garantindo assim a ausência de impurezas. Os agregados reciclados foram então separados nas fracções 2/4, 4/8 e 8/16 mm, tendo sido lavados de modo a remover todo o pó. Utilizou-se areia de rio para a fracção 0/2 mm. Foram executados provetes com diferentes taxas de substituição de AN por ARB (0; 25; 50 e 75%). Estas misturas foram designadas de NAC, RAC1, RAC2 e RAC3, respectivamente (Quadro 2.4). As composições destes betões estão presentes no Quadro 2.4. Os provetes foram submetidos a 75 ciclos gelo-degelo sendo que o arrefecimento foi feito ao ar até -20 ± 2 °C durante 4 h e o aquecimento realizado dentro de água até $+18 \pm 2$ °C, também durante quatro horas.

Quadro 2.4 - Características dos betões produzidos por Boltryk et al. (2009).

Variável	NAC	RAC1	RAC2	RAC3
a/c	0,45	0,47	0,49	0,51
Vebê [s]	6	6	7	6
Massa volúmica [kg/m ³]	2470	2440	2418	2389

Quadro 2.5 - Composição dos betões produzidos por Boltryk et al (2009)

Betão	Cimento [kg]	Água [dm ³]	a/c	Areia	Agregado natural			Agregado reciclado		
				0/2 [kg]	2/4 [kg]	4/8 [kg]	8/16 [kg]	2/4 [kg]	4/8 [kg]	8/16 [kg]
NAC	387	174	0,45	573	191	382	763	-	-	-
RAC1	378	178	0,47	566	141	283	565	47	94	189
RAC2	376	184	0,49	557	93	185,5	371,5	93	185,5	371,5
RAC3	374	191	0,51	547	46	91	182	137	274	548

2.2.5. Campanha de Richardson et al. (2011)

Richardson et al. (2011) utilizaram agregados reciclados com dimensões entre 8 e 20 mm, sendo que 70% da sua composição consistiu em cerâmica vermelha e azul e os restantes 30% em betão reciclado com resistência desconhecida. Os autores substituíram os AGN por AGR, tal como no estudo realizado por Zaharieva et al. (2004), denominando essa mistura como RAC1.

Foram utilizados, na produção do betão, um agente introdutor de ar e fibras de polipropileno sendo o cimento utilizado do tipo CEM I. Os provetes foram separados em dois grupos: um com agregados reciclados e outro sem agregados reciclados, sendo que estes dois grupos se subdividem em 3 subgrupos: um sem adições (VP), outro com um agente introdutor de ar (VA) e, por fim, um com fibras de polipropileno (VF).

A durabilidade aos ciclos gelo-degelo do betão produzido foi avaliada segundo a ASTM C666. Os provetes foram sujeitos a arrefecimento ao ar até a uma temperatura de -18 °C e ao aquecimento em água a 20 °C, até os provetes atingirem uma temperatura de 6 °C. Foram realizados 56 ciclos gelo-degelo.

2.3. Propriedades dos agregados reciclados de betão

São neste ponto apresentadas as propriedades dos agregados reciclados de betão, nomeadamente no que diz respeito à massa volúmica e absorção de água, tendo esta última uma grande importância durante o período de amassadura, como será explicado.

2.3.1. Introdução

Admite-se que um agregado é reciclado de betão quando é constituído por mais de 95% de betão britado. Estes agregados apresentam-se em geral mais angulosos e porosos do que os naturais (Limbachiya et al., 2004).

Os agregados representam cerca de 70 a 75% do volume de betão, assumindo como tal grande influência no comportamento do mesmo. Por exemplo, sabe-se que a pasta cimentícia presente nos agregados reciclados de betão pode fazer com que estes sejam

mais susceptíveis à acção de gelo-degelo, devido à sua maior porosidade (Zaharieva et al., 2004).

Em termos gerais, a massa volúmica dos agregados reciclados de betão tende a ser menor do que a dos agregados naturais e a sua absorção de água tende a ser maior. O valor obtido através do ensaio de desgaste de Los Angeles tende a ser superior nos agregados reciclados, devido à pasta cimentícia residual presente neste tipo de agregados (Figura 2.2). Estima-se que a percentagem de pasta nos agregados reciclados de betão seja cerca de 30% para agregados com dimensões entre 16 e 32 mm e de 60% em agregados com dimensões entre 4 e 8 mm. (Topçu et al., 2002).

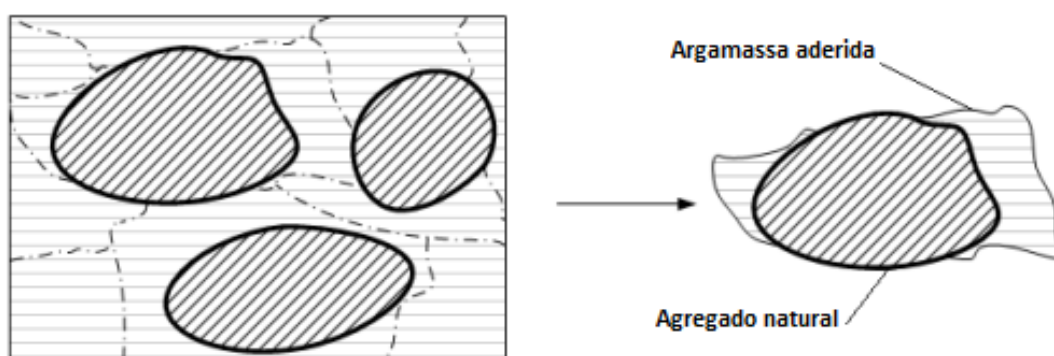


Figura 2.2 - Gênese dos agregados reciclados de betão (Pereira, 2010)

As propriedades dos agregados reciclados de betão dependem do tipo de betão de origem, idade em que foi reciclado e local onde foi produzido ou utilizado. A escassez de documentos normativos referentes a agregados reciclados e às suas utilizações na construção perpetua a relutância em utilizá-los em projetos de engenharia, em variadas condições de exposição ambiental. Sugere-se assim que haja, cada vez mais, uma uniformização em termos da produção de betão reciclado e do acompanhamento técnico durante a mesma (Zaharieva et al., 2004; Boltryk et al., 2009; Richardson et al., 2011).

Quando possível, sugere-se a lavagem dos agregados reciclados de betão antes de serem utilizados. A remoção de impurezas através deste processo leva ao fortalecimento da zona de interação agregado-pasta, aumentando a sua coesividade e consequentemente a resistência mecânica. Aos agregados reciclados de betão devem ser removidos, dentro do possível, outros materiais como madeira, cerâmica, aço e outros (Topçu et al., 2002; Boltryk et al., 2009). Segundo Boltryk et al. (2009), a diferença no valor da resistência à compressão de betões fabricados com agregados reciclados lavados ou não lavados pode chegar a 10%.

Evangelista e Brito (2009) referem que a utilização de agregados finos reciclados de betão (AFRB) tem sido uma das últimas opções no que diz respeito ao aproveitamento de betão para reciclar. A explicação prende-se com o facto de diversos estudos iniciais comprovarem que a utilização deste tipo de agregados provoca perdas acentuadas nas características do betão, tais como a resistência à compressão ou o módulo de elasticidade.

2.3.2.Massa volúmica

A massa volúmica do betão tende a diminuir com o aumento da taxa de substituição de agregados naturais por reciclados. Isso é observado por Boltryk et al. (2009) e Zaharieva et al. (2004). Zaharieva et al. (2004) referem que normalmente os agregados reciclados apresentam uma massa volúmica menor do que os naturais, com valores de $2,16 \pm 0,4 \text{ t/m}^3$ para os agregados grossos e de $2,25 \pm 0,4 \text{ t/m}^3$ para os finos. Já Limbachiya et al. (2004) afirmam que os agregados reciclados de betão tendem a ter valores de massa volúmica entre 3 e 10% inferiores aos dos agregados naturais. São apresentados no Quadro 2.6 os valores de massa volúmica obtidos para agregados naturais e reciclados em vários estudos.

Quadro 2.6 - Massas volúmicas de agregados naturais e reciclados para várias campanhas.

Campanha	Fracção	Massa volúmica [kg/m^3]	
		AN	ARB
Hansen e Narud (1983)	4 - 8mm	-	2340
	16 - 32 mm	-	2490
Topçu et al. (1995)	9 - 31,5 mm	2500	2450
Topçu et al. (2002)	Finos e Grossos	2660 - 2700	2470
Limbachiya et al. (2004)	5 - 20 mm	2540	2580
Evangelista e Brito (2007)	0,074 - 2,38 mm	2544	1913
Cabral et al. (2010)	Finos	2640	2560
	Grossos	2870	2270

Topçu et al. (2002) obtiveram valores de massa volúmica, para agregados obtidos através da reciclagem de provetes cilíndricos C14, de 2470 kg/m^3 . Os mesmos autores chegaram a um valor de 2660 e 2700 kg/m^3 para agregados finos e grossos naturais, respetivamente, comprovando a tendência descrita.

2.3.3.Absorção de água

Devido à pasta cimentícia que normalmente está acoplada aos agregados reciclados, a absorção de água nestes, em comparação com a dos agregados naturais, tende a ser mais elevada. Quando maior for a quantidade de fracções muito finas de agregados reciclados ($< 0,063 \text{ mm}$), maior será a retenção de água por parte dos mesmos (Boltryk et al., 2009).

A porosidade dos agregados reciclados, relacionada com a sua absorção de água, encontra-se normalmente entre 11 e 22%. A absorção de água encontra-se normalmente

à volta de 5,8% para os agregados grossos reciclados e de 12,5% para os agregados finos reciclados (Topçu et al., 2002). Limbachiya et al. (2004) afirmam que a absorção de água por parte dos agregados reciclados tende a ser entre 3 e 5 vezes superior à dos agregados naturais no estado saturado com superfície seca, devido à porosidade da pasta cimentícia residual que envolve este tipo de agregados.

São apresentados no Quadro 2.7 os valores da absorção de água obtidos por vários autores para agregados naturais e reciclados.

Quadro 2.7 - Absorção de água de AN e AR para vários estudos.

Estudo	Tempo [h]	Fracção	WA [%]- Absorção de água	
			Agregado natural	Agregado reciclado
Hasaba et al. (1981)	24	5 - 25 mm	-	7
Hansen e Narud (1983)	24	4 - 8 mm	-	8,7
		16 - 32 mm	-	3,7
Topçu et al. (1995)	0,5	9 - 31,5 mm	1,5	7
Topçu et al. (2002)	0,5	Finos e Grossos	1,5	7
Limbachiya et al (2004)	N/D	5 - 20 mm	2,5	5,5
Evangelista e Brito (2007)	24	0,074 - 2,38 mm	0,8	13,1
Boltryk et al. (2009)	24	2 - 16 mm	3	5,3
Cabral et al. (2010)	N/D	Finos	0,42	7,55
		Grossos	1,22	5,65

Evangelista e Brito (2007), citando Neville (1995), referem que, após a introdução do ligante na amassadura, a absorção de água por parte dos agregados reciclados diminui devido à selagem dos poros dos agregados, limitando assim este fenómeno.

2.4. Propriedades dos betões fabricados com agregados reciclados de betão

Tendo agora uma noção generalizada das propriedades dos agregados reciclados de betão, incide-se neste ponto nas propriedades dos betões fabricados com esse tipo de agregados.

2.4.1. Introdução

A prática comum na produção de betões reciclados consiste na substituição natural de AGN por AGR. A utilização de agregados finos reciclados é normalmente desencorajada, uma vez que se tem verificado ser prejudicial às propriedades do betão no estado fresco. Sabe-se que normalmente os agregados reciclados têm características

mecânicas satisfatórias, apesar de serem inferiores às dos agregados naturais (Topçu et al., 2002; Zaharieva et al., 2004). Topçu et al. (2002) referem no entanto que, uma vez que é necessária mais água de amassadura para manter a trabalhabilidade do betão quando se usa este tipo de agregados, se deve procurar utilizar agregados finos de modo a manter a relação a/c desejada. Este facto deve-se a estes possuírem uma maior quantidade de pasta cimentícia residual em comparação com os agregados grossos. Topçu (1997) analisou a velocidade de propagação de ultrassons em função da taxa de substituição de AN por ARB, como mostra a Figura 2.3. Como se pode observar, quanto maior for esta taxa de substituição, maior será o tempo de propagação de ultrassons, ou seja, mais poroso será o betão.

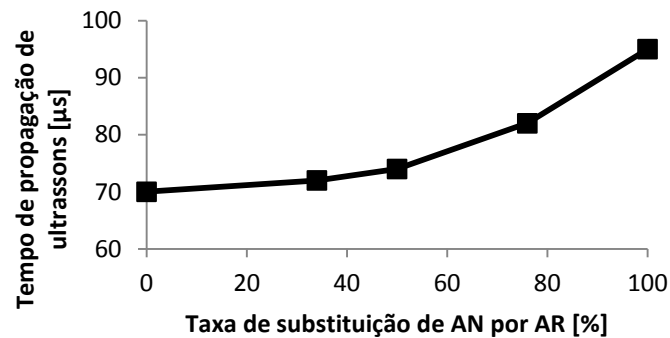


Figura 2.3 - Tempo de propagação de ultrassons em função da taxa de substituição de AN por AR (Topçu, 1997).

Topçu et al. (2002), citando Gökçü et al. (2000), referem que os betões produzidos com agregados finos reciclados de betão podem apresentar uma melhor durabilidade aos ciclos gelo-degelo do que outros fabricados com agregados finos naturais.

2.4.2. Massa volúmica

Topçu et al. (2002) chegaram à conclusão de que a massa volúmica do betão tende a decrescer com o aumento da taxa de substituição de agregados reciclados de betão por agregados naturais (Figura 2.4). Em média, os betões fabricados com este tipo de agregados tendem a ser cerca de 6% mais leves.

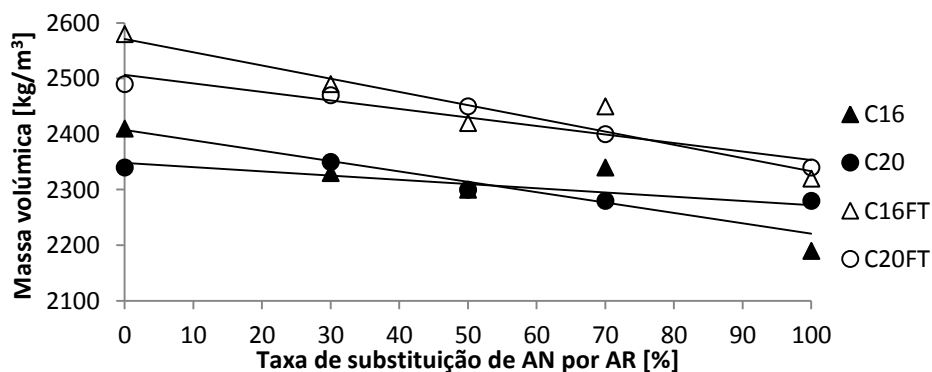


Figura 2.4 Relação entre a taxa de substituição de agregados grossos reciclados de betão por naturais e a massa volúmica do betão (Topçu e Şengel, 2004).

Quadro 2.8 - Massa volúmicas dos betões de vários estudos em função das taxas de substituição de agregados naturais por reciclados.

Campanha	Taxa de substituição de agregados naturais por reciclados [%]					
	0	25	50	75	100	
	Massa volúmica [kg/m ³]					
Zaharieva et al. (2004)	2380	-	-	-	2160 - 2300	
Boltryk et al. (2009)	2470	2440	2418	2389	-	
Richardson et al. (2011)	s/ IA	2204	-	-	-	2215
	c/ IA	2142	-	-	-	2182

O estudo levado a cabo dois anos mais tarde por Topçu e Şengel (2004) reitera esta tendência. Como se pode observar através do Quadro 2.8, existe uma tendência generalizada para a massa volúmica do betão diminuir com o aumento da taxa de substituição de AN por ARB.

No entanto, no estudo efetuado por Richardson et al. (2011), observa-se que esta tendência não se verifica (Quadro 2.8). Como referido em §2.3.5, os betões produzidos nesta campanha tinham, para além de ARB, uma percentagem elevada de material reciclado de cerâmica azul. Os autores apresentam, como justificação para esta inversão da tendência normal, o facto de a angulosidade dos AR associados à percentagem de cerâmica azul presente nos betões levar a um maior agrupamento das partículas, provocando assim uma maior massa volúmica.

2.4.3. Trabalhabilidade

A grande absorção de água por parte dos agregados reciclados é o maior obstáculo no que diz respeito à produção de betão. O betão fresco produzido com este tipo de agregados diminui rapidamente a sua trabalhabilidade, mesmo quando são utilizados superplastificantes (Zaharieva et al., 2004).

De modo a evitar a perda de trabalhabilidade, deve-se proceder à pré-saturação dos agregados reciclados (Richardson et al., 2011). Apesar disso, Topçu e Şengel (2004) chegaram à conclusão no seu estudo que a trabalhabilidade decresce (entre 15 e 20%) com o aumento da taxa de substituição de agregados naturais por reciclados de betão, mesmo quando a absorção de água é controlada. A Figura 2.5 mostra os resultados obtidos por estes autores.

Limbachiya et al. (2004) comprovaram que a utilização de ARB provoca uma perda na trabalhabilidade do betão, referindo no entanto que nunca é ultrapassado o intervalo de variações aceitáveis estipulado (± 25 mm) para o estudo em questão.

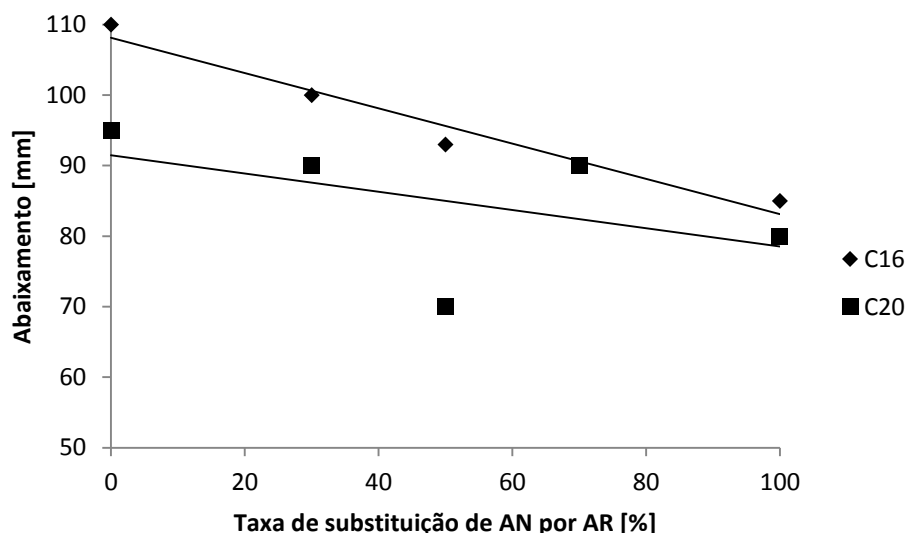


Figura 2.5 - Relação entre a taxa de substituição de agregados grossos naturais por reciclados do betão e o valor do abaixamento do betão (Topçu e Şengel 2004).

2.4.4. Resistência à compressão

Richardson et al. (2011), citando Meyer (2009), referem que a resistência à compressão de betão fabricado com AGRB, em comparação com outro fabricado apenas com AGN, diminui entre 5 e 24%. O mesmo autor refere que, quando são utilizados tanto AGRB como AFRB, em detrimento de AN, a redução na resistência à compressão do betão pode ir desde 15 a 40%. Vários estudos comprovam que a utilização de agregados finos reciclados de betão pode causar uma diminuição da resistência à compressão até 30% (Boltryk et al., 2009; Ajdukiewicz et al., 2002; Khatib et al., 2005). Uma das razões para esta diminuição resulta do facto de os agregados reciclados produzirem um maior volume de vazios dentro do betão, devido à sua porosidade, diminuindo assim a resistência à compressão.

Apesar de normalmente a resistência à compressão ser menor em betões que utilizam ARB na sua composição, nem sempre isso sucede. Richardson et al. (2011), tendo por base Shigematsu et al. (2010), referem que a pré-lavagem dos agregados reciclados antes da amassadura proporciona, através da remoção de finos, agregados com boa qualidade. Por outro lado, o ato de pré-saturar os agregados pode levar à criação de uma reserva de água no interior da matriz cimentícia, proporcionando cura interna e assim uma melhor hidratação da pasta com conseqüente aumento da resistência à compressão. Ferreira (2007) comprovou que o facto de compensar a água de amassadura é ligeiramente mais eficaz do que proceder à pré-saturação dos agregados.

Topçu et al. (1997) mostram que, quanto maior for a taxa de substituição de AN por ARB, menor será a resistência à compressão do betão (Figura 2.6)

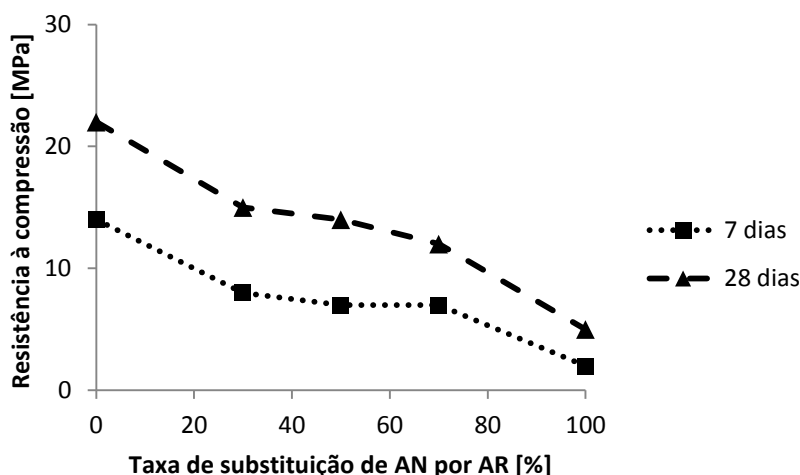


Figura 2.6 - Resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de idade de betões fabricados com diferentes taxas de substituição de AN por ARB (Topçu et al., 1997).

Boltryk et al. (2009) não obtiveram diferenças muito significativas, no que diz respeito à resistência à compressão, para betões fabricados com substituição parcial ou total de agregados naturais por agregados grossos reciclados de betão. Aos 28 dias, os betões com 25% (RAC1) e 75% (RAC3) de taxa de substituição de agregados grossos apresentaram a maior resistência à compressão. Aos 90 dias, o betão que apresenta maior resistência à compressão é o fabricado apenas com agregados naturais (NAC), sendo que o que apresenta menor resistência é o RAC1 (Figura 2.7). Os resultados mostram assim, que apesar de existirem diferenças entre betões fabricados com AGN e AGRB, essa diferença não é significativa.

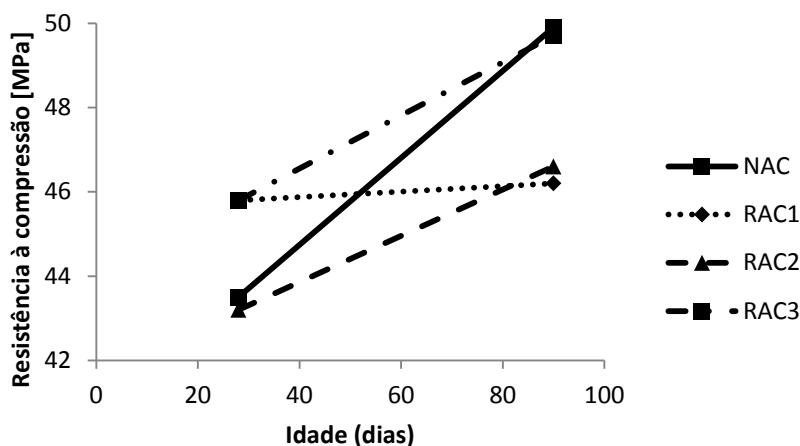


Figura 2.7 - Resistência à compressão de diferentes betões: NAC - betão fabricado só com agregados naturais, RAC1, RAC2 e RAC3 - betões com taxas de substituição de AGRB por AGN de 25, 50 e 75% respectivamente (Boltryk et al., 2009).

Zaharieva et al. (2004) fabricaram quatro tipos de betão diferentes denominados por NAC (betão só com agregados naturais), RAC1 (betão com agregados grossos reciclados e finos naturais), RAC2 (betão só com agregados reciclados, sem pré-

saturação dos mesmos) e RAC3 (betão só com agregados reciclados, com pré-saturação dos mesmos). São apresentados no Quadro 2.9 os resultados obtidos.

Quadro 2.9 - Resistência à compressão aos 28 dias (Zaharieva et al., 2004).

Tipo de betão	Resistência à compressão aos 28 dias [MPa]
NAC	47,7
RAC1	37,8
RAC2	34,2
RAC3	38,1

Os resultados mostram que a resistência à compressão é mais elevada no betão fabricado apenas com agregados naturais. No entanto, no caso de se pré-saturar os agregados reciclados, comprova-se que a resistência à compressão é ligeiramente maior num betão fabricado totalmente com agregados reciclados do que num betão fabricado apenas com AGR.

Topçu et al. (2004) comprovam no seu estudo que existe uma tendência generalizada de decréscimo da resistência à compressão em betões fabricados com agregados reciclados de betão, quando comparados com outros fabricados apenas com agregados naturais (Quadro 2.8).

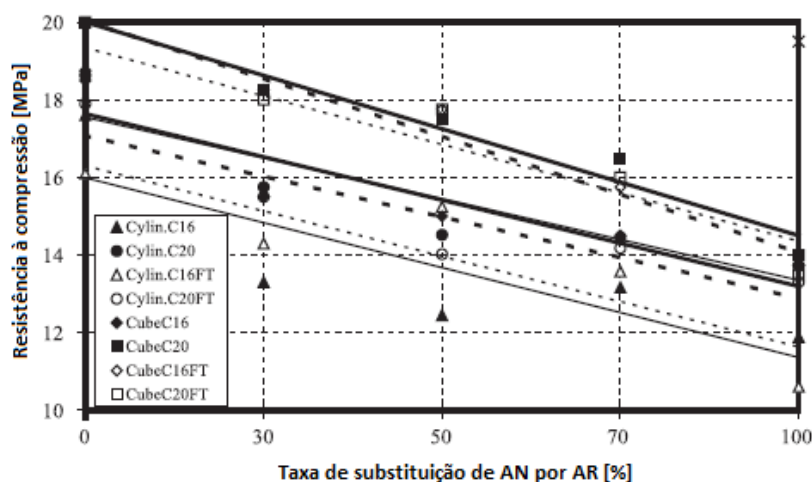


Figura 2.8 - Relação entre a resistência à compressão e a percentagem de substituição de agregados naturais grossos por reciclados de betão (Topçu et al., 2004).

Limbachiya et al. (2004) comprovaram no seu estudo que, até a uma determinada taxa de substituição de AGN por AGRB, a resistência à compressão do betão não apresenta grandes alterações. No entanto, a partir desse valor, esta resistência tende a diminuir (Figura 2.9). Cabral et al. (2010) estudaram, para várias relações a/c, a influência na resistência à compressão de variadas taxas de substituição de AN por AGRB E AFRB. São apresentados, nas Figuras 2.10 e 2.11, os resultados obtidos por estes autores.

Como se pode observar através dessas figuras, a resistência à compressão tende a diminuir com o aumento da taxa de substituição de agregados naturais por reciclados. No entanto, é visível que o decréscimo é maior quando se substituem agregados grossos naturais por reciclados e menor quando se substituem agregados finos naturais por reciclados.

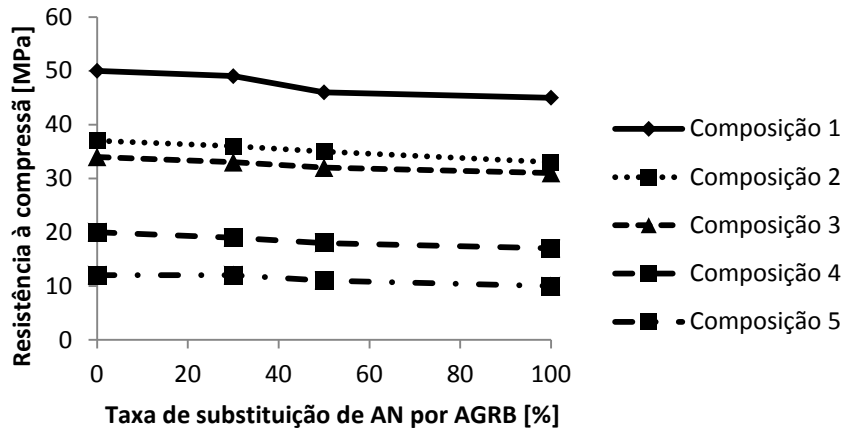


Figura 2.9 - Influência da taxa de substituição de AN por AGRB na resistência à compressão do betão (Limbachiya et al., 2004) NOTA: As composições diferem apenas na relação a/c à exceção da composição 3 que possui IA na sua constituição.

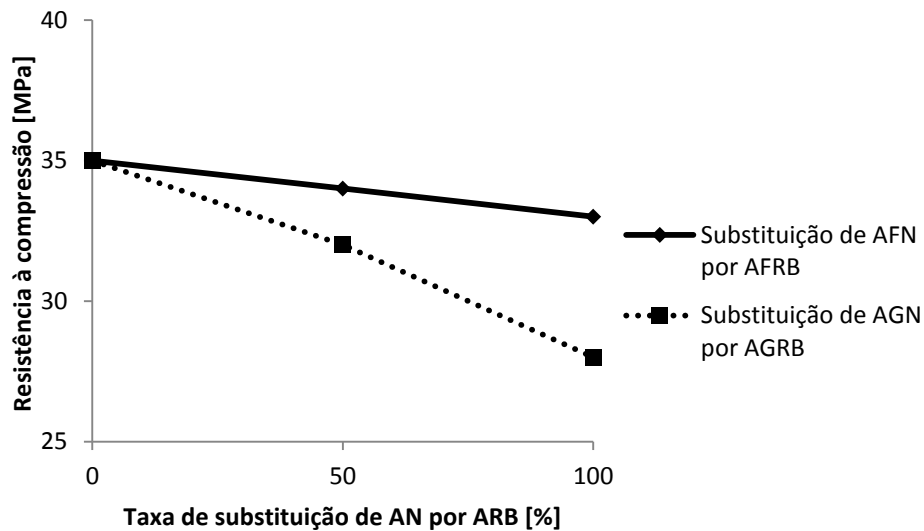


Figura 2.10 - Variação da resistência à compressão com diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação a/c = 0,60 (Cabral et al., 2010).

Evangelista e Brito (2007) estudaram a influência que a substituição de AFN por AFRB pode ter na resistência à compressão do betão. Os autores chegaram à conclusão de que a resistência do betão fabricado apenas com AN tende a estabilizar aos 28 dias, enquanto a do betão fabricado com agregados reciclados continua a aumentar a partir dessa idade (Figura 2.12).

A explicação para tal pode partir do facto de os agregados finos reciclados de betão possuírem uma grande taxa de cimento na sua composição, contribuindo este para o aumento da resistência do betão.

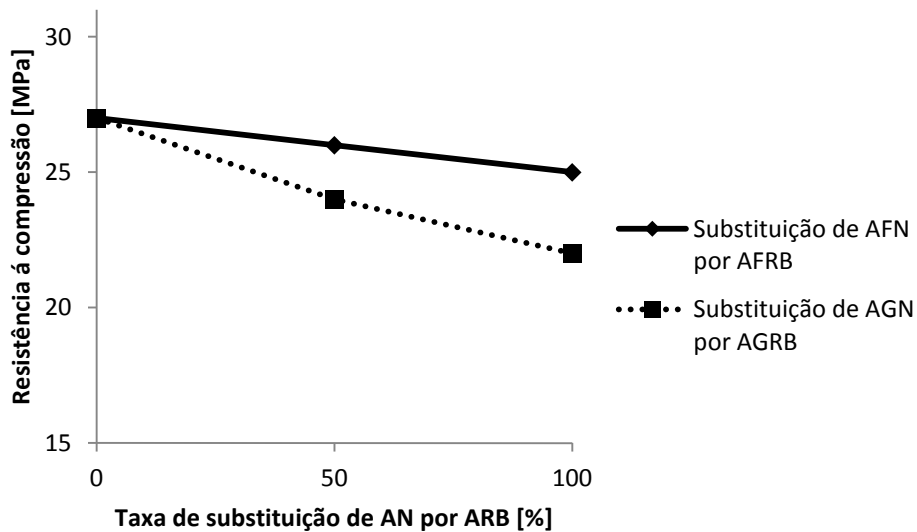


Figura 2.11 - Variação da resistência à compressão com diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação a/c = 0,74 (Cabral et al., 2010)

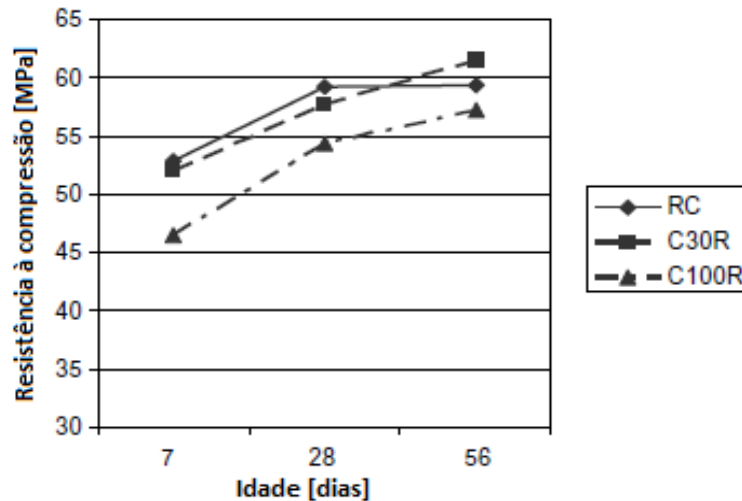


Figura 2.12 - Resistência à compressão dos mesmos betões em função da idade de ensaio: RC - betão só com AN. C30R e C100R - betões com taxas de substituição de 30 e 100% de AFN por AFRB respetivamente (Evangelista e Brito, 2007).

2.4.5. Módulo de elasticidade

Topçu et al. (1995) produziram betões com variadas taxas de substituição de AGN por AGRB (8 - 31,5 mm). Como se pode observar através da Figura 2.13, o módulo de elasticidade, dado pela relação tensão-deformação, tende a decrescer para maiores taxas de substituição de agregados naturais por reciclados.

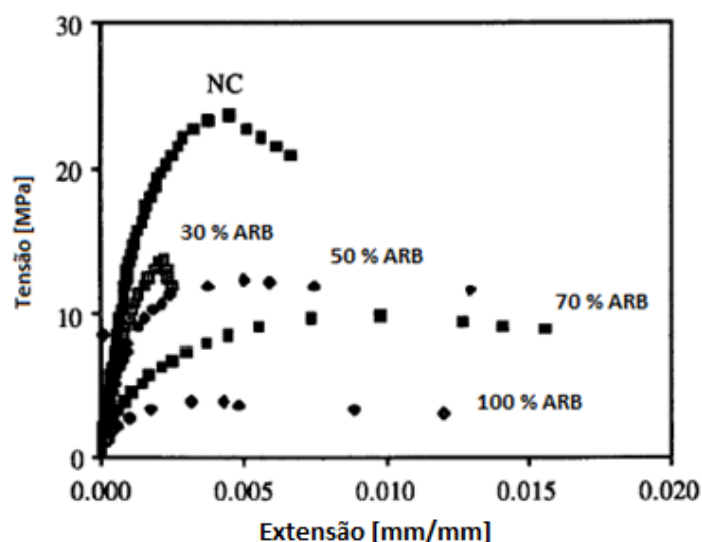


Figura 2.13 - Gráfico tensão - deformação para várias taxas de substituição de AGN por ARB (Topçu et al., 1994).

Limbachiya et al. (2004) chegaram a valores diferentes dos obtidos por Topçu et al. (1995), verificando que, para os betões produzidos no seu estudo, o módulo de elasticidade pouco varia com a substituição de AN por ARB.

Os valores obtidos por Limbachiya et al. (2004) são apresentados no Quadro 2.10.

Quadro 2.10 - Valores obtidos por Limbachiya et al. (2004) para o módulo de elasticidade em função das diferentes taxas de substituição de agregados naturais por reciclados.

Taxa de substituição de AN por AR [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
0	25,5
30	26,0
50	25,5
100	25,0

Cabral et al. (2010) estudaram a influência da substituição de AN por AGRB e AGFRB no módulo de elasticidade, tendo em consideração diferentes relações a/c, como mostram as Figuras 2.14 e 2.15.

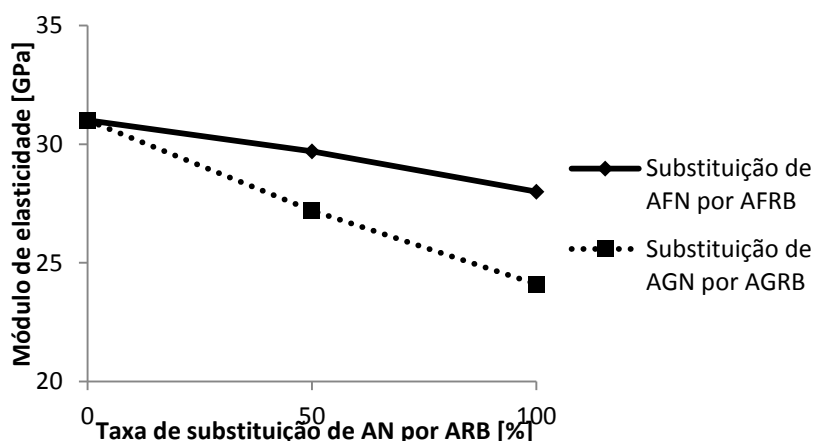


Figura 2.14 - Variação do valor do módulo de elasticidade para diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação a/c = 0,46 (Cabral et al., 2010).

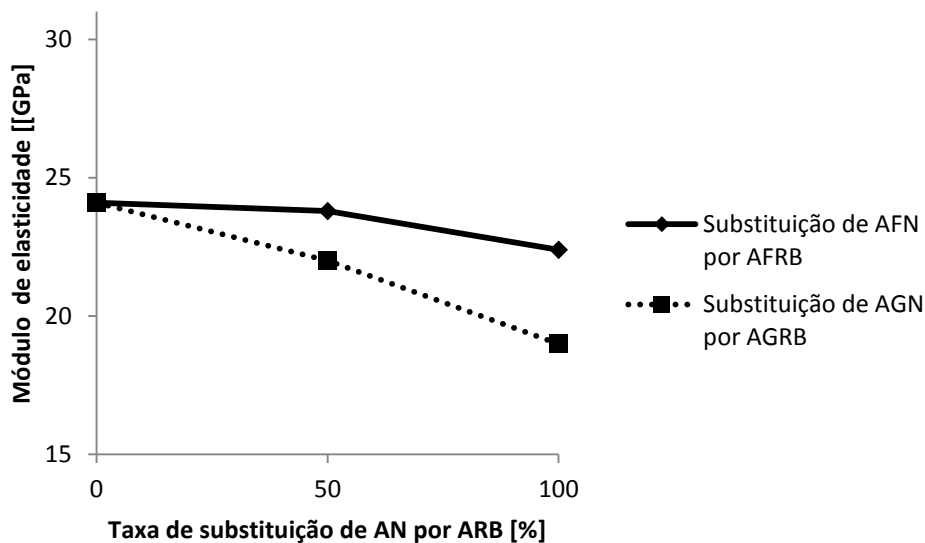


Figura 2.15 - Variação do valor do módulo de elasticidade para diferentes taxas de substituição de AN por AFRB ou AGRB para uma relação $a/c = 0,74$ (Cabral et al., 2010).

Como se pode observar através destas figuras, o módulo de elasticidade do betão tende a decrescer com o aumento da taxa de substituição de agregados naturais por reciclados. Cabral et al. (2010) chegaram a um valor de decréscimo de 21% e 10% do valor do módulo de elasticidade, para uma substituição de 100% de AN por AGRB e AGFRB, respetivamente.

Evangelista e Brito (2007) chegaram à conclusão de que o valor do módulo de elasticidade tende a decrescer com o aumento da taxa de substituição de areia natural por agregados finos reciclados. Os autores apresentam como justificação o facto de a consistência da pasta cimentícia no betão ser um de vários factores que afectam o seu módulo de elasticidade.

Assim, para pequenas taxas de substituição, esta variável não se torna suficientemente importante para alterar muito este parâmetro de caracterização do betão. No entanto, para grandes taxas de substituição de AFN por AFRB, a pasta cimentícia mostra uma grande perda de consistência, afectando bastante o módulo de elasticidade.

Quadro 2.11 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade em função de várias taxas de substituição de AFN por AFRB (Evangelista e Brito, 2007).

Taxa de substituição [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
0	35,5
30	34,2
100	28,9

2.4.6. Absorção de água

O mecanismo de absorção de água por parte do betão é normalmente bastante irregular e complexo. Quando se utilizam agregados reciclados, a relação a/c aparente e efectiva pode diferir bastante devido à grande absorção de água por parte destes (Zaharieva et al., 2004).

Boltryk et al. (2009) determinaram a absorção de água dos betões produzidos no seu estudo através da diferença de massas entre espécimes totalmente saturados e secos a 105 ° C. Os resultados são bastante conclusivos, como mostra a Figura 2.17, sendo que, quanto maior a taxa de substituição de AGN por AGRB, maior é a absorção de água por parte do betão. Isto deve-se maioritariamente à maior absorção de água dos ARB em relação aos AN, propriedade que se reflete directamente nas características do próprio betão.

Verifica-se uma diferença de 24% para este parâmetro entre betão fabricado apenas com AGN (NAC) e outro fabricado com uma taxa de substituição de 75% de AGN por AGRB (RAC3).

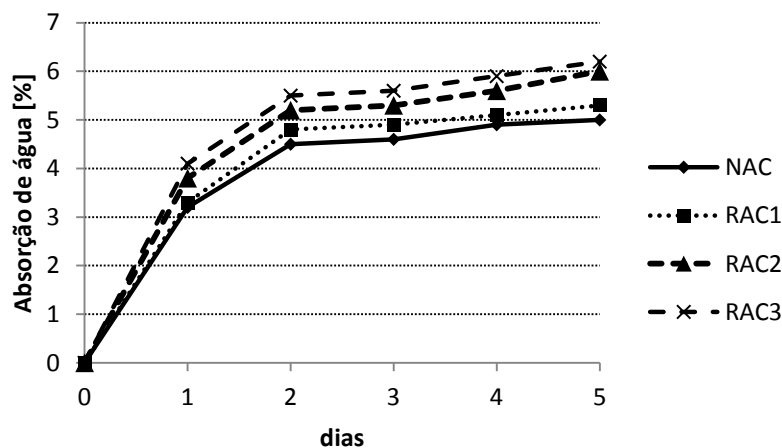


Figura 2.16 - Absorção de água de vários betões (Boltryk et al., 2009): NAC - betão fabricado só com agregados naturais. RAC1, RAC2 e RAC3 - betões com taxas de substituição de AGRB por AGN de 25, 50 e 75%, respectivamente.

2.5. Acção de introdutores de ar no betão

A utilização de introdutores de ar (IA) no betão proporciona uma protecção adicional contra a acção do gelo-degelo. A vantagem da sua utilização prende-se com a introdução de um sistema de vazios preenchidos por ar, na matriz cimentícia do betão, podendo estes servir de escape para as tensões provocadas pela pressão hidráulica proporcionada pela congelação da água. O tamanho dos vazios depende do tipo de processo utilizado para a introdução dos mesmos, variando normalmente entre 0,05 e 1,25 mm (Palliere, 1994; Richardson, 2011). Certos estudos demonstram, no entanto, que betões produzidos com agregados reciclados e introdutores de ar podem mostrar-se menos duráveis aos ciclos gelo-degelo (Topçu et al., 2002). Não é a quantidade total de

ar presente no betão que proporciona uma proteção adicional à acção do gelo, mas sim a distância entre vazios que deve ter um valor máximo de 0,1 a 0,2 mm (Mehta e Monteiro, 2008). Bogas (2011), baseado em Mehta e Monteiro (2006) e em Mindess et al. (2003), refere que os agentes tensioativos presentes no IA têm um grupo hidrofílico que se dissolve na água e outro hidrofóbico que é repellido por esta (Figura 2.17). Explica igualmente que estes agentes se concentram na interface ar-água, o que faz com que haja um decréscimo na tensão superficial e a possibilidade de formação e estabilização de bolhas de ar.

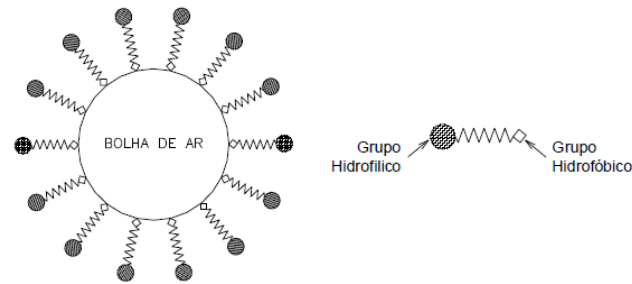


Figura 2.17 - Representação esquemática da introdução de ar (Bogas, 2011).

2.6.Acção de superplastificantes no betão

Os superplastificantes são constituídos por cadeias longas de moléculas tensioativas, com um grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos. Quando estas moléculas são absorvidas pelas partículas de cimento, é produzida uma forte carga negativa (Figura 2.18) que faz com que a tensão superficial entre moléculas de água diminua, aumentando assim a fluidez do sistema (Mehta e Monteiro, 2008).

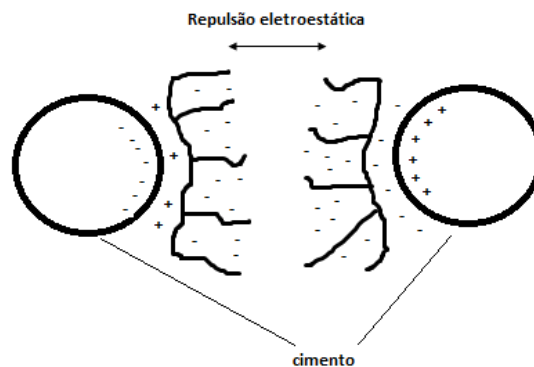


Figura 2.18 - Repulsão electrostática (Mehta e Monteiro 2008).

Os mesmos autores, apontam que, devido à grande dispersão de moléculas de água causada por este efeito, o processo de hidratação é mais efetivo, podendo levar a uma perda de trabalhabilidade mais acelerada.

De modo a resolver este problema, surgem os superplastificantes de última geração (Figura 2.19) à base de éter caborxílico, possuindo longas cadeias laterais, também conhecidas como *side chains*. Estas cadeias aumentam o espaço físico entre as

partículas de cimento, causando um tipo de repulsão chamada estérica, que continua a atuar após o desaparecimento da repulsão electrostática (Bogas, 2011).

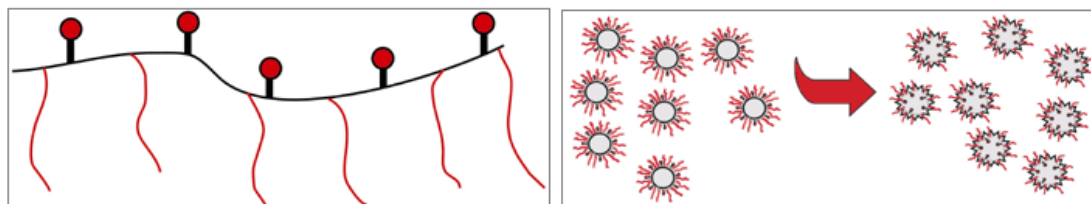


Figura 2.19 - Molécula de policarboxilato (esquerda). Manutenção da trabalhabilidade através do efeito de repulsão estérica (direita) (BASF, 2013).

2.7.Acção do gelo-degelo no betão

De acordo com o Eurocódigo 2 (2006), "*uma estrutura durável deve apresentar as necessárias condições de serviço, resistência e estabilidade durante a sua vida útil, sem perdas excessivas e sem requerer excesso de manutenção*" (Richardson et al., 2011). Torna-se assim importante analisar a influência que a acção do gelo-degelo tem na durabilidade. No Reino Unido, considera-se que a acção de gelo-degelo no betão é, depois da acção de corrosão por parte dos cloretos, a maior causa de degradação deste material (Richardson et al., 2011).

É importante investigar a resistência do betão fabricado com agregados reciclados aos ciclos gelo-degelo, uma vez que ainda não existe um consenso científico em relação a este assunto. Este facto pode ser explicado devido à heterogeneidade das características dos agregados reciclados. A utilização de métodos experimentais inapropriados contribui também para esse facto (Zaharieva et al., 2004). Por outro lado, ainda não existe uma relação fiável entre os ensaios em laboratório e as condições reais, sendo os primeiros normalmente bastante mais severos (ACI 213R, 2003). Verbeck e Langdren (1960) referem que, no caso de as estações secas serem suficientemente longas, a saturação do betão pode nunca vir a ocorrer.

A degradação do betão, devido aos fenómenos de gelo-degelo, é muito estudada em pavimentos rodoviários, em que a utilização de sais anti-congelantes pode levar a uma degradação excessiva do betão, levando ao aparecimento de fendilhação superficial, normalmente referida como *D-cracking* (devido à semelhança entre a forma das fendas e a letra "D"). Assim sendo, o descasque superficial é normalmente uma variável a monitorizar, quando se estuda este fenómeno (Mehta e Monteiro, 2006). Rønning (2001) explica que o descasque superficial do betão, quando submetido a ciclos gelo-degelo, se pode prender com a utilização de agregados susceptíveis a este fenómeno. Assim, estes agregados, devido à sua mais fácil saturação e menor resistência mecânica sofrem uma expansão, quando a água congela no seu interior, levando ao descasque da pasta cimentícia adjacente.

Existem várias teorias no que diz respeito à degradação do betão devido à acção do gelo-degelo, podendo este mecanismo dever-se à formação de pressões hidráulicas

dentro do betão ou ainda a diferenças de entropia criadas durante o processo de congelamento do betão (Bogas, 2011). Estas teorias são explicadas de seguida.

Em relação à criação de pressões hidráulicas no interior do betão, Mehta e Monteiro (2008), citando Powers (1958), explicam o mecanismo de acção do gelo na pasta cimentícia presente no betão. Segundo os autores, quando a água congela numa cavidade capilar, a expansão da água devido a este fenómeno provoca um aumento em termos de volume de aproximadamente 9% do tamanho da cavidade afetada. Durante este processo, são criadas pressões hidráulicas cuja magnitude depende da proximidade a um "escape", da velocidade de formação do gelo e da permeabilidade do betão (Figura 2.20). Os mesmos autores sugerem que, no caso de se utilizar um introdutor de ar na produção do betão, esse facto pode levar à dissipação das pressões formadas. No caso de o gelo se formar nos poros presentes no betão, a pressão nas suas paredes vai aumentar, podendo provocar dano na matriz cimentícia. No entanto, a presença de bolhas de ar no betão pode permitir um alívio e dissipação dessas pressões. Quanto o gelo se forma dentro destes espaços, atrai a água dos capilares, diminuindo assim as pressões hidráulicas passíveis de ocorrerem. Piltner e Monteiro (2000) verificaram que quando o gelo se forma nos vazios preenchidos por ar, a matriz cimentícia tende a contrair com se observa na Figura 2.21.

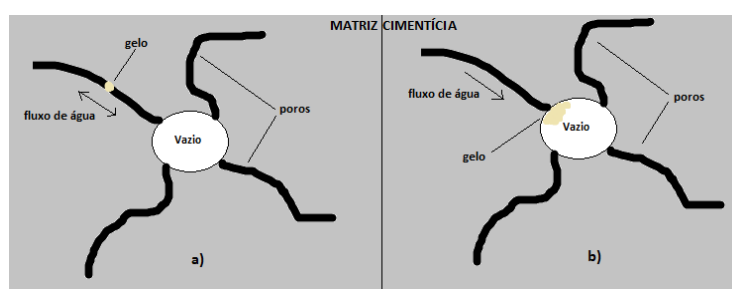


Figura 2.20 - a) Formação de gelo nos poros presentes na matriz cimentícia. b) formação de gelo nos vazios

No entanto não é a quantidade de vazios presente no betão, mas sim a distância entre este que condiciona a resistência a ciclos gelo-degelo. Existe ainda o conceito de *spacing-factor*, correspondendo este à menor distância que uma determinada pressão hidráulica, formada no interior do betão, tem de percorrer até um ponto de alívio de pressões. Assim, esta distância corresponde, na realidade, a metade da hipotenusa cujos catetos são a distância entre vazios (Mehta e Monteiro, 2006).



Figura 2.21 - Contração do vazio e consequentemente da matriz cimentícia (Mehta e Monteiro 2008,).

Por outro lado, sabe-se que a água presente nos poros de gel da matriz cimentícia, fora das cavidades capilares, necessita de uma temperatura menor para congelar. Isto significa que a água presente nas cavidades capilares congela, ficando num estado de menor energia, enquanto a restante permanece num estado líquido, num estado de energia superior. Esta diferença de entropia faz com que a água presente na matriz cimentícia tenda a equilibrar o sistema, deslocando-se para as cavidades capilares de modo a poder congelar. Este acréscimo de água nas cavidades capilares e o seu conseqüente congelamento provoca uma expansão do sistema, desde que essa expansão seja superior à contracção verificada nos C-H-S. (Mehta e Monteiro, 2008).

A teoria das pressões hidráulicas serão em principio mais válidas para betões perto do grau de saturação crítico (grau de saturação para o qual o betão não consegue suportar os 9% de aumento de volume de água, sem fendilhar internamente). Por outro lado, os mecanismos de transporte de água dentro do betão, deverão ser a maior causa de degradação em betões sujeitos a longos períodos de congelamento. A maioria dos autores crê que a maior causa de degradação da acção do gelo-degelo dentro do betão se prende como movimento da água dentro do mesmo (Bogas, 2011).

A resistência do betão à acção do gelo-degelo não depende apenas da microestrutura da matriz cimentícia mas também dos agregados utilizados no seu fabrico. Mehta e Monteiro (2008), baseados em Verbeck e Landgren (1960), apontam a existência de três tipos diferentes de agregados.

O primeiro abrange agregados com baixa permeabilidade e elevada resistência mecânica, sendo que a deformação elástica nas partículas é suportada sem causar fractura. O segundo tipo de agregado apresenta uma permeabilidade razoável, enquanto o terceiro tipo possui uma permeabilidade bastante elevada. Esta última categoria permite uma entrada e saída fácil da água, podendo no entanto causar problemas de durabilidade devido à má aderência agregado-matriz. A segunda categoria leva ao aparecimento do conceito de "tamanho crítico do agregado". Devido à permeabilidade intermédia, a durabilidade ao gelo-degelo depende da taxa de descida da temperatura e da distância que as tensões hidráulicas têm que percorrer até encontrar um "escape", dependendo estas características do tamanho dos agregados, do tamanho dos seus poros e da sua distribuição.

Verbeck e Langdren (1960), introduzem assim o conceito de tamanho crítico do agregado, que depende dos factores já referidos. Os autores referem ainda que a permeabilidade dos agregados desempenha sempre um papel duplo na resistência a ciclos gelo-degelo, uma vez que se por um lado tornam o betão mais permeável, por outro, quando se formam pressões no seu interior, uma maior permeabilidade pode levar a uma maior facilidade de dissipação das mesmas.

Richardson et al. (2011) referem que a porosidade proporcionada ao betão pela utilização de agregados reciclados pode fornecer um maior sistema intrínseco de vazios. Este facto pode levar a uma redução da resistência à compressão do betão,

proporcionando no entanto uma maior durabilidade aos ciclos gelo-degelo, devido à maior facilidade de dissipação de pressões hidráulicas.

Os critérios clássicos para a avaliação da resistência ao gelo-degelo por parte do betão são a perda de resistência mecânica e de massa. No entanto, estes parâmetros não chegam para fazer uma avaliação correcta e completa do comportamento do betão quando sujeito a este tipo de acção, caracterizando apenas o período final de degradação do mesmo. É necessário realizar ensaios adicionais não destrutivos, de modo a perceber quando se inicia o processo de degradação, nomeadamente o aparecimento de fendilhação interna. Entre estes ensaios, encontram-se a medição da variação de comprimento ao longo do tempo e da velocidade de propagação de ultrassons (Zaharieva et al., 2004).

Richardson et al. (2011), baseado no estudo de Jacobsen et al. (1996) referem que para relações água cimento (*a/c*) de 0,3 ou 0,35, não existe nenhuma, ou muito pouca, formação de gelo no interior dos espécimes. Os mesmos autores referem que, para estas condições, menos de metade da água absorvida é de facto congelada a uma temperatura de -20 °C, não provocando assim dano no betão. A baixa relação *a/c* é também apontada pelo ACI201.R (2001) e pelo ACI365.1R (2000) como uma boa método para aumentar a resistência a ciclos gelo-degelo.

2.7.1. Acção do gelo em betões fabricados com ARB - resultados das principais campanhas

São apresentados neste ponto os resultados das principais campanhas experimentais referidas em §2.3.

2.7.1.1 Campanha de Zaharieva et al. (2004)

Foram utilizados, no estudo realizado por Zaharieva et al. (2004), três critérios para avaliação da durabilidade dos betões produzidos aos ciclos gelo-degelo. O primeiro critério relaciona-se com a variação de comprimento ao longo do tempo dos provetes ensaiados.

A resistência ao gelo-degelo é avaliada através do número de ciclos gelo-degelo (N_1) realizados até se verificar uma variação de comprimento $\epsilon_n \geq 500 \mu\text{m/m}$. O segundo critério está directamente relacionado com a medição da velocidade de propagação de ultrassons ou da frequência transversa fundamental, valores a partir dos quais se consegue calcular o módulo de elasticidade dinâmico relativo.

Assim, a resistência à acção do gelo-degelo é avaliada através do número de ciclos necessários até que o módulo de elasticidade dinâmico relativo diminua mais de 60% em relação ao inicial.

Caso se utilize a medição da velocidade de ultrassons, este número de ciclos denomina-se de N_2 , caso contrário denomina-se de N_3 . Na Figura 2.22, estão presentes os resultados, para cada tipo de betão e condição de saturação, referentes à variação do

módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo, calculado com base nas medições da frequência transversa fundamental dos supracitados betões.

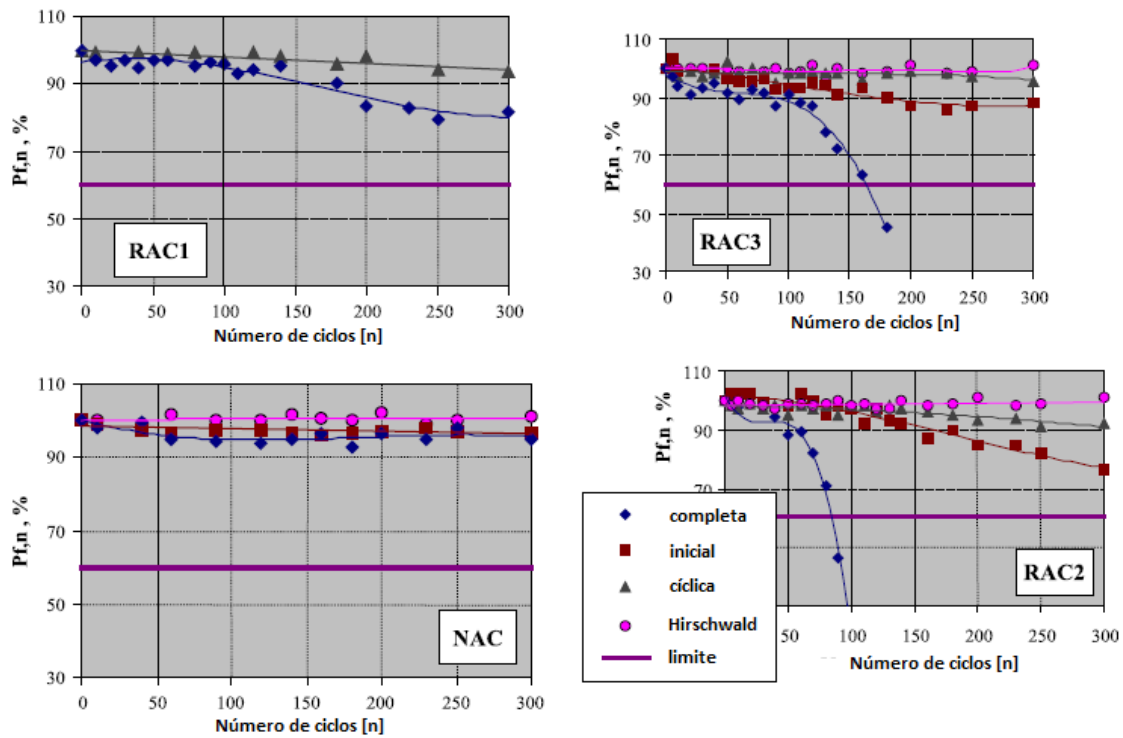


Figura 2.22 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico (calculado com base na frequência transversal fundamental) ao longo do tempo, para os vários tipos de betão (ver §2.2.1) e condições de saturação (Zaharieva et al., 2004).

O terceiro e último critério para avaliação da resistência aos ciclos gelo-degelo é o factor de durabilidade (DF). Este factor é uma medida indirecta da variação do módulo de elasticidade dinâmico, calculado através de N_2 ou de N_3 (Figura 2.23).

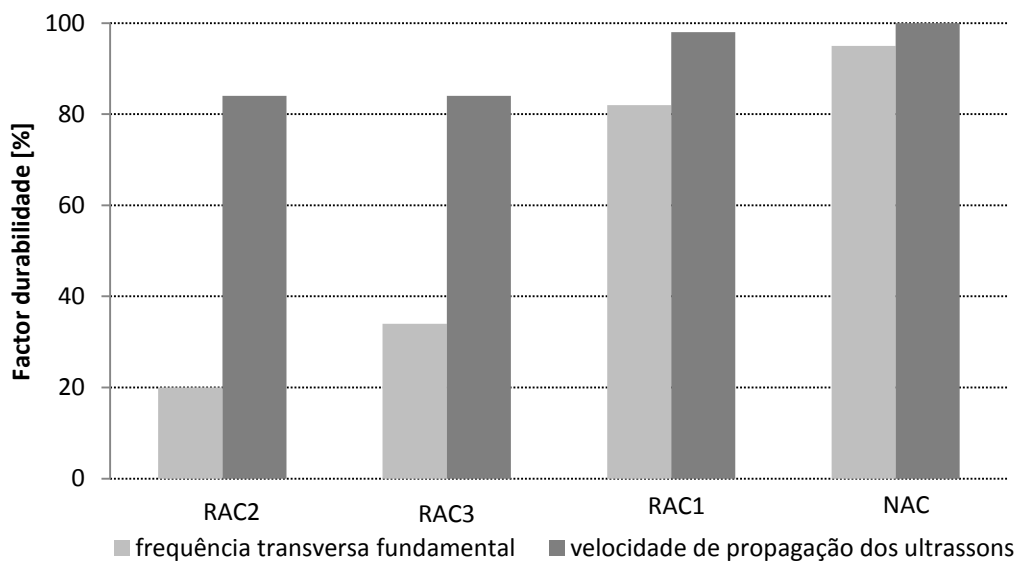


Figura 2.23 - Factor de durabilidade para cada tipo de betão (ver §2.2.1), (Zaharieva et al., 2004).

O betão pode ser dividido em quatro categorias no que diz respeito à acção do gelo.

- não resistente ao gelo ($D \leq 40\%$);
- sem resistência ao gelo comprovada ($D \leq 60\%$);
- resistência ao gelo razoável ($D \geq 60\%$);
- resistente ao gelo ($D \geq 80\%$).

Os resultados mostram que, quando é utilizado o critério da variação de comprimento, nenhum betão produzido com agregados reciclados é resistente ao gelo-degelo para um grau de saturação completo. No caso de a saturação ser do tipo inicial, nenhum betão produzido totalmente com agregados reciclados é resistente à acção do gelo-degelo.

Os autores explicam este resultado devido ao facto de a relação a/c aparente nestes betões ser maior, o que provoca uma situação mais severa quando se trata de um tipo de saturação inicial. Quando o tipo de saturação é cíclico, os betões produzidos com AR provam ser mais resistentes, apesar de o RAC2 não ser resistente à acção do gelo-degelo para este tipo de situação. Conclui-se assim que o único tipo de saturação que não provoca qualquer tipo de dano relevante nos RAC's é a Hirshwald (ver §2.2.1), que correspondente a um grau de saturação bastante reduzido.

O RAC1 é o betão com agregados reciclados mais resistente ao gelo-degelo, sendo que o betão de referência (NAC) também é resistente a este tipo de acção. Como se pode observar através da Figura 2.24, a resistência à compressão do betão de referência permanece praticamente inalterada ao fim de 300 ciclos. Por sua vez, os betões com agregados reciclados apresentam, ao fim deste intervalo de tempo, uma resistência à compressão bastante mais reduzida do que a inicial.

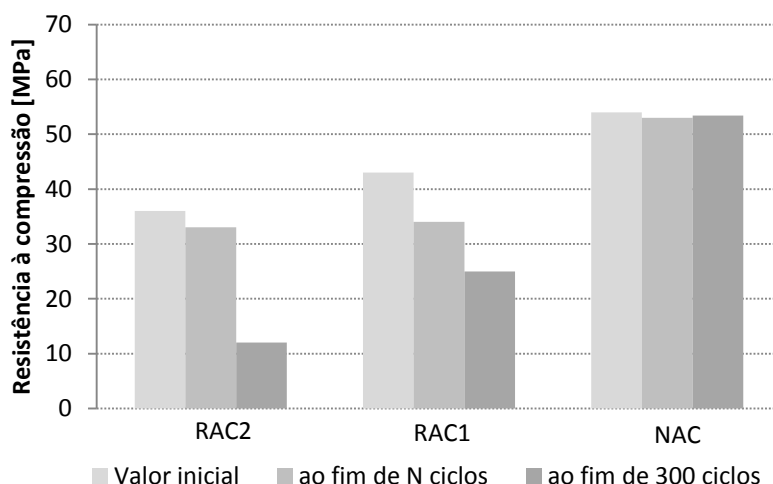


Figura 2.24 - Resistência à compressão inicial, ao fim de N ciclos e ao fim de 300 ciclos (Zaharieva et al., 2004).
NOTA: N ciclos corresponde ao número de ciclos necessários para que o valor limite (60%) de aceitação do factor de durabilidade seja atingido.

A partir destes resultados, os autores concluem que os betões fabricados com agregados reciclados não são resistentes à acção do gelo-degelo. Apresentam como principal causa

a grande relação a/c aparente, a sua elevada porosidade e as suas menores características mecânicas.

Prova-se também que as condições de saturação são bastante importantes, influenciando de uma forma definitiva a severidade da acção gelo-degelo.

O parâmetro que melhor parece avaliar a degradação ao longo do tempo e a fendilhação interna é a variação de comprimento durante o período de exposição.

2.7.1.2 Campanha de Topçu et al. (2004)

A partir das Figuras 2.5 e 2.9, presentes em §2.4.2 (massa volúmica) e §2.4.4 (resistência à compressão), chega-se à conclusão de que os resultados obtidos por Topçu et al. (2004) mostram que existe um decréscimo adicional de 1%, em relação aos outros provetes, no que diz respeito à massa volúmica de provetes que foram submetidos a ciclos gelo-degelo.

A causa para esta ocorrência prende-se com o deslocamento de partículas finas, causada pela acção do gelo-degelo.

Conclui-se ainda que a resistência à compressão de provetes cúbicos, quando submetidos a ciclos gelo-degelo, permanece praticamente inalterada.

Os autores chegaram ainda à conclusão de que os ciclos gelo-degelo têm pouca relevância no que diz respeito à resistência à tracção por flexão de provetes em betão (Figura 2.25).

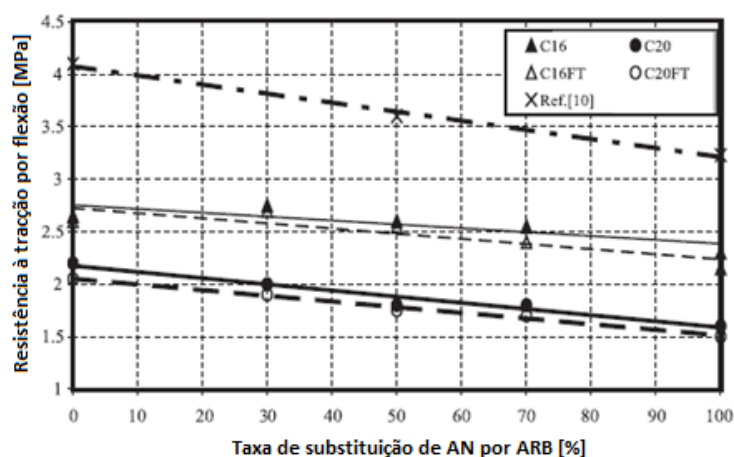


Figura 2.25 - Resistência à tracção por flexão em função da percentagem de substituição de AN por ARB (Topçu et al., 2004). Nota: Os betões com o acrónimo FT foram submetidos a ciclos gelo-degelo.

2.7.1.3 Campanha de Limbachiya et al. (2004)

Limbachiya et al. (2004) analisaram a resistência de betões reciclados aos ciclos gelo-degelo através do cálculo do factor de durabilidade (DF), definido na ASTM C666.

Como se pode observar na Figura 2.26, os factores de durabilidade nunca desceram abaixo de 95%, indicando uma boa resistência aos ciclos gelo-degelo por parte dos betões com agregados reciclados de betão.

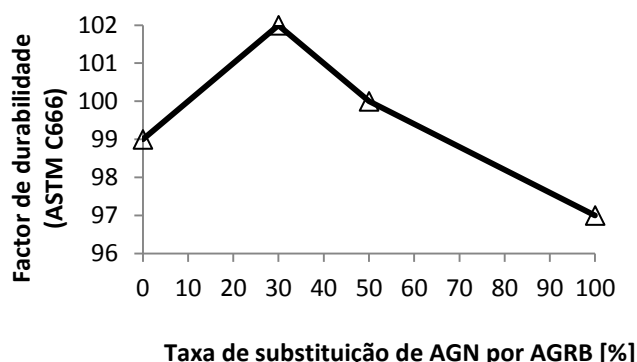


Figura 2.26 - Factor de durabilidade em função da taxa de substituição de AGN por AGRB (Limbachiya et al., 2004).

2.7.1.4 Campanha de Boltryk et al. (2009)

Boltryk et al. (2009) estudaram a perda de massa e de resistência à compressão após a acção de gelo-degelo. Os resultados mostram que a perda de massa nos provetes analisados é insignificante e que a perda de resistência à compressão após a acção de gelo-degelo nunca ultrapassa o limite estipulado pelos autores (20%) (Quadro 2.12). Conclui-se assim que o betão fabricado com ARB pode ser tão resistente à acção do gelo-degelo como outro fabricado apenas com AN.

Quadro 2.12 - Resultados da campanha de Boltryk et al. (2009)

Tipo de betão	Perda média de massa [%]	Perda média de resistência à compressão [%]
NAC	0,4	5,2
RAC1	0,2	-0,7
RAC2	0,2	6,4
RAC3	0,1	5,9

2.7.1.5 Campanha de Richardson et al. (2011)

Num estudo realizado com betões não estruturais, Richardson et al. (2011) demonstraram que a introdução de ar pode ser eficiente na protecção aos ciclos gelo-degelo, tanto em betões fabricados com AN como em betões fabricados com AGRB. O maior decréscimo na resistência à compressão deu-se para o betão fabricado apenas com agregados naturais (VP), atingindo um valor de 70%. Para os betões fabricados com agregados reciclados, notou-se um decréscimo menor no que diz respeito a este parâmetro, na ordem de 24%. A justificação para este facto pode relacionar-se com a maior resistência inicial por parte dos betões fabricados com agregados reciclados proporcionar uma maior protecção à acção do gelo-degelo. Foi ainda analisada a perda de massa ao fim de 56 ciclos, sendo que este parâmetro se tornou apenas relevante no que diz respeito ao betão fabricado apenas com AN. Os autores concluíram assim que

os betões fabricados com agregados reciclados são ligeiramente mais duráveis do que aquelas fabricados apenas com agregados naturais. Se os agregados reciclados forem utilizados em conjunto com adjuvantes, podem ser uma solução tão boa como a utilização de AN, no que diz respeito à resistência aos ciclos gelo-degelo. Nas Figuras 2.27 e 2.28, estão apresentados os resultados obtidos para a velocidade de propagação de ultrassons e de perda de massa após 56 ciclos gelo-degelo, sendo que no Quadro 2.13 estão apresentados os valores da resistência à compressão para as mesmas condições.

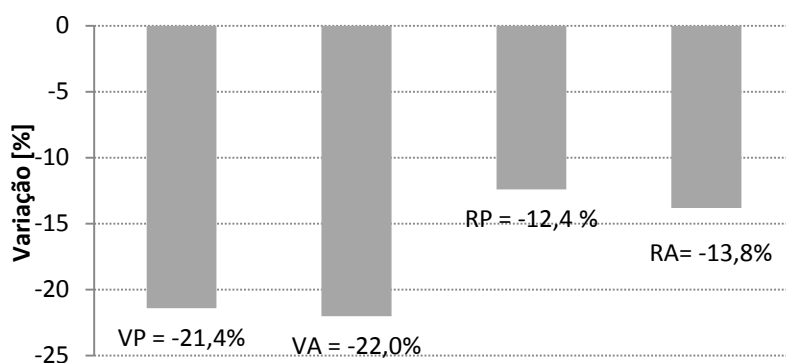


Figura 2.27 - Velocidade de propagação de ultrassons após 56 ciclos gelo-degelo (Richardson et al., 2011)

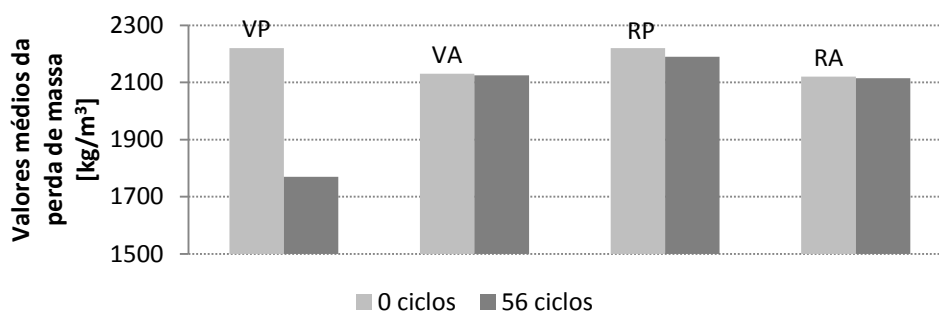


Figura 2.28 - Perdas de massa após 56 ciclos gelo-degelo (Richardson et al., 2011)

Quadro 2.13 - Resistência à compressão de cubos com dimensões 100 x 100 x 100 mm, após 56 ciclos gelo-degelo (Richardson et al., 2011)

Tipo de betão	Resistência à compressão	Resistência à compressão após
	dos cubos de controlo [MPa]	56 ciclos gelo-degelo [MPa]
VP	20,7	3,8
VA	18,0	13,8
RP	21,6	11,7
RA	18,4	14,1

NOTA: Os cubos de controlo não foram submetidos à acção de gelo-degelo.

2.8. Conclusões do capítulo

O aproveitamento de resíduos de construção e demolição continua a ter uma importância crucial no desenvolvimento da civilização humana, devendo haver uma preocupação crescente em promover um desenvolvimento científico, técnico e legislativo nesta área. Se separados de impurezas e outros materiais, verifica-se que os betões fabricados com ARB podem ter comportamentos comparáveis aos dos betões correntes, nomeadamente em termos de durabilidade à acção do gelo-degelo.

Apesar de provocarem uma perda generalizada de trabalhabilidade, devido à sua maior porosidade e conseqüente absorção de água, quando utilizados em conjunto com adjuvantes, esse aspecto pode ser ultrapassado.

A perda na resistência à compressão e módulo de elasticidade pode ser atenuada se for adoptada uma taxa de substituição de AN por ARB razoável. Diversos estudos apontam para um valor limite de 30% para esta taxa, tanto para substituição de agregados grossos como agregados finos.

No que diz respeito à durabilidade aos ciclos gelo-degelo dos betões reciclados, os trabalhos realizados são ainda escassos e os resultados contraditórios, sendo portanto necessário um desenvolvimento científico mais abrangente nesta área, de modo a poder obter resultados mais conclusivos.

A utilização de agregados finos reciclados de betão tem sido alvo de menos interesse comparativamente com a utilização de agregados grossos, uma vez que parece haver um opinião preponderante que indica que este tipo de agregados finos provoca efeitos negativos nas características do betão. De modo a contrariar esta tendência, têm-se vindo a desenvolver no IST diversos estudos sobre betões fabricados com AFRB. Assim, a presente dissertação tem como objectivo continuar este projeto de desenvolvimento científico, neste caso estudando a durabilidade aos ciclos gelo-degelo.

3. Campanha experimental

3.1. Introdução

A presente dissertação tem como objectivo analisar as principais propriedades mecânicas de diferentes tipos de betão, fabricados com variadas taxas de substituição de agregados finos naturais (AFN) por agregados finos reciclados de betão (AFRB), após serem sujeitos a ciclos acelerados de gelo-degelo, de acordo com a norma ASTM C666.

Para concretizar este objectivo, foi realizada uma vasta campanha experimental que envolveu a produção de diversos betões e a sua caracterização no estado fresco e endurecido antes e após serem sujeitos à acção de gelo-degelo. Estes betões foram analisados em termos da sua resistência à tracção por flexão, compressão e módulo de elasticidade. Para monitorização da degradação dos betões aos ciclos gelo-degelo, foram realizados ensaios de acordo com a norma ASTM C666. Estes ensaios consistem essencialmente na medição da variação do comprimento e da velocidade de propagação de ultrassons ao longo do tempo. Todos os ensaios realizados durante a campanha experimental são descritos detalhadamente neste capítulo.

De modo a ter em consideração diferentes tipos de betão com ou sem introdutor de ar e com diferentes taxas de substituição de AFN por AFRB, foram fabricados 12 tipos de betão com a seguinte denominação:

- **BR** - betão corrente de referência, apenas com agregados naturais (AN);
- **B20R** - betão corrente com uma taxa de substituição de 20% de agregados finos naturais (AFN) por agregados finos reciclados de betão (AFRB);
- **B50R** - betão corrente com uma taxa de substituição de 50% de AFN por AFRB;
- **B100R** - betão corrente fabricado apenas com AFRB;
- **HBR** - betão de alto desempenho de referência fabricado apenas com AN;
- **HB20R** - betão de alto desempenho com uma taxa de substituição de 20% de AFN por AFRB;
- **HB50R** - betão de alto desempenho com uma taxa de substituição de 50% de AFN por AFRB;
- **HB100R** - betão de alto desempenho fabricado apenas com AFRB;
- **HBRIA** - betão de alto desempenho e com introdutor de ar (IA), fabricado apenas com AN;
- **HB20RIA** - betão de alto desempenho com IA e com uma taxa de substituição de 20% de AFN por AFRB;
- **HB50RIA** - betão de alto desempenho com IA e com uma taxa de substituição de 50% de AFN por AFRB;
- **HB100RIA** - betão de alto desempenho com IA e com uma taxa de substituição de 100% de AFN por AFRB;

Todas as composições foram fabricadas com agregados grossos naturais (AGN) e as percentagens de substituição em questão são em termos de volume e não de massa. Os agregados reciclados utilizados foram obtidos através de britagem, no Laboratório de construção do IST, a partir de betão fabricado pela empresa *Unibetão*, do grupo *Secil*. Estes processos são explicados detalhadamente mais à frente neste capítulo. Foram realizadas duas fases experimentais, uma para estudo da resistência dos betões fabricados aos ciclos acelerados de gelo-degelo segundo a ASTM C666 e outra para aferir a influência da acção do gelo-degelo na variação do módulo de elasticidade desses mesmos betões.

3.2. Ensaaios aos agregados

As propriedades físicas, químicas e geométricas dos agregados influenciam directamente parâmetros como a trabalhabilidade do betão e a sua resistência mecânica final.

É necessário portanto caracterizar com detalhe os agregados utilizados durante a campanha experimental, de forma a perceber a sua influência no comportamento dos betões produzidos. No Quadro 3.1, são indicados os ensaios realizados aos agregados bem como as respectivas normas utilizadas.

Quadro 3.1 - Ensaaios de caracterização dos agregados e respetivas normas

Ensaaios	Normas
Análise granulométrica	NP EN 933-1 e NP EN 933-2
Massa volúmica e absorção de água	NP EN 1097-6
Baridade	NP EN 1097-3
Desgaste de Los Angeles	NP EN 1097 -2

3.2.1. Análise granulométrica

3.2.1.1 Objectivo

A análise granulométrica consiste na separação de um determinado tipo de agregado em várias fracções de modo a obter uma análise estatística da composição, por tamanho de partículas, desse mesmo agregado.

3.2.1.2 Agregados finos

Decidiu-se, durante a fase de formulação das amassaduras a produzir, que a fracção fina dos agregados, ou seja, partículas com dimensão inferior a 4 mm, iria ajustar-se à curva teórica de Faury sem cimento. Significa isto que não foi necessário realizar uma análise granulométrica aos agregados finos de modo a obter a maior compacidade possível do betão, tendo estes sido separados nas respetivas fracções correspondentes aos peneiros normalizados segundo a NP EN 933 -2 (1999).

Os agregados finos naturais utilizados foram obtidos através da empresa *AREIPOR, areias portuguesas Lda.*, tendo sido recebidos no Laboratório de Construção do IST já separados nas seguintes fracções:]0; 0,5[mm, [0,5; 1,0[mm, [1,0; 2,0[mm e [2,0; 4,0[mm. Foi assim necessário separar, *à posteriori*, a fracção mais fina recebida em duas fracções distintas, sendo estas]0; 0,250[mm e [0,250; 0,5[mm. Seguiu-se este procedimento de forma a obter uma aproximação mais fiel à curva teórica de Faury sem cimento, tendo em conta os peneiros normalizados referidos na NP EN 933-2 (1999).



3.1 - Sacos com areia calibrada (esquerda). Agregados reciclados, obtidos através da britagem de betão (direita).

Os agregados finos reciclados foram obtidos através da reciclagem de betão (Figura 3.1). Este processo está detalhadamente explicado mais à frente neste capítulo. Estes agregados foram separados nas fracções referidas para os agregados naturais. A separação dos agregados foi feita com recurso ao método de peneiração, tendo sido utilizados os peneiros normalizados segundo a NP EN 933-2 (1999). Todos os agregados com dimensão superior a 4 mm foram armazenados no IST.

3.2.1.3 Agregados grossos

Os agregados grossos utilizados, denominados de brita 2 e brita 1, foram fornecidos ao Laboratório de construção do IST pela empresa *Soarvmil*. No que diz respeito à fracção grossa dos agregados, a curva granulométrica real das misturas não se ajusta fielmente à curva teórica de Faury sem cimento, tendo sido portanto necessário realizar uma análise granulométrica a estes agregados de forma a obter a maior compacidade possível nos betões a produzir.

A massa das amostras utilizadas foi obtida por interpolação, através do Quadro 3.2 presente na NP EN 933-1 (2000).

Quadro 3.2 - Massa mínima da amostra em função de $D_{máx}$, para análise granulométrica - NP EN 933-1 (2000).

Dimensão máxima do agregado - $D_{máx}$ [mm]	Massa mínima da amostra [kg]
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

O procedimento de ensaio seguido é o definido pela NP EN 933-1 (2000). Os peneiros utilizados (Figura 3.2 - esquerda) correspondem aos presentes na NP EN 933-2 (1999).



Figura 3.2 - Peneiros na máquina de vibração (esquerda) . Coluna de peneiros normalizados (direita).

3.2.1.3.1 Cálculo dos resultados

Tendo em conta todo o procedimento descrito na NP 933-1 (2000), obteve-se, através da separação dos agregados com recurso aos peneiros normalizados, a distribuição percentual da massa retida em cada peneiro em relação à massa inicial da amostra.

A percentagem de finos (f), que atravessa o peneiro de 63 μm é dada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

sendo que,

- M_1 - massa seca do provete de ensaio, em kg;
- M_2 - massa seca do material com granulometria superior a 63 μm ;
- P - massa de material retido no fundo da coluna de peneiros, em kg.

Foi ainda calculado o módulo de finura (MF), que corresponde à soma das percentagens acumulados nos peneiros normalizados, dividida por 100. Quanto maior for este valor mais grosso será o agregado. O ensaio é considerado válido se a diferença da soma das massas retidas em cada peneiro e P com a massa inicial (M_1) for inferior a 1%.

3.2.2. Massa volúmica e absorção de água

3.2.2.1 Objectivo

Os betões a produzir foram formulados com base no método de Faury, o que significa que os valores obtidos para a dosagem de agregados são em termos de volume e não de massa. Torna-se necessário conhecer a massa volúmica dos mesmos de modo a realizar a dosagem em massa na altura de produção das misturas.

O conhecimento da absorção de água por parte dos agregados, associado ao valor do teor de humidade presente nos mesmos na altura da betonagem permite o controlo da trabalhabilidade do betão. Este problema surge sobretudo para elevadas taxas de substituição de agregados naturais por agregados reciclados, uma vez que estes últimos possuem uma elevada capacidade de absorção de água, dificultando o controlo da trabalhabilidade do betão, sendo assim necessário prever e corrigir a dosagem de água de forma a manter a relação a/c efectiva desejada.

A massa volúmica e a absorção de água foram determinadas através da NP EN 1097-6 (2003) "*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*".

3.2.2.2 Procedimento de ensaio

O referido ensaio foi realizado a três fracções distintas nomeadamente brita 2, brita 1 e agregados finos [< 4 mm]. Recordar-se que o principal objectivo dos ensaios aos agregados é compreender a influência que estes terão na fase de produção do betão e no seu estado fresco e endurecido.

Assim, para a fracção fina, a amostra escolhida não só respeitou a NP EN 1097-6 em termos de definição da sua massa mas também a curva granulométrica dos betões a produzir. Quer isto dizer que se compôs uma amostra, em termos percentuais, igual àquela que irá compor o betão. Pretende-se dessa forma uma melhor aproximação à realidade no que diz respeito aos resultados obtidos.

Os agregados foram colocados em água, num recipiente semelhante ao da Figura 3.3.

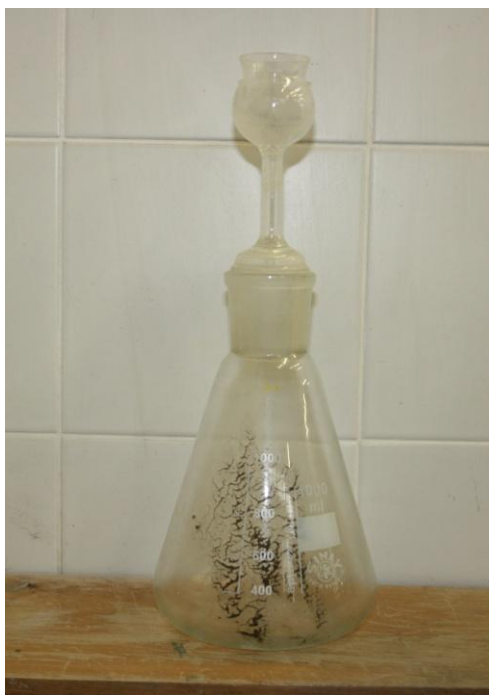


Figura 3.3 - Picnómetro.

Após saturação durante 24 horas, os agregados foram retirados, tendo-se procedido à secagem da superfície do mesmos (Figura 3.4) mas mantendo o seu interior saturado. A superfície dos agregados grossos foi seca com recurso a um pano absorvente enquanto os agregados finos foram colocados num tabuleiro e secos por um ventilador, sendo revolvidos regularmente para que a secagem fosse homogênea (Figura 3.5).

Os agregados foram de seguida secos em estufa segunda a norma referida. Foram anotadas a massa saturada com superfície seca (M_1), a massa do picnómetro com agregados saturados (M_2) (Figura 3.6), a massa do picnómetro cheio de água (M_3) e a massa dos agregados após secagem em estufa (M_4). São apresentadas no próximo ponto as expressões utilizadas no cálculo a massa volúmica e absorção de água ao longo do tempo.



Figura 3.4 - Secagem da superfície de agregados grossos (esquerda). Secagem da superfície de agregados finos (direita).

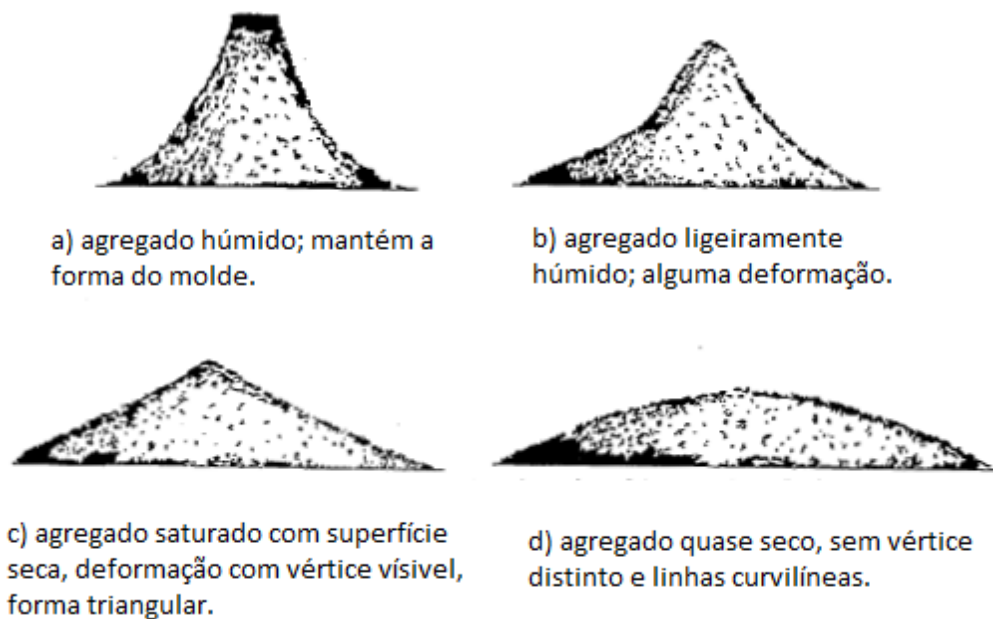


Figura 3.5 - Guia para obtenção de um agregado fino saturado com superfície seca - NP EN 1097-6 (2003).



Figura 3.6 - Esquerda: obtenção da massa M_3 . Direita: obtenção da massa M_2 .

3.2.2.3 Cálculo dos resultados

A NP EN 1097-6 permite o cálculo de três massas volúmicas e da absorção de água, por parte dos agregados, após 24 horas. São apresentadas de seguida as expressões que permitem chegar aos resultados pretendidos:

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (3.2)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3.3)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3.4)$$

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.5)$$

em que,

- ρ_a - massa volúmica aparente [kg/dm³];
- ρ_{rd} - massa volúmica dos agregados secos em estufa [kg/dm³];
- ρ_{ssd} - massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca [kg/dm³];
- WA_{24} - absorção de água, em percentagem, após imersão durante 24 h em água;
- M_1 - massa dos agregados saturados com superfície seca [g];
- M_2 - massa do picnómetro contendo os agregados saturados [g];
- M_3 - massa do picnómetro cheio de água [g];
- M_4 - massa dos agregados após secagem em estufa [g].

3.2.3. Baridade e volume de vazios

3.3.3.1 Objectivo

A baridade [kg/dm³] ou massa volúmica aparente representa a massa por unidade de volume aparente de uma determinada amostra.

Dependendo da forma das partículas e do seu tamanho, são criados espaços entre as mesmas quando depositadas num certo recipiente. Assim, ao dividir a massa dos agregados em questão pelo volume desse recipiente, são desprezados os espaços vazios, preenchidos por ar, entre as partículas. Obtém-se assim um resultado aparente e não real.

A baridade define assim, à partida, se o agregado é mais fino ou mais grosso e se as partículas são mais ou menos angulosas. Quanto mais grosso e anguloso for o agregado, maior a diferença entre a massa volúmica real e a aparente devido ao maior volume de vazios que ocorre entre as partículas.

A norma seguida para o cálculo deste parâmetro foi a NP EN 1097-3 (2003) "Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da baridade e do volume de vazios".

3.3.3.2 Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado aos seguintes agregados: brita 2, brita 1, agregados finos reciclados e agregados finos naturais. Os agregados foram secos em estufa e colocados em recipientes de 3 e 10 litros (Figura 3.7) respectivamente para os agregados finos e grossos.

Pesou-se o recipiente com o agregado (M_2) e o recipiente vazio (M_1).



Figura 3.7 - Recipientes para medição da baridade (esquerda). enchimento do recipiente com Brita 1 (direita).

3.3.3.3 Cálculo dos resultados

A baridade é, segundo a NP EN 1097-3, calculada através da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad (3.6)$$

em que,

- ρ - baridade da amostra [kg/dm^3];
- M_1 - massa do recipiente vazio e totalmente limpo [kg];
- M_2 - massa do recipiente com a amostra dentro [kg];
- V_r - volume do recipiente [dm^3].

Com base na massa volúmica das partículas secas referida no ponto anterior, é possível assim calcular o volume de vazios para os agregados em questão. Segundo a norma, vem que:

$$v = \frac{\rho_{rd} - \rho_b}{\rho_{rd}} \quad (3.7)$$

em que,

- v - volume de vazios por unidade de volume [dm^3/dm^3];
- ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas [kg/dm^3];
- ρ_b - massa volúmica aparente [kg/dm^3].

3.2.4. Desgaste de *Los Angeles*

3.3.4.1 Objectivo

O ensaio de desgaste de *Los Angeles* permite avaliar de uma forma indirecta a resistência ao choque e à abrasão de um determinado tipo de agregado.

Este ensaio foi realizado apenas aos agregados grossos (britas 2 e 1), seguindo-se a norma NP EN 1097-2 (2000) "*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 7: Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles*".

3.3.4.2 Procedimento de ensaio

As amostras de ensaio foram preparadas segundo a norma referida, sendo colocadas de seguida, juntamente com 11 esferas metálicas, na máquina de desgaste de *Los Angeles* (Figura 3.8). Após 500 rotações a velocidades entre 31 e 33 rpm, retirou-se a amostra e peneirou-se sobre o peneiro com malha de 1,6 mm. Anotou-se a massa retida nesse mesmo peneiro (m).



Figura 3.8 - Máquina para realização do ensaio (esquerda). Esferas metálicas (direita).

3.3.4.3 Cálculo dos resultados

O coeficiente de *Los Angeles* (LA) é calculado com base na massa retida no peneiro de 1,6 mm (m). Segundo a norma referida, vem que:

$$LA = \frac{(5000 - m)}{5000} \quad (3.8)$$

em que,

- m - massa retida no peneiro de 1,6 mm [g].

3.3. Formulação dos betões

3.3.1. Introdução

A formulação dos betões foi obtida através do método de Faury, apontando para uma relação água/cimento (a/c) que rondasse 0,55 para os betões correntes e 0,35 para os betões de elevado desempenho. A relação a/c dos betões foi ligeiramente corrigida para 0,53 de modo a obter o abaixamento pretendido. Nos betões com a/c de 0,35, a trabalhabilidade foi ajustada por adição de superplastificante.

3.3.2. Máxima dimensão do agregado

Este parâmetro ($D_{m\acute{a}x}$) foi definido de acordo com o método de Faury e corresponde à menor abertura do peneiro através do qual passa, pelo menos, 90% da massa dos agregados. É importante definir um valor máximo para este parâmetro de modo a facilitar a vibração do betão, evitando assim os fenómenos de segregação e de efeito de parede. O seu valor relaciona-se com o tamanho e forma dos provetes utilizados.

Segundo Faury, tem-se que:

$$D_{m\acute{a}x} \leq \frac{4}{3} R \quad (3.9)$$

em que,

$$R = \frac{\text{volume do provete}}{\text{área das faces do provete}} \quad (3.10)$$

Os provetes que mais condicionam $D_{m\acute{a}x}$ são os menores, correspondendo neste caso a cubos de 100 mm de aresta, para ensaios à compressão. Vem assim que:

$$R = \frac{L^3}{6 \times L^2} = \frac{L}{6} = \frac{100}{6} \approx 16,7 \text{ mm} \quad (3.11)$$

e

$$R = \frac{L^3}{6 \times L^2} = \frac{L}{6} = \frac{100}{6} \approx 16,7 \text{ mm} \quad (3.12)$$

$$D_{m\acute{a}x} \leq \frac{4}{3} \times 16,7 \approx 22,2 \text{ mm}$$

No presente trabalho, adoptou-se um $D_{m\acute{a}x}$ correspondente à abertura do peneiro normalizado mais próximo deste valor, ou seja, $D_{m\acute{a}x} = 22,4 \text{ mm}$.

3.3.3. Dosagem de cimento

Tendo em consideração outros trabalhos realizados no IST e a experiência obtida através da produção de betões semelhantes, adoptou-se uma dosagem de cimento de 350 kg/m³ para os betões correntes e de 420 kg/m³ para os betões de elevado desempenho.

3.3.4. Dosagem de água

Como referido, visou-se obter uma relação a/c de 0,53 para os betões correntes e de 0,35 para os betões de elevado desempenho. Assim, para cada um destes casos tem-se que:

Para betões correntes:

$$0,53 = \frac{\text{água}}{350} \leftrightarrow \text{água} = 0,53 \times 350 = 185,5 \text{ l/m}^3$$

Para betões de elevado desempenho:

$$0,35 = \frac{\text{água}}{420} \leftrightarrow \text{água} = 0,35 \times 420 = 147,0 \text{ l/m}^3$$

3.3.5. Volume de vazios

É sabido que o betão possui sempre, mesmo após vibração, ar na sua composição. O volume de vazios (V_v) presente no betão depende da máxima dimensão dos agregado (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Volume de vazios em função de $D_{m\acute{a}x}$ - adaptado de Pinto et al. (2009)

$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	V_v [l/m ³]
9,52	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,2	2

Assim o volume de vazios adoptado foi obtido através de interpolação entre os valores de $D_{m\acute{a}x}$ igual a 19,1 mm e 25,4 mm. Tem-se assim que $V_v = 17 \text{ l/m}^3$.

3.3.6. Índice de vazios

O índice de vazios (I_v) é dado pela seguinte expressão:

$$I_v = V_{\text{água}} + V_v \quad (3.13)$$

Tem-se para betões correntes, com $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, que :

$$V_{\text{água}} = \frac{185,5}{1000} \approx 0,186 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.14)$$

E para betões de elevado desempenho que:

$$V_{\text{água}} = \frac{147,0}{1000} = 0,147 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.15)$$

Vem assim que, para betões correntes (B) e de elevado desempenho (HB), respectivamente:

$$I_v (B) = 0,017 + 0,186 = 0,203 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.16)$$

$$I_v (HB) = 0,017 + 0,147 = 0,164 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.17)$$

3.3.7. Volume absoluto de matéria sólida

O volume absoluto de matéria sólida (S) é dado por:

$$S = 1 - I_v \quad (3.18)$$

Sendo que:

$$S (B) = 1 - 0,203 = 0,798 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.19)$$

$$S (HB) = 1 - 0,164 = 0,836 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.20)$$

3.3.8. Volume absoluto de agregados

O volume absoluto dos agregados por unidade de volume é dado genericamente por:

$$V_{\text{agregados}} = S - V_{\text{cimento}} \quad (3.21)$$

Adoptando $\rho_{\text{cimento}} = 3100 \text{ kg/m}^3$ tem-se que:

$$V_{\text{agregados}}(B) = 0,798 - \frac{350}{3100} = 0,798 - 0,113 = 0,685 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.22)$$

$$V_{\text{agregados}}(HB) = 0,836 - \frac{420}{3100} = 0,836 - 0,135 = 0,701 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (3.23)$$

3.3.9. Definição dos parâmetros A e B da curva de Faury

Os parâmetros A e B da curva de Faury, podem ser retirados do Quadro 3.4. Uma vez que os agregados grossos utilizados foram britados e se pretendeu uma trabalhabilidade denominada mole, adoptou-se para os valores de A e B, respectivamente, 30 e 2.

Quadro 3.4 - Parâmetros A e B da curva de Faury (Pinto et al., 2009).

Trabalhabilidade	Meios de compactação que se podem empregar	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos agregados			
		Areia rolada		Areia britada	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado	Agregado grosso britado	
Terra húmida	Vibração potente e compressão (pré-fabricação)	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1.5
Plástico	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1.5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluída	Espalhamento e compactação pelo próprio peso	32	34	38	2

3.3.10. Curva de referência de Faury

Após obter os parâmetros A e B da curva de Faury é agora necessário calcular o ponto de abcissa igual a metade de $D_{m\acute{a}x}$. Vem assim que:

$$\frac{D_{m\acute{a}x}}{2} = \frac{22,4}{2} = 11,2 \text{ mm} \quad (3.24)$$

O ponto pretendido é dado por:

$$P(11,2) = A + 17 \times \sqrt[5]{D_{m\acute{a}x}} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} = 30 + 17 \times \sqrt[5]{22,4} + \frac{2}{1 - 0,75} \quad (3.25)$$

$$\approx 70,0$$

Decidiu-se que a curva granulométrica real dos betões a produzir seria igual à curva teórica sem cimento de Faury, para os agregados finos, ou seja, para uma dimensão de agregados compreendidos no intervalo de]0,4] mm. Para os agregados grossos, com base nas curvas granulométricas dos mesmos, obteve-se, através da curva sem cimento de Faury, as percentagens a incorporar de cada tipo de agregado grosso, nos betões a produzir.

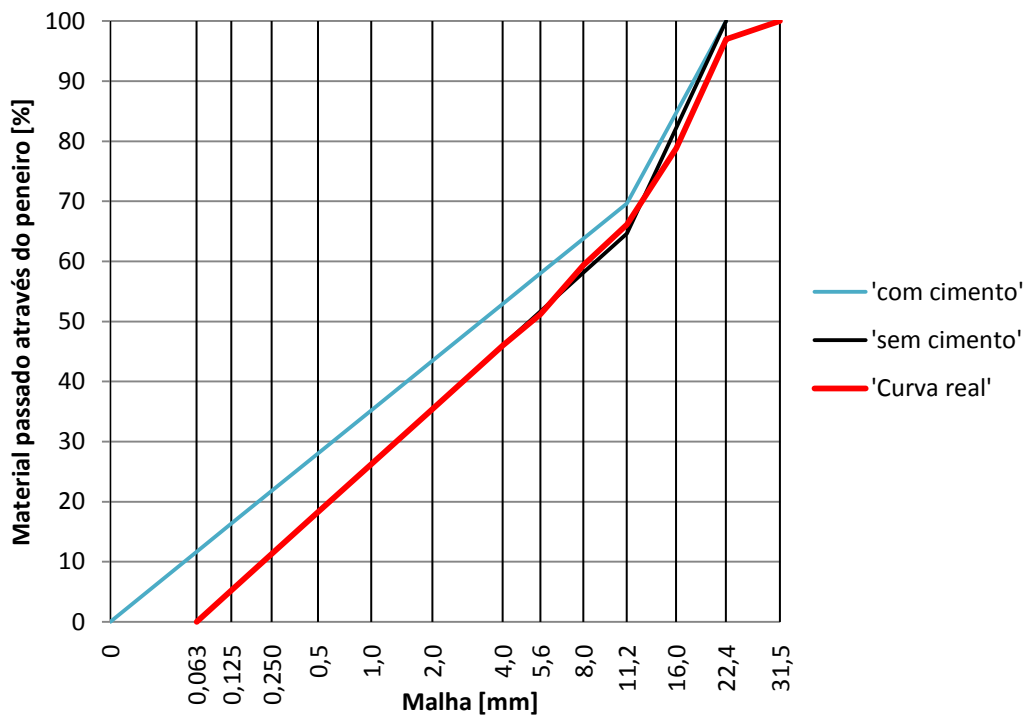


Figura 3.9 - Curvas de referência com e sem cimento de Faury e curva granulométrica real.

Como se pode observar na Figura 3.9, a curva real adapta-se perfeitamente à curva teórica sem cimento de Faury até à malha correspondente a 4 mm, sendo que para valores superiores de malha se obteve a curva real com base nas curvas granulométricas dos agregados grossos.

No Quadro 3.5, são apresentado os valores referentes à curva granulométrica real dos betões a produzir. Como se pode observar, no caso dos agregados grossos, a curva referida depende da curva granulométrica dos mesmos (Quadro 3.5). Já para os agregados finos, os valores apresentados correspondem exatamente aos obtidos através da curva teórica de Faury sem cimento.

É ainda possível observar que ambos os agregados grossos (britas 1 e 2) possuem partículas de tamanho compreendido entre 2,0 e 4,0 mm. Sendo assim, do ponto de vista prático, esta fracção estaria ligeiramente inflacionada. Desta forma, durante a produção dos betões, este factor foi tido em conta descontando-se sempre a esta fracção a percentagem incluída, *a priori*, nos agregados grossos utilizados.

Quadro 3.5 - Percentagens passadas nas malhas para os vários tipos de agregado bem como para a curva granulométrica real.

Malha [mm]	Brita 2		Brita 1		Finos [<4 mm]		Curva real
	%	0,3	%	0,24	%	0,46	
31,5	100,0	30,0	100,0	24,0	100,0	46,0	100,0
22,4	89,9	27,0	100,0	24,0	100,0	46,0	97,0
16,0	29,4	8,8	100,0	24,0	100,0	46,0	78,8
11,2	1,2	0,4	82,2	19,7	100,0	46,0	66,1
8,0	0,3	0,1	55,2	13,2	100,0	46,0	59,3
5,6	0,3	0,1	21,2	5,1	100,0	46,0	51,2
4,0	0,3	0,1	3,4	0,8	46,0	21,2	46,0
2,0	-	-	0,0	0,0	35,4	16,3	35,4
1,0	-	-	-	-	26,2	12,1	26,2
500,0	-	-	-	-	18,2	8,4	18,2
250,0	-	-	-	-	11,3	5,2	11,3
125,0	-	-	-	-	5,2	2,4	5,2
63,0	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0
65,0	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0

3.3.11. Composição dos betões

São apresentadas no Quadro 3.6 as composições dos betões formulados. O prefixo "B" indica um betão corrente e "HB" um betão de elevado desempenho, enquanto que o número que se lhe segue indica a percentagem de substituição de agregados finos naturais por agregados reciclados.

Assim, na família "B" encontram-se os betões denominados por BR, B20R, B50R e B100R, enquanto da família "HB" fazem parte os betões HBR, HB20R, HB50R, HB100R, HBRIA, HB20RIA, HB50RIA e HB100RIA. Os quatro últimos têm a mesma composição dos betões HB, com excepção do introdutor de ar (IA). Após multiplicar os valores presentes no Quadro 3.6 pela massa volúmica dos materiais e volume de amassadura e tendo em conta a absorção de água por parte dos agregados, obtém-se as quantidades finais de cada componente a utilizar na betonagem.

No Quadro 3.7, apresenta-se a quantidade de superplastificante (SP) e introdutor de ar (IA) utilizados nos betões em que foram utilizados adjuvantes. Excluem-se à partida os betões correntes dado não terem adjuvantes na sua composição

Quadro 3.6 - Composição dos vários tipos de betão.

Componente		Betões correntes (a/c efectiva = 0,53)				Betões de elevado desempenho (a/c efectiva = 0,35)			
		B	B20	B50	B100	HB	HB20	HB50	HB100
		Quantidades [m ³ /m ³]							
Grossos	Brita 2	0,205	0,205	0,205	0,205	0,210	0,210	0,210	0,210
	Brita 1	0,164	0,164	0,164	0,164	0,168	0,168	0,168	0,168
Finos naturais	2,0-4,0	0,075	0,060	0,038	-	0,077	0,062	0,039	-
	1,0-2,0	0,062	0,049	0,031	-	0,063	0,050	0,032	-
	0,5-1,0	0,055	0,044	0,027	-	0,056	0,045	0,028	-
	0,25-0,5	0,048	0,038	0,024	-	0,049	0,039	0,025	-
	0,125-0,25	0,075	0,060	0,038	-	0,077	0,062	0,039	-
Finos reciclados	2,0-4,0	-	0,015	0,038	0,075	-	0,015	0,039	0,077
	1,0-2,0	-	0,012	0,032	0,062	-	0,013	0,032	0,063
	0,5-1,0	-	0,011	0,027	0,055	-	0,011	0,028	0,056
	0,25-0,5	-	0,010	0,024	0,048	-	0,010	0,025	0,049
	0,125-0,25	-	0,015	0,038	0,075	-	0,015	0,039	0,077
	Cimento	0,113	0,113	0,133	0,133	0,135	0,135	0,135	0,135
	Água	0,186	0,186	0,186	0,186	0,147	0,147	0,147	0,147
	Água de absorção dos AFRB	-	0,0026	0,0064	0,0128	-	0,0026	0,0065	0,0131
	a/c aparente	0,53	0,537	0,548	0,574	0,35	0,356	0,366	0,381
	Vazios	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017

Quadro 3.7 - Quantidade de SP e IA utilizados para cada tipo de composição

Adjuvante	HBR	HB20R	HB50R	HB100R	HBRIA	HB20RIA	HB50RIA	HB100RIA
	Quantidade [% do peso de cimento]							
SP	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
IA	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1

3.4. Betão de origem e produção dos agregados reciclados

3.4.1. Introdução

Denomina-se como betão de origem (BO) o betão produzido com o intuito de posterior reciclagem, de modo a obter os agregados reciclados utilizados na campanha experimental referente ao presente trabalho. Decidiu-se nesta fase trabalhar em conjunto com outros projetos a decorrer no IST. Desta forma, houve menor desperdício após a reciclagem, tendo sido os agregados finos reciclados utilizados na presente dissertação e os agregados grossos nos restantes projetos.

O BO foi produzido pela empresa *Unibetão*, do grupo *Secil*, tendo sido entregue no Laboratório de Construção do IST em camião betoneira, pedido à fábrica com as seguintes características:

- $D_{\text{máx}} = 22 \text{ mm}$;
- classe de trabalhabilidade - S_3 ;
- classe de resistência - C30/35.

Foram posteriormente realizados ensaios deste betão no estado fresco e endurecido de modo a caracterizar de forma rigorosa o BO.

3.4.2. Montagem da cofragem

Foi necessário montar uma cofragem de modo a receber, no Laboratório de Construção do IST, o betão para reciclar. Decidiu-se produzir uma cofragem de madeira com dimensões em planta de 4 x 4 x 0,25 m de modo a satisfazer as necessidades da presente dissertação e dos restantes projetos.

De modo a facilitar a posterior britagem do betão (para efeitos de reciclagem), colocaram-se tábuas perpendiculares a duas das faces exteriores da cofragem de modo, obtendo-se um sistema de vigas ao invés de uma laje inteira. Teve-se também atenção ao facto de se realizar o contraventamento da cofragem (Figura 3.10), de modo a evitar o seu abaulamento.



Figura 3.10 - Montagem da cofragem para recepção do BO.

3.4.3.Recepção do BO

O BO foi recebido no Laboratório de Construção do IST em camião betoneira tendo sido directamente depositado na cofragem referida no ponto anterior. Foi de imediato vibrado de modo a expulsar parte do ar presente na sua composição e a produzir uma distribuição homogénea ao longo de toda a área a betonar.

Foram feitos, em paralelo, os ensaios da massa volúmica no estado fresco e do abaixamento do cone de Abrams. Foram ainda produzidos cubos de 15 cm de aresta (Figura 3.11) de modo a analisar a resistência à compressão do BO aos 28 dias e, assim, o betão a reciclar.



Figura 3.11 - Cubos produzidos com BO.

3.4.4.Descofragem e preparação para a reciclagem

Após dois dias de cura ao ar livre, procedeu-se à descofragem e fracturação do BO. Este processo é necessário uma vez que a britadeira (máquina utilizada para reciclagem de betão) tem uma capacidade limitada. Assim, com recurso a uma marrecta e a pé de cabra, procedeu-se à descofragem e fracturação do BO (Figuras 3.12 e 3.13).



Figura 3.12 - Fracturação da laje de BO em blocos.



Figura 3.13 - Blocos de betão prontos para reciclagem.

3.4.5. Reciclagem

Os agregados reciclados foram obtidos através do betão de origem, após 28 dias de cura ao ar livre. A reciclagem do betão de origem foi feita com recurso à britadeira presente no Laboratório de Construção do IST (Figura 3.14). A máquina, através do movimento mecânico de duas placas denteadas, esmaga o betão de modo a produzir agregados reciclados. O processo de ajuste da britadeira é feito através da colocação de placas metálicas que, ao serem adicionadas ao sistema, provocam um maior fecho das placas de modo a produzir agregados cada vez mais finos.

Assim, foi necessário haver uma sinergia entre os vários projetos de modo a que se conseguisse obter a distribuição granulométrica necessária, para os agregados reciclados. Depois dos primeiros processos de reciclagem, fez-se então uma análise granulométrica simplificada - necessária apenas para efeitos de gestão de recursos - aos agregados obtidos por este processo. As aberturas das placas da britadeira foram sendo ajustadas de modo a satisfazer todas as necessidades supracitadas.



Figura 3.14 - Britadeira utilizada para a reciclagem de betão.

Após reciclagem, os agregados reciclados foram guardados em barricas ao abrigo das condições climáticas, tendo sido posteriormente separados nas fracções desejadas.

3.5. Produção dos betões

3.5.1. Introdução

Foram realizadas em instantes distintos, duas fases de produção de betões. A primeira pretende avaliar, segundo a ASTM C666, a resistência aos ciclos gelo-degelo dos betões produzidos. Durante esta fase, foram realizados também ensaios de resistência à tracção por flexão e compressão dos betões produzidos e estudou-se ainda a relação entre a resistência à compressão de cubos de 15 cm de aresta e a de cubos de 10 cm de aresta. A segunda fase tem como objectivo a caracterização do módulo de elasticidade residual dos betões produzidos, após serem sujeitos a ciclos gelo-degelo.

A razão pela qual se realizaram duas fases distintas da campanha experimental prende-se com o facto de a câmara de ensaios de gelo-degelo, localizada na fábrica da *Secil* em Outão, ter um espaço demasiado reduzido para a colocação de todos os provetes em simultâneo. Assim, por uma questão de espaço, foi necessário realizar a campanha experimental em duas fases.

3.5.2. Moldes utilizados

A norma ASTM C666 prevê o estudo da resistência de betões aos ciclos gelo-degelo com recurso a provetes prismáticos de dimensões 100 x 100 x 300 mm. Desta forma foi necessária a produção de provetes destas dimensões, cortesia da Alves Ribeiro S.A., de modo a que se pudesse seguir a norma em vigor. Foram projectados assim moldes em contraplacado marítimo (Figura 3.15) de modo a produzir os provetes desejados.



Figura 3.15 - Moldes em contraplacado marítimo para execução de provetes prismático 100 x 100 x 300 mm.

Os restantes provetes foram obtidos através de moldes com dimensões especificadas na norma NP EN 12390-1 (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes" (Figura 3.16).

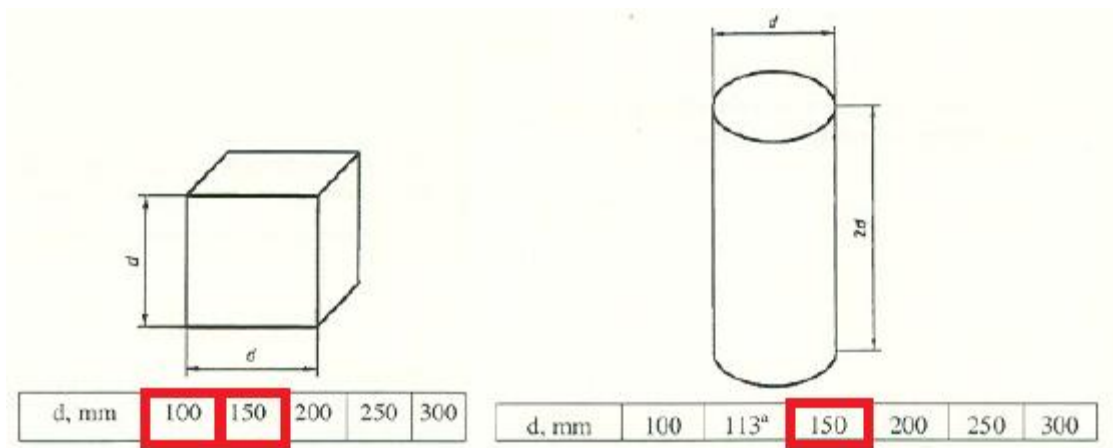


Figura 3.16 - Dimensões dos moldes utilizados (a vermelho) - adaptado da NP EN 12390-1 (2003).

3.5.3. Amassadura

O processo de amassadura difere consoante se utilizem apenas agregados naturais ou agregados naturais e reciclados. Difere ainda no caso de se utilizar superplastificante (SP) e introdutor de ar (IA).

Este processo começa com a pesagem de todos os materiais a utilizar durante a betonagem bem como a sua colocação no local apropriado no decorrer dos trabalhos. São de seguida humedecidos todos os equipamentos utilizados durante o processo de amassadura, incluindo a betoneira e o carrinho de mão utilizado no transporte do betão para o local de preenchimento dos moldes. Esta acção é realizada com o intuito de evitar a absorção de água da amassadura por parte dos elementos referidos.

No caso de só se utilizarem agregados naturais e de se tratar de um betão corrente sem SP e IA, o processo de amassadura respeita a seguinte sequência:

- colocação na betoneira de todos os agregados grossos + 50% da água;
- mistura durante 2 minutos;
- ao fim de 2 minutos, adicionar o cimento e restante água;
- perfazer cerca de 7 minutos desde o início do processo.

Se, por outro lado, se utilizarem agregados reciclados, o processo é realizado de acordo com os seguintes passos:

- colocação na betoneira de todos os agregados finos e grossos + 50% da água (incluindo a água de compensação);
- mistura durante 4 minutos;
- ao fim de 4 minutos adicionar, o cimento e restante água;
- perfazer 9 minutos desde o início do processo.

No caso de se utilizarem agregados reciclados, a água de compensação (§3.5.3) é adicionada juntamente com 50% da água, quando esta é colocada na betoneira. Tanto o

superplastificante como o introdutor de ar são adicionados em simultâneo com a colocação na betoneira de toda a água de amassadura.

Após a amassadura, foi realizado o ensaio de abaixamento do cone de Abrams (§3.6.2). O valor pretendido deveria encontrar-se no intervalo (125 ± 15 mm). Caso isto se verificasse, o processo de amassadura estaria concluído e proceder-se-ia ao preenchimento dos moldes. No caso de o abaixamento ser inferior ao pretendido, procedeu-se à correção da relação a/c (§3.5.5), repetindo o ensaio posteriormente. Caso o abaixamento continuasse fora do intervalo pretendido, a betonagem teria que ser repetida.

3.5.4. Água de absorção dos AFRB

Uma vez que os agregados reciclados possuem uma grande capacidade de absorção de água é necessário adicionar água, à amassadura de modo a controlar a relação a/c efectiva e manter a trabalhabilidade pretendida. Uma forma de estimar a água de compensação implica o conhecimento do teor de humidade dos agregados reciclados bem como a sua absorção de água ao fim de 15 minutos.

Para calcular o teor de humidade dos agregados reciclados, foi recolhida uma amostra, e registada essa massa como M_1 . Depois de seca em estufa ventilada, pesou-se outra vez a amostra e anotou-se a massa como M_2 . O teor de humidade (h), em percentagem, é dado pela seguinte expressão:

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

em que,

- h - teor de humidade [%];
- M_1 - massa às condições climatéricas ambiente da amostra [g];
- M_2 - massa após secagem em estufa da amostra [g].

Para calcular a absorção de água ao fim de 15 minutos por parte dos agregados reciclados, preparou-se uma amostra com curva granulométrica equivalente à utilizada nos betões a fabricar. Pesou-se essa amostra e anotou-se a massa correspondente como M_1 . De seguida, colocou-se a amostra dentro de água durante 15 minutos. Ao fim desse tempo, secou-se a água superficial das partículas sem perdas de massa por parte da amostra. Pesou-se a amostra e anotou-se essa massa como M_2 . A absorção de água ao fim de 15 minutos, em termos percentuais, é dada por:

$$Abs15 = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (3.27)$$

em que,

- Abs15 - absorção de água ao fim de 15 minutos [%];
- M_1 - massa da amostra saturada ao fim de 15 minutos [g];
- M_2 - massa da amostra saturada ao fim de 15 minutos [g].

Desta forma, a água de compensação a utilizar em cada amassadura depende da massa dos agregados reciclados utilizados. Para uma determinada massa de agregados reciclados (m), a água de compensação (w_{comp}) a utilizar em determinada amassadura é dada por:

$$w_{comp} = \frac{(Abs15 - w_0)}{100} \times m \quad (3.28)$$

em que,

- w_{comp} - água de compensação [kg];
- Abs15 - absorção de água ao fim de 15 minutos [%];
- w_0 - teor de humidade [%];
- m - massa de agregados utilizados na produção de betão [kg].

3.5.5. Correção da relação a/c

Pode ser necessária a correção da relação água/cimento durante o período de amassadura, caso se verifique que o abaixamento é inferior ao pretendido. A adição por si só de água causará o aumento do volume de amassadura, alterando o volume de agregados por unidade de volume. Vem assim que o novo volume por unidade de volume dos agregados é dado por:

$$V'_{agg} = 1 - C \times (a/c)' - V_c - V_v \quad (3.29)$$

em que,

- V'_{agg} - volume que os agregados passam a ocupar por unidade de volume [m^3/m^3];
- C - dosagem de cimento inicial [kg/m^3];
- $(a/c)'$ - nova relação água/cimento que se pretende obter;
- V_c - volume de cimento [m^3/m^3];
- V_v - volume de vazios [m^3/m^3].

Desta forma, o novo volume de amassadura (V') é dado por:

$$V' = \frac{V_{agg}}{V'_{agg}} \times V \quad (3.30)$$

em que,

- V' - novo volume de amassadura [m^3];
- V_{agg} - volume de agregados correspondente ao volume inicial de amassadura [m^3/m^3];
- V'_{agg} - volume de agregados correspondente ao novo volume de amassadura [m^3/m^3];
- V - volume inicial de amassadura.

Assim, admitindo que para uma nova relação a/c pretendida, se denomina ΔV como a diferença entre os volumes final e inicial de amassadura, a quantidade de cimento a adicionar à amassadura é dada pela seguinte expressão:

$$C' = \Delta V \times C \quad (3.31)$$

em que,

- C' - cimento a adicionar à amassadura [kg];
- C - dosagem de cimento inicial [kg/m^3].

Por sua vez, a água a adicionar é fácil de calcular tendo em conta a relação (a/c) que se pretende e as expressões já descritas. Caso este processo seja necessário, a água e o cimento são adicionados à amassadura, repetindo-se o ensaio de abaixamento ao fim de 1 minuto.

3.5.6. Superplastificante

Foi utilizado superplastificante em todas as betonagens relacionadas com betões de elevado desempenho.

O superplastificante utilizado foi o *GLENIUM SKY 548* (Anexo A), produzido pela *BASF*. Adoptou-se uma dosagem inicial durante a amassadura de 0,5% do peso de cimento. Caso a trabalhabilidade não fosse a pretendida, esta dosagem ia sendo corrigida com pequenas doses de 0,1% do peso de cimento até se atingir a trabalhabilidade desejada. Verificou-se que, para todos os betões, a dosagem de superplastificante ficou entre 0,7 e 0,8% do peso de cimento.

O superplastificante foi sempre adicionado às amassaduras em simultâneo com os últimos 50% da água, adicionando-se tempo de amassadura ao tempo definido em §3.5.3.

3.5.7. Introdutor de ar

O ar presente na matriz cimentícia pode ser benéfico na durabilidade do betão aos ciclos gelo-degelo, devido à possível transferência de tensões interiores para esses espaços.

Desta forma, pretendeu-se estudar o efeito que a utilização de um introdutor de ar (IA) pode provocar nos betões produzidos. O introdutor de ar utilizado foi o *MICRO AIR 100*

(Anexo B), tendo sido utilizada uma dosagem de IA de 0,1% do peso de cimento. Estão presentes na Figura 3.17 o superplastificante e introdutor de ar utilizados.



Figura 3.17 - Superplastificante (esquerda). Introdutor de ar (direita).

3.5.8. Preenchimento dos moldes

Todos os moldes foram previamente limpos com ar comprimido de forma a remover qualquer impureza no seu interior. Aplicou-se de seguida o óleo descofrante, que se torna essencial para que a descofragem se dê de uma forma suave não danificando nem os moldes nem os provetes.

Após a moldagem, o betão foi vibrado mantendo o vibrador perpendicular ao fundo do molde. Foram de seguida alisadas as superfícies de betonagem dos provetes (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Moldes correspondentes a uma betonagem preenchidos.

3.5.9. Descofragem e cura

A descofragem foi feita após 24 horas com recurso a ar comprimido, no caso dos provetes em plástico, ou com recurso a martelo de borracha no caso de moldes de encaixe. Após a descofragem, todos os moldes foram devidamente limpos para posterior utilização. Todos os provetes foram marcados com o tipo de betão e respetiva data de betonagem, tendo sido colocados de seguida em câmara húmida, com humidade superior a 95% (Figura 3.19).



Figura 3.19 - Câmara húmida para cura dos provetes.

Os provetes permaneceram na câmara húmida até as respetivas idades de ensaio, excepto aqueles que foram colocados posteriormente na câmara de gelo-degelo. Estes últimos tiveram dois dias totalmente imersos em água para que se garantisse a sua completa saturação antes da entrada na câmara de gelo-degelo.

3.6. Ensaios do betão no estado fresco

3.6.1. Introdução

Os ensaios realizados no estado fresco são necessários para que se verifique que todos os betões produzidos têm uma trabalhabilidade idêntica, sendo assim comparáveis. Estes ensaios são também importantes no sentido de controlar a composição e propriedades do betão produzido.

3.6.2. Abaixamento do cone de Abrams

3.6.2.1 Objectivo

Este ensaio tem como objectivo avaliar a consistência do betão. Este procedimento é especialmente importante visto terem sido utilizados diferentes percentagens de agregados reciclados, para diferentes tipos de betão. Este facto, aliado à utilização de superplastificante e introdutor de ar, faz com que este ensaio seja essencial no sentido

de uniformizar a trabalhabilidade de todos os betões produzidos. O abaixamento considerou-se válido para valores no intervalo 120 ± 20 mm.

O ensaio foi realizado de acordo com a NP EN 12350-2 (2002) "Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento".

3.6.2.2 Procedimento de ensaio

O ensaio consiste no preenchimento de um elemento metálico tronco-cónico, em cima de uma placa metálica, com betão saído directamente da betoneira. O betão colocado dentro do elemento referido é compactado em três instantes distintos, correspondentes ao preenchimento de um terço da altura de molde de cada vez. A compactação dá-se através de 25 pancadas, com recurso a um varão de aço, que devem ser uniformemente distribuídas. As pancadas devem penetrar na camada inferior ou até à placa metálica do fundo se se tratar da primeira camada. O cone é retirado e o abaixamento é medido, com recurso a uma régua calibrada. Todos os objectos foram previamente humedecidos de modo a evitar a absorção de água por parte dos mesmos (Figura 3.20).



Figura 3.20 - Material para execução do ensaio de abaixamento (esquerda) . Execução do ensaio (direita).

3.6.2.3 Resultados

O resultado do ensaio é a diferença entre a altura inicial do elemento tronco-cónico e a altura final da coluna de betão deformada (Figura 3.22). A NP EN 12350-2 (2002) especifica a situação para a qual o ensaio é válido (Figura 3.21).

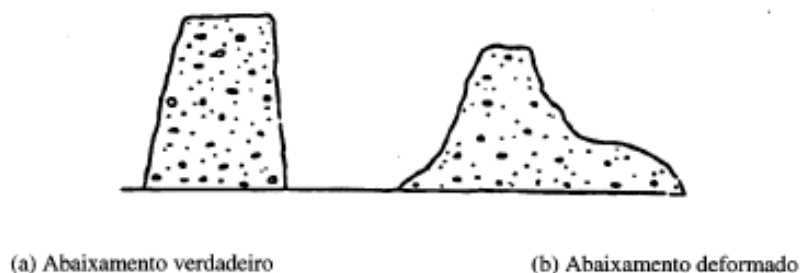


Figura 3.21 - Abaixamentos verdadeiros e deformados segundo a NP EN 12350-2 (2002).

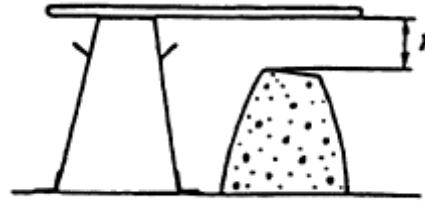


Figura 3.22 - Medição do abaixamento (esquerda). Medição do abaixamento segundo a NP EN 12350-2 (2002) (direita).

3.6.3. Massa volúmica

3.6.3.1 Objectivo

A massa volúmica permite avaliar indirectamente a composição do betão. À partida, quanto maior for a percentagem de substituição de agregados naturais por agregados reciclados, menor será a massa volúmica do betão, visto que os agregados reciclados possuem menor massa volúmica do que os agregados naturais. Este ensaio permite assim avaliar qualquer desvio em relação ao que seria expectável, permitindo uma melhor análise dos resultados.

O ensaio seguiu a norma NP EN 12350-6 (2002) "*Ensaaios do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica*".

3.6.3.2 Procedimento de ensaio

Um recipiente metálico, de volume conhecido (10 litros), é humedecido e pesado, sendo anotada a sua massa como M_1 . De seguida, esse recipiente é cheio com betão que é vibrado de seguida. A superfície do betão à vista é alisada com recurso a colher de pedreiro. Limpa-se o excesso de betão e pesa-se o conjunto anotando a sua massa como M_2 .

3.6.3.3 Cálculo dos resultados

A massa volúmica do betão no estado fresco é dada pela seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad (3.32)$$

em que,

- γ - massa volúmica do betão no estado fresco [kg/m^3];
- M_1 - massa do recipiente humedecido [kg];
- M_2 - massa do conjunto recipiente + betão [kg];
- V_r - volume do recipiente [m^3].

3.7. Ensaaios do betão no estado endurecido

3.7.1. Introdução

Os ensaios no estado endurecido do betão realizados no presente trabalho evoluem duas etapas distintas. A primeira relaciona-se com os ensaios de resistência mecânica dos betões, conforme o Quadro 3.8. A segunda fase de ensaios relaciona-se com o estudo da durabilidade dos betões sujeitos aos ciclos gelo-degelo. Estes ensaios estão indicados no Quadro 3.9.

Quadro 3.8 - Ensaaios de resistência mecânica no estado endurecido do betão e respetivas normas.

Ensaio	Norma
Resistência à compressão	NP EN 12390-3
Resistência à flexão	NP EN 12390-5
Módulo de elasticidade	LNEC E 397

Quadro 3.9 - Ensaaios para avaliação da durabilidade dos betões aos ciclos gelo-degelo.

Ensaio	Norma
Resistência aos ciclos gelo-degelo	ASTM C666
Medição da velocidade de propagação de ultrassons	EN 12504-4/ASTM C666
Medição da variação do comprimento	ASTM C666

O número de provetes utilizados bem como a sua idade de ensaio estão especificados mais à frente neste capítulo. Recorde-se que a geometria dos provetes foi definida em §3.5.2. Como se sabe, o descasque superficial do betão, quando sujeito a ciclos gelo-degelo, toma especial importância aquando da utilização de sais anti-congelantes. Apesar de não ter sido estudado o efeito deste tipo de sais, analisou-se, em paralelo com os ensaios referidos, o descasque superficial dos betões através de inspeção visual.

3.7.2. Resistência à compressão

3.7.2.1 Objectivo

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2003) "*Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*". O equipamento (Figura 3.23) utilizado para o ensaio à compressão consiste numa prensa hidráulica de 3000 kN de capacidade da marca *Toni Pact*, calibrada pela *TAP* e

respeitando a NP EN 12390-4 (2003) "Ensaio do betão endurecido. Parte 4: Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio".



Figura 3.23 - Máquina para ensaio à compressão (esquerda). Ensaio à compressão de um cubo de aresta igual a 150 mm (direita).

3.7.2.2 Provetes ensaiados

O ensaio de resistência à compressão realizou-se em cubos de 15 cm de aresta aos 7, 28 e 90 dias e em cubos de 10 cm de aresta aos 7 e aos 28 dias. Realizou-se também este ensaio a cada uma das metades resultantes do ensaio à flexão aos provetes prismáticos (§3.7.3).

Devido a condicionantes relacionadas com o equipamento, foi necessário colocar na máquina duas placas auxiliares de 10 cm de aresta, de modo a conseguir ensaiar os cubos de 10 cm, bem como as metades resultantes do ensaio à flexão dos provetes prismáticos (Figura 3.24).



Figura 3.24 - Esquerda: metades resultantes do ensaio à flexão dos provetes prismáticos, prontas a serem ensaiadas à compressão. Direita: pratos auxiliares para ensaio à compressão de cubos de 100mm de aresta e partes resultantes dos provetes prismáticos.

3.7.2.3 Procedimento de ensaio

O excesso de humidade foi removido da superfície dos provetes e os pratos da máquina de ensaio foram limpos. O provete a ensaiar foi previamente pesado (excepto as partes resultantes dos prismas) e colocado na máquina de forma a estar centrado e com a face de enchimento perpendicular ao plano dos pratos. A velocidade de carga utilizada foi de 13,5 kN/s para os cubos de 15 cm de aresta e de 6 kN/s para os cubos de 10 cm de aresta e partes resultantes do ensaio à flexão dos prismas. Ambos os valores correspondem a uma velocidade de carga de 0,6 MPa/s que está dentro do intervalo de valores estipulado pela NP EN 12390-3 (2003).

3.7.2.4 Cálculo dos resultados

A norma em vigor explicita a validade do ensaio através de inspeção visual como representado nas Figuras 3.25 e 3.26.



Figura 3.25 - Roturas satisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2003).

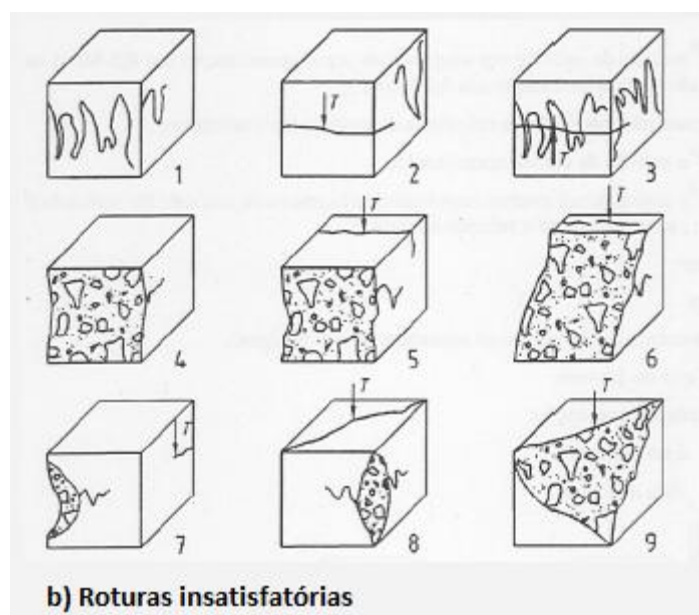


Figura 3.26 - Roturas insatisfatórias segundo a NP EN 12390-3 (2003).

No caso de o ensaio ser satisfatório, a resistência do betão à compressão é dada pela seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.33)$$

em que,

- f_c - resistência à compressão do betão em MPa [N/mm²];
- F - carga máxima à rotura [N]
- A_c - área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada [mm²].

3.7.3. Resistência à tracção por flexão

3.7.3.1 Objectivo

Os ensaios foram realizados com base na norma NP EN 12390-5 (2003) "*Ensaio do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão dos provetes*". A máquina utilizada para o ensaio foi uma *IBERTEST MODELO FIB 100W* com capacidade de 100 kN.

3.7.3.2 Provetes ensaiados

Foram ensaiados, por cada tipo de betão, sete provetes prismáticos com dimensões definidas em §3.5.2. Três provetes foram ensaiados aos 28 dias, enquanto outros dois sofreram 300 ciclos gelo-degelo, tendo sido ensaiados ao fim desse tempo. Foram ainda ensaiados dois provetes ao fim do mesmo tempo (300 ciclos) mas sem sofrerem a acção gelo-degelo. Esses provetes foram conservados em câmara húmida até dois dias antes da idade de ensaio, a partir da qual foram imersos em água. As partes resultantes do ensaio à tracção por flexão foram ensaiadas à compressão conforme referido em §3.7.2

3.7.3.3 Procedimento de ensaio

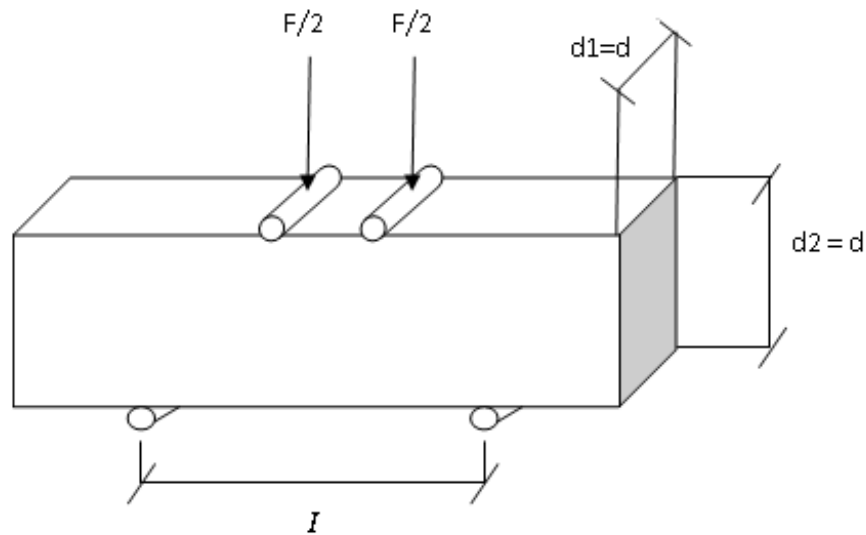
Foi retirada a humidade em excesso dos provetes, pesando-os de seguida. Os provetes foram apoiados em dois roletes conforme a NP EN 12390-5 (Figura 3.27). O vão adoptado foi de 25 cm, estando os dois apoios centrais espaçados de aproximadamente 1/3 do vão (Figura 3.28). A velocidade de carga segundo a norma é dada por:

$$R = \frac{s \times d_1 \times d_2^2}{I} \quad (3.34)$$

em que,

- R - velocidade de aplicação da carga [N/s];
- s - velocidade de aplicação da tensão [N/mm².s];
- d_1 , d_2 e I - definidos na Figura 3.27.

Assim, tendo em consideração que a norma especifica um valor máximo de carga de 0,06 MPa/s e com d_1 e d_2 iguais a 100 mm, adoptou-se uma velocidade de carga de 0,24 kN/s.



3.27 - Esquema de ensaio à tração por flexão - NP EN 12390-5 (2003).



Figura 3.28 - Ensaio de resistência à tração por flexão.

3.7.3.4 Cálculo dos resultados

A resistência à flexão de um determinado provete é dado pela seguinte equação:

$$f_{cf} = \frac{F \times I}{d_1 \times d_2^2} \quad (3.35)$$

sendo que,

- f_{cf} - resistência à tracção por flexão em MPa [N/mm^2];
- F - carga máxima que leva o provete à rotura [N];
- d_1 , d_2 e I - definidos na Figura 3.27.

3.7.4. Módulo de elasticidade

3.7.4.1 Objectivo

O módulo de elasticidade ou de Young é calculado, para um meio elástico, a partir do diagrama tensão-deformação ($\sigma - \epsilon$) para um determinado material, neste caso o betão. Uma vez que no betão esta relação não é linear, torna-se necessário adoptar um procedimento de cálculo simplificado. O módulo de elasticidade pode assim ser calculado pelo método da tangente, em que o módulo de elasticidade é definido pelo declive da tangente na origem do gráfico $\sigma - \epsilon$, ou pelo método da secante em que se adopta uma recta que passa na origem do referencial e num ponto de tensão pré-definida.

No caso da presente dissertação, o módulo de elasticidade foi calculado pelo método da secante, sendo o ponto de tensão supracitado o correspondente a 1/3 da resistência média do betão à compressão.

O ensaio (Figura 3.29), foi realizado segundo a especificação LNEC E-397 "Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão."



Figura 3.29 - Gaiola metálica acoplada ao provete para medição das deformações. Equipamento de ensaio para determinação do módulo de elasticidade (direita).

3.7.4.2 Provetes ensaiados

Foram ensaiados três provetes cilíndricos aos 28 dias de idade. Foram colocados na câmara gelo-degelo dois provetes por cada tipo de composição, tendo sido ensaiados ao fim de 300 ciclos. No fim desse tempo, foram também ensaiados dois provetes de referência por composição, sem terem sido submetidos à acção do gelo-degelo.

3.7.4.3 Procedimento de ensaio

As bases dos cilindros foram rectificadas de modo a obter o melhor contacto possível com os pratos da máquina. Acoplou-se uma "gaiola" metálica ao provete que permite a medição das deformações sofridas pelo mesmo. Após preparação, o provete foi colocado numa prensa hidráulica da marca *INSTRON*, modelo 1343, com capacidade de 250 kN (Figura 3.29). Um computador foi ligado ao sistema de forma a traçar o gráfico tensão-deformação dos provetes a analisar. Aplicou-se uma tensão inicial de 0,5 a 1 MPa, aumentando-se a força continuamente a uma velocidade de $0,5 \pm 0,1$ MPa/s até se atingir 1/3 da resistência média à compressão do betão. Registaram-se as tensões e deformações iniciais e finais.

3.7.4.4 Cálculo dos resultados

O ensaio é considerado válido se a diferença entre as médias das variações de dois ciclos consecutivos for inferior a 1×10^{-5} , como mostra a seguinte expressão:

$$|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| = \left| \left(\frac{\varepsilon_{\text{ext}1} + \varepsilon_{\text{ext}2}}{2} \right)_i - \left(\frac{\varepsilon_{\text{ext}1} + \varepsilon_{\text{ext}2}}{2} \right)_{i+1} \right| \leq 1 \times 10^{-5} \quad (3.36)$$

O módulo de elasticidade em compressão é dado pela expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad (3.37)$$

sendo que,

- E_c - módulo de elasticidade em compressão [GPa];
- $\sigma_{i,n}$ - tensão inicial aplicada no ciclo n [MPa];
- $\sigma_{f,n}$ - tensão máxima aplicada no ciclo n [MPa];
- $\varepsilon_{i,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{i,n}$ no ciclo n;
- $\varepsilon_{f,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{f,n}$ no ciclo n.

3.7.5. Ensaio de medição de velocidade de propagação de ultrassons (UPV)

3.7.5.1 Objectivo

O ensaio de ultrassons consiste, basicamente, em medir o tempo que um determinado impulso sonoro demora a percorrer uma determinada secção longitudinal. Como é sabido, o som propaga-se mais rápido num meio mais denso e mais devagar num meio mais poroso. Este ensaio permite, dessa forma, analisar de uma forma indirecta as características intrínsecas de um determinado provete.

O ensaio de medição de ultrassons foi realizado segundo a EN 12504-4 (2004) "Ensaio do betão nas estruturas. Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons". O equipamento utilizado foi o *PUNDIT*, que permite leituras com precisão até 0,1 μ s.

3.7.5.2 Provetes ensaiados

O ensaio foi realizado a todos os provetes prismáticos que sofreram ciclos gelo-degelo, nas condições iniciais e após 10, 20, 36, 55, 91, 121, 181 e 300 ciclos.

3.7.5.3 Procedimento de ensaio

O equipamento foi devidamente calibrado, fazendo passar o sinal sonoro do emissor para o receptor através de um material com tempo de propagação conhecido.

As faces do provete, nas quais foram colocados o emissor e o receptor, foram devidamente limpas de partículas soltas. Para facilitar a medição, colocou-se massa consistente entre o provete e os transdutores de modo a garantir o melhor contacto possível entre estes, garantindo assim uma leitura correcta do tempo de propagação (Figura 3.30).

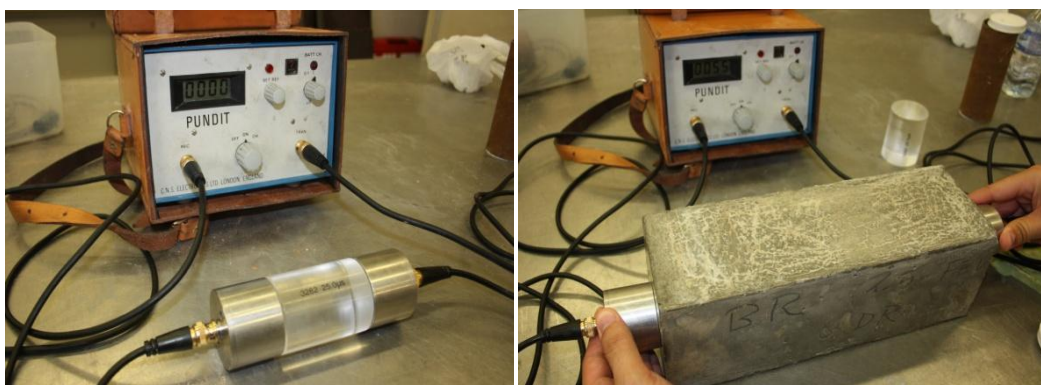


Figura 3.30 - Calibração do equipamento (esquerda). Medição do tempo de propagação de ultrassons (direita).

3.7.5.4 Cálculo dos resultados

A velocidade de propagação de ultrassons é dada pela seguinte expressão:

$$V_{\mu s} = \frac{L}{t} \quad (3.38)$$

em que,

- $V_{\mu s}$ - velocidade de propagação de ultrassons [mm/ μ s];
- L - comprimento do longitudinal do provete, distância entre o emissor e receptor [mm];
- t - tempo de propagação de ultrassons [μ s].

3.7.6. Medição da variação de comprimento ao longo do tempo

3.7.6.1 Objectivo

A norma ASTM 666 prevê a medição da variação ao longo do tempo dos provetes submetidos a ciclos gelo-degelo. Desta forma, e uma vez que as variações de temperatura provocam, no betão, variações dimensionais, optou-se por medir esta variável.

3.7.6.2 Provetes de ensaiados

Foram ensaiados todos os provetes prismáticos com as dimensões definidas em §3.5.2.

3.7.6.3 Procedimento de ensaio

Para que fosse possível medir a variação de comprimento dos provetes ao longo do tempo, foi necessária a colocação de discos metálicos nos provetes e ensaiar (Figura 3.31). Os discos foram colados numa das superfícies do provete com recurso a resina epóxida de duas componentes, que provou ser resistente à acção do gelo. A distância inicial entre discos foi de 200 mm, tendo sido garantida com a ajuda de uma régua calibrada (Figura 3.22).

O aparelho utilizado para as medições foi um comparador da marca *MITUTOYO* com precisão até à 3ª casa decimal (Figura 3.32). Antes de cada medição, o aparelho foi calibrado com recurso a uma barra padrão de modo a que os resultados pudessem ser comparáveis entre si.

A barra padrão (Figura 3.31) foi sempre colocada no mesmo local numa superfície plana de modo a evitar possíveis distorções devido à inclinação do plano de repouso da barra.



Figura 3.31 - Régua de calibração do comparador (esquerda). "Pastilhas" coladas nos provetes prismáticos para medição da variação de comprimento ao longo do tempo (direita).



Figura 3.32 - Esquerda: comparador. Direita: medição da variação de comprimento ao fim de n ciclos.

3.7.6.4 Resultados

A leitura do valor no visor do aparelho utilizado indica a variação de comprimento que existe entre os discos colados na superfície do provete a ensaiar e o comprimento da régua padrão.

Foram feitas medições nos provetes antes da entrada na câmara gelo-degelo e após 10, 20, 36, 55, 91, 121, 181 e 300 ciclos.

3.7.7. Ensaio de resistência do betão aos ciclos acelerados de gelo-degelo

3.7.7.1 Introdução

A norma ASTM C666 prevê dois procedimentos para avaliação da resistência do betão aos ciclos de gelo-degelo. O procedimento A, que consiste na aplicação das condições de gelo e degelo com os provetes sempre imersos em água, e o procedimento B, que consiste na congelação dos provetes ao ar livre, dando-se o seu descongelamento em água. Para a presente dissertação, foi adoptado o procedimento A, visto ser o mais gravoso em termos de durabilidade do betão

Os ciclos de gelo-degelo adoptados respeitam os intervalos estipulados pela norma. De modo a definir ao certo os intervalos de tempo entre as várias fases do ciclo, foram produzidos provetes adicionais com características idênticas aos utilizados durante a execução do ensaio. Estes provetes foram submetidos a diferentes ciclos gelo-degelo de modo a identificar aquele que melhor se adaptava às necessidades experimentais e às condicionantes por parte do equipamento.

Após os ciclos gelo-degelo experimentais, os provetes foram ensaiados à flexão, de modo a analisar o seu interior. Através de inspeção visual, com recurso a lupa, averiguou-se da presença de cristais de gelo no interior do provete (Figura 3.33).



Figura 3.33 - Inspeção visual com recurso a lupa para detecção de cristais de gelo.

Verificou-se a presença de cristais de gelo no interior de um dos provetes, tendo este estado sujeito a um determinado ciclo gelo-gelo, presente na Figura 3.34, adoptando-se assim esse ciclo para os restantes ensaios.

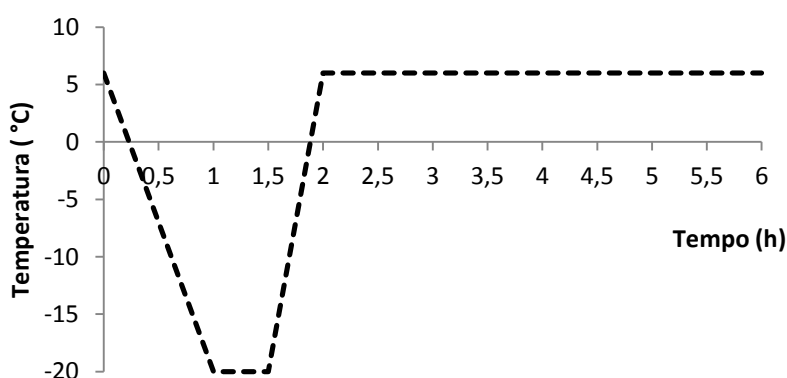


Figura 3.34 - Ciclo gelo-degelo adoptado.

Como se pode observar na figura, o ciclo consiste num período de 30 minutos em que o provete vai de uma temperatura de 6 °C até -20 °C, permanecendo a essa temperatura durante 30 minutos. Após esse tempo, dá-se uma subida de temperatura, durante 30 minutos, até 6 °C, permanecendo os provetes nessas condições durante 4 horas até ao

seu total descongelamento. Este procedimento foi semelhante ao adoptado por Bogas (2011).

3.7.7.2 Provetes ensaiados

Numa primeira fase, foram colocados 24 prismas na câmara de gelo-degelo, dois por cada tipo de composição formulada. Na segunda fase experimental, foram colocados 24 cilindros, dois por cada tipo de composição formulada, com o objectivo de avaliar o módulo de elasticidade residual dos betões após estarem sujeitos a ciclos de gelo-degelo.

3.7.7.3 Procedimento de ensaio

Antes da entrada na câmara, os provetes foram pesados, medindo-se para cada um a velocidade de propagação dos ultrassons conforme definido em §3.7.5 e a distância inicial entre discos de acordo com §3.7.6. As mesmas medições foram realizadas aos 10, 20, 36, 55, 91, 121, 181 e 300 ciclos. A colocação dos provetes na câmara de gelo-degelo foi feita em caixas metálicas, respeitando a espessura de lâmina de água especificada na ASTM C666 (Figura 3.35).

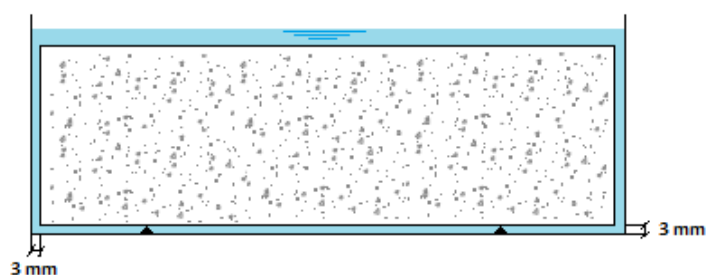


Figura 3.35 - Esquema da colocação dos provetes dentro das caixas metálicas (Bogas, 2011).



Figura 3.36 - Câmara gelo-degelo (esquerda). Provetes colocados dentro das caixas metálicas no interior da câmara (direita).

O equipamento utilizado (Figura 3.39) foi uma câmara ventilada da *IBERTEST DL 100* com capacidade para -20 °C e que foi gentilmente cedida pela *SECIL*. A posição dos provetes dentro da câmara foi alterada no fim de cada ciclo gelo-degelo, de modo a homogeneizar as condições a que cada provete foi submetido.

3.7.7.4 Cálculo dos resultados

A ASTM C666 permite avaliar a resistência aos ciclos gelo-degelo a partir do factor de durabilidade que, por sua vez, é calculado a partir do módulo de elasticidade dinâmico que é dado por:

$$E_d = \rho \times v_{us}^2 \times \frac{(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3.39)$$

em que,

- E_d - módulo de elasticidade dinâmico [GPa];
- v_{us} - velocidade de propagação de ultrassons definida em §3.7.5;
- ν - coeficiente de Poisson, que se admite igual a 0,2.

O factor de durabilidade, ao fim de N ciclos, é calculado segundo a seguinte expressão:

$$DF = \frac{N \times \left(\frac{E_{d,x}}{E_{d,o}} \right) \times 100}{300} \quad (3.40)$$

em que,

- DF - factor de durabilidade;
- N - número de ciclos para o qual se pretender calcular DF ;
- $E_{d,x}$ - módulo de elasticidade dinâmico ao fim de x ciclos;
- $E_{d,o}$ - módulo de elasticidade dinâmico no início dos ciclos.

A variação de comprimento, ao longo do tempo, é dada pela ASTM C666 por:

$$L_c = \frac{(l_2 - l_1)}{L_g} \times 100 \quad (3.41)$$

em que,

- L_c - variação de comprimento entre o instante inicial e o ciclo "x" [%];
- l_1 - leitura no comparador no instante inicial segundo §3.7.6 [mm];
- l_2 - leitura no comparador ao fim do ciclo "x" [mm];
- L_g - distância entre pontos de fixação do comparador (200 mm).

4. Apresentação e análise dos resultados

4.1.Introdução

No presente capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a campanha experimental, conforme exposto em §3.

Existe uma preocupação constante, ao longo da exposição dos resultados, em comparar as características dos betões de referência com os betões produzidos com diferentes taxas de substituição de AFN por AFRB, de modo a compreender a influência deste tipo de agregados no comportamento do betão. Entendem-se como betões de referência aqueles fabricados apenas com agregados naturais (AN), tanto finos como grossos. São identificadas desta forma três famílias de betões distintas:

- família BR - família de betões correntes que abrange betões sem adjuvante com uma relação a/c efectiva igual a 0,53; fazem parte desta família os betões denominados por BR, B20R, B50R e B100R, definidos em §3;
- família HBR - família de betões de elevado desempenho que abrange betões com superplastificante (SP) e relação a/c efectiva igual a 0,35; fazem parte desta família os betões denominados por HBR, HB20R, HB50R e HB100R, definidos em §3;
- família HBRIA - família de betões de elevado desempenho que abrange betões com superplastificante e relação a/c efectiva igual a 0,35, possuindo na sua composição introdutor de ar (IA); fazem parte desta família os betões denominados por HBRIA, HB20RIA, HB50RIA e HB100RIA, definidos em §3.

Desta forma, pretende-se analisar a influência da utilização de AFRB na resistência ao gelo-degelo do betão, tendo em conta diferentes composições e condições de ensaio.

A câmara gelo-degelo esteve avariada durante cerca de seis meses, período durante o qual não foi possível submeter os provetes prismáticos a ciclos acelerados de gelo-degelo. A norma ASTM C666 prevê este tipo de situação, indicando a forma de actuação perante a mesma. Assim, respeitando a norma, os provetes foram preservados em água até à data de reparação do equipamento.

Devido a este atraso, não é possível analisar, na presente dissertação, a influência que a acção do gelo-degelo provoca no módulo de elasticidade dos betões fabricados. Ainda assim, os provetes cilíndricos foram produzidos, tendo sido garantido o início dos ensaios experimentais. São esperados resultados no segundo trimestre de 2014.

4.2.Ensaio aos agregados

Na presente secção, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais referentes à caracterização dos agregados, utilizados no fabrico dos betões.

4.2.1. Análise granulométrica

Neste ponto, são apresentados os resultados obtidos da análise granulométrica dos agregados grossos utilizados, conforme referido em §3.2.1.

Este ensaio realizou-se apenas para os agregados grossos, visto os agregados finos terem sido separados através de peneiração, de modo a possibilitar uma distribuição granulométrica semelhante à da curva teórica de Faury sem cimento. Os valores presentes nos Quadros 4.1 e 4.2 representam a média aritmética dos três ensaios realizados para cada tipo de agregado, sendo cada um destes ensaios apresentado no Anexo C.

4.2.1.1 Brita 2

Os resultados referente à análise granulométrica da brita 2, bem como a percentagem de finos (f) e o módulo de finura (M.F.), são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Análise granulométrica da brita 2

Brita 2			
Peneiro [mm]	Valor retido médio [%]	Valor retido médio acumulado [%]	Valor médio passado acumulado [%]
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	10,1	10,1	89,9
16,0	60,4	70,6	29,4
11,2	28,2	98,8	1,2
8,0	0,9	99,7	0,3
5,6	0,0	99,7	0,3
4,0	0,0	99,7	0,3
2,0	0,0	99,7	0,3
1,0	0,0	99,7	0,3
0,500	0,0	99,7	0,3
0,125	0,0	99,7	0,3
0,063	0,0	99,7	0,3
Refugo	0,3	100,0	

f (%)	0,87
M.F.	7,70

Na Figura 4.1, apresenta-se a curva granulométrica da brita 2 tendo por base os valores do Quadro 4.1.

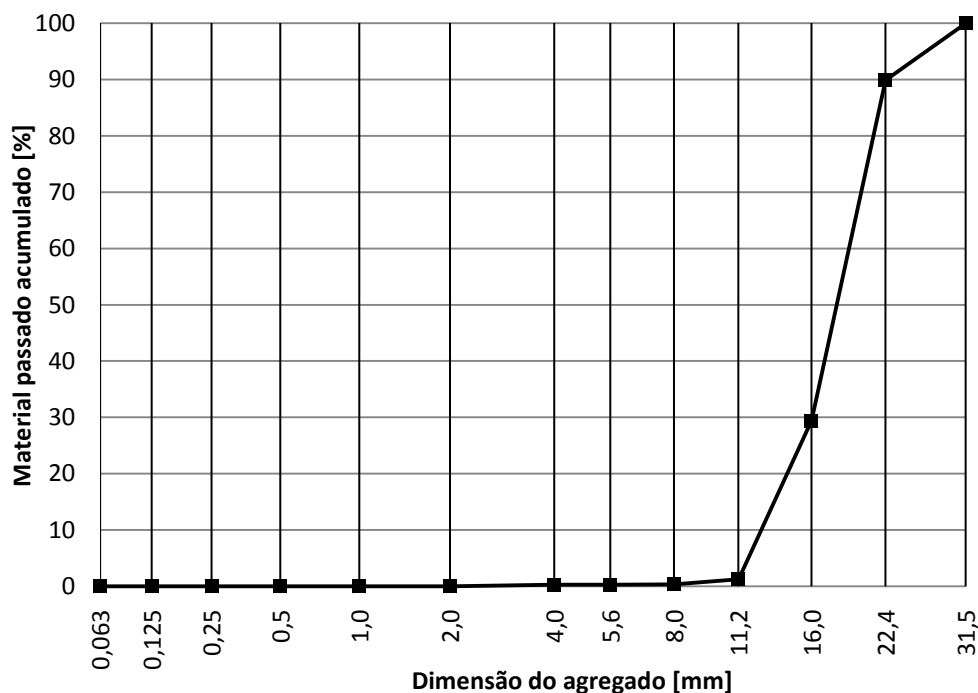


Figura 4.1 - Curva granulométrica da brita 2.

4.2.1.2 Brita 1

Os resultados referentes à da análise granulométrica da brita 1, bem como a percentagem de finos (f) e o módulo de finura (M.F.), são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Análise granulométrica da brita 1.

Brita 1			
Peneiro	Valor retido médio	Valor retido médio	Valor médio passado
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16,0	0,0	0,0	100,0
11,2	17,7	17,7	82,3
8,0	27,0	44,7	55,3
5,6	33,9	78,6	21,4
4,0	17,8	96,4	3,6
2,0	3,4	99,8	0,2
1,0	0,0	99,8	0,2
0,500	0,0	99,8	0,2
0,125	0,0	99,8	0,2
0,063	0,0	99,8	0,2
Refugo	0,2	100,0	-
<hr/>			
f		0,87	
M.F.		6,41	

Na Figura 4.2, apresenta-se a curva granulométrica da brita 1 tendo por base os valores presentes no Quadro 4.2.

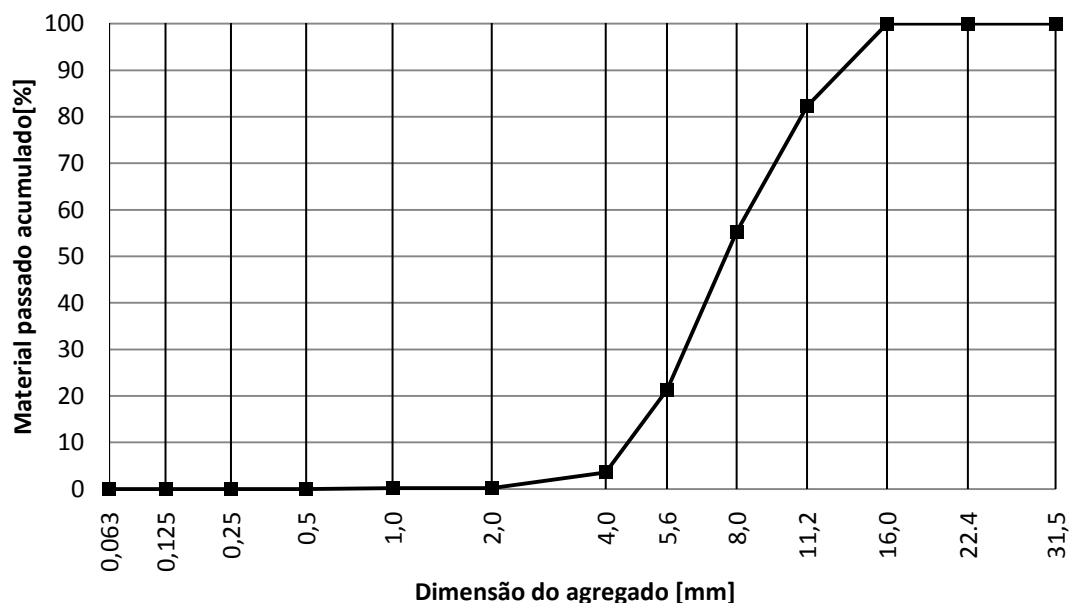


Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita 1.

4.2.2. Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica e a absorção de água foram calculadas de acordo com o referido em §3.2.2.

No Quadro 4.3, são apresentados os valores da massa volúmica aparente (ρ_a), massa volúmica dos agregados secos em estufa (ρ_{rd}), massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca (ρ_{ssd}) e absorção de água após 24 horas (WA_{24}). No Anexo D, são apresentados em detalhe os valores médios obtidos nestes ensaios.

Quadro 4.3 - Valores das massa volúmicas aparente (ρ_a), seca (ρ_{rd}) e com superfície seca (ρ_{ssd}) dos agregados utilizados, bem como da absorção de água ao fim de 24 h (WA_{24}).

Massas volúmicas	Finos naturais	Finos reciclados	Brita 1	Brita 2
ρ_a [kg/m ³]	2684	2679	2656	2724
ρ_{rd} [kg/m ³]	2568	2156	2610	2680
ρ_{ssd} [kg/m ³]	2611	2351	2628	2696
WA_{24} [%]	1,68	9,05	0,66	0,61

Os resultados mostram, como era expectável, que os agregados finos reciclados de betão têm uma massa volúmica inferior à dos agregados finos naturais. Em relação aos agregados finos naturais, verifica-se um decréscimo de 0,17% no que diz respeito a ρ_a e de 16% e 10% para ρ_{rd} e ρ_{ssd} , respectivamente, o que decorre da maior porosidade dos agregados reciclados, como referido em §2.4.

Os agregados finos reciclados apresentam uma absorção de água, ao fim de 24 h, bastante superior à dos agregados finos naturais. Na Figura 4.3, são apresentados os resultados para a absorção de água de diversas campanhas realizadas. Como se observa através da figura, os resultados obtidos na presente dissertação encontram-se no intervalo de valores obtidos por outros autores. A justificação para a elevada absorção de água por parte dos agregados reciclados está relacionada com o aumento da porosidade aberta, resultante da argamassa residual existente em torno dos mesmos. Analisando os resultados de outras campanhas (Figura 4.4), verifica-se que existe uma tendência evidente para o aumento da absorção de água ao fim de 24 horas com o decréscimo da massa volúmica dos AFRB. Confirma-se assim a relação directamente proporcional entre o aumento da porosidade e o aumento da absorção de água deste tipo de agregados.

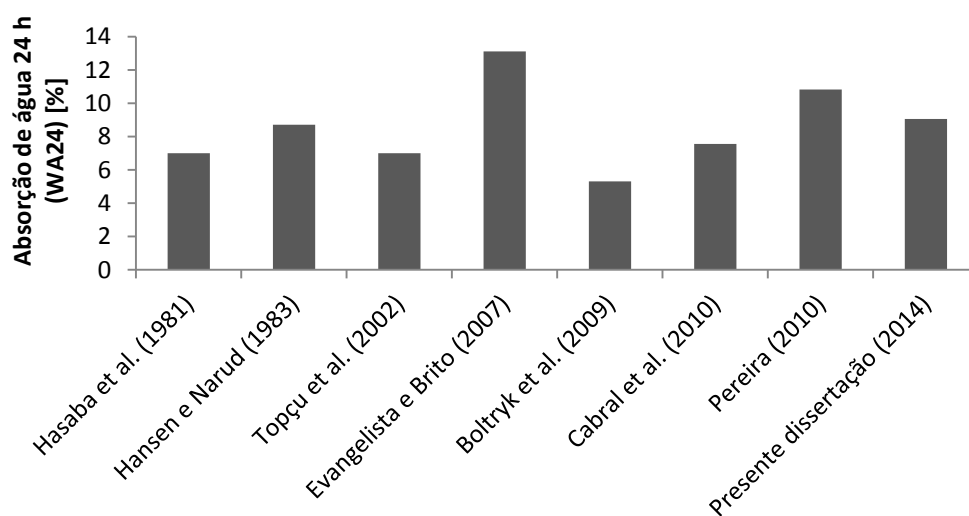


Figura 4.3 - Resultados da absorção de água para AFRB de vários estudos realizados.

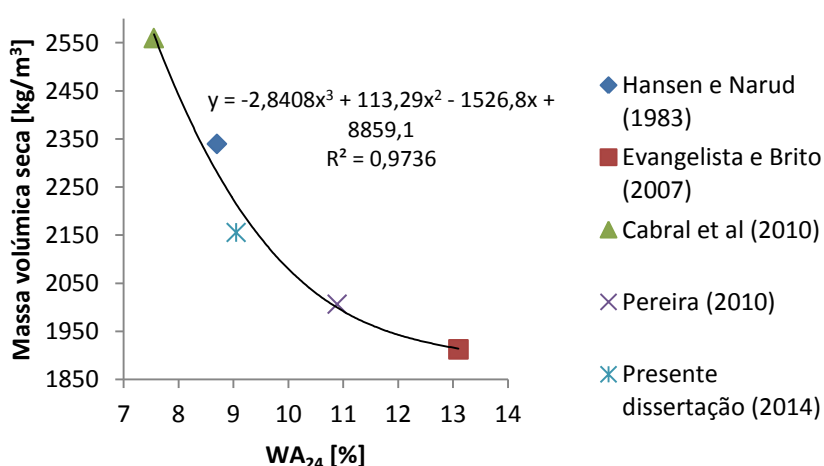


Figura 4.4 - Relação entre a massa volúmica seca e a absorção de água ao fim de 24 h para várias campanhas.

4.2.3. Baridade e volume de vazios

Os valores obtidos para a baridade e volume de vazios (V_v) dos vários agregados estão presentes no Quadro 4.4. Tal como referido em §3.2.3, os ensaios realizados aos agregados finos naturais e reciclados compreenderam a utilização de uma amostra com curva granulométrica equivalente à dos betões produzidos.

Como seria de esperar, o valor da baridade, para todos os agregados, é inferior ao da massa volúmica das partículas secas, devido aos vazios existentes entre as partículas. A quantidade de vazios numa amostra depende da forma e tamanho das partículas presentes na mesma, verificando-se que, para agregados mais angulosos (brita 2 e brita 1), a percentagem de vazios é superior à dos agregados finos, mais arredondados e menos monogranulares (AFN e AFRB).

Quadro 4.4 - Baridade e volume de vazios dos vários agregados utilizados.

Agregado	Baridade [kg/m^3]	ρ_{rd} [kg/m^3]	V_v [%]
Brita 1	1326	2680	51
Brita 2	1353	2610	48
AFN	1422	2568	45
AFRB	1163	2156	46

Tendo em consideração granulometrias semelhantes, a menor baridade dos AFRB face aos AFN resulta essencialmente de estes apresentarem uma maior massa volúmica.

4.2.4. Desgaste de Los Angeles

São apresentados, neste ponto, os resultados referentes ao ensaio de desgaste de Los Angeles, tal como especificado em §3.2.4. Lembra-se que este ensaio foi realizado apenas aos agregados grossos, ou seja, à brita 1 e brita 2. São apresentados, no Quadro 4.5, os resultados obtidos para este ensaio, estando presentes no Anexo E os valores utilizados no cálculo dos mesmos.

Quadro 4.5 - Valores do ensaio do desgaste de Los Angeles para os agregados grossos (brita 2 e brita 1).

	Brita 2	Brita 1
ΔLA [%]	43,6	38,5
Classe (EN 12620)	LA 50	LA 40

Ambos os agregados se encontram dentro do intervalo estipulado na especificação LNEC E373, que indica um valor limite de 50% para este ensaio no que se refere a agregados para betões estruturais.

4.3. Ensaio ao betão no estado fresco

Nesta secção, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados ao betão no estado fresco, nomeadamente o ensaio de abaixamento e o ensaio para determinação da massa volúmica fresca do betão.

4.3.1. Abaixamento do cone de Abrams

O ensaio de abaixamento do cone de Abrams foi realizado de acordo com o referido em §3.6.2.

O ensaio de abaixamento permite analisar de forma indirecta a trabalhabilidade de uma dada mistura, sendo que um dos parâmetros que afecta a sua medição é a quantidade de água livre presente na amassadura. Nas famílias de betões de elevado desempenho ($a/c = 0,35$), foi adicionada a quantidade de SP necessária de modo a obter misturas com o abaixamento pretendido. São apresentados, no Quadro 4.6, os valores de abaixamento do cone de Abrams obtidos para as várias misturas produzidas.

Quadro 4.6 - Valores do abaixamento obtidos para as várias misturas produzidas.

		Taxa de substituição de AFN por AFRB [%]			
		0	20	50	100
Família BR	Valor do abaixamento [cm]	11,5	12,5	12,0	11,5
Família HBR		13,5	12,5	11,5	12,5
Família HBRIA		12,1	11,5	12,0	11,0

Como se pode observar através do Quadro 4.6, todos os valores obtidos para o abaixamento do cone de Abrams respeitam o intervalo pretendido (120 ± 20 mm). Recuperando os resultados apresentados no Quadro 3.7 em §3, lembra-se que a quantidade de SP e IA não varia dentro da mesma família de betões. O intervalo de valores pretendido foi atingido através da adição de água de absorção dos AFRB, nas quantidades referidas no Quadro 3.6.

Os AFRB, pré-saturados, provaram não provocar uma perda acentuada na trabalhabilidade do betão. Os resultados contrariam a tendência apontada por outros autores (§ 2.5.3) que, apesar de realizarem o processo de pré-saturação, notaram perdas acentuadas de trabalhabilidade.

4.3.2. Massa volúmica

A massa volúmica do betão no estado fresco foi calculada de acordo com §3.6.3. São apresentadas, no Quadro 4.7, as massas volúmicas frescas teóricas e experimentais, bem como o respectivo erro. São apresentados ainda os desvios percentuais em relação ao betão de referência, para cada família (BR, HBR e HBRIA) e a massa volúmica aos 28 dias de idade, obtida em cubos de 150 mm de aresta. Os valores utilizados neste cálculo encontram-se no Anexo F.

Quadro 4.7 - Massas volúmicas teóricas e no estado fresco dos betões produzidos e respectivo erro e desvio percentual em relação aos betões de referência BR, HBR e HBRIA.

Betão	$\rho_{\text{teórico}}$ [kg/m ³]	ρ_f [kg/m ³]	Erro [%]	Δ [%]	Ar introduzido [%]	Teor total de ar [%]	$\rho_{28 \text{ dias}}$ [kg/m ³]
BR	2345	2355	0,44	-	-	1,7	2369
B20R	2324	2315	0,39	- 1,7	-	1,7	2333
B50R	2296	2287	0,37	- 2,9	-	1,7	2298
B100R	2253	2261	0,32	- 4,0	-	1,7	2279
HBR	2412	2423	0,46	-	-	1,7	2446
HB20R	2393	2406	0,53	- 0,7	-	1,7	2408
HB50R	2366	2350	0,67	- 3,0	-	1,7	2365
HB100R	2324	2328	0,18	- 3,9	-	1,7	2340
HBRIA	2412	2357	2,26	-	2,9	4,6	2380
HB20RIA	2393	2336	2,41	- 0,9	2,9	4,6	2358
HB50RIA	2366	2318	2,00	- 1,7	2,5	4,2	2328
HB100RIA	2324	2151	7,44	- 8,8	2,9	4,6	2260

Como se pode observar através do Quadro 4.7, os valores da massa volúmica fresca do betão apresentam sempre erros inferiores a 1%, para as famílias de betões BR e HBR. Como era expectável, na família HBRIA obtêm-se erros maiores, devido a não se ter tido em linha de conta a introdução de ar na massa volúmica teórica. Verifica-se que o betão HB100RIA apresenta um erro bastante superior em relação aos betões da mesma família. Porém, este valor deverá ser considerado anómalo, uma vez que, no estado endurecido, a massa volúmica apresentada para este betão é de 2260 kg/m³ ao invés de 2151 kg/m³, reduzindo-se o erro obtido em relação à massa volúmica teórica de 7,4% para 2,8%.

Verifica-se que o valor da massa volúmica diminui com o aumento da taxa de substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados, em qualquer das famílias, confirmando a tendência apontada pela bibliografia em §2.5.2. Esta tendência é visível na Figura 4.5, em que se optou por não apresentar o valor da massa volúmica no estado fresco do betão HB100RIA dado que, conforme referido, este valor não é válido. Apresenta-se, ao invés, o valor da massa volúmica no estado endurecido.

Como seria de esperar, os betões de maior compacidade, da família HBR, apresentam massas volúmicas superiores às dos restantes betões, para taxas de substituição de AFN por AFRB iguais.

Tendo em consideração as massas volúmicas experimentais e a relação volumétrica entre os vários componentes de uma dada mistura, é possível estimar o teor de ar introduzido, estando esses valores presentes no Quadro 4.7.

Porém, tal como verificado por vários autores, o importante não é o volume total de ar incluído no betão, mas sim a forma como este se distribui na argamassa (Lohanesson, 2010; Mehta e Monteiro, 2006). Partindo do princípio de que as bolhas de ar presentes no betão são esferas com um diâmetro médio de 150 μm (0,05-1mm, tendo em conta os dados fornecidos por Mehta e Monteiro, 2006) e considerando um teor de ar médio

de 4,5% (tendo em conta o ar acidental e o ar introduzido no betão), estima-se que existam 25.464 bolhas de ar por cm^3 de betão, o que corresponde a uma distância média entre vazios de cerca de 339 μm e um *spacing-factor* de 240 μm . Este valor encontra-se muito próximo do proposto por Mehta e Monteiro (2006), que referem um distanciamento entre vazios de cerca de 100-200 μm , para que as tensões hidráulicas produzidas possam ser dissipadas sem causar deterioração do betão, quando submetido a ciclos gelo-degelo.

Infelizmente, não foi possível quantificar a distribuição dos vazios introduzidos no betão com recurso a técnicas analíticas, como seria desejado. Porém, por análise visual dos provetes, é possível observar que os vazios se encontram, em geral, macroscopicamente bem distribuídos.

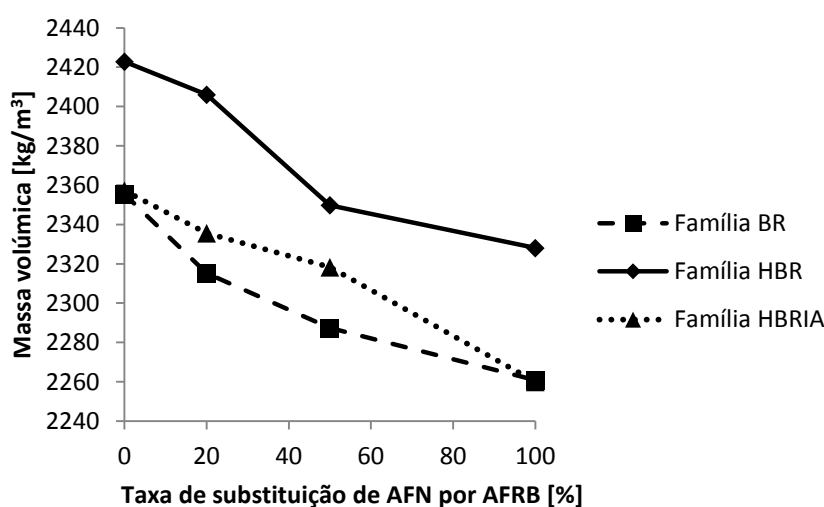


Figura 4.5 - Variação da massa volúmica no estado fresco com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB.

4.4. Ensaaios no estado endurecido

Neste ponto, são analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados ao betão no seu estado endurecido.

4.4.1. Resistência à compressão em cubos de 15 cm de aresta

No Quadro 4.8, são apresentados os valores médios de resistência à compressão para cubos de 150 mm de aresta dos vários betões produzidos, bem como o desvio percentual de cada um relativamente ao betão de referência.

Os desvios apresentados estão calculados em relação ao betão de referência de cada família de betões, ou seja, em relação ao BR, para betões correntes, ao HBR, para betões de elevado desempenho sem introdução de ar e ao HBRIA, para betões de elevado desempenho com introdução de ar. Os valores intermédios utilizados no cálculo encontram-se no Anexo G.

Quadro 4.8 - Resistência dos betões à compressão aos 7, 28 e 90 dias de idade para cubos de 150 mm de aresta.

Betão	7 dias			28 dias			90 dias		
	f_c [MPa]	Δ [%]	CV [%]	f_c [MPa]	Δ [%]	CV [%]	f_c [MPa]	Δ [%]	CV [%]
BR	40,1	-	2,1	50,2	-	2,1	55,8	-	3,8
B20R	38,1	-5,0	0,6	49,9	-0,5	2,0	54,9	-1,6	1,6
B50R	38,1	-5,1	3,8	47,4	-5,6	2,7	54,8	-1,9	0,3
B100R	34,4	-14,3	3,1	43,1	-14,1	2,5	49,6	-11,2	3,5
HBR	66,6	-	2,0	81,0	-	1,3	83,5	-	1,4
HB20R	65,7	-1,2	1,8	72,7	-10,2	2,0	78,7	-5,8	0,9
HB50R	62,1	-6,6	3,3	67,4	-16,8	3,0	68,9	-17,5	2,2
HB100R	50,9	-23,6	1,9	58,8	-27,4	4,6	65,6	-21,4	2,9
HBRIA	58,3	-	1,4	67,9	-	1,7	69,0	-	6,4
HB20RIA	48,8	-16,2	3,2	61,8	-9,0	6,0	61,3	-14,6	1,9
HB50RIA	46,2	-20,7	2,9	52,1	-23,3	3,1	55,9	-22,2	7,3
HB100RIA	38,2	-34,5	3,5	44,9	-33,8	0,7	49,9	-30,5	3,7

Como se pode verificar no Quadro 4.8, existe, para todas as famílias de betões, um decréscimo na resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados. Esta redução é mais importante nos betões de elevado desempenho, em que a taxa de substituição de AFN por AFRB provoca uma diminuição mais acentuada na resistência à compressão do que em betões correntes.

Os agregados reciclados foram obtidos através da britagem de betão com classe de resistência C 25/30 (§ 3.4). Assim, para betões de elevado desempenho, é mais importante a diferença, em termos de resistência e rigidez, entre a pasta de cimento e os agregados que constituem o betão. Por essa razão, ocorre uma redução na resistência quando se procede à substituição de AN por AFRB. Caso se tivessem utilizado agregados reciclados provenientes de um betão de origem de maior resistência, seria de esperar que o decréscimo observado fosse menor.

Observa-se ainda que, para uma igual taxa de substituição de agregados naturais por reciclados, os betões de elevado desempenho com introdução de ar apresentam, para todas as idades, menor resistência à compressão do que os betões sem introdução de ar. Em média verificam-se, aos 28 dias, reduções de 18% na resistência à compressão para cerca de 2,8% de ar introduzido. De acordo com Mehta e Monteiro (2006), cerca de 1% de ar introduzido conduziria a um decréscimo entre 2 e 5% na resistência à compressão do betão. Os valores obtidos encontram-se acima desse intervalo, apresentando-se em média decréscimos de 6,4% na resistência à compressão por 1% de ar introduzido.

A Figura 4.6 mostra, para a família de betões correntes, a relação entre o valor da resistência à compressão e a taxa de substituição de AFN por AFRB. A tendência é analisada para cada idade de ensaio em separado.

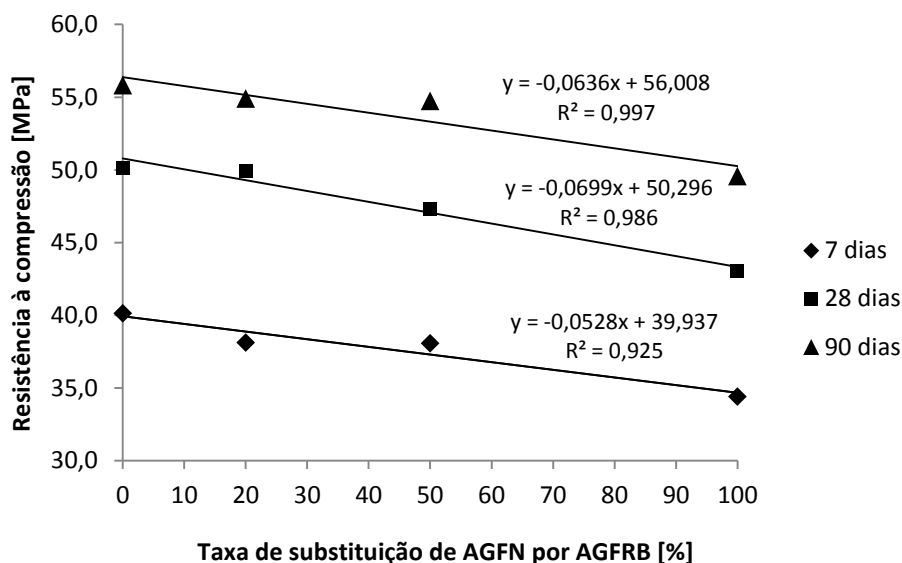


Figura 4.6 - Família de betões correntes - resistência à compressão de cubos de 15 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.

Conforme seria de esperar, a resistência à compressão varia menos entre os 28 e os 90 dias do que entre os 7 e os 28 dias, dado a taxa de hidratação do cimento ser progressivamente mais reduzida. O mesmo tipo de resultados é analisado, na Figura 4.6, para betões de elevado desempenho sem introdutor de ar.

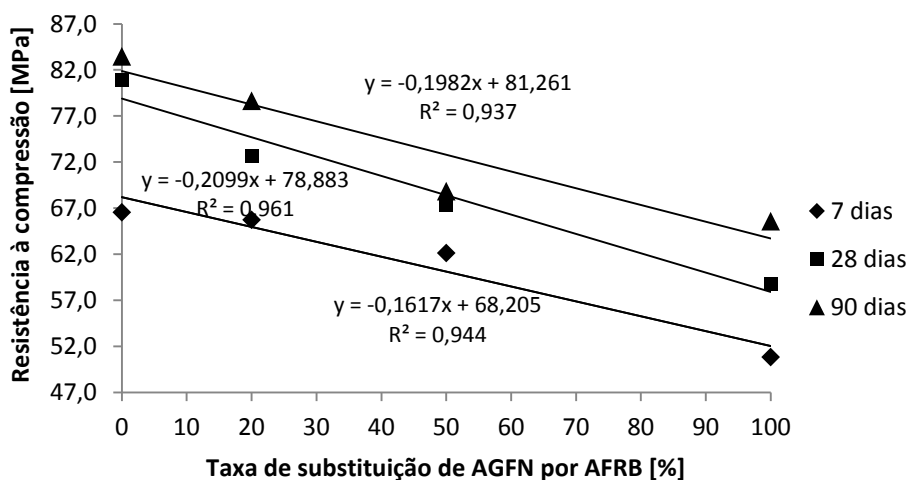


Figura 4.7 - Família de betões de elevado desempenho - resistência à compressão de cubos de 15 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.

Como se pode verificar, em comparação com betões correntes, nota-se uma variação ainda menor da resistência à compressão entre os 28 e os 90 dias do que entre os 7 e os 28 dias, para betões de elevado desempenho. Uma vez mais, isso prende-se com o facto de a taxa de hidratação do cimento ser mais importante na fase inicial, entre os 7 e os 28 dias de idade. Neste caso, uma vez que a relação a/c é menor do que nos betões correntes, a evolução da resistência tende a ser mais rápida.

Na Figura 4.8, está presente a variação do valor da resistência à compressão em função da idade de ensaio para betões de elevado desempenho com introdução de ar. Tal como nos betões de elevado desempenho sem IA, nota-se uma menor variação na resistência à compressão entre os 28 e os 90 dias do que entre os 7 e os 28 dias, excepto para o caso do betão 100% reciclado. Nota-se ainda, aos 7 e aos 90 dias, uma maior dispersão de resultados relativamente aos betões correntes e de elevado desempenho, justificada pelo controlo mais difícil da introdução de ar no betão.

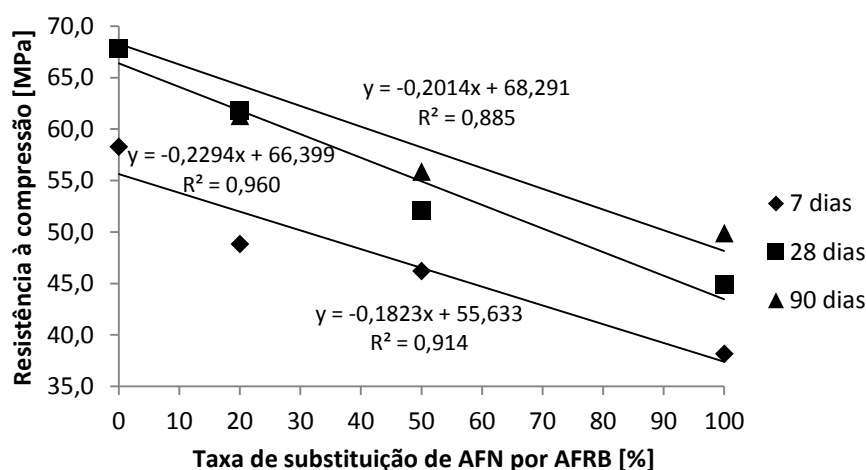


Figura 4.8 - Família de betões de elevado desempenho com introdução de ar - resistência à compressão de cubos de 15 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.

Como seria de esperar, a família de betões que apresenta maior resistências à compressão é a família HBR, dado possuir menor relação a/c e não incluir introdutor de ar na sua composição. O betão fabricado com uma taxa de substituição de 50% de AFN por AFRB e sem introdutor de ar (HB50R) apresenta uma resistência à compressão aos 28 e aos 90 dias equivalente à de um betão de elevado desempenho, com introdução de ar, fabricado apenas com AN. Por outras palavras, a introdução de ar nos betões de elevado desempenho fabricados, provoca uma perda na resistência à compressão equivalente à utilização de uma taxa de substituição de 50% de AFN por AFRB.

Na Figura 4.9, é apresentada a evolução das resistências à compressão ao longo do tempo de todos os betões produzidos.

A redução na resistência à compressão, devido ao aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB, em betões de elevado desempenho, tende a aumentar com o aumento do tempo de cura. Isto deve-se essencialmente ao facto de, para idades inferiores, a discrepância entre a resistência mecânica da pasta cimentícia e dos agregados reciclados não ser tão grande, devido à baixa hidratação ainda sofrida pelo cimento. Assim sendo, a influência dos agregados na resistência à compressão aumenta com a idade de ensaio.

Por outro lado, nota-se que, aos 90 dias de idade, a diminuição na resistência à compressão com o aumento da referida taxa, para qualquer tipo de betão, é ligeiramente menor. Admite-se, como possibilidade para este comportamento, com base em

resultados idênticos observados por Topçu et al. (1997) e Evangelista e Brito (2007), o facto de a presença de cimento não hidratado nos agregados finos reciclados de betão contribuir para o aumento da resistência à compressão do betão. Assim, apesar de a utilização destes provocar um decréscimo na resistência à compressão, nota-se que, para períodos de cura superiores, a hidratação das fracções mais finas de agregados reciclados (que são praticamente constituídas apenas por cimento) provoca um menor decréscimo na resistência à compressão em relação aos betões de referência.

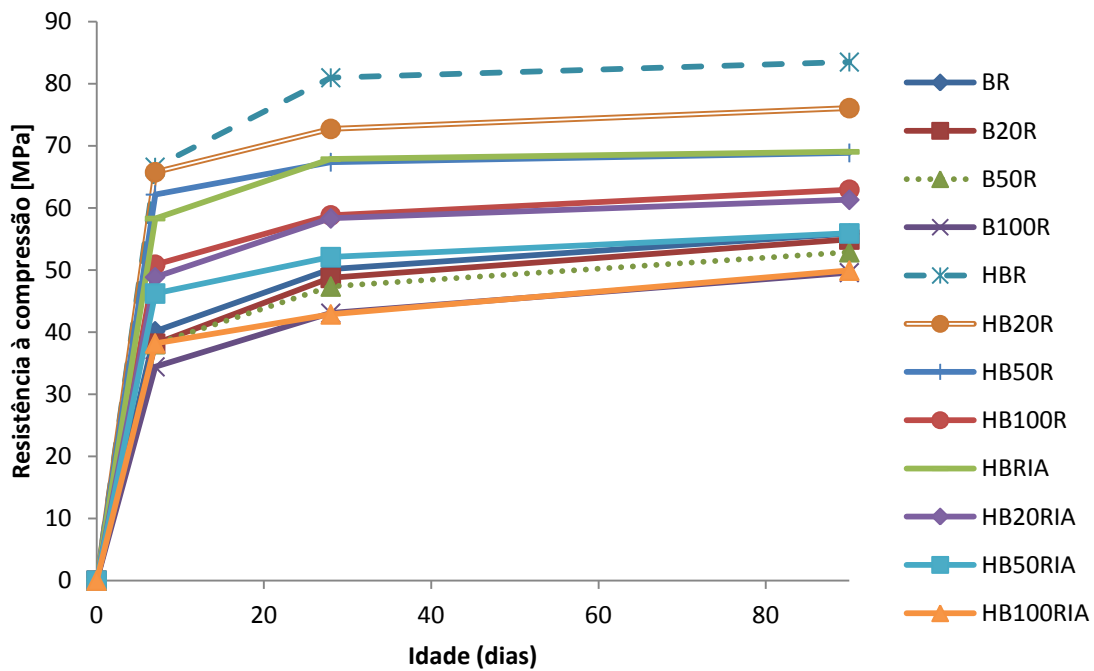


Figura 4.9 - Resistência à compressão em função da idade para todos os tipos de betão.

De uma forma geral os resultados obtidos apresentam-se dentro dos valores documentados na bibliografia consultada (§2.5.4), que apontam um valor estimado de 30% para o decréscimo na resistência à compressão aquando da utilização total de agregados finos reciclados de betão na constituição deste. Este limite não é ultrapassado no presente estudo, exceptuando-se o betão 100% reciclado e com introdutor de ar, no qual se observam decréscimos de aproximadamente 35% aos 7 e aos 28 dias. No entanto, devido aos possíveis mecanismos de hidratação do cimento presente nos agregados reciclados, este decréscimo diminui para 30% aos 90 dias, sendo semelhante ao observado na bibliografia.

No Quadro 4.9, estão presentes os valores de eficiência estrutural, (f_{cm}/ρ), para os betões produzidos, que corresponde ao quociente entre a massa volúmica e a resistência à compressão. Assim, quanto menor for o valor de (f_{cm}/ρ), mais eficiente é o betão em causa, ou seja, maior é o contributo em termos de aumento da resistência à compressão por unidade de massa.

Quadro 4.9 - Eficiência estrutural dos vários betões produzidos.

Betão	$\rho_{28 \text{ dias}}$ [kg/m ³]	$f_{cm,28 \text{ dias}}$ [MPa]	(f_{cm}/ρ)
BR	2369	50,2	0,021
B20R	2333	49,9	0,021
B50R	2298	47,4	0,021
B100R	2279	43,1	0,019
HBR	2446	81,0	0,033
HB20R	2408	72,7	0,030
HB50R	2365	67,4	0,028
HB100R	2340	58,8	0,025
HBRIA	2380	67,9	0,029
HB20RIA	2358	61,8	0,026
HB50RIA	2328	62,1	0,022
HB100RIA	2260	44,9	0,020

Como se pode observar através do Quadro 4.9, os betões mais eficientes para qualquer taxa de substituição de AFN por AFRB, são os de elevada resistência sem introdução de ar, seguidos dos betões de elevada resistência com introdutor de ar e dos betões correntes.

Para qualquer uma das famílias de betões, a eficiência estrutural diminui com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB, ou seja, a perda de massa provocada pela utilização de agregados reciclados de betão não compensa a perda em termos de resistência que se verifica. A mesma informação está expressa de forma gráfica na Figura 4.10.

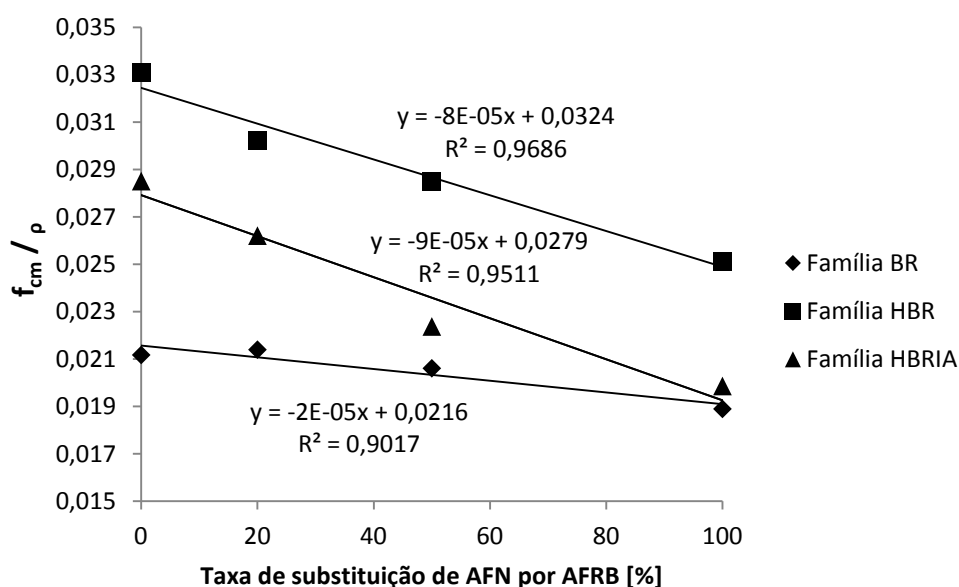


Figura 4.10 - Variação do coeficiente de eficiência estrutural com o aumento da taxa de substituição de AN por AFRB.

4.4.2. Resistência à compressão em cubos de 10 cm de aresta

O principal objectivo deste ensaio consiste em comparar os resultados obtidos em cubos de 10 cm de aresta com os que resultam de ensaios à compressão em cubos de 15 cm de aresta, de modo a encontrar uma relação entre os dois.

No Quadro 4.10, são apresentados os valores de resistência à compressão obtidos para os cubos de 10 cm de aresta, aos 7 e aos 28 dias de idade. Os valores apresentados no referido quadro correspondem à média aritmética de três ensaios realizados para cada idade e tipo de betão, estando os valores intermédios presentes no Anexo H.

Quadro 4.10 - Valores de resistência à compressão em cubos de 10 cm de aresta aos 7 e 28 dias de idade.

Betão	7 dias		CV [%]	28 dias		CV [%]
	f_c [MPa]	Δ [%]		f_c [MPa]	Δ [%]	
BR	42,5	-	2,9	51,7	-	3,7
B20R	42,7	0,3	1,0	49,5	-4,2	2,1
B50R	43,1	1,4	2,1	49,4	-4,4	3,0
B100R	39,0	-8,3	1,2	48,7	-5,7	1,6
HBR	67,6	-	1,0	82,0	-	2,4
HB20R	67,0	-0,9	5,9	81,1	-1,2	3,6
HB50R	63,3	-6,4	0,5	74,5	-9,2	3,1
HB100R	56,5	-16,5	1,7	66,5	-18,9	2,2
HBRIA	62,7	-	3,8	69,3	-	0,8
HB20RIA	52,3	-16,6	8,1	60,7	-12,4	0,6
HB50RIA	48,6	-22,4	1,8	57,0	-17,7	4,5
HB100RIA	38,9	-37,9	0,7	48,4	-30,1	4,0

Como se pode observar através das Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, existe uma tendência generalizada para o decréscimo da resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados de betão, tal como se verificou para os cubos de 15 cm de aresta.

Aos 7 dias de idade, existe uma tendência menos evidente, em cubos de 10 cm de aresta, no que diz respeito ao decréscimo da resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB, do que em cubos de 15 cm de aresta. Após 28 dias de cura, esta tendência é mais acentuada, uma vez mais devido à hidratação da pasta cimentícia que provoca uma maior discrepância entre a resistência mecânica da mesma e dos agregados reciclados, notando-se assim um maior decréscimo na resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB.

A maior disparidade de resultados obtida neste caso, para a família BR e HBRIA, pode prender-se com a necessidade de utilização de pratos auxiliares não normalizados (§3.7.2).

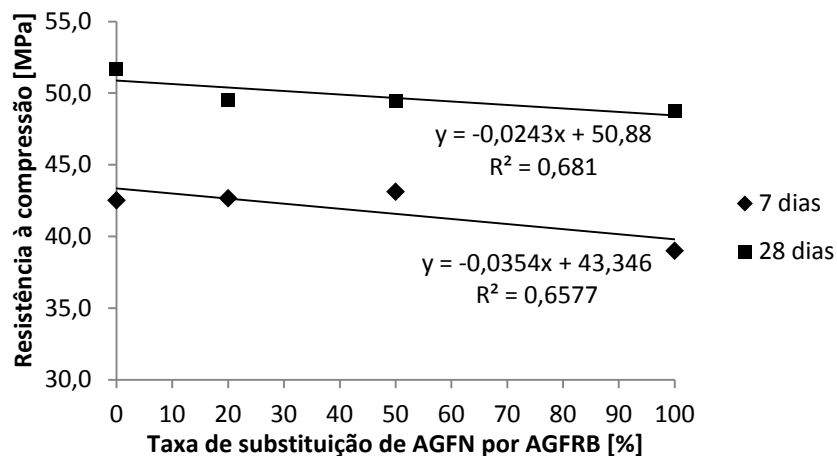


Figura 4.11 - Família de betões correntes - resistência à compressão de cubos de 10 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.

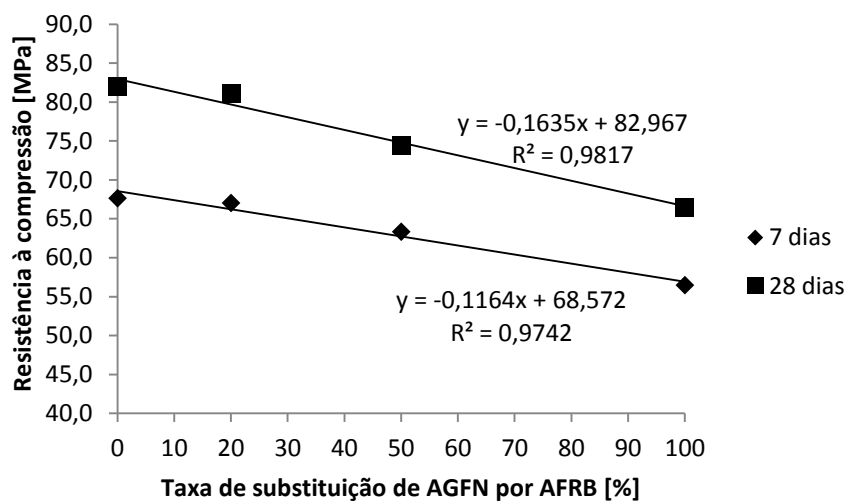


Figura 4.12 - Família de betões de elevado desempenho - resistência à compressão de cubos de 10 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.

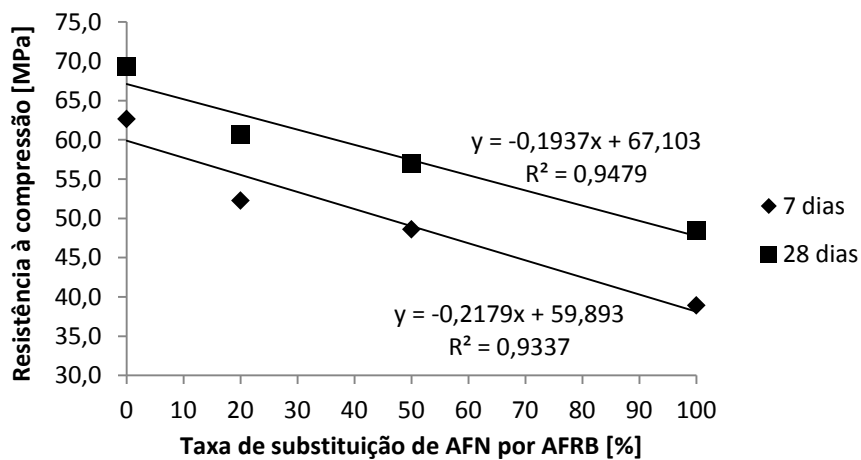


Figura 4.13 - Família de betões de elevado desempenho com introdução de ar - resistência à compressão de cubos de 10 cm de aresta em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, para cada idade de ensaio.

4.4.3. Relação entre as resistências à compressão de cubos de 10 e 15 cm de aresta

Em §4.4.2, apresentou-se, de uma forma geral, a relação entre o decréscimo da resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB, no que diz respeito a ensaios em cubos de 10 cm. Compararam-se também esses resultados com os obtidos para cubos de 15 cm de aresta de forma a poder relacionar os dois ensaios.

São apresentados, no Quadro 4.11, os desvios percentuais, relativos à resistência à compressão, entre cubos de 10 e 15 cm de aresta aos 7 e aos 28 dias de idade.

Quadro 4.11 - Desvio percentual do valor da resistência à compressão entre cubos de 10 e 15 cm de aresta, aos 7 e aos 28 dias.

Betão	Δ [%]	
	7 dias	28 dias
BR	6,0	3,1
B20R	11,9	-0,8
B50R	13,3	4,4
B100R	13,4	13,2
HBR	1,6	1,3
HB20R	2,0	11,5
HB50R	1,9	10,6
HB100R	11,1	13,1
HBRIA	7,5	2,1
HB20RIA	7,1	-1,7
HB50RIA	5,2	9,5
HB100RIA	2,0	7,9

Verifica-se, em todas as situações, que o decréscimo da resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB é menos acentuado em cubos de 10 cm aresta do que em cubos de 15 cm de aresta, sendo os declives das rectas de regressão linear para estes últimos maiores em termos de valor absoluto.

Como é visível através do Quadro 4.11, observa-se que, regra geral, os cubos de 10 cm de aresta apresentam valores superiores de resistência à compressão do que os cubos de 15 cm de aresta. Tal pode ser justificado pelo facto de a importância dos defeitos existentes no betão ser menor em provetes de menores dimensões (Coutinho, 1996).

As Figuras 4.14 e 4.15 representam de forma gráfica a relação entre a resistência à compressão em cubos de 10 e 15 cm de aresta, verificando-se que esta é elevada tanto aos 7 como aos 28 dias de idade.

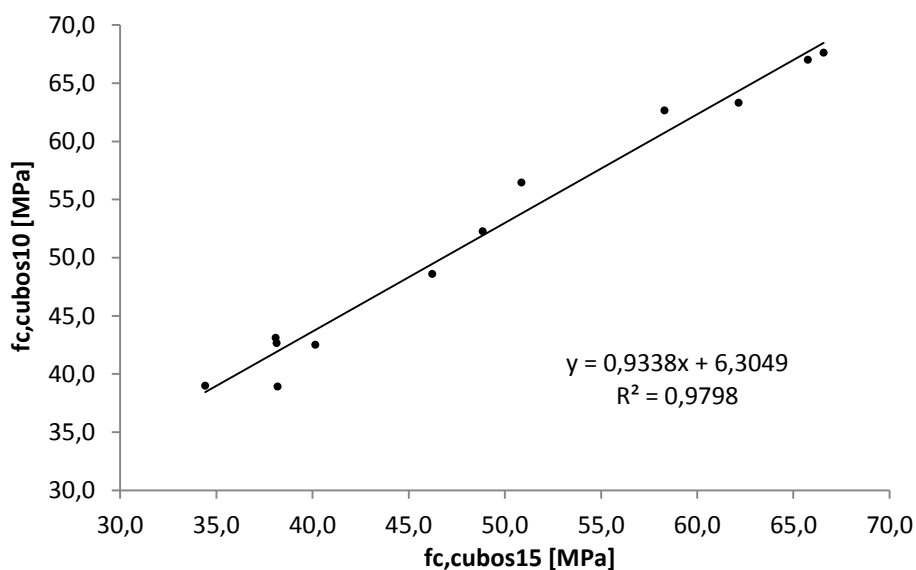


Figura 4.14 - Relação entre a resistência à compressão aos 7 dias de idade entre cubos de 10 e 15 cm de aresta.

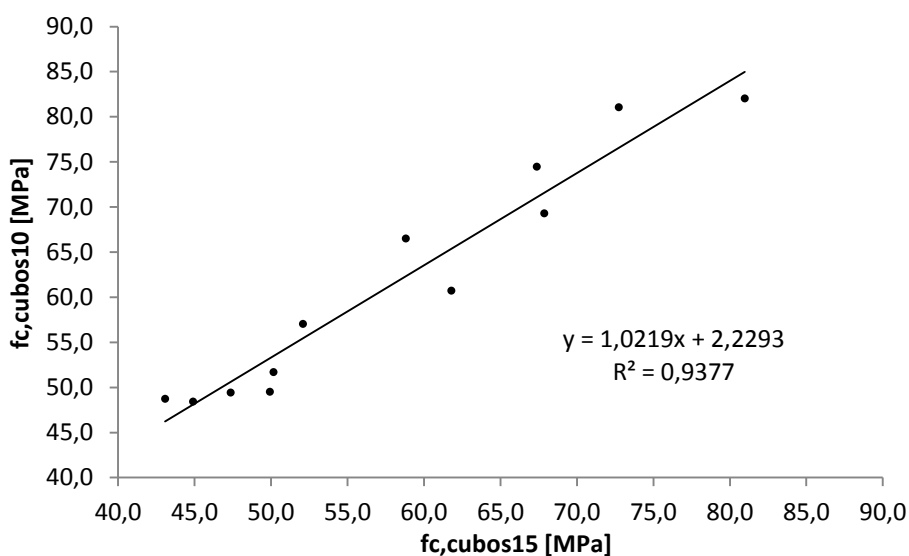


Figura 4.15 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de idade entre cubos de 10 e 15 cm de aresta.

4.4.4. Resistência à tracção por flexão aos 28 dias de idade

Como referido, foram realizados ensaios à tracção por flexão a provetes prismáticos, com dimensões definidas em §3.5.2. São apresentados neste ponto os resultados obtidos para este ensaio aos 28 dias de idade, sendo posteriormente analisadas em §4.4.5 as resistências à compressão das partes resultantes do supracitado ensaio. Os resultados presentes no Quadro 4.12 representam a média aritmética de três ensaios realizados para cada tipo de betão.

Estes valores encontram-se no Anexo I e foram calculados de acordo com as equações presentes em §3.7.3, tendo respeitado o procedimento de ensaio descrito nesse mesmo ponto.

Quadro 4.12 - Resistência à tracção por flexão dos vários betões produzidos, aos 28 dias de idade.

Betão	f_{ctf} [MPa]	Δ [%]	CV [%]
BR	12,6	-	0,3
B20R	10,1	- 19,8	4,9
B50R	9,8	- 22,2	0,4
B100R	8,3	- 34,1	1,9
HBR	13,8	-	5,9
HB20R	11,7	- 15,2	2,1
HB50R	10,3	- 25,4	3,1
HB100R	8,8	- 36,2	3,2
HBRIA	10,4	-	1,1
HB20RIA	9,0	- 13,6	6,5
HB50RIA	8,7	- 16,3	1,9
HB100RIA	8,0	- 23,1	2,0

Como é visível no Quadro 4.12, a resistência à tracção por flexão diminui com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB. Neste ensaio, ao contrário dos resultados obtidos para a resistência à compressão, conclui-se que, de uma forma geral, a família BR apresenta uma resistência à tracção por flexão ligeiramente superior à da família HBRIA. Não obstante, tal como seria de esperar, os restantes betões de elevado desempenho sem introdutor de ar apresentam sempre uma resistência à tracção por flexão superior à dos betões correntes, para todas as taxas de substituição de AN por AFRB. Na Figura 4.16, são apresentados os vários resultados obtidos para cada percentagem de substituição.

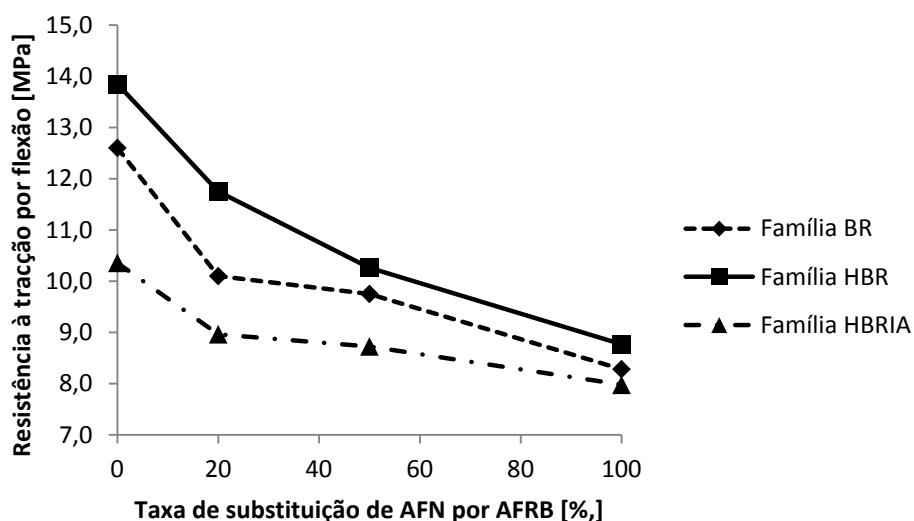


Figura 4.16 - Resistência à tracção por flexão em função da taxa de substituição de AN por AFRB para as várias famílias de betão.

A bibliografia aponta para um valor de resistência à tracção axial entre 0,07 e 0,11 do valor de resistência à compressão (Mehta e Monteiro, 2006). Assim sendo, os valores obtidos encontram-se acima deste intervalo. No entanto, neste caso, os resultados referem-se a resistências à tracção por flexão, que pode sobrestimar o valor de resistência à tracção axial entre 50 e 100%. Esta diferença de valores prende-se com o

facto de se admitir uma distribuição elástica das tensões no cálculo da resistência à tracção por flexão, desprezando-se a plastificação ocorrida durante a rotura. Para além disso, o ensaio de tracção axial envolve toda a secção do provete, enquanto o ensaio à tracção por flexão implica apenas a secção inferior do mesmo. É ainda importante referir que, apesar de a resistência à compressão poder ser um bom indicador do comportamento do betão quando traccionado, a resistência à tracção por flexão é ainda afectada pelo tipo de betão, características dos agregados e adjuvantes utilizados (Mehta e Monteiro, 2006).

Segundo Coutinho (1994), a resistência à tracção não é tão afectada pela relação a/c como a resistência à compressão. Assim, notam-se taxas de redução da resistência à tracção por flexão mais parecidas entre betões correntes e de elevado desempenho do que aquelas observadas na resistência à compressão, em que a discrepância entre a resistência mecânica dos agregados reciclados e a pasta de cimento ganha uma maior importância.

Apresenta-se, no Quadro 4.13, a relação entre as resistências à compressão e à tracção por flexão dos betões produzidos.

Quadro 4.13 - Relação entre as resistências à tracção por flexão e compressão dos betões produzidos.

Betão	f_{c28} [MPa]	f_{tf} [MPa]	Rácio [%]
BR	51,7	12,6	24,4
B20R	49,5	10,1	20,4
B50R	49,4	9,8	19,7
B100R	48,7	8,3	17,0
HBR	82,0	13,8	16,9
HB20R	81,1	11,7	14,5
HB50R	74,5	10,3	13,8
HB100R	66,5	8,8	13,2
HBRIA	69,3	10,4	14,9
HB20RIA	60,7	9,0	14,8
HB50RIA	57,0	8,7	15,3
HB100RIA	48,4	8,0	16,5

Como se verifica, o rácio entre a resistência à tracção por flexão diminui com a diminuição da relação a/c, como esperado. Nota-se, para betões correntes, que este valor tende a diminuir com o aumento da taxa de substituição de AN por AFRB, o que é natural devido à influência da menor resistência dos agregados reciclados ser mais condicionante na resistência à tracção do que na resistência à compressão.

A família HBRIA tem uma relação f_{ctf}/f_c inferior à família BR, tal como já possuía resistências à tracção inferiores face à mesma família. Assim sendo, conclui-se que a introdução de ar tem um maior efeito negativo na tracção do que na compressão. A Figura 4.17 representa de forma gráfica os dados já apresentados.

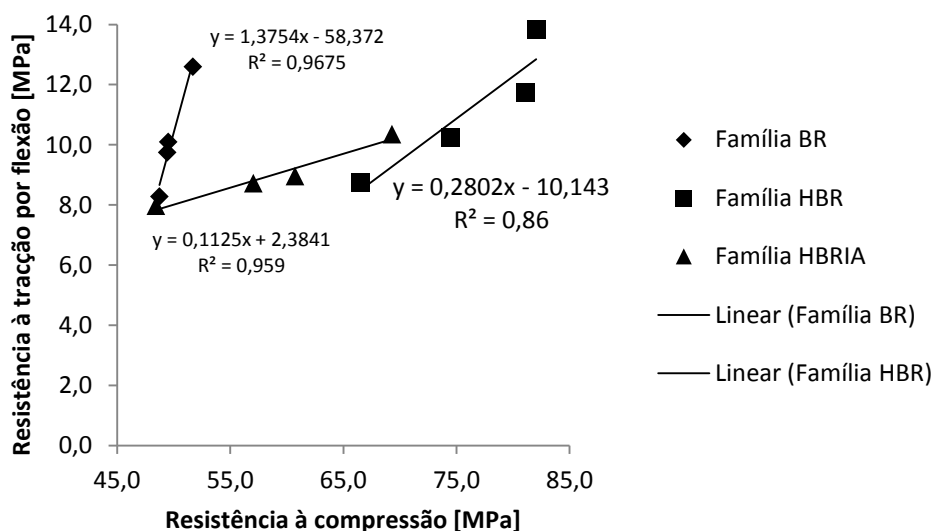


Figura 4.17 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tracção por flexão dos betões produzidos.

Verifica-se, através da Figura 4.16, comparando a família BR e HBR, que a diminuição da relação a/c efectiva dá origem a um menor aumento da resistência à tracção por flexão com o aumento da resistência à compressão, como seria de esperar.

Como se pode observar, a relação entre a resistência à tracção por flexão e a resistência à compressão é muito afectada pelos valores de resistência à tracção obtidos, que são muito sobrestimados. Conclui-se, com base nos valores obtidos e nas condições de ensaio, que, devido à altura da secção dos provetes ser muito elevada em comparação com a distância entre os apoios e os pontos de carga, grande parte da carga foi directamente transmitida ao apoio, sobrestimando portanto os valores de resistência à tracção por flexão.

O comportamento observado foi portanto mais aproximado ao de uma consola curta, ao invés do de uma viga submetida à flexão, não sendo possível uma comparação fiel com a normalização existente (EC2). No entanto, os provetes foram todos ensaiados nas mesmas condições, validando assim uma análise comparativa, que é, no fundo, o objectivo principal deste ensaio, de modo a avaliar a influência da acção de gelo-degelo nos betões produzidos.

4.4.5. Resistência à compressão das partes resultantes dos ensaios de tracção por flexão aos 28 dias

As duas metades que resultam do ensaio à tracção por flexão, realizado em provetes prismáticos com dimensões definidas em §3.5.2, foram ensaiadas posteriormente à compressão. Os resultados apresentados no Quadro 4.14 são obtidos através da média aritmética dos valores presentes no Anexo J.

Quadro 4.14 - Resistência à compressão das partes resultantes do ensaio à tracção por flexão.

Betão	f_c metades resultantes [MPa]	CV [%]	f_c cubos de 10 cm de aresta - 28 dias [MPa]	CV [%]	Δ [%]
BR	44,3	10,5	51,7	3,7	-14,2
B20R	35,6	5,3	49,5	2,1	-28,2
B50R	32,3	8,3	49,4	3,0	-34,6
B100R	31,4	1,9	48,7	1,6	-35,7
HBR	54,4	4,6	82,0	2,4	-33,7
HB20R	49,6	5,2	81,1	3,6	-38,8
HB50R	46,1	4,7	74,5	3,1	-38,1
HB100R	40,1	2,0	66,5	2,2	-39,8
HBRIA	47,9	2,0	69,3	0,8	-30,8
HB20RIA	44,7	7,9	60,7	0,6	-26,4
HB50RIA	37,4	7,3	57,0	4,5	-34,4
HB100RIA	30,7	3,5	48,4	4,0	-36,6

Como se observa através do Quadro 4.14, ao contrário daquilo que seria expectável, existem diferenças muito elevadas entre a resistência à compressão em cubos de 10 cm de aresta e em metades resultantes do ensaio à flexão. Isto deve-se às condições experimentais menos apropriadas, que implicaram a utilização de pratos auxiliares (§3.7.2) não normalizados para a realização deste ensaio. Acrescentado ao facto de os provetes ensaiados poderem apresentar desvios geométricos devido a terem sido fabricado com recurso a moldes de encaixe, a utilização de dois pratos auxiliares pode ter levado ao aparecimento de pequenas excentricidades (Figura 4.18), provocando, consequentemente, o aparecimento de um momento flector. Esse desvio tem uma importância tanto maior quanto maior for a carga de rotura, como sucede nos betões de elevada resistência.

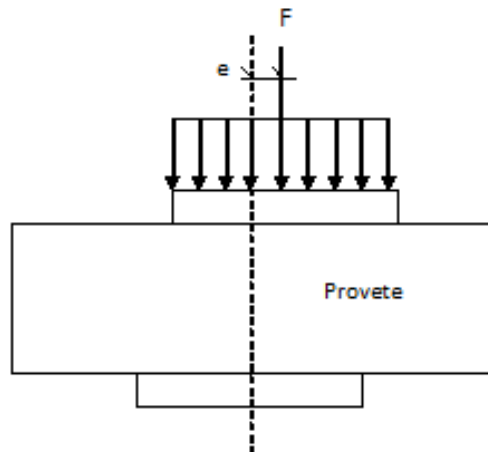


Figura 4.18 - Excentricidade causada pelo desalinhamento dos pratos auxiliares.

Desta forma, tendo em conta que o momento flector criado é dado pelo produto da excentricidade pela resultante das forças actuantes no prato, as tensões adicionais criadas na secção do provetes são dadas por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{w} = \frac{F \times e}{\frac{b \times h^2}{6}} = \frac{6F \times e}{h^3} \quad (4.2)$$

A excentricidade obtida provoca o efeito que normalmente se observa em fundações de estruturas e que consiste na redução da área resistente efectiva devido ao aparecimento de um momento flector. Assim sendo, a área na qual a força foi de facto aplicada, pode não ser a área total da placa mas sim menor. Dessa forma, seria natural que a rotura por compressão se desse para valores menores de tensão, devido a esta diminuição na área resistente efectiva, justificando assim os valores obtidos.

Independentemente das maiores variabilidades obtidas neste ensaio em comparação com o realizado em cubos de 10 cm de aresta, verifica-se que existe um decréscimo na resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB (Figura 4.19).

No entanto, devido aos resultados obtidos, não é possível tirar outras conclusões para além daquelas referidas nos pontos anteriores. Este ensaio servirá apenas como referência para ensaios idênticos realizados em provetes submetidos a ciclos gelo-degelo e a provetes conservados em câmara húmida até se perfazerem 300 ciclos gelo-degelo.

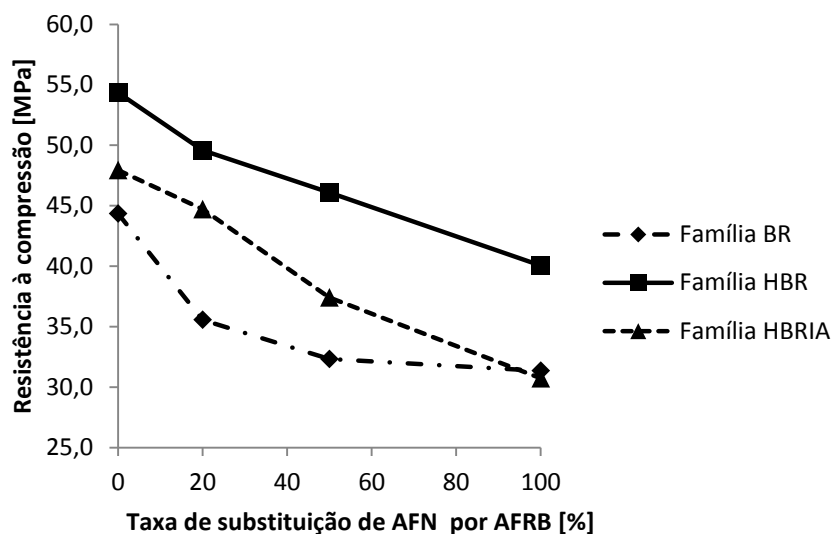


Figura 4.19 - Resistência à compressão das partes resultantes do ensaio de resistência à tracção por flexão dos betões produzidos.

4.4.6. Avaliação do descasque superficial de provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo

Foi realizada uma avaliação visual da desagregação superficial dos provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados gelo-degelo, de modo a observar a degradação que este tipo de acção provoca no betão. As Figuras 4.20 a 4.23 mostram os resultados obtidos

para a família de betões correntes (família BR) no início do ensaio e ao fim de 300 ciclos gelo-degelo. Todos os betões desta família apresentam uma degradação bastante severa ao fim dos 300 ciclos. Notou-se que esta degradação se deu, na sua maior parte, entre 181 e 300 ciclos de gelo-degelo, embora os provetes já mostrassem anteriormente sinais de desagregação superficial.



Figura 4.20 - Betão BR - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.21 - Betão B20R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.22 - Betão B50R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.23 - Betão B100R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).

O betão com maiores perdas de massa foi o B100R, que estava muito degradado ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, sendo possível a sua fácil desagregação à mão. Os betões com melhor desempenho, da família BR, foram o BR e o B50R que apresentaram sinais de degradação superficial idênticos mas, ainda assim, muito severos.

As Figuras 4.24 a 4.27 referem-se aos betões de elevado desempenho sem introdução de ar (família HBR). Em comparação com os betões correntes, nota-se que os betões de

elevado desempenho apresentam um melhor comportamento em termos de desagregação superficial, independentemente da taxa de substituição de AFN por AFRB.



Figura 4.24 - Betão HBR - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.25 - Betão HB20R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.26 - Betão HB50R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.27 - Betão HB100R - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).

Comparando os vários betões da família HBR, conclui-se que o HB100R é o que tem um descasque superficial mais acentuado. Os restantes três betões têm um descasque superficial semelhante, apesar de o HBR apresentar um comportamento mais homogêneo ao longo da superfície do provete, enquanto o HB20 e o HB50R sofreram desagregação acentuada em zonas específicas. Nas Figuras 4.28 a 4.31, estão presentes os betões da família HBRIA no início do ensaio e ao fim de 300 ciclos acelerados de gelo-degelo. Como se pode observar, os betões com agregados reciclados apresentam

uma degradação ligeiramente superior à do betão de referência, embora essa diferença seja pouco significativa, principalmente entre o HBRIA e o HB20RIA.



Figura 4.28 - Betão HBRIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.29 - Betão HB20RIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.30 - Betão HB50RIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).



Figura 4.31 - Betão HBRIA - No início (esquerda) e ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo (direita).

Tal como nos betões de elevado desempenho sem IA, o HB50RIA e o HB100RIA apresentam desagregação superficial menos uniforme, sendo mais pontual e mais severa. Este fenómeno (Figura 4.32) é semelhante ao de "*salt scaling*", resultante da utilização de sais anti-congelantes normalmente adoptados em países com invernos rigorosos. Os agregados mais porosos, que se encontram junto da superfície de contacto com o exterior do betão, são facilmente saturados. Quando a água congela, causa pressões no agregado e, conseqüentemente, o descasque superficial do betão (Verbeck e Langden, 1960; Mehta e Monteiro, 2006; Rønning, 2001; Bogas, 2011).

No entanto, o fenómeno que se observa no presente estudo é ligeiramente diferente. As areias recicladas levam à obtenção de pastas cimentícias de menor resistência. Nos betões de elevado desempenho, notaram-se descasques pontuais em zonas com agregados alongados. Sabe-se que estas zonas são mais susceptíveis a fenómenos de exsudação, levando a uma maior acumulação de água junto dos agregados, e à consequente fragilização destas regiões. Desta forma, quando essa água congela, provoca a rotura da pasta envolvente, provocando o efeito de "pop-out". Nos betões reciclados, com pastas de menor resistência, este efeito é agravado. Por outro lado, nos betões correntes, nota-se um descasque mais homogéneo, visto a pasta cimentícia ser, à partida, muito permeável e pouco resistente à acção do gelo. Assim, os AFRB não condicionam tanto o comportamento em betões correntes como o comportamento de betões de elevado desempenho, notando-se em todos os betões com uma relação a/c elevada um mau desempenho. Conclui-se assim que os betões com uma relação a/c efectiva maior apresentam um maior nível de desagregação, com perdas efectivas de secção. Os betões de elevado desempenho apresentam uma degradação directamente proporcional à taxa de substituição de AFN por AFRB, sendo no entanto as diferenças mais ténues, e relacionando-se com a menor resistência da pasta

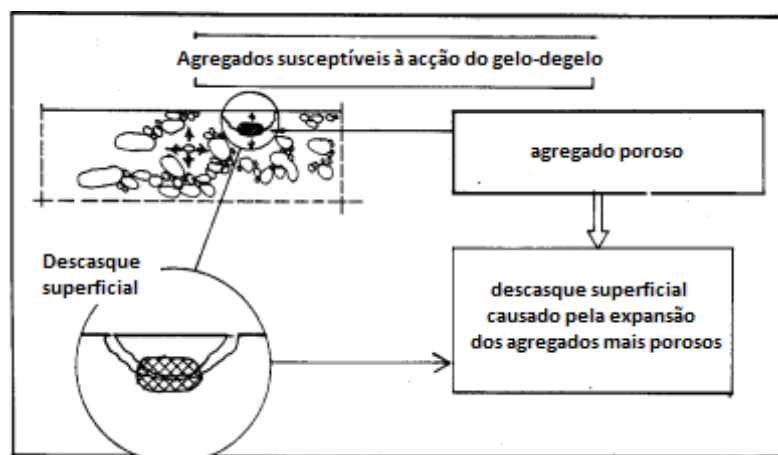


Figura 4.32 - Descasque superficial do betão devido à presença de agregados porosos (Rønning, 2001).

4.4.7. Avaliação da perda de massa ao longo do tempo de provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo

Os provetes foram pesados ao fim de 10, 20, 36, 55, 91, 121, 181 e 300 ciclos de gelo-degelo, de modo a avaliar as perdas de massa devidas à degradação dos provetes. Estão presentes no Quadro 4.15 as variações percentuais em relação à massa inicial dos provetes submetidos a ciclo gelo-degelo. As perdas de massa foram calculadas em separado para cada provete, sendo que os valores presentes no referido quadro representam a média aritmética dos resultados obtidos para cada provete. Todos os valores utilizados neste cálculo estão presentes no Anexo K.

Devido à avaria do equipamento, foram realizadas duas pesagens adicionais, tendo-se verificado que não houve alteração da massa dos provetes enquanto não foram submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo. De uma forma geral e conforme seria

de esperar, observa-se que os betões correntes, quando comparados com os de elevado desempenho, apresentam uma maior perda de massa ao longo do tempo. Isto confirma a maior degradação superficial observada em § 4.4.6. Por outro lado, nota-se que os betões fabricados com AFRB apresentam perdas de massa ligeiramente superiores. No entanto, para 100% de taxa de substituição de AFN por AFRB nos betões correntes, obtém-se uma deterioração cerca de duas vezes superior às observadas nos restantes betões. Ainda assim, a perda de massa em todos os betões só foi efectivamente relevante após 180 ciclos.

4.15- Variação de massa ao longo do tempo de provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.

Betão	Variação de massa ao longo do tempo [%]							
	Δ 10	Δ 20	Δ 36	Δ 55	Δ 91	Δ 121	Δ 181	Δ 300
BR	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-1,2	-2,7	-12,6
B20R	-0,3	-0,4	-0,5	-0,5	-0,8	-1,5	-2,3	-19,2
B50R	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,8	-1,5	-2,6	-12,3
B100R	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-1,0	-2,6	-4,0	-37,9
HBR	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2
HB20R	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2
HB50R	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3
HB100R	-0,1	-0,1	-0,2	0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,6
HBRIA	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2
HB20RIA	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2
HB50RIA	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3
HB100RIA	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3

A Figura 4.33 representa a variação de massa ao longo do tempo observada para a família BR.

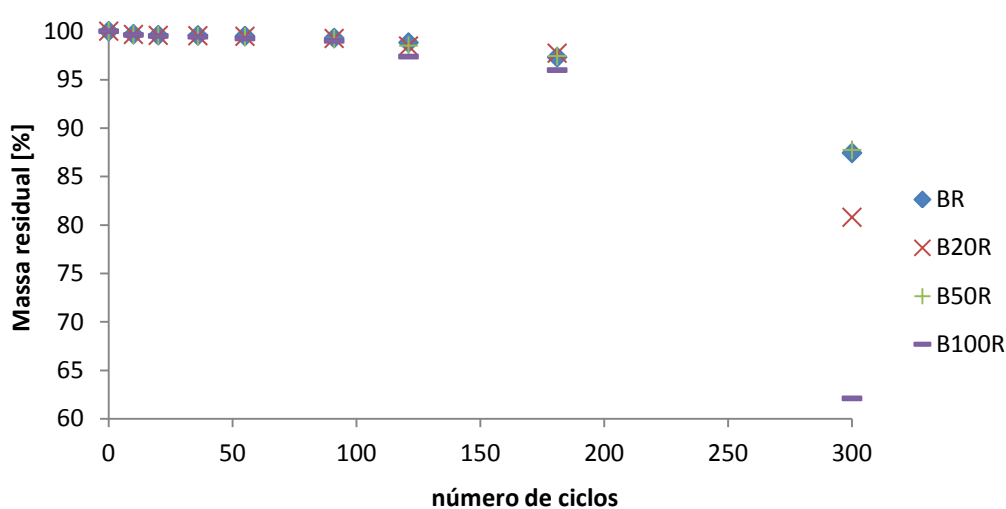


Figura 4.33 - Variação da massa ao longo do tempo para a família BR.

É possível observar, através da Figura 4.33, que existe um decréscimo da massa ao longo do tempo para todos os betões da família BR. Como referido, quanto maior a taxa de substituição de AFN por AFRB, maiores as perdas de massa ao longo do tempo, embora esta diferença seja quase irrelevante, sendo sempre inferior a 0,2% até se perfazerem 91 ciclos, altura a partir da qual se notam valores ligeiramente superiores na ordem de 1,4%.

Os resultados obtidos ao fim de 300 ciclos são menos rigorosos uma vez que, como referido, foi possível o descasque à mão da maior parte dos provetes. Assim sendo, de modo a ser ainda possível realizar o ensaio à tracção por flexão, decidiu-se proceder apenas à lavagem dos detritos de maior dimensão presentes nos provetes desta família. A maior degradação dos betões correntes em relação aos de elevado desempenho prende-se com a maior permeabilidade e menor resistência da pasta cimentícia, que proporciona uma saturação mais rápida dos agregados e da própria pasta, provocando o fenómeno de "pop-out". Ao haver degradação superficial, é cada vez mais fácil a água atingir a secção interior dos provetes, pelo que a degradação é cada vez maior.

Conclui-se que, para a família de betões correntes, os agregados reciclados não possuem uma grande influência na durabilidade do betão quando submetido a ciclos gelo-degelo, excepto para uma taxa de substituição de 100% de AFN por AFRB em que se notou uma degradação bastante superior à dos restantes betões, os quais apresentaram resultados muito idênticos, embora ligeiramente piores no caso de se utilizarem agregados reciclados.

São apresentados, nas Figura 4.34 e 4.35, os resultados para a família HBR e HBRIA respectivamente.

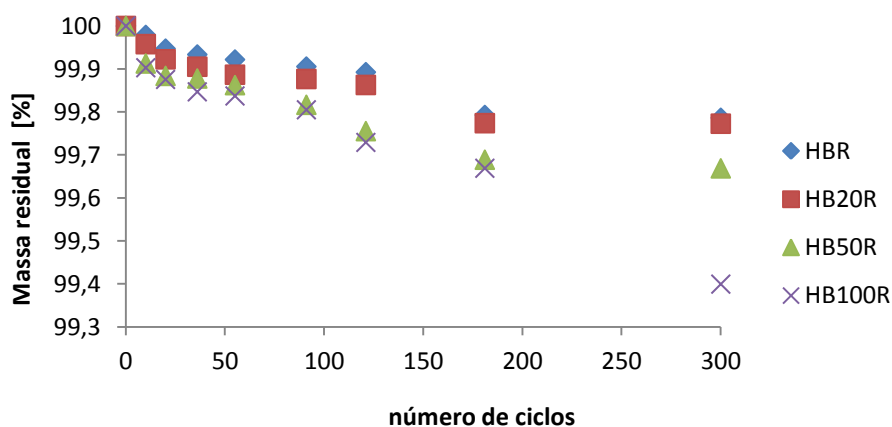


Figura 4.34 - Variação de massa ao longo do tempo para a família HBR.

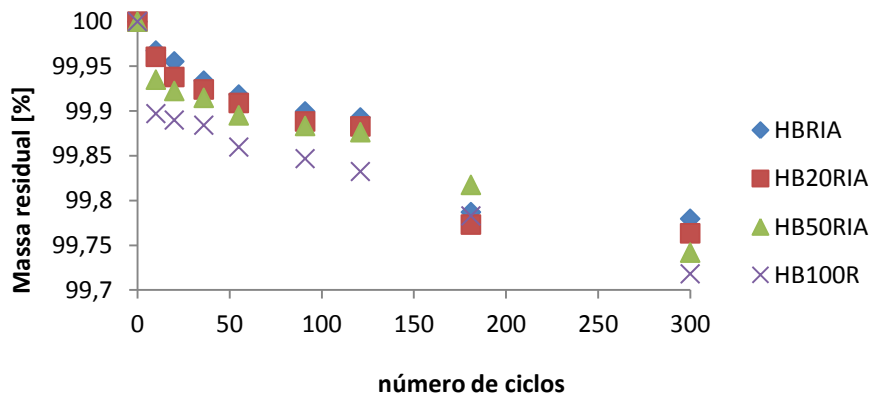


Figura 4.35 - Variação de massa ao longo do tempo para a família HBRIA.

Como se verifica através das figuras, as perdas de massa em betões de elevado desempenho são bastante inferiores às dos betões correntes, nunca ultrapassando 0,6% para betões sem introdutor de ar e 0,3% para betões com introdutor de ar, de onde se conclui que o introdutor de ar parece ser ligeiramente benéfico no que diz respeito às perdas de massa em betões de elevado desempenho. Conclui-se, através da análise dos resultados, que a influência que os agregados reciclados têm nas perdas de massa destes betões é mínima.

Assim, é possível concluir que as perdas de massa de provetes de betão submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo dependem muito mais da relação a/c efectiva das misturas produzidas do que da taxa de substituição de AFN por AFRB. Enquanto os betões de elevado desempenho apresentam perdas de massa quase nulas ao longo do tempo, os betões correntes apresentam perdas de secção significativas ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo. Foi realizada uma análise em termos percentuais da perda de massa ao longo do tempo, ou seja, os resultados apresentados poderiam ser menos rigorosos, uma vez que, para uma igual perda de massa, o peso percentual dessa perda seria maior em betões mais leves. No entanto, verifica-se que, apesar das diferenças serem menos importantes, em termos de valor absoluto de perda de massa, as tendências observadas são idênticas à da análise apresentada nas Figuras 4.34 e 4.35. Por outro lado, o introdutor de ar mostrou ter um efeito quase insignificante no que diz respeito à degradação em betões de elevado desempenho. Vários autores questionam inclusive a vantagem da utilização de IA em betões com uma baixa relação a/c (Li et al., 1994; Pigeon et al. 1996; Mindess et al. 2003). Teria sido mais benéfico ter-se utilizado o introdutor de ar em betões correntes, em que a maior permeabilidade da pasta cimentícia provoca uma saturação mais fácil dos agregados e da mesma, dando origem aos mecanismos de degradação devido à acção do gelo-degelo (§2.8).

4.4.8. Variação do comprimento de provetes submetidos a ensaios acelerados de gelo-degelo

Como referido, a medição da variação de comprimento ao longo do tempo de provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo pode ser utilizada como meio

complementar de diagnóstico, quando se pretende avaliar a resistência do betão a este tipo de acção. Segundo Coutinho e Gonçalves (1994), a diferença entre a deformação axial e superficial pode ser desprezável para prismas com secção transversal suficientemente reduzida, validando assim a importância deste ensaio.

A norma ASTM C666 especifica um valor limite de 0,1% para este tipo de variação. Uma vez atingido este limite, os testes podem ou não continuar até aos 300 ciclos. Neste caso, decidiu-se que todos os provetes sofreriam 300 ciclos de gelo-degelo, sendo a resistência mecânica (tracção por flexão e compressão) avaliada ao fim desse tempo. O ensaio de variação de comprimento ao longo do tempo foi realizado de acordo com §3.7.6. Devido à avaria da câmara, foram realizadas duas medições adicionais espaçadas no tempo, não se verificando mudanças notáveis na variação de comprimento dos provetes. Assim sendo, são apresentadas, no Quadro 4.16, as variações de comprimento, medidas ao longo do tempo, para diferentes ciclos de gelo-degelo.

Quadro 4.16 - Variação de comprimento ao longo do tempo de provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.

Betão	Variação em relação ao início / ciclo [%]							
	Δ 10	Δ 20	Δ 36	Δ 55	Δ 91	Δ 121	Δ 181	Δ 300
BR	-0,007	-0,008	0,002	0,048	0,125	0,320	0,395	-
B20R	-0,010	-0,010	0,000	0,015	0,052	0,297	0,306	-
B50R	-0,009	-0,007	0,003	0,032	0,034	0,110	0,175	-
B100R	-0,012	-0,017	-0,007	-0,002	0,033	0,159	0,373	-
HBR	-0,009	-0,009	0,001	0,006	0,002	0,038	0,049	0,141
HB20R	-0,014	-0,018	-0,009	-0,002	-0,005	0,039	0,075	0,080
HB50R	-0,009	-0,008	0,004	0,009	0,005	0,015	0,038	0,028
HB100R	-0,007	-0,028	0,005	0,003	-0,001	0,008	0,025	0,029
HBRIA	0,000	-0,009	0,003	0,009	0,001	0,008	0,016	0,036
HB20RIA	-0,015	-0,012	-0,008	-0,004	0,001	0,002	0,005	0,009
HB50RIA	-0,008	-0,006	0,005	0,005	0,012	0,021	0,028	0,034
HB100RIA	-0,006	-0,005	0,002	0,004	0,007	0,090	0,012	0,015

Os resultados presentes no Quadro 4.16 foram calculados através dos valores presentes no Anexo L. Ao fim de 300 ciclos gelo-degelo, a degradação dos betões da família BR (relação a/c efectiva de 0,54) foi muito severa, provocando a remoção das pastilhas da superfície dos provetes.

No entanto, o valor limite para a variação de comprimento já tinha sido atingido aos 91 ciclos para o BR e aos 121 ciclos para o B20R, B50R e B100R. As Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 representam graficamente a variação do comprimento ao longo do tempo para as famílias BR, HBR e HBRIA, respectivamente.

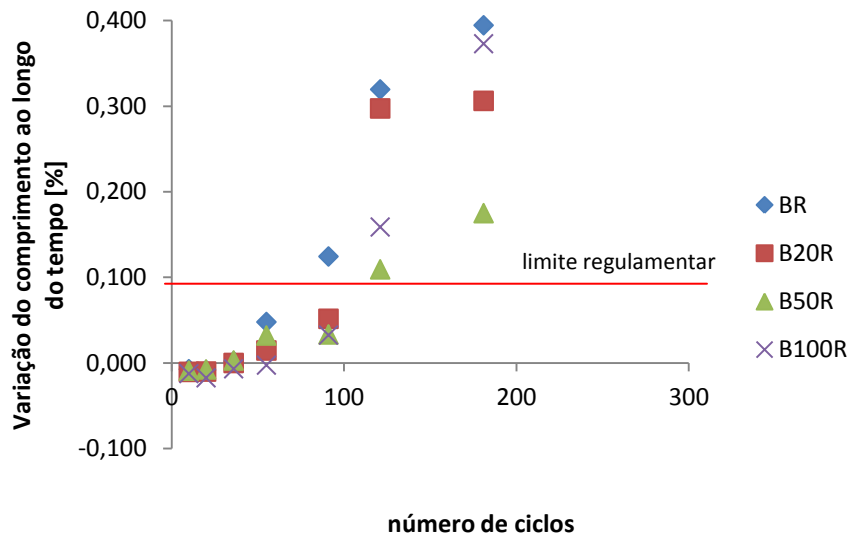


Figura 4.36 - Variação do comprimento ao longo do tempo para a família BR.

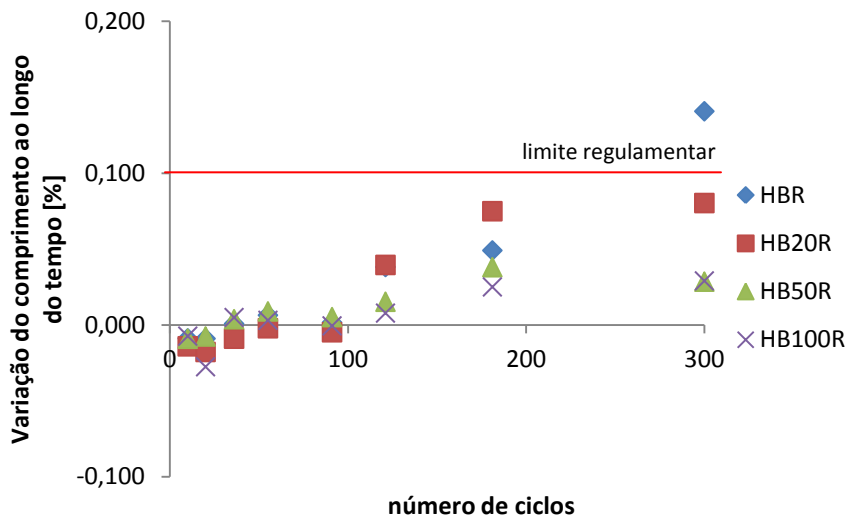


Figura 4.37 - Variação do comprimento ao longo do tempo para a família HBR.

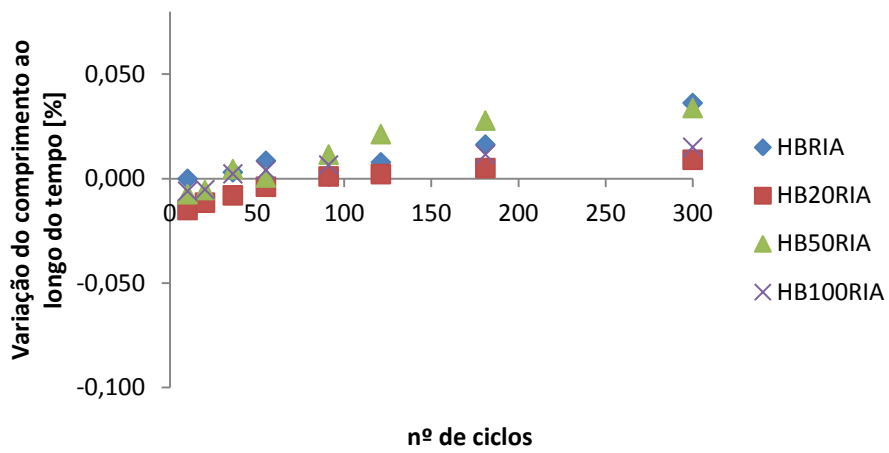


Figura 4.38 - Variação do comprimento ao longo do tempo para a família HBRIA.

As expansões verificadas para números de ciclos superiores foram esperadas. Sabe-se que a água presente nos poros de gel da matriz cimentícia, fora das cavidade capilares, necessita de uma temperatura menor para congelar. Isto significa que a água presente nas cavidades capilares congela, ficando num estado menor de energia, enquanto a restante permanece num estado líquido, de energia superior. Esta diferença de entropia faz com que a água presente nos poros de gel se desloque para as cavidades capilares, de modo a equilibrar o sistema. Quando a água chega às cavidades capilares e congela, pode provocar uma expansão do sistema, verificando-se assim um aumento do comprimento dos provetes, desde que esta expansão seja superior à contracção verificada nos poros de gel e os poros capilares atinjam valores de saturação superiores aos críticos (Mehta e Monteiro, 2006).

É importante referir que os espécimes foram sempre medidos a temperaturas muito baixas, imediatamente após serem retirados da câmara gelo-degelo. Assim sendo, notam-se retracções inicialmente, que podem ser explicadas pela contracção da superfície do provete, face ao valor de referência inicialmente medido antes da entrada dos provetes na câmara, devido à baixa temperatura a que se efectuaram as medições. Esta retracção pode ser quantificada com base no coeficiente de dilatação térmica do betão e no gradiente de temperaturas observado, que se estima ser cerca de 14 °C, levando a retracções na ordem de cerca de 0,014%. À medida que a degradação interior do provete aumenta, a contracção causada pela baixa temperatura a que é efectuada a medição não é suficiente para contrariar a expansão do sistema devido ao fenómeno já descrito. Estas contracções iniciais são menos visíveis em betões com uma maior relação a/c, em que a expansão do sistema é mais importante desde os instantes iniciais.

Como referido, os betões com agregados reciclados mostraram provocar perdas de massa ligeiramente superiores. No entanto, é visível através das Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 que em qualquer das famílias de betão, aquele que apresenta o pior desempenho em termos de variação de comprimento é o betão de referência, fabricado apenas com agregados naturais. Um conceito importante, em termos de resistência a ciclos gelo-degelo, é o de tamanho crítico do agregado, que é basicamente o tamanho máximo que o agregado pode atingir, devido ao congelamento da água, sem provocar rotura do agregado ou da pasta envolvente do mesmo. Baseados na lei de Darcy e tendo em conta que a pressão máxima exercida no agregado não pode ultrapassar a sua capacidade resistente, Verbeck e Langden (1960) propõem a expressão 4.2 para o cálculo do tamanho crítico do agregado.

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{27,7 \times K_1 \times T}{0,09 \times dWF/dt} \quad (4.2)$$

em que:

- $L_{m\acute{a}x}$ - tamanho crítico do agregado;
- K_1 - permeabilidade do agregado (cm/s);
- T - pressão máxima suportada pelo agregado (Psi);
- dWF/dt - velocidade de congelamento da água.

Como é visível através da expressão, o tamanho crítico do agregado aumenta com o aumento da sua permeabilidade e da pressão máxima suportada por este. Assim sendo, os agregados reciclados, por serem mais porosos e apresentarem uma maior permeabilidade, podem, eventualmente, apresentar um maior tamanho crítico do que os agregados naturais. No entanto, como referido em §2, os agregados reciclados apresentam, em geral, um pior comportamento mecânico do que os agregados naturais, pelo que o efeito benéfico causado pela sua maior permeabilidade pode ser contrariado pela diminuição da pressão máxima suportada por estes.

A saturação de betões com uma baixa relação a/c demora mais tempo ou nunca chega a acontecer efectivamente (Richardson et al., 2011). No entanto, após esta ocorrer, o efeito do gelo-degelo pode ser mais gravoso em betões com menor relação a/c, devido à maior dificuldade de dissipação das pressões hidráulicas causadas (Verbeck e Langden, 1960). Justifica-se assim a maior vantagem que a permeabilidade dos agregados reciclados teve em betões de elevado desempenho do que em betões correntes, devido à maior facilidade de dissipação deste tipo de pressões, apesar de nos betões de maior resistência estas pressões quase não se desenvolverem. Outra hipótese para o melhor comportamento dos betões com agregados reciclados face aos betões fabricados apenas com AN pode prender-se com o já explicado possível fenómeno de hidratação do cimento presente nos AFRB, contribuindo ligeiramente para a diminuição da relação a/c efectiva e, conseqüentemente, diminuindo a permeabilidade dos betões. De resto, notou-se que o introdutor de ar foi benéfico, originando uma menor variação de comprimento na família HBRIA face à família HBR. Isto justifica-se por as bolhas de ar presentes na pasta de cimento permitirem a dissipação das tensões hidráulicas criadas, evitando a expansão do sistema (Mehta e Monteiro, 2006; Bogas 2011).

A contradição encontrada entre o efeito benéfico dos agregados reciclados no interior do betão e o efeito ligeiramente prejudicial encontrado em termos de perda de massa pode prender-se com o facto de as perdas de massa, que se devem apenas a descasque superficial, poderem ser agravadas pela pior resistência mecânica da argamassa dos betões com AFRB e pelos efeitos de exsudação em zonas de agregados alongados, perto da superfície do provete. Ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, o único betão de elevado desempenho que ultrapassa o limite estipulado pela norma é o HBR, fabricado apenas com agregados naturais e sem introdutor de ar. Uma vez mais, comprova-se que a resistência a ciclos gelo-degelo é muito condicionada pela relação a/c efectiva das misturas e que o introdutor de ar é benéfico em termos de durabilidade aos ciclos de gelo-degelo. Apesar de os agregados reciclados se terem mostrado benéficos, não existe uma tendência de comportamento com o aumento da taxa de substituição, pelo que não se pode tirar uma conclusão inequívoca sobre a influência dos mesmos.

4.4.9. Ensaio de propagação de ultrassons em provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo

São apresentados neste ponto os resultados obtidos através do ensaio de propagação de ultrassons definido em §3.7.5. Os resultados obtidos são também utilizados no cálculo

do módulo de elasticidade dinâmico, tal como referido na norma ASTM C666. Durante a avaria do equipamento, foram realizadas duas medições adicionais, não se tendo observado variações no tempo de propagação de ultrassons nos provetes, quando não submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo. Estão presentes, no Quadro 4.17, os valores residuais da velocidade de propagação dos ultrassons, obtidos através do quociente entre o comprimento do provete e o tempo de propagação. As medições utilizadas neste cálculo encontram-se no Anexo M. Tal como referido, a degradação em betões com uma relação a/c efectiva de 0,53 foi muito intensa ao fim de 300 ciclos não permitindo a medição do tempo de propagação de ultrassons nesse instante. As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 representam graficamente os resultados obtidos para a família BR, HBR e HBRIA, respectivamente.

Quadro 4.17 - Variação ao longo do tempo do tempo de propagação de ultrassons em provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.

Betão	Velocidade residual de propagação dos ultrassons [%]								
	Início	Δ 10	Δ 20	Δ 36	Δ 55	Δ 91	Δ 121	Δ 181	Δ 300
BR	100,0	97,5	97,1	96,6	93,8	82,3	53,0	47,3	-
B20R	100,0	99,8	99,0	99,1	95,8	87,9	58,7	58,3	-
B50R	100,0	97,8	97,5	97,5	96,5	96,3	94,8	60,9	-
B100R	100,0	99,5	99,2	98,1	98,1	95,0	94,6	60,2	-
HBR	100,0	97,3	96,9	96,8	96,3	96,1	95,6	94,5	92,3
HB20R	100,0	98,8	98,5	98,4	98,2	98,0	97,6	96,6	96,4
HB50R	100,0	98,8	98,6	98,3	97,5	97,4	97,3	97,1	96,4
HB100R	100,0	98,8	98,0	97,7	97,5	96,9	96,3	96,1	94,6
HBRIA	100,0	98,9	98,3	98,2	97,9	96,9	96,6	96,1	95,3
HB20RIA	100,0	99,0	97,9	97,8	97,8	97,2	96,2	95,9	95,8
HB50RIA	100,0	98,9	98,5	98,0	97,8	97,5	97,4	96,9	96,7
HB100RIA	100,0	99,8	99,1	99,0	98,5	98,0	97,9	97,5	97,4

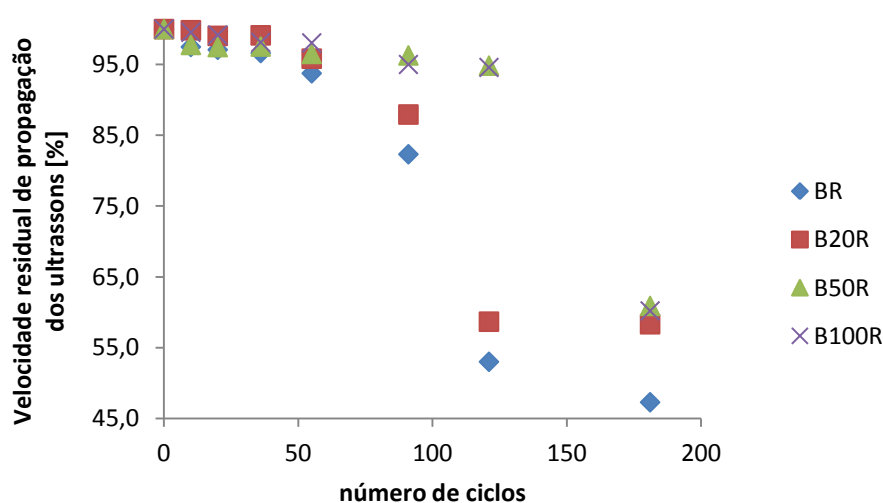


Figura 4.39 - Velocidade residual de propagação dos ultrassons ao longo do tempo para a família BR.

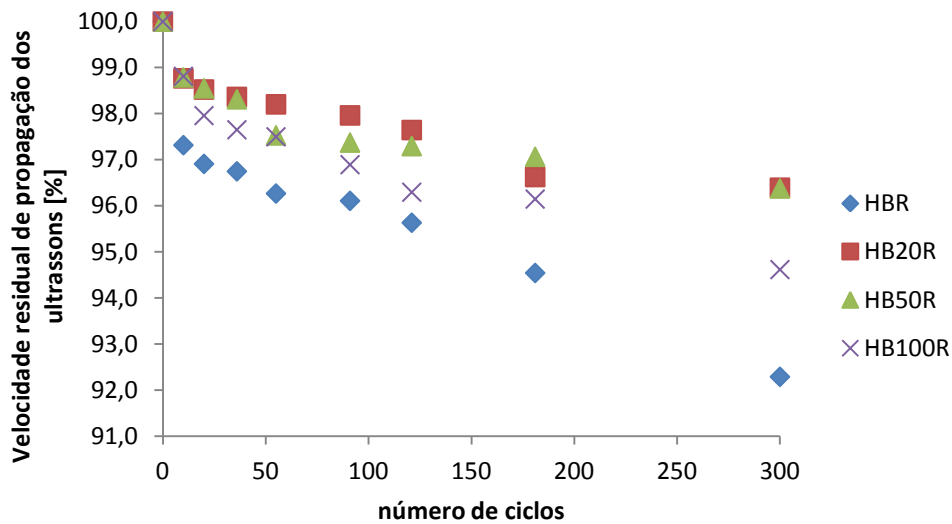


Figura 4.40 - Velocidade residual de propagação dos ultrassons ao longo do tempo para a família HBR.

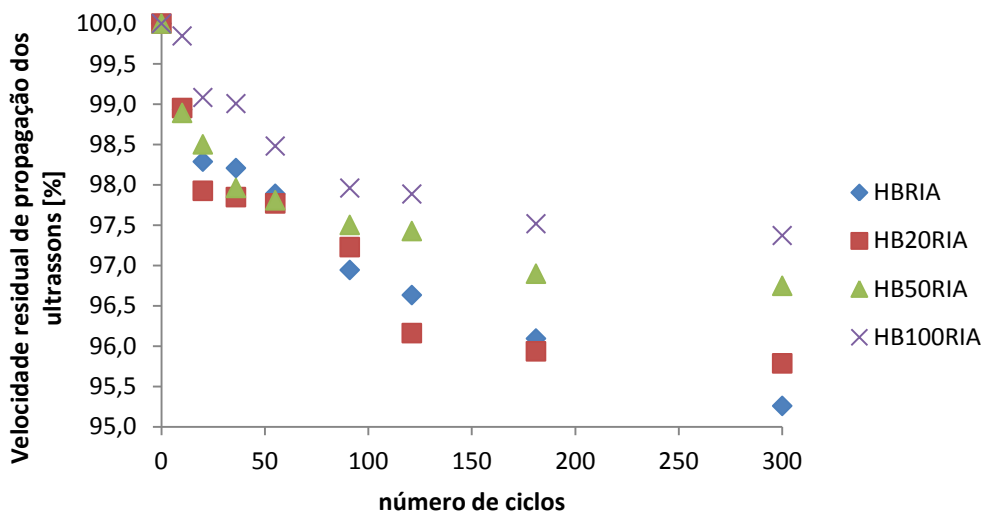


Figura 4.41 - Velocidade residual de propagação dos ultrassons ao longo do tempo para a família HBRIA.

Através das figuras, é possível verificar que os betões que apresentam pior comportamento, i.e, maior perda de velocidade de propagação de ultrassons, são os de referência, fabricados apenas com AN. Estes resultados reiteram a tendência observada na variação do comprimento, em que a incorporação de reciclados provou ser ligeiramente benéfica. Devido aos mecanismos de degradação do betão explicados, a velocidade de propagação dos ultrassons tende a diminuir com o aumento do número de ciclos de gelo-degelo, uma vez que a matriz cimentícia se torna cada vez mais porosa e, conseqüentemente, um meio de menor compacidade.

Uma vez mais os betões correntes, devido à sua maior relação a/c efectiva, apresentaram o pior comportamento, não sendo inclusive possível medir o tempo de propagação de ultrassons ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, como referido.

De resto, os betões de elevado desempenho mostraram perdas de velocidade sempre inferiores a 9% no caso dos betões sem introdutor de ar e a 5% nos betões com esse adjuvante na sua composição. Assim sendo, os resultados confirmam que o introdutor de ar é ligeiramente benéfico em termos de resistência aos ciclos gelo-degelo, como referido.

Conclui-se assim, através dos resultados obtidos, que houve efectivamente degradação interior dos provetes, como seria expectável através das medições de variação do comprimento na superfície dos mesmos.

Uma vez mais, os agregados reciclados provaram ser ligeiramente benéficos em termos de resistência aos ciclos gelo-degelo, não se encontrando no entanto uma tendência clara no seu comportamento, com excepção da família HBRIA em que se nota de facto, ao fim de 300 ciclos, uma melhoria efectiva de desempenho com o aumento da taxa de substituição de AN por AFRB.

4.4.10. Variação na resistência à tracção por flexão de provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo

Como referido, foram armazenados em câmara húmida dois provetes prismáticos por tipo de composição, ensaiados posteriormente à flexão de modo a poder comparar os resultados com aqueles obtidos em provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo. São apresentados, no Quadro 4.18, os valores obtidos para a resistência à tracção por flexão de provetes prismáticos aos 28 dias.

São também apresentados os resultados deste ensaio ao fim de 300 ciclos gelo-degelo de provetes que não foram submetidos a essa acção e de provetes que sofreram ciclos acelerados de gelo-degelo. Os resultados presentes no supracitado quadro foram obtidos através dos valores presentes no Anexo N.

Como se pode observar através do Quadro 4.18, existe um ligeiro aumento na resistência à tracção por flexão de provetes não submetidos à acção de gelo-degelo, entre os 28 dias de idade e o instante em que se completaram 300 ciclos gelo-degelo (aproximadamente dez meses de idade), o que seria expectável devido ao aumento da resistência dos betões.

Como analisado, os betões com uma relação a/c efectiva de 0,54 sofreram uma degradação severa, razão pela qual se nota um decréscimo na resistência à tracção por flexão ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo com valores entre 94,6 e 100%, independentemente do tipo de agregados utilizados, de onde se conclui que, para betões correntes, o tipo de agregado não tem influência na resistência à tracção por flexão dos betões estudados.

Quadro 4.18 - Resistência à tracção por flexão de provetes prismáticos aos 28 dias e ao fim de 300 ciclos gelo-degelo sem sofrer a acção do gelo-degelo e a sofrer essa mesma acção.

Betão	f_{cf} [MPa]						Δ Com/ Sem gelo [%]
	28 dias	CV [%]	Sem acção gelo-degelo (300 dias de idade)	CV [%]	300 ciclos gelo-degelo (300 dias de idade)	CV [%]	
BR	12,6	0,3	13,2	1,6	0,1	141,4	-98,8
B20R	10,1	4,9	10,8	2,2	0,2	141,4	-98,6
B50R	9,8	0,4	10,4	3,2	0,6	15,7	-94,6
B100R	8,3	1,9	9,5	2,1	0,0	0,0	-100,0
HBR	13,8	5,9	15,2	0,0	12,8	1,4	-15,7
HB20R	11,7	2,1	13,1	7,0	11,8	1,2	-10,0
HB50R	10,3	3,1	11,4	3,6	10,6	12,0	-6,8
HB100R	8,8	3,2	10,4	2,5	8,3	4,7	-19,5
HBRIA	10,4	1,1	11,5	5,9	10,7	11,6	-6,4
HB20RIA	9,0	6,5	10,4	0,8	9,8	10,1	-5,9
HB50RIA	8,7	1,9	10,1	2,2	9,5	1,9	-5,3
HB100RIA	8,0	2,0	8,7	3,7	8,6	5,1	-6,2

Na Figura 4.42, é visível o estado do betão B50R após o ensaio à tracção por flexão.



Figura 4.42 - Ensaio à tracção por flexão de um provete da composição B50R.

A Figura 4.42 representa graficamente a variação da resistência à tracção por flexão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB, ao fim de 300 ciclos, para provetes prismáticos não submetidos a ciclos gelo-degelo.

Em comparação com os ensaios realizados aos 28 dias de idade (§4.4.5), nota-se que a família BR apresenta, ao fim de 300 ciclos sem acção do gelo-degelo, valores mais próximos de f_{cf} da família HBRIA. Ainda assim, continua a apresentar valores de resistência à tracção por flexão superiores aos da família HBRIA para qualquer taxa de substituição de AFN por AFRB. Assim, a tendência observada após 10 meses mantém-se igual à observada aos 28 dias de idade, sendo os resultados ligeiramente superiores devido ao maior período de hidratação. A Figura 4.44 analisa os mesmos resultados mas em termos relativos ao betão de referência. Como seria de esperar, os AFRB têm um

efeito mais negativo nos betões com maior resistência, em que a fraca resistência mecânica dos AFRB é mais condicionante.

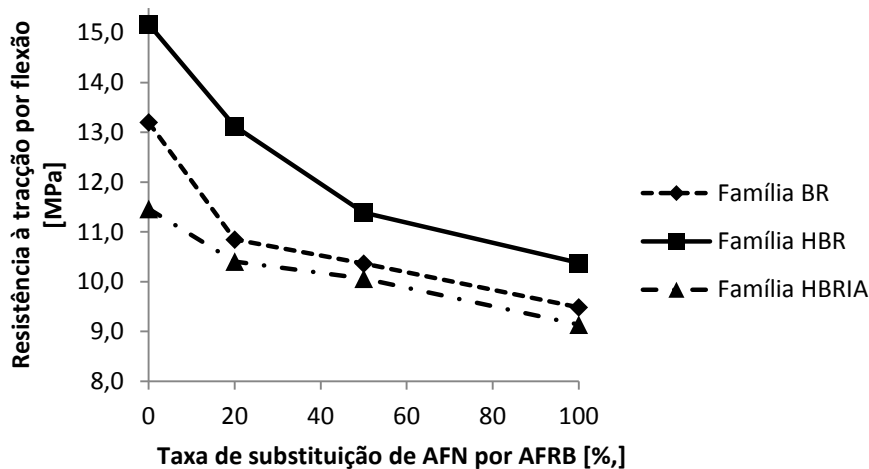


Figura 4.43 - Variação da resistência à tracção por flexão, em termos de valor absoluto, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB de provetes prismáticos, ensaiados sem sofrer a acção do gelo-degelo.

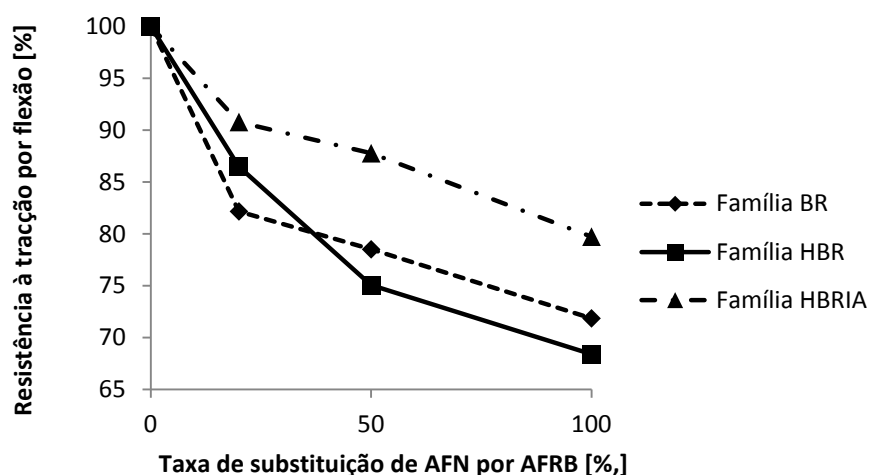


Figura 4.44 - Variação da resistência à tracção por flexão, em termos de valor relativo, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB de provetes prismáticos, ensaiados sem sofrer a acção do gelo-degelo.

Por sua vez, a Figura 4.45 representa de forma gráfica os valores de tracção por flexão apresentados pelos betões produzidos, após sofrerem 300 ciclos de gelo-degelo. Como se verifica, os betões da família BR apresentam valores de resistência à tracção por flexão quase nulos devido à degradação sofrida. Para o betão denominado por B100R, não foi possível realizar este ensaio devido às grandes perdas de secção observadas (§ 4.4.6), adoptando-se um valor nulo de resistência à tracção por flexão

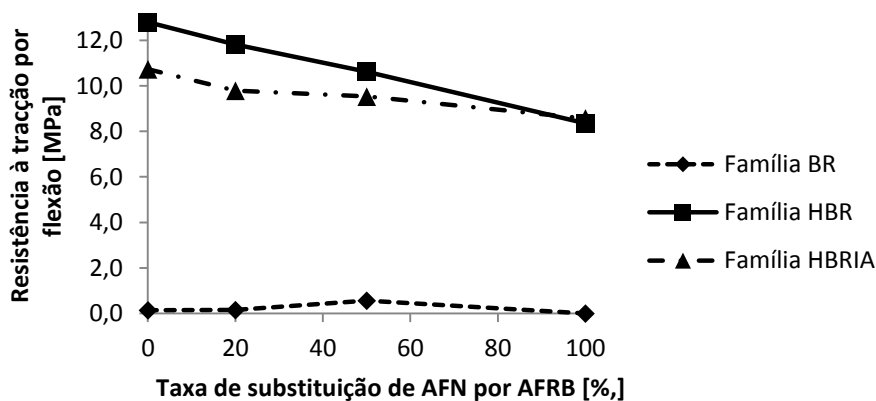


Figura 4.45 - Variação da resistência à tracção por flexão com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB de provetes prismáticos, ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo.

É visível, através dos resultados expostos, que nenhum betão da família de betões correntes apresenta resultados minimamente satisfatórios ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, o que era expectável face ao seu elevado estado de degradação no fim do ensaio de gelo-degelo. Assim, para esse nível de degradação, as diferenças de resistências observadas na família BR têm pouco significado.

Parece haver uma ligeira melhoria em termos de resistência dos betões aos ciclos gelo-degelo, quando são incorporados AFRB, à excepção do B100R e do HB100R (Figura 4.46), que provaram ter um maior decréscimo na resistência à tracção por flexão ao fim de 300 ciclos. A maior resistência aos ciclos gelo-degelo, de um modo geral, dos betões com agregados reciclados resulta da sua menor degradação interior, já observada em §4.4.8 e §4.4.9. Por outro lado, apesar de a acção do gelo-degelo ser menos efectiva em betões com agregados reciclados, os efeitos dessa acção podem ser mais condicionantes em betões de menor resistência, justificando-se assim a maior perda de resistência do B100R e do HB100R.

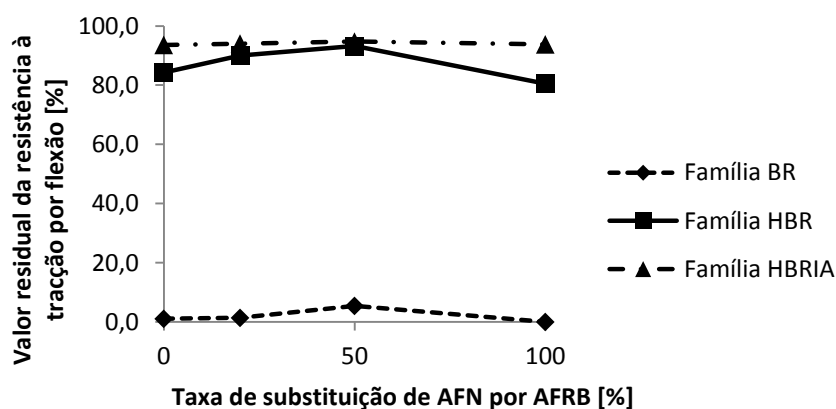


Figura 4.46 - Valor residual da resistência à tracção por flexão, em função da taxa de substituição de AFN por AFRB, ao fim de 300 ciclos.

Os betões com introdutor de ar apresentaram, em todos os casos, um melhor comportamento do que os betões sem esse adjuvante, reiterando uma vez mais a influência positiva deste na resistência a ciclos gelo-degelo apontada na bibliografia.

4.4.11. Variação na resistência à compressão de provetes submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo

Após 300 ciclos gelo-degelo, os provetes prismáticos foram ensaiados (§4.4.10), sendo neste ponto analisada a resistência à compressão das metades resultantes desse ensaio. De modo a avaliar a variação na resistência à compressão que os ciclos acelerados de gelo-degelo provocam, foram simultaneamente ensaiadas à compressão as metades resultantes do ensaio à flexão de prismas não submetidos à acção de gelo-degelo, após 300 ciclos. Como referido em §4.4.5, este ensaio foi de muito difícil execução durante a campanha experimental, devido à utilização de pratos auxiliares não normalizados. Pequenas excentricidades entre o prato inferior e superior podem ter dado origem a um momento flector, afectando os resultados. Por outro lado, o facto de este ensaio ser realizado em provetes moldados, pode ter levado à grande variabilidade de resultados obtida. Não obstante, decidiu-se apresentar os resultados, apesar de se ter eliminado alguns valores e a representatividade ser reduzida. No Quadro 4.19, estão presentes os valores de resistência à compressão das metades resultantes de provetes prismáticos, já analisados em §4.4.5. São apresentados também os resultados obtidos para a resistência à compressão das metades resultantes do ensaio à tracção por flexão de prismas sujeitos a ciclos gelo-degelo e de prismas não sujeitos a ciclos acelerados de gelo-degelo. Encontram-se no Anexo O os valores utilizados no cálculo dos resultados presentes no Quadro 4.19.

Quadro 4.19 - Resistência à compressão de metades resultantes de provetes prismáticos aos 28 dias e no fim do ensaio de gelo-degelo, sem sofrer a acção do gelo-degelo e a sofrer essa mesma acção.

Betão	f_c [MPa]						Δ Com/ Sem gelo [%]
	28 dias	CV [%]	Sem acção gelo-degelo (300 dias de idade)	CV [%]	300 ciclos gelo-degelo (300 dias de idade)	CV [%]	
BR	44,3	10,5	45,0	8,9	7,5	15,4	-83,4
B20R	35,6	5,3	42,7	4,2	5,3	19,9	-87,7
B50R	32,3	8,3	40,8	13,4	7,8	26,7	-80,9
B100R	31,4	1,9	39,2	3,3	0,0	0,0	-100,0
HBR	54,4	4,6	58,6	8,4	40,6	39,4	-30,6
HB20R	49,6	5,2	54,4	13,6	38,2	10,7	-29,8
HB50R	46,1	4,7	50,1	21,2	34,7	17,3	-30,8
HB100R	40,1	2,0	44,0	7,4	25,8	1,2	-41,3
HBRIA	47,9	2,0	55,8	3,3	34,2	12,3	-38,7
HB20RIA	44,7	7,9	49,8	15,3	34,0	10,6	-31,6
HB50RIA	37,4	7,3	45,0	1,7	31,6	10,1	-29,8
HB100RIA	30,7	3,5	37,2	4,8	21,6	8,1	-42,1

Houve, para todos os betões, um acréscimo na resistência à compressão de provetes prismáticos não submetidos a ciclos gelo-degelo, entre os 28 dias de idade e o instante em que se perfizeram 300 ciclos de gelo-degelo, como seria expectável, devido ao aumento da hidratação dos mesmos. Refere-se, uma vez mais, que os betões com uma relação a/c efectiva de 0,53, devido à sua grande degradação, apresentaram decréscimos na resistência à compressão muito significativos, entre 83,4 e 100%. A Figura 4.47 compara os resultados obtidos num provete de um betão corrente (B50R) e um betão de elevado desempenho (HBR). Como se pode verificar, o betão corrente apresenta uma perda de massa e de coesão elevada, enquanto o betão de elevado desempenho se mantém mais coeso, mesmo após 300 ciclos de gelo-degelo. A Figura 4.48 representa graficamente a variação da resistência à compressão das partes resultantes do ensaio à tracção por flexão, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFR, de provetes prismáticos ensaiados à tracção por flexão sem serem submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.



Figura 4.47 - Ensaio de resistência à compressão de um provete do tipo B50R após 300 ciclos de gelo-degelo (esquerda). Ensaio de resistência à compressão de um provete do tipo HBR após 300 ciclos de gelo-degelo (direita).

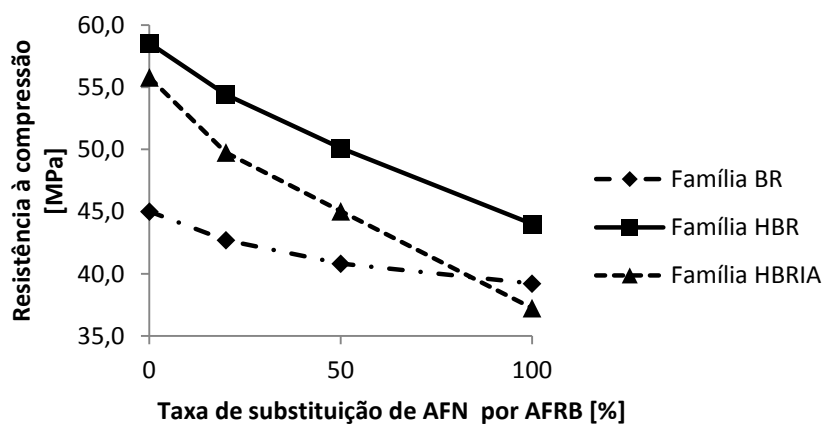


Figura 4.48 - Variação da resistência à compressão de provetes prismáticos ensaiados após 300 ciclos gelo-degelo, sem sofrerem a acção de ciclos gelo-degelo.

Em termos gerais, o comportamento observado (Figura 4.48), no que diz respeito à resistência à compressão de metades resultantes de provetes prismáticos não submetidos a ciclos gelo-degelo, é muito idêntico ao observado aos 28 dias de idade (§ 4.4.5). Como referido, existe um acréscimo em f_c em todos os betões devido à idade, sendo que o HB100RIA, tal como aos 28 dias de idade, apresenta uma resistência à compressão inferior à do B100R.

São apresentadas, nas Figura 4.49 e 4.50, resultados idênticos obtidos para partes resultantes de provetes prismáticos submetidos a ciclos acelerados de gelo-degelo.

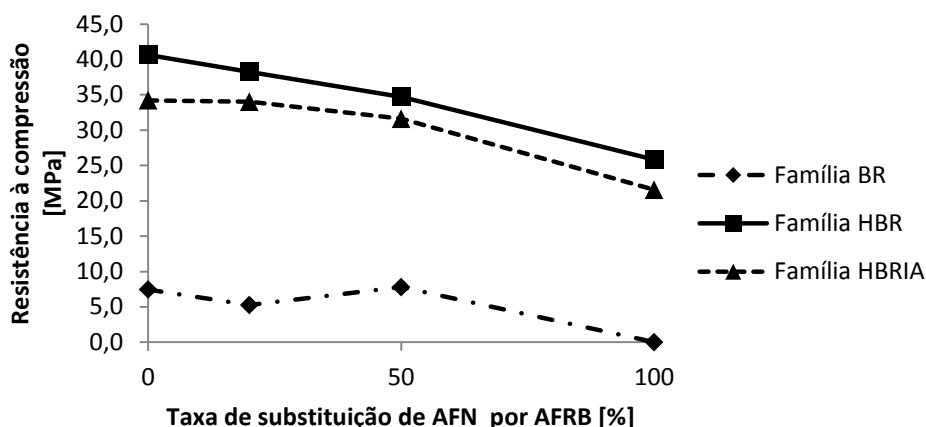


Figura 4.49 - Variação da resistência à compressão de provetes prismáticos ensaiados após 300 ciclos gelo-degelo.

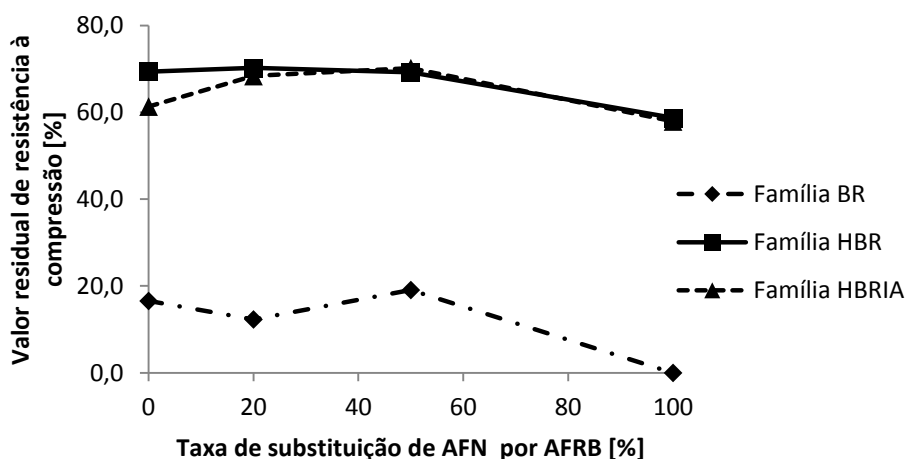


Figura 4.50 - Valor residual da resistência à compressão ao fim de 300 ciclos gelo-degelo.

Como se pode observar através das Figura 4.49 e 4.50, os betões da família BR apresentam resistências à compressão residuais muito reduzidas, que resultam da sua grande degradação analisada em pontos anteriores.

De resto, não se pode concluir acerca da influência dos agregados reciclados e do introdutor de ar nos betões produzidos, visto não existir uma tendência evidente num e noutro caso. No entanto, é expectável, com base nos resultados anteriormente analisados e nos agora obtidos, que os agregados reciclados, pelo menos, não

prejudiquem o betão em termos de resistência a ciclos de gelo-degelo. Nota-se que, tal como na resistência à tracção por flexão, apesar de a acção do gelo ser menos efectiva em betões com uma maior taxa de substituição de AFN por AFRB, para betões com menor resistência, ou seja, com mais agregados reciclados, os efeitos dessa acção podem ter maior influência em termos de resistência mecânica, justificando-se assim o comportamento observado.

4.4.12. Resistência a ciclos acelerados gelo-degelo com base na norma ASTM C666

Como referido, a norma ASTM C666 prevê a avaliação da resistência do betão a ciclos gelo-degelo com base na variação do módulo de elasticidade dinâmico e das variações de comprimento ao longo do tempo.

O factor de durabilidade, definido em § 3.7.7, é calculado com base no decréscimo do módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo e é, basicamente, outra forma de quantificar os resultados obtidos através das medições obtidas para o ensaio de propagação de ultrassons (§ 4.4.9). A norma indica um valor limite no decréscimo do módulo de elasticidade dinâmico de 40%, ou seja, um valor residual de 60%.

No Quadro 4.20, estão presentes os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, para variados ciclos gelo-degelo, tendo estes sido calculados com base nos valores apresentados em § 4.4.9, de acordo a expressão 3.39 definida em § 3.7.7.4.

Quadro 4.20 - Valor residual do módulo de elasticidade dinâmico ao fim de vários ciclos gelo-degelo.

Betão	Valor do módulo de elasticidade dinâmico [GPa]								
	Início	Δ 10	Δ 20	Δ 36	Δ 55	Δ 91	Δ 121	Δ 181	Δ 300
BR	54,0	51,3	50,9	50,4	47,4	36,6	15,2	12,1	-
B20R	49,8	49,6	48,8	48,9	45,7	38,5	17,1	16,9	-
B50R	47,0	45,0	44,7	44,8	43,8	43,6	42,3	17,4	-
B100R	43,2	42,8	42,5	41,6	41,5	39,0	38,6	15,6	-
HBR	58,9	55,8	55,4	55,2	54,6	54,4	53,9	52,7	50,2
HB20R	53,9	52,6	52,3	52,2	52,0	51,7	51,4	50,3	50,1
HB50R	51,4	50,1	49,9	49,6	48,9	48,7	48,6	48,4	47,7
HB100R	48,7	47,5	46,7	46,4	46,3	45,7	45,1	45,0	43,6
HBRIA	53,6	52,4	51,7	51,7	51,3	50,3	50,0	49,5	48,6
HB20RIA	51,1	50,0	49,0	48,9	48,8	48,3	47,2	47,0	46,8
HB50RIA	48,1	47,1	46,7	46,2	46,1	45,8	45,7	45,2	45,1
HB100RIA	43,6	43,5	42,8	42,7	42,3	41,8	41,8	41,5	41,3

Como se pode observar, no início dos ensaios, os betões da família HBR apresentam, para todos as taxas de substituição de AFN por AFRB, os valores de módulo de elasticidade dinâmico mais elevados, o que seria expectável, devido à sua maior compacidade. Os betões da família BR e HBRIA apresentam valores muito idênticos para cada taxa de substituição de AFN por AFRB. Uma vez que este parâmetro é calculado de acordo com a velocidade de propagação de ultrassons, a introdução de ar

provoca perdas visíveis no módulo de elasticidade dinâmico devido à menor velocidade de propagação dos ultrassons. A Figura 4.51 relaciona a variação do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB para as várias famílias de betões.

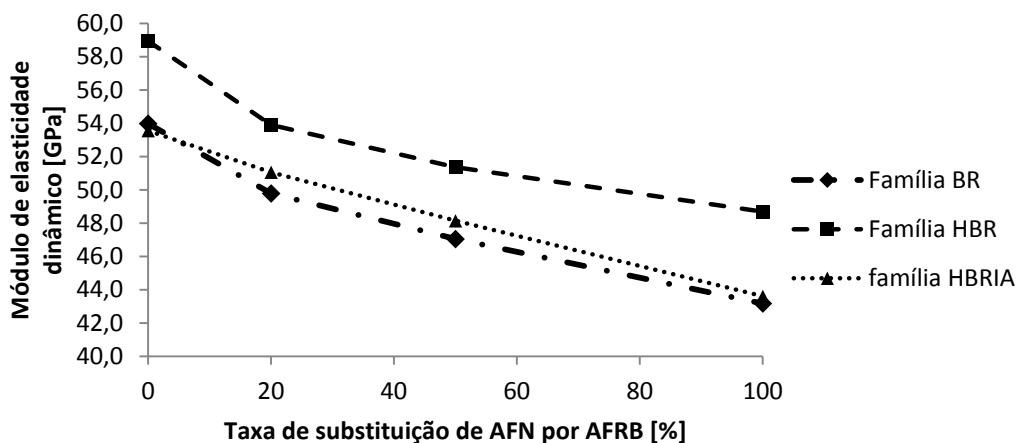


Figura 4.51 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB no início do ensaio.

Tal seria de esperar, existe um decréscimo no módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da taxa de substituição de agregados finos naturais por reciclados, devido aos últimos apresentarem uma maior porosidade e, portanto, menor rigidez. As semelhanças de valores entre a família BR e HBRIA levam a crer que o introdutor de ar provocou uma porosidade, em betões de elevado desempenho, equivalente à presente em betões correntes.

Interessa agora avaliar a durabilidade dos betões produzidos. No Quadro 4.21, são apresentados os valores residuais de E_d ao fim de vários ciclos de gelo-degelo. Como se pode verificar, os betões correntes fabricados com agregados reciclados apresentam, em termos gerais, um melhor comportamento ao longo do tempo do que o betão de referência. Por outro lado, nenhum desses betões possui uma resistência aceitável ao fim de 181 ciclos gelo-degelo, como analisado anteriormente.

Os betões de elevado desempenho com e sem introdutor de ar apresentam, ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, perdas no valor do módulo de elasticidade entre 3,7 e 15,9%. Conclui-se que, em termos gerais, a resistência dos betões a ciclos acelerados gelo-degelo depende mais da relação a/c efectiva do que da taxa de substituição de AFN por AFRB, tendo no entanto esta alguma relevância. Como seria de esperar, os resultados obtidos apresentam um reflexo das tendências observadas em §4.4.9, visto derivarem directamente dos resultados aí analisados. Assim sendo, a utilização de agregados reciclados mostrou ser ligeiramente benéfica em termos de resistência dos betões aos ciclos gelo-degelo.

Na Figura 4.52, são representados graficamente os valores presentes no Quadro 4.21 para a família de betões BR e, nas Figuras 4.53 e 4.54, são representados os resultados idênticos para as famílias de betões HBR e HBRIA.

Quadro 4.21 - Valor residual do módulo de elasticidade dinâmico, em percentagem, para os vários tipos de betão, ao fim de determinados ciclos de gelo-degelo.

Betão	Valor residual do módulo de elasticidade dinâmico [%]							
	Δ 10	Δ 20	Δ 36	Δ 55	Δ 91	Δ 121	Δ 181	Δ 300
BR	95,0	94,3	93,4	87,9	67,8	28,1	22,4	-
B20R	99,7	98,1	98,2	91,8	77,3	34,4	34,0	-
B50R	95,6	95,0	95,1	93,1	92,7	90,0	37,1	-
B100R	99,1	98,3	96,3	96,1	90,3	89,5	36,2	-
HBR	94,7	93,9	93,6	92,7	92,4	91,5	89,4	85,2
HB20R	97,6	97,1	96,8	96,4	96,0	95,3	93,4	92,9
HB50R	97,6	97,1	96,7	95,1	94,8	94,7	94,2	92,9
HB100R	97,6	96,0	95,4	95,1	93,9	92,7	92,4	89,5
HBRIA	97,9	96,6	96,4	95,8	94,0	93,4	92,3	90,7
HB20RIA	97,9	95,9	95,7	95,6	94,5	92,5	92,0	91,7
HB50RIA	97,8	97,0	96,0	95,7	95,1	94,9	93,9	93,6
HB100RIA	99,7	98,2	98,0	97,0	96,0	95,8	95,1	94,8

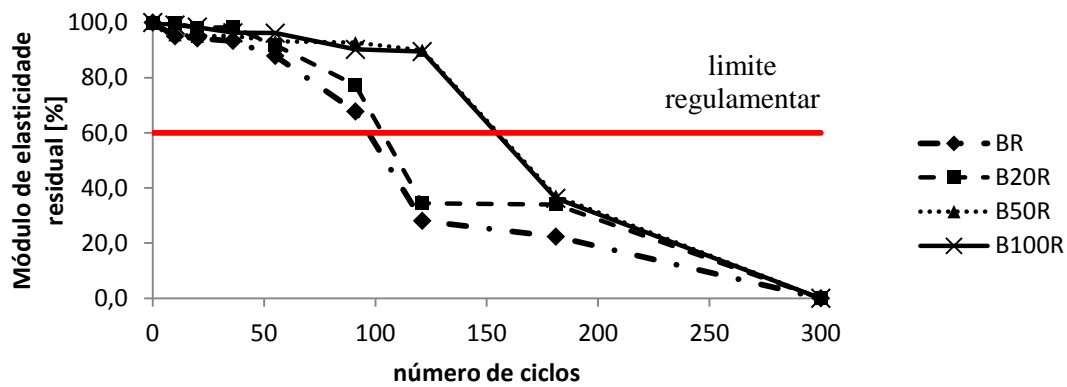


Figura 4.52 - Módulo de elasticidade dinâmico residual (%) ao longo de vários ciclos de gelo-degelo para a família BR.

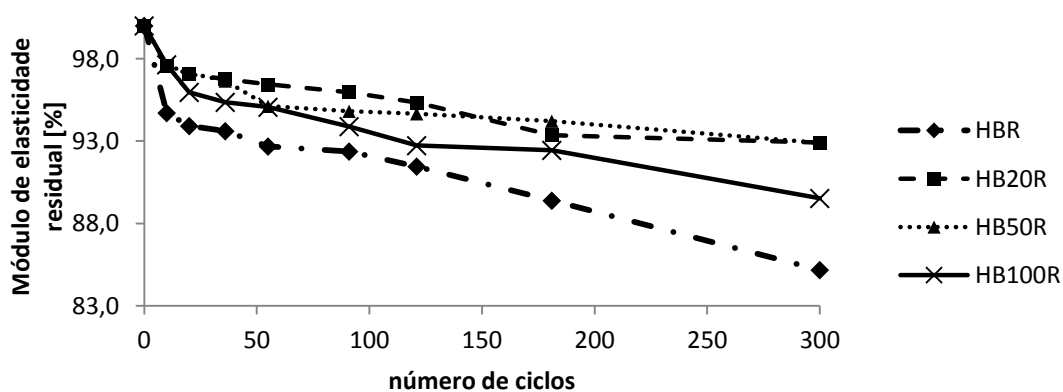


Figura 4.53 - Módulo de elasticidade dinâmico residual (%) ao longo de vários ciclos de gelo-degelo para a família HBR.

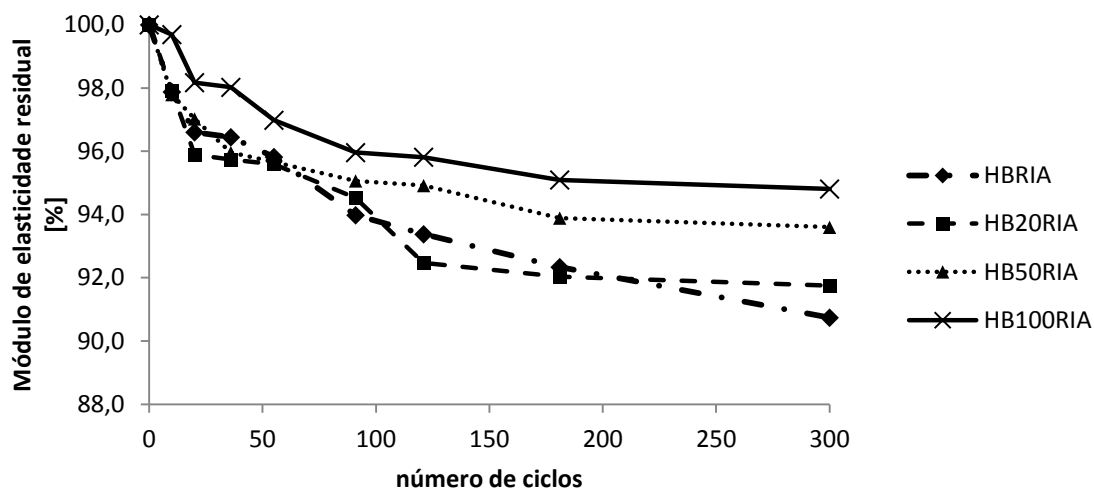


Figura 4.54 - Módulo de elasticidade dinâmico residual (%) ao longo de vários ciclos de gelo-degelo para a família HBRIA.

Na Figura 4.55, são apresentados os factores de durabilidade, ao fim de 300 ciclos, para todos os betões de elevado desempenho, verificando-se que os betões com uma relação a/c efectiva de 0,54 não são resistentes ao gelo-degelo.

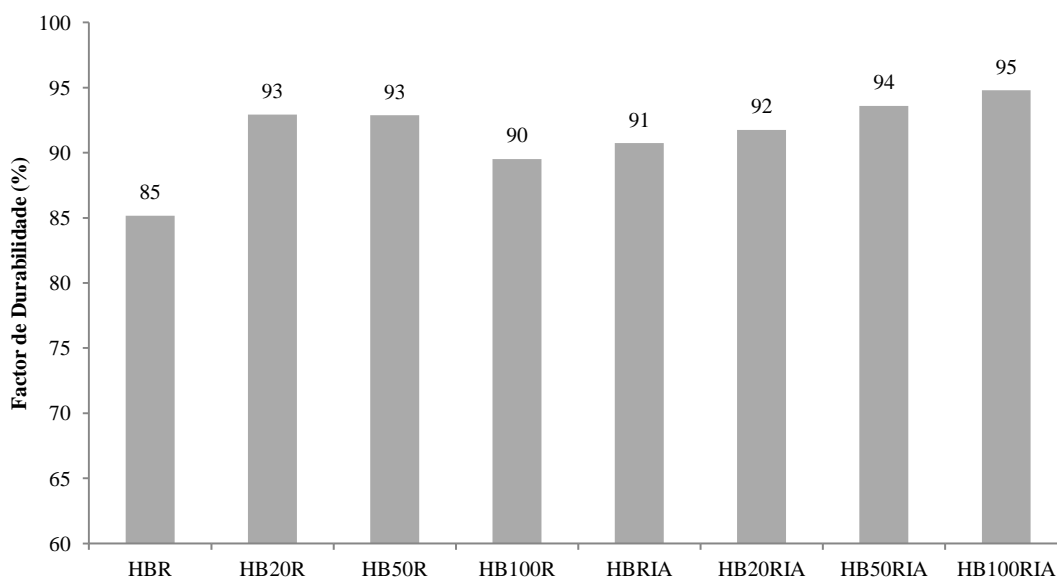


Figura 4.55 - Factor de durabilidade para os vários betões de elevado desempenho analisados.

Como se pode observar através da Figura 4.55, todos os betões de elevado desempenho fabricados com agregados finos reciclados de betão apresentam uma maior resistência à acção do gelo-degelo relativamente aos fabricados apenas com agregados naturais (HBR e HBRIA). O melhor desempenho dos betões com agregados reciclados pode resultar dos fenómenos descritos em §4.4.8. Não existe, no entanto, uma tendência evidente para este tipo de comportamento, verificando-se apenas que este tipo de betões são mais resistentes do que os fabricados apenas com AN mas o seu comportamento varia para diferentes taxas de substituição de AFN por AFRB. Não obstante, pode-se concluir que a utilização de agregados reciclados, pelo menos, não parece ser prejudicial.

4.5. Conclusões do capítulo

As propriedades dos agregados reciclados de betão, face aos AN, encontram-se dentro das tendências apontadas pela bibliografia (Hasaba et al. 1981; Hansen e Narud 1983; Topçu et al. 2002; Limbachiya et al. 2004; Evangelista e Brito 2007; Boltryk et al. 2009; Cabral et al. 2010), sendo mais porosos, tendo menor massa volúmica e maior capacidade de absorção de água. O mesmo se verifica para as propriedades dos betões fabricados com AFRB que apresentam uma tendência de diminuição das suas características (massa volúmica, resistência à compressão, tracção por flexão e módulo de elasticidade dinâmico), com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB. Apesar de alguns autores (Evangelista e Brito 2007; Boltryk et al. 2009) não terem verificado discrepâncias relevantes na resistência à compressão de betões fabricados com AFRB face aos fabricados apenas com AN, o mesmo não se verificou no presente estudo, em que essa tendência é evidente.

Em termos de durabilidade, os betões com agregados reciclados demonstraram uma menor resistência à degradação superficial, o que poderá indiciar que não deverão ser utilizados em pavimentos rodoviários, em que este fenómeno é condicionante (Verbeck e Langden 1960; Mehta e Monteiro 2006). No entanto, em relação ao comportamento intrínseco do betão, os agregados reciclados mostraram ser ligeiramente benéficos no que respeita à variação de comprimento, de velocidade de propagação dos ultrassons e de perdas de resistência à tracção. Contudo, não existe uma tendência evidente para esta melhoria de comportamento, podendo-se apenas admitir essa possibilidade. Ainda assim, à partida, os agregados reciclados não demonstram ser prejudiciais em termos de resistência aos ciclos gelo-degelo. Devido à grande variabilidade obtida nos resultados dos ensaios de resistência à compressão, após ciclos gelo-degelo, não é possível obter conclusões adicionais.

Em relação aos resultados obtidos através da norma ASTM C666, conclui-se que todos os betões de elevado desempenho, fabricados com agregados reciclados de betão, são duráveis. Os resultados obtidos por Zaharieva et al. (2004), para um betão fabricado com agregados grossos reciclados e agregados finos naturais e com a/c efectiva de 0,34, levaram à obtenção de um factor de durabilidade, ao fim de 300 ciclos, de aproximadamente 80% para condições de saturação iguais às do presente estudo. Assim sendo, comparando o betão fabricado pelos supracitados autores com o HB100R, cuja única diferença é ter sido fabricado com agregados finos reciclados ao invés de grossos e com uma relação a/c efectiva ligeiramente superior (0,35), supõe-se que os agregados finos reciclados de betão são menos prejudiciais do que os agregados grossos com a mesma origem, em termos de resistência a ciclos gelo-degelo, visto ter-se obtido no presente estudo um factor de durabilidade de 89%.

Por outro lado, comparando os presentes resultados com os obtidos por Limbachiya et al. (2004), que utilizou variadas taxas de substituição de AN por agregados grossos, conclui-se que os AFRB podem ser prejudiciais face aos AGRB, já que esses autores chegaram a factores de durabilidade, independentemente do valor da referida taxa,

sempre superiores a 96%. Note-se no entanto que, ao abordar os resultados obtidos por outros autores, há que ter em linha de conta as diferentes composições e condições de ensaio, que são, como seria de esperar, novas variáveis.

Ainda assim, como referido, todos os betões de elevado desempenho fabricados com AFRB apresentam uma boa resistência aos ciclos gelo-degelo, concluindo-se do presente estudo que o que mais afectou este parâmetro foi a relação a/c efectiva dos betões e não o tipo de agregados utilizados. Por último, refere-se que ainda não existe uma relação aceitável entre os resultados obtidos em ensaios acelerados e o comportamento expectável dos betões em ambiente real. Os ensaios em laboratório são muito severos e uma saturação total dos provetes, como foi o caso do presente estudo, raramente ocorre em ambiente natural. Se o período das estações secas for muito alargado, pode não existir sequer saturação do betão durante os períodos de inverno, não havendo, conseqüentemente, degradação do betão quando submetido a ciclos de gelo-degelo (Verbeck e Langden 1960, Mehta e Monteiro 2006, Bogas 2011).

5. Conclusões gerais

O presente trabalho teve como objectivo o estudo da influência da incorporação de AFRB em betões correntes e de elevado desempenho, ao nível das suas características mecânicas e da resistência ao gelo-degelo. Assim, no presente capítulo, são apresentadas as conclusões gerais referentes ao estudo realizado, sintetizando-se os principais resultados obtidos e as tendências analisadas em §4.

Em geral, verifica-se que os betões reciclados apresentam um comportamento mecânico inferior ao observado em betões de referência, com agregados naturais, que é directamente proporcional à taxa de substituição de AFN por AFRB. Em relação à resistência a ciclos gelo-degelo, os resultados indiciam que o comportamento dos betões com AFRB é, pelo menos, semelhante ao dos betões correntes

5.1. Propriedades dos AFRB e sua influência nos betões produzidos

Os agregados finos reciclados de betão, como seria expectável, apresentaram menor massa volúmica e menor baridade, bem como uma maior absorção de água após 24 horas (WA_{24}). Este comportamento deve-se à maior porosidade dos AFRB, resultante da argamassa residual presente na sua constituição. No Quadro 5.1, são comparadas as propriedades obtidas para os AFRB, com as obtidas para os AFN, verificando-se as tendências esperadas.

Quadro 5.1 - Comparação das propriedades obtidas para os AFRB com as obtidas para os AFN.

Propriedades dos agregados	Δ AFRB - AFN [%]	Tendência
Massa volúmica aparente (ρ_a)	-0,2	↓
Massa volúmica dos agregados secos em estufa (ρ_{rd})	-16,0	↓
Massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca (ρ_{ssd})	-10,0	↓
Absorção de água (WA_{24})	+ 7,4	↑
Baridade	- 18,2	↓
Volume de vazios (V_v)	+ 1,0	↑

Conclui-se assim, com base na bibliografia consultada (§2.4) e nos resultados agora apresentados, que as propriedades dos AFRB utilizados, provenientes de um betão corrente de classe de resistência C 25/30, se encontram dentro das tendência expectáveis. Verificou-se também que existe uma relação directamente proporcional entre o decréscimo da massa volúmica dos AFRB e o aumento da absorção de água ao fim de 24 h. Demonstra-se ainda que os agregados reciclados, quando convenientemente pré-saturados, não provocaram perdas acentuadas de trabalhabilidade nos betões produzidos, ao contrário do sugerido por outros autores (§2.5.3).

Verificou-se, para os betões produzidos, um decréscimo da massa volúmica com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB, o que é expectável, dado que de todos os constituintes do betão, os agregados apresentam a maior influência na massa

volúmica do mesmo (Mehta e Monteiro, 2006). Assim, devido à menor massa volúmica dos AFRB, o betões produzidos com este tipo de agregados terão, conseqüentemente, massas volúmicas inferiores. Verificaram-se também decréscimos nas propriedades mecânicas dos betões, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB, nomeadamente em termos de resistência à compressão, resistência à tracção e velocidade de propagação dos ultrassons. É apresentado, no Quadro 5.2, um resumo das variações obtidas para cada parâmetro estudado.

Quadro 5.2 - Variações e tendências obtidas para os vários betões produzidos em termos de massa volúmica, resistência à compressão aos 28 dias de idade, resistência à tracção aos 28 dias de idade e velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias de idade.

Betão	$\Delta \rho_{28d}$ [%]	Δ $f_{c,28d}$ [%]	Δ $f_{t,28d}$ [%]	$\Delta v_{us,28d}$ [%]
BR	-	-	-	-
B20R	-1,7	-0,5	-19,8	-3,1
B50R	-2,9	-5,6	-22,2	-5,4
B100R	-4,0	-14,1	-34,1	-8,4
HBR	-	-	-	-
HB20R	-0,7	-10,2	-15,2	-3,5
HB50R	-3,0	-16,8	-25,4	-5,1
HB100R	-3,9	-27,4	-36,2	-7,0
HBRIA	-	-	-	-
HB20RIA	-0,9	-9,0	-13,6	-1,8
HB50RIA	-1,7	-23,3	-16,3	-3,5
HB100RIA	-8,8	-33,8	-23,1	-7,0

Os decréscimos na resistência à tracção e compressão prendem-se directamente com a menor resistência mecânica dos agregados reciclados, que provocam conseqüentemente um decréscimo na resistência mecânica do betão. Os agregados reciclados, ao serem mais porosos, e por isso apresentarem menor rigidez, conduzem ainda a menores velocidades de propagação de ultrassons.

Em seguida, são referidas as principais conclusões obtidas nesta fase do estudo:

- os AFRB provocam perdas na resistências à tracção e compressão dos betões produzidos directamente proporcionais à sua taxa de incorporação;
- a massa volúmica e a velocidade de propagação de ultrassons diminuem com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB.

5.2. Resistência a ciclos acelerados de gelo-degelo de betões fabricados com AFRB

Neste ponto, são referidas as principais conclusões obtidas, relativas ao estudo da caracterização da durabilidade a ciclos gelo-degelo dos betões produzidos, nomeadamente no que se refere à influência dos AFRB na resistência a este tipo de acção.

Importa salientar que todos os betões correntes tiveram um desempenho não satisfatório ao fim de 300 ciclos gelo-degelo, excedendo, em todos os ensaios realizados, os valores máximos admissíveis de resistência ao gelo-degelo. Tal como sugerido por outros autores, verifica-se que uma relação a/c efectiva de 0,53 conduz a uma permeabilidade excessiva do betão, permitindo a saturação dos agregados e da matriz cimentícia, o que provoca uma degradação excessiva do betão, nas condições de saturação em que foi realizado o ensaio. Por outro lado, a matriz cimentícia é mais fraca, suportando pior as acções expansivas resultantes do gelo-degelo. Como referido por Verbeck e Langdren (1960), a maior permeabilidade dos agregados e da matriz cimentícia poderia ser favorável, no sentido em que permitiria mais facilmente a transmissão de tensões hidráulicas no interior do betão, adiando a rotura. No entanto, neste caso, a redução da relação a/c assume maior importância no aumento da capacidade resistente da matriz cimentícia e na redução da quantidade total de água congelável. De acordo com o ACI213R (2003), ainda não existe uma relação adequada entre os ensaios acelerados de gelo-degelo realizados em laboratório e o comportamento dos betões em ambiente real, sendo os primeiros geralmente mais severos. De facto, o procedimento A da ASTM C666, adoptado na presente dissertação, exige a permanência dos betões em meio aquoso durante toda a extensão do ensaio, situação que raramente ocorre na Natureza. Assim sendo, os betões estão mais sujeitos a atingirem a saturação no seu interior, sofrendo maior desgaste através da acção de gelo-degelo. Para os betões de elevado desempenho, decidiu-se atribuir um sistema de pontuação, em que o betão com melhor comportamento obtém a pontuação de 100 e os restantes obtêm pontuações directamente proporcionais ao seu nível de desempenho. Assim, para cada tipo de ensaio, são atribuídas pontuações dentro do intervalo estipulado, sendo a pontuação final a soma das pontuações obtidas em cada ensaio em separado. Estes valores são apresentados no Quadro 5.3. Os ensaios escolhidos para atribuição de pontuação são os de perda de resistência à tracção (Δf_t), perda de massa (Δm), variação de comprimento (Δl) e factor de durabilidade (DF). Optou-se por não incluir nestes resultados as perdas de resistência à compressão, devido às grandes variabilidades obtidas, fenómeno já explicado em §4.

Quadro 5.3 - Variações obtidas, ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, no ensaio de resistência à tracção por flexão, variação de massa, variação de comprimento e factor de durabilidade dos betões de elevado desempenho .

Betão	Δf_t [%]	Pont.	Δm [%]	Pont.	Δl [%]	Pont.	DF [%]	Pont.	Total
HBR	-30,6	97,4	-0,2	100,0	0,141	84,2	84,2	90,0	293,7
HB20R	-29,8	100,0	-0,2	100,0	0,080	92,9	92,9	99,3	310,5
HB50R	-30,8	96,8	-0,3	66,7	0,028	91,9	91,9	98,2	293,7
HB100R	-41,3	72,2	-0,6	33,3	0,029	89,1	89,1	95,2	231,7
HBRIA	-38,7	77,0	-0,2	100,0	0,036	89,1	89,1	95,2	297,2
HB20RIA	-31,6	94,3	-0,2	100,0	0,009	90,3	90,3	96,5	390,8
HB50RIA	-29,8	100,0	-0,3	66,7	0,021	93,6	93,6	100,0	309,5
HB100RIA	-42,1	70,8	-0,3	66,7	0,012	90,2	90,2	96,4	308,8

A partir do Quadro 5.3, verifica-se que, de uma forma geral, a utilização de agregados reciclados conduz a betões com resistências a ciclos gelo-degelo pelo menos tão

elevadas como as dos betões de referência. A única excepção é o betão HB100R que apresenta, em geral, um pior comportamento do que o betão de referência HBR. Note-se no entanto que esta análise é muito simplista, partindo do pressuposto de que todos os ensaios têm a mesma importância, e dependem de factores semelhantes. Por exemplo, da análise realizada em §4 e por comparação dos valores presentes no Quadro 5.3, conclui-se que, apesar de a acção de gelo-degelo ser menos efectiva nos betões com AFRB, os efeitos dessa acção, traduzidos pela perda de resistência à tracção por flexão e compressão, podem ser mais severos em betões de menores resistências, como é o caso do HB100R. Isto significa que para um nível de degradação igual nos betões de referência e nos betões reciclados, estes últimos teriam uma maior diminuição da sua resistência mecânica, devido à sua menor capacidade resistente. Nota-se também um maior efeito de "pop-out" nos betões reciclados, que leva a uma perda de massa mais acentuada. A incorporação de areias recicladas no betão, leva à obtenção de argamassas cimentícias de menor resistência. Assim, nos betões de elevado desempenho, notou-se um descasque superficial em zonas com agregados mais alongados, em que o fenómeno de exsudação ocorre com maior frequência. O acumular de água nestes pontos e o seu conseqüentemente congelamento, provoca uma rotura mais fácil em pastas com menores resistência, ou seja, com AFRB. Este efeito foi mais visível nos betões de elevada desempenho, uma vez que nos betões correntes a discrepância de resistência mecânica entre a argamassa residual presente nos agregados reciclados e a própria argamassa do betão é menos relevante.

O melhor comportamento intrínseco de betões fabricados com AFRB aos ciclos gelo-degelo pode relacionar-se com a maior dimensão crítica das areias recicladas face aos AFN, devido à sua maior permeabilidade, permitindo uma melhor dissipação das pressões hidráulicas criadas. Nos betões correntes, não é possível concluir acerca das vantagens ou desvantagens dos AFRB, visto a diferença entre a resistência da pasta cimentícia e da argamassa residual presente nas areias recicladas ser pouco significativa, levando a comportamentos idênticos em ambas. Nota-se, desse modo, uma degradação acentuada em qualquer um dos tipos de betão corrente, resultante da sua reduzida compacidade ($a/c = 0,53$). Em betões de elevado desempenho, este efeito é mais visível, devido à maior diferença entre as características dos AFRB e da matriz cimentícia. Os agregados reciclados, por serem mais porosos, deverão ser mais efectivos na dissipação das pressões hidráulicas, geradas durante os ciclos de gelo-degelo. As areias recicladas proporcionam também uma diminuição da distância crítica, ou seja, a distância que é necessário percorrer até se alcançar um local de dissipação de pressões. Por outro lado, a matriz cimentícia presente nos betões de elevado desempenho, por ser mais fina, pode provocar a migração da água presente nos AFRB para a própria pasta, evitando assim a saturação dos AFRB e reduzindo, conseqüentemente, a sua susceptibilidade ao gelo-degelo

O introdutor de ar provou ter um efeito ligeiramente benéfico em termos de resistência aos ciclos gelo-degelo. No entanto, devido aos betões de elevado desempenho apresentarem uma baixa permeabilidade e, conseqüentemente, uma boa resistência aos

ciclos gelo-degelo, não foi possível avaliar com rigor a influencia do IA. Prevê-se que o efeito da introdução de ar seja mais benéfico em betões correntes. Tendo em conta todos os resultados obtidos e a análise realizada em §4, é possível concluir do presente estudo que:

- a resistência aos ciclos gelo-degelo depende maioritariamente da permeabilidade do betão, ou seja, da relação a/c efectiva, sendo que, quanto menor for, mais resistente é o betão a este tipo de acção;
- os AFRB podem ser ligeiramente benéficos em termos de resistência a ciclos gelo-degelo, apesar de essa tendência nem sempre se verificar; os resultados obtidos no presente estudo sugerem que a utilização de AFRB, pelo menos, não prejudica a resistência ao gelo-degelo dos betões;
- a introdução de ar deverá ser mais justificável em betões de resistência corrente, visto que os betões de elevado desempenho já possuem, por si só, uma adequada resistência à acção do gelo-degelo;
- o efeito de "*pop-out*" é mais gravoso em betões com agregados reciclados, uma vez que a incorporação de AFRB conduz a argamassas de menor resistência; este efeito é agravado pontualmente em betões de elevada resistência, devido a fenómenos de exsudação que ocorrem em zonas com agregados mais alongados; em betões correntes, a degradação superficial é mais uniforme e gravosa, devido à menor qualidade e maior porosidade da própria pasta do betão;
- para uma taxa de substituição de 100% de AN por AFRB, os betões correntes e de elevado desempenho sem introdutor de ar apresentam uma maior perda de resistência mecânica do que os betões de referência; de facto, apesar de a acção de gelo-degelo ser mais importante nos betões fabricados apenas com AN, o efeito dessa acção pode ser mais gravoso nos betões reciclados, de menor resistência.

5.3. Propostas de desenvolvimento futuro

Como referido, o comportamento do betão, quando submetido à acção do gelo-degelo, é fortemente condicionado pela sua estrutura microscópica, nomeadamente pelas características do sistema de vazios presente na matriz cimentícia, i.e, tamanho dos poros e sua distribuição, bem como pela porosidade, permeabilidade, resistência mecânica e distribuição dos poros no interior dos agregados que o constituem (Verbeck e Landgren 1960, Mehta e Monteiro 2006, Bogas 2011). Desta forma, seria importante avaliar o comportamento microscópico do betão, quando submetido a ciclos acelerados de gelo-degelo, bem como a resistência isolada dos AFRB quando submetidos a essa acção. Os mecanismos de degradação de betões fabricados com AFRB, quando submetidos à acção do gelo-degelo, serão apenas compreendidos na totalidade quando for possível avaliar de uma forma concreta estes processos, ou seja, saber exactamente quando ocorre a saturação dos agregados presentes no interior do betão e como se transmitem as pressões hidráulicas, resultantes do congelamento da água, no interior do betão.

Será também relevante estudar o comportamento de betões fabricados com AFRB provenientes de betões com origens distintas. Em relação aos adjuvantes utilizados, foi notório que o introdutor de ar teve pouca influência em termos de durabilidade a ciclos acelerados de gelo-degelo de betões de elevado desempenho, visto a sua baixa permeabilidade permitir, à partida, um melhor desempenho, pelo que será interessante estudar o efeito deste adjuvante em betões de resistência correntes.

Em termos económicos e sociais, será importante promover a utilização deste tipo de agregados através de um conhecimento científico mais abrangente, tornando-os estruturalmente e economicamente viáveis. Tendo em atenção os pontos acima referidos, são propostas as seguintes linhas de desenvolvimentos futuros:

- estabelecer relações fiáveis entre os ensaios acelerados laboratoriais e o comportamento dos betões em ambiente real;
- estudar a durabilidade a ciclos gelo-degelo de betões de resistência corrente produzidos com um agente introdutor de ar (IA);
- estudar o comportamento microscópico dos AFRB quando submetidos a ciclos gelo-degelo;
- produzir e estudar betões de elevado desempenho produzidos com AFRB provenientes de betões com argamassas de diferentes composições;
- avaliar a relação custo-benefício da introdução de AFRB no fabrico de betão;
- actuar perante os órgãos responsáveis de modo a chegar a um plano legislativo coerente e pormenorizado para a utilização de AFRB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artigos, teses e conferências

- Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.** *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC.* Cement & Concrete Composites, No 24, p. 269-279, (2002).
- Alves, F.** *Betões com agregados reciclados -Levantamento do “state-of-the-art” experimental nacional.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, (2007).
- Appleton, J.** *Estruturas de Betão.* Volume 1 e 2. Edições Orion, (2013).
- A. Gökce, S. Nagataki, M. Hisada, T. Saeki.** *Durability of recycled aggregate concretes subjected to freezing and thawing: Impact of crushed concrete characteristics, II.* International Symposium, Cement and Concrete Technology in the 2000, vol. 1, Istanbul, Turkey, pp. 371– 381, (2000).
- Boltryk, M., Malaszkiwicz, D., Pawluczuk, E.** *Technical Properties of Recycled Aggregate Concrete.* projects No S/IIB/1/05 and S/IIB/1/06, Technical University of Bialystok, (2009).
- Bogas JA.** *Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida.* Lisboa: Tese de doutoramento em engenharia civil. Instituto Superior Técnico, (2011).
- Brito, J., Alves, F.** *Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research,* Materials and Structures, 43:35-51, (2010).
- Brito, J.** *Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões.* Lisboa: Lição de Síntese. Instituto Superior Técnico, (2005).
- Cabral, A., Schalch V., Molin, D. Ribeiro J.** *Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete.* Construction and Building Materials 24, 421–430, (2010).
- Coutinho, A.S., Gonçalves, A.** *Fabrico e Propriedades do betão.* LNEC, volume 3, (1994).
- Envangelista, L., Brito, J.** *Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates.* Cement & Concrete Composites 32, 9–14 (2007).
- Ferreira, L.** *Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão: Influência da pré-saturação.* Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, (2011).

- Gahafoori, N., Smith, D.R.** *Comparison of ASTM and Canadian Freeze-thaw durability tests.* Pave Israel (1996).
- Gonçalves, A., Esteves, A., Vieira, M.** *Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability.* LNEC, Portugal, (2004).
- G.Verbeck, R. Landgren.** *Influence of Physical Characteristics of Aggregates on Frost Resistance of Concrete.* Portland Cement Association (1960).
- Hansen T.C.** *Recycling of Demolished Concrete and Masonry.* Reino Unido (1992).
- Hasaba, S., Kawamura, M., Torli, L., Takemoto, L.** *Drying Shrinkage of recycled-aggregate concrete.* ACI Journal 82(5): 648 - 652, (1982).
- Jacobsen, S., Sellevold, E.J., Matala, S.** *Frost durability of high strength concrete: effect of internal cracking on ice formation.* Cement and Concrete Research 26 (No. 6), 919 e 931, (1996).
- Janssen, D., Snyder, M.,** *Resistance of Concrete to Freezing and Thawing,* Strategic Highway Research Program, (1994).
- Khatib J.M.** *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate.* Cement and Concrete Research, No 35, p. 763-769, (2005).
- Khalaf FM, DeVenny Alan S.** *Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate.* ASCE J Mater Civil Eng 331–40, (2004).
- Kozikowski Jr, R.,** *Air-Void Clustering: A Rare Problem Explained.* Concrete Technology Today, (2005).
- Limbachyia, M., Koulouris, A., Fried, A.,** *Performance of recycled aggregate concrete.* RILEM Internacional Symposium of Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development, RILEM Publications SARL, 127-136, (2004).
- Lovato, P., Possan., E., Molin, Denise., Masuero, Â., Ribeiro, J.,** *Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes,* Construction and Building Materials 26 437–447, (2012).
- Mehta, P., Monteiro, P.** *Concrete: microstructure, properties and materials.* 3rd ed. McGraw Hill, (2006).
- Meyer, C.** *The greening of the concrete industry.* Cement and Concrete Compositions Concrete Compositions 31 (8), 601 e 605, (2009).
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D.** *Concrete.* Second Edition. Upper Saddle River, (2003).
- Neville AM.** *Properties of concrete.* 4th ed. London: Longman; 316, (1995).

- Palliere, A.M.** *Applications of Admixtures in Concrete*. E & F N Spon, London. 20, (1994).
- Pereira, P.** *Betões estruturais com a incorporação de agregados finos reciclados de betão – Influência de superplastificantes*. Lisboa: Tese de mestrado em engenharia civil. Instituto Superior Técnico, (2010).
- Petkovic, G., Mehus, J., Myren, S.** *Recycled Concrete Aggregate – Durability Aspects*. Overview of research conducted as a part of the Norwegian Roads Recycled Materials R&D Program (2003).
- Pigeon, M., Pleau, R., Aïtcin, P.C.** *The deicer salt resistance of concrete made of supplementary cementing materials*. Rapport GCS-96-04, Université Laval (1996).
- Józwiak-Niedzwiedzka, D.** *Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate*, 2004 Cement & Concrete Composites 27, 709–715, (2005).
- Rahal, K.** *Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*, Building and Environment 42, 407–415, (2007).
- Rao, A., Jha, K., Misra, S.** *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*. Resources. Conservation and Recycling 50, 71–81, (2007).
- Richardson, A., Coventry, K., Bacon, J.** *Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete*, Journal of Cleaner Production 19, 272-277, (2011).
- Shigematsu, A., Sato, R., Nukushina, T., Kimura, M.**, 2010. *Improvement of properties of B-type blast furnace slag cement concrete by internal curing used ceramic roof material waste as a part of coarse aggregate*. Second International Conference on Sustainable Construction Technologies, Ancona, Italy, vol. 1, pp. 95 e 105, (2010).
- Rønning, T.** *Freeze-Thaw Resistance of Concrete Effect of: Curing Conditions, Moisture Exchange and Materials*. The Norwegian Institute of Technology (2001).
- S.W. Forster**, *Recycled concrete as aggregate*, Concr. Int. Des. Constr. 8, 34– 40, (1986).
- S. Frondistou-Yannas**, *Waste concrete as aggregate for new concrete*, ACI J. Proc. 74, 373–376, (1977).
- T.D. Hansen and H. Narud.** *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate*. ACI Concr. Int. Des. Const. 5, 79-83 (1983).
- Topçu, I.B.** *Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete*. Cement and Concrete Research, 27(12), 1817-1823, (1997).

Topçu, İ., Sengel, S., *Properties of concretes produced with waste concrete aggregate,* Cement and Concrete Research 34, 1307–1312, (2004).

Topçu, İ., Gunçan, N., *Using Waste Concrete as Aggregate,* Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7. pp. 1385-1390, (1995).

Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Wirquin, E. *Frost resistance of recycled aggregate concrete.* Cement and Concrete Composites 25 (2), 223 e 232, (2004).

Normas e Especificações

ACI 201.2R-01. *Guide to Durable Concrete.* ACI Committee, (2001).

ACI 365.1R-00. *Service life prediction.* ACI Committee, (2000).

ACI 213R-03. *Guide for structural lightweight-aggregate concrete.* ACI committee (2003)

ASTM C 666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Proc. B, 1997.

BS 12: 1996, Specification for Portland cement, London: British Standards Institution, 1996.

LNEC E 237 (1970) - Agregados: Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles. LNEC, Lisboa.

LNEC E 393 (1993) - Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. LNEC, Lisboa.

LNEC E397 (1993)- Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC, Lisboa.

NP EN 197-1 (2001)- Cimento. Parte 1 - Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. IPQ, Lisboa.

NP EN 933-1 (2000) - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. IPQ, Lisboa.

NP EN 933-2 (1999) - Ensaios para a determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. IPQ, Lisboa.

NP EN 933-4 (2002) - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma. IPQ, Lisboa.

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

- NP EN 1097-6 (2003)** - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. IPQ, Lisboa.
- NP EN 12350-1 (2009)** - Ensaio do betão fresco. Parte 1: Amostragem. IPQ, Lisboa.
- NP EN 12350-2 (2009)** - Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento. IPQ, Lisboa.
- NP EN 12350-6 (2009)** - Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica. IPQ, Lisboa.
- NP EN 12390-1 (2003)** - Ensaio do betão endurecido Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes. IPQ, Lisboa.
- NP EN 12390-2 (2009)** - Ensaio do betão endurecido Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. IPQ, Lisboa.
- NP EN 12390-4 (2003)** - Ensaio do betão endurecido Parte 4: Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio. IPQ, Lisboa.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A - Ficha técnica do superplastificante utilizado.....	A.1
Anexo B - Ficha técnica do introdutor de ar utilizado.....	A.3
Anexo C - Análise granulométricas da brita 2 e brita 1.....	A.5
Anexo D - Valores para o cálculo da massa volúmica e absorção de água dos agregados.....	A.7
Anexo E - Valores para o cálculo do desgaste de Los Angeles.....	A.9
Anexo F - Valores para o cálculo da massa volúmica aos 28 dias de idade.....	A.11
Anexo G - Valores para o cálculo da resistência à compressão em cubos de 150 mm de aresta	A.13
Anexo H - Valores para o cálculo da resistência à compressão em cubos de 100 mm de aresta	A.15
Anexo I - Valores para o cálculo da resistência à tracção por flexão aos 28 dias de idade.....	A.17
Anexo J - Valores para o cálculo da resistência à compressão das metades resultante do ensaio à tracção por flexão aos 28 dias.....	A.19
Anexo K - Valores da variação de massa ao longo de vários ciclos gelo-degelo.....	A.21
Anexo L - Valores da variação de comprimento ao longo de vários ciclos.....	A.23
Anexo M - Valores da velocidade de propagação de ultrassons.....	A.25
Anexo N - Valores da resistência à tracção ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, para provetes que sofreram e que não sofreram essa acção.....	A.27
Anexo O - Valores da resistência à compressão ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, para provetes que sofreram e que não sofreram essa acção.....	A.29

Anexo A - Ficha técnica do superplastificante utilizado



The Chemical Company

GLENIUM[®] SKY 548

Características técnicas	
Função principal:	Superplastificante / Redutor de água de alta actividade
Função secundária:	Acelerador de endurecimento
Efeitos secundários:	Risco de segregação com sobredosagem
Marcação CE:	Segundo NP EN 934-2 como T3.1, T3.2 e T7
Aspecto:	Líquido turvo ligeiramente amarelado
Densidade relativa (20°C):	1.038 ± 0,02 g/cm ³
pH:	6 ± 1
Viscosidade Brookfield (20°C):	< 70 cps
Teor em iões cloreto:	< 0,1%
Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.	

Modo de aplicação

- GLENIUM SKY 548 é um adjuvante líquido pronto a usar que deve ser adicionado ao betão durante a mistura. Os melhores resultados são obtidos quando o adjuvante é adicionado após todos os restantes componentes e após a adição de pelo menos 80% do total de água de mistura. Evitar a adição do adjuvante aos materiais secos
- Misturar durante pelo menos 60 segundos, depois da introdução do GLENIUM SKY 548 por forma a obter uma dispersão homogénea.
- Continuar a mistura e ajustar a quantidade de água para obter a trabalhabilidade requerida.

NOTA:

A presente Ficha Técnica serve, assim como as demais recomendações e informação técnica, unicamente para a descrição das características do produto, modo de utilização e suas aplicações. Os dados e informações reproduzidos têm por base os nossos conhecimentos técnicos adquiridos através de biógrafos, ensaios de laboratório e através da prática.

Os dados de consumo e dosificação que figuram nesta ficha técnica, são baseados na nossa própria experiência, pelo que são susceptíveis de variações devido a diferentes condições de obra. Os consumos e dosificações reais deverão determinar-se através de ensaios prévios sendo esta responsabilidade do cliente.

Para um acompanhamento adicional, o nosso serviço técnico, está à sua disposição.

BASF Portuguesa, S.A. reserva o direito de modificar a composição dos produtos, sempre e quando estes continuem cumprindo as características descritas na Ficha Técnica.

Outras aplicações do produto que não se enquadram com as indicadas, não serão da nossa responsabilidade.

Outorgamos garantia em caso de defeito na qualidade de produção dos nossos produtos, ficando excluídas as reclamações adicionais, sendo da nossa responsabilidade tão só a de compensar o valor de mercado da fornecida.

Deve ser tido em conta as eventuais reservas correspondentes a patentes ou direito de terceiros.

Data de emissão 10/06/2011

A presente ficha técnica perde a sua validade com a emissão de uma nova.

Compatibilidade

GLENIUM SKY 548 é compatível e recomendado para utilização com:

- RHEOMATRIX para produção de Smart Dynamic Concrete;
- RHEOMIX 820 MA, adjuvantes para produção de betão reodinâmico;
- MICRO-AIR adjuvante introdutor de ar, para melhorar a resistência aos ciclos de gelo-degelo (classe de exposição XF 1 a XF 4, EN 206 – 1);
- MEYCO MS 610, microsilica para betão de maiores performances e de maior durabilidade em ambientes quimicamente agressivos (classe de exposição XA 1 a XA 3, EN 206 – 1);
- Agente desmoldante RHEOFINISH para remoção de cofragens e para melhorar acabamentos arquitectónicos.

GLENIUM SKY 548 não é compatível com os superplastificantes RHEOBUILD.



Glenium Sky 548 Página 2 de 2

BASF Portuguesa, S.A.

Sede: Rua 25 de Abril, n.º 1

2680-536 PRIOR-VELHO

Tel: 21 949 99 00 – Fax: 21 949 99 4549

Fábrica: Rua de S. Sebastião, 57 – Cabra Figa

2635-047 RIO DE MOURO

Tel: 21 915 85 50 – Fax: 21 915 85 52

Delegação Norte: Rua Manuel Pinto de Azevedo, 626

4100-320 PORTO

Tel: 22 615 96 00 – Fax: 22 617 75 10

www.basf.pt

Anexo B - Ficha técnica do introdutor de ar utilizado



The Chemical Company

MICRO-AIR[®] 100

Air-entraining admixture for concrete

Description

MICRO-AIR 100 is an air-entraining admixture, which creates ultra-stable air bubbles that are strong, small and closely spaced.

Applications

Entraining a controlled air content in a wide range of concrete types :

- Normal mix designs.
- Low slump concrete.
- Concrete containing high carbon content fly ash.
- Concrete containing large amounts of fine materials.
- Concrete using high-alkali cements.
- High temperature concrete.
- Concrete with extended mixing times.

Advantages

MICRO-AIR 100 is especially useful in the types of concrete known for their difficulty to entrain and maintain the air content desired. Entrainment of the optimum air content in concrete results in the following improvements to quality:

- Increased freeze / thaw resistance.
- Reduced permeability - increased watertightness.
- Reduced segregation and bleeding.
- Improved plasticity and workability.
- Increased resistance to scaling.
- Greatly improved stability of air entrainment.
- Ready to use - solution is at optimum strength for accurate dispensing.

MICRO-AIR 100 is compatible with concrete containing other admixtures or admixture systems - water-reducers, high-range water reducers, accelerators, retarders, densifiers and water repellents. It also increases the entrained air content of concrete made with air-entraining Portland Cement.

The use of MICRO-AIR 100 with BASF admixtures forms a desirable combination for producing the highest quality, normal or lightweight concrete.

Packaging

MICRO-AIR 100 is supplied in 210 litre drums and bulk delivery as appropriate.

Typical properties*

Specific gravity:	0.986 - 1.036
pH:	10.5 - 12.5
Colour:	Amber - brown
Chloride content:	Nil to BS 5075: 1982
Flash point:	Not applicable
Freeze point:	-1°C

Standards

MICRO-AIR 100 meets the requirements of:

ASTM C-260-86

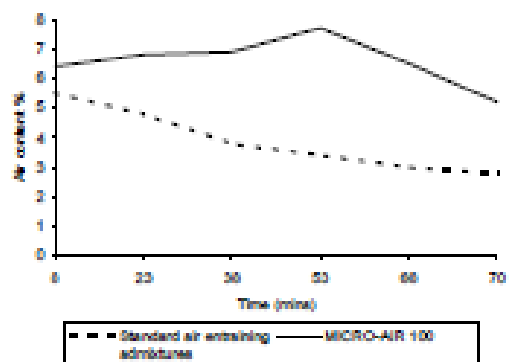
AASHTO M-154

CRD-C 13-77

BS 5075: 1982 Part 2

DIN 1048 Part 1

Figure 1 Air content vs mixing time



1. In accordance with ASTM C-182: 3 minutes mix, 3 minutes rest followed by 2 minutes final mixing.
2. 13 minutes agitation and 2 minutes mixing.
3. Retempered and 2 minutes mixing time.

Adding Value to Concrete

Anexo C - Análise granulométricas da brita 2 e brita 1

Análise granulométrica da brita 2									
Peneiro [mm]	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Valores médios		
	massa retida [g]	% retida	massa retida [g]	% retida	massa retida [g]	% retida	valor médio retido	valor médio acumulado [%]	valor médio passado acumulado [%]
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
22,4	937,6	9,8	1085,8	11,2	919,8	9,3	10,1	10,1	89,9
16,0	5960,7	62,3	5797,2	59,8	5845,2	59,1	60,4	70,6	29,4
11,2	2602,4	27,2	2704,7	28,7	2947,3	29,8	28,2	98,8	1,2
8,0	47,8	0,5	77,6	0,0	138,5	1,4	0,9	99,7	0,3
5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	0,3
4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	0,3
2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	0,3
1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	0,3
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	0,3
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	0,3
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	0,3
Refugo	19,1	0,2	29,1	0,3	39,6	0,4	0,3	100,0	0,0
TOTAL	9567,8	100,0	9694,3	100,0	9890,4	100,0			

Análise granulométrica da brita 1									
Peneiro [mm]	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Valores médios		
	massa retida [g]	% retida	massa retida [g]	% retida	massa retida [g]	% retida	valor médio retido	valor médio acumulado [%]	valor médio passado acumulado [%]
31,5	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0,0	100,0
16,0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0,0	100,0
11,2	546,4	18,9	519,6	17,7	513,3	16,5	17,7	17,7	82,3
8,0	821,0	28,4	769,1	26,2	821,2	26,4	27,0	44,7	55,3
5,6	901,9	31,2	1068,5	36,4	1060,7	34,1	33,9	78,6	21,4
4,0	485,7	16,8	504,9	17,2	603,5	19,4	17,8	96,4	3,6
2,0	124,3	4,3	67,5	2,3	108,9	3,5	3,4	99,8	0,2
1,0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	99,8	0,2
0,5	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	99,8	0,2
0,1	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	99,8	0,2
0,1	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	99,8	0,2
Refugo	11,6	0,4	5,9	0,2	3,1	0,1	0,2	100,0	0,0
TOTAL	2890,8	100,0	2935,5	100,0	3110,7	100,0			

Anexo D - Valores para o cálculo da massa volúmica e absorção de água dos agregados

Agregados finos naturais			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
M ₁ [g]	1380,7	1450,2	1431,7
M ₂ [g]	2530,7	2570,8	2560,5
M ₃ [g]	1677,7	1676,9	1677,4
M ₄ [g]	1359,4	1425,4	1407,2

Agregado finos reciclados			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
M ₁ [g]	1295,1	1258,4	1278,2
M ₂ [g]	2400,0	2387,1	2444,2
M ₃ [g]	1678,3	1677,4	1677,7
M ₄ [g]	1187,4	1537,2	1174,5

Brita 1			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
M ₁ [g]	3574,2	3513,2	3583,4
M ₂ [g]	7465,3	7446,0	7453,0
M ₃ [g]	5256,6	5250,4	5248,2
M ₄ [g]	3550,2	3490,2	3560,2

Brita 2			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
M ₁ [g]	3305,2	3305,2	3370,4
M ₂ [g]	7331,9	7401,2	7350,0
M ₃ [g]	5256,3	5256,3	5239,0
M ₄ [g]	3258,3	3414,3	3350,3

Anexo E - Valores para o cálculo do desgaste de Los Angeles

Agregado	Massa retida no peneiro de 12,5 mm [g]	Massa passante no peneiro 12,5 mm [g]	Massa retida no peneiro 1,6 mm - <i>m</i> [g]
Brita 2	2001,3	3002,8	2820,1
Brita 1	2003,2	3001,0	3075,0

Anexo F - Valores para o cálculo da massa volúmica aos 28 dias de idade

Betão	Provete	Massa (kg)	Massa volúmica (kg/m³)
BR	1	7,9	2354,1
	2	8,0	2366,2
	3	8,1	2386,7
B20R	1	7,9	2339,3
	2	7,9	2339,9
	3	7,8	2320,6
B50R	1	7,7	2294,8
	2	7,7	2284,4
	3	7,8	2314,1
B100R	1	7,6	2266,4
	2	7,7	2280,0
	3	7,7	2291,6
HBR	1	8,2	2442,6
	2	8,2	2435,6
	3	8,3	2459,0
HB20R	1	8,2	2419,8
	2	8,2	2418,8
	3	8,0	2384,1
HB50R	1	8,0	2363,6
	2	8,0	2370,7
	3	8,0	2360,0
HB100R	1	7,8	2323,7
	2	8,0	2355,7
	3	7,9	2341,7
HBRIA	1	8,0	2371,9
	2	8,0	2374,5
	3	8,1	2394,7
HB20RIA	1	7,9	2337,6
	2	8,0	2368,0
	3	8,0	2367,1
HB50RIA	1	7,9	2340,4
	2	7,8	2318,2
	3	7,8	2324,7
HB100RIA	1	7,6	2248,3
	2	7,6	2248,3
	3	7,7	2284,4

Anexo G - Valores para o cálculo da resistência à compressão em cubos de 150 mm de aresta

Betão	Provete	7 dias			28 dias			90 dias		
		Tensão (MPa)	DESVAP	CV [%]	Tensão (MPa)	DESVAP	CV [%]	Tensão (MPa)	DESVAP	CV [%]
BR	1	39,3	0,9	2,1	48,9	1,1	2,1	57,8	2,1	3,8
	2	41,0			50,9			53,6		
	3	40,2			50,6			56,1		
B20R	1	38,4	0,2	0,6	49,2	2,1	2,0	55,6	0,9	1,6
	2	37,9			-			55,2		
	3	38,0			50,6			53,9		
B50R	1	39,1	1,4	3,8	47,2	1,3	2,7	54,6	3,3	0,3
	2	38,7			46,1			-		
	3	36,4			48,7			54,9		
B100R	1	35,1	1,1	3,1	42,5	1,1	2,5	50,1	1,7	3,5
	2	34,9			42,4			51,0		
	3	33,2			44,3			47,6		
HBR	1	67,6	1,4	2,0	82,1	1,0	1,3	84,4	1,1	1,4
	2	65,0			80,6			82,2		
	3	67,1			80,2			83,9		
HB20R	1	65,8	1,2	1,8	73,6	1,5	2,0	78,2	4,5	0,9
	2	64,5			71,0			-		
	3	66,9			73,5			79,2		
HB50R	1	63,4	2,1	3,3	68,8	2,0	3,0	68,8	1,5	2,2
	2	59,8			68,3			67,4		
	3	63,3			65,0			70,4		
HB100R	1	51,9	1,0	1,9	61,9	2,7	4,6	64,3	4,8	2,9
	2	50,7			57,2			66,9		
	3	50,0			57,3			-		
HBRIA	1	58,0	0,8	1,4	69,2	1,2	1,7	68,6	5,8	6,4
	2	57,7			67,2			75,1		
	3	59,2			67,2			-		
HB20RIA	1	47,9	1,5	3,2	64,4	6,6	6,0	60,3	1,2	1,9
	2	50,6			59,2			62,6		
	3	48,0			-			61,0		
HB50RIA	1	46,6	1,3	2,9	53,5	1,6	3,1	53,0	4,1	7,3
	2	44,8			52,4			60,6		
	3	47,3			50,3			54,1		
HB100RIA	1	39,5	1,4	3,5	44,7	3,5	0,7	51,9	1,8	3,7
	2	38,2			45,1			49,6		
	3	36,8			-			48,3		

Anexo H - Valores para o cálculo da resistência à compressão em cubos de 100 mm de aresta

Betão	7 dias			28 dias		
	Tensão (MPa)	DESVAP	CV [%]	Tensão (MPa)	DESVAP	CV [%]
BR	43,9	1,2	2,9	50,2	1,9	3,7
	41,7			51,0		
	42,0			53,8		
B20R	42,9	0,4	1,0	50,7	1,1	2,1
	42,2			48,8		
	43,0			49,0		
B50R	43,3	0,9	2,1	50,1	1,5	3,0
	42,1			47,7		
	43,9			50,5		
B100R	39,5	0,5	1,2	47,9	0,8	1,6
	38,8			49,5		
	38,7			48,8		
HBR	68,4	0,7	1,0	83,0	2,0	0,3
	67,1			83,4		
	67,4			-		
HB20R	67,2	3,9	5,9	78,2	2,9	3,6
	70,9			81,0		
	63,0			84,0		
HB50R	63,2	0,3	0,5	72,4	2,3	3,1
	63,7			74,1		
	63,1			76,9		
HB100R	55,8	1,0	1,7	64,0	1,4	2,2
	56,0			66,6		
	57,6			66,2		
HBRIA	60,2	2,4	3,8	69,3	0,6	0,8
	62,9			68,7		
	64,9			69,9		
HB20RIA	51,9	4,2	8,1	-	5,6	0,6
	48,3			60,5		
	56,7			61,0		
HB50RIA	47,7	0,9	1,8	58,1	2,6	4,5
	49,4			58,9		
	48,8			54,1		
HB100RIA	44,8	5,1	13,0	50,4	1,9	4,0
	36,1			46,6		
	35,9			48,3		

Anexo I - Valores para o cálculo da resistência à tracção por flexão aos 28 dias de idade

Betão	Provete	f_{tr} [MPa]	DESVAP	CV [%]
BR	1	12,6	0,0	0,3
	2	12,6		
	3	-		
B20R	1	-	0,5	4,9
	2	9,8		
	3	9,8		
B50R	1	9,7	0,0	0,4
	2	9,8		
	3	9,7		
B100R	1	8,3	0,2	1,9
	2	8,1		
	3	8,5		
HBR	1	13,3	1,4	5,9
	2	14,4		
	3	-		
HB20R	1	11,6	0,2	2,1
	2	12,0		
	3	11,6		
HB50R	1	9,9	0,3	3,1
	2	10,5		
	3	10,3		
HB100R	1	9,0	0,6	3,2
	2	8,6		
	3	-		
HBRIA	1	10,5	0,1	1,1
	2	10,3		
	3	10,4		
HB20RIA	1	9,5	0,6	6,5
	2	9,0		
	3	8,3		
HB50RIA	1	8,8	0,8	1,9
	2	-		
	3	8,6		
HB100RIA	1	7,9	0,6	2,0
	2	8,1		
	3	-		

Anexo J - Valores para o cálculo da resistência à compressão das metades resultante do ensaio à tracção por flexão aos 28 dias

Betão	f _c [MPa]		DESVPAD	CV [%]
	Parte 1	Parte 2		
BR	47,9	-	4,7	10,5
	42,9	38,6		
	32,5	-		
B20R	33,6	36,0	1,9	5,3
	36,7	-		
	-	38,1		
B50R	-	-	2,7	8,3
	35,3	30,0		
	32,0	29,6		
B100R	-	-	0,6	1,9
	31,1	32,1		
	30,7	31,6		
HBR	-	53,7	2,5	4,6
	58,1	55,8		
	53,1	51,8		
HB20R	-	47,3	2,6	5,2
	48,3	48,4		
	-	53,1		
HB50R	43,1	45,0	2,2	4,7
	46,6	47,7		
	43,1	42,4		
HB100R	40,1	41,1	0,8	2,0
	41,6	37,1		
	-	40,2		
HBRIA	47,4	33,5	1,0	2,0
	46,7	48,0		
	-	49,0		
HB20RIA	-	45,9	3,5	7,9
	-	-		
	40,9	-		
HB50RIA	41,1	39,1	2,7	7,3
	42,7	35,8		
	37,5	-		
HB100RIA	31,0	30,5	1,1	3,5
	31,4	30,0		
	28,6	-		

Anexo K - Valores da variação de massa ao longo de vários ciclos gelo-degelo

MASSA [g]						
Betão	início		Ciclos - 10		Ciclos - 20	
	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
BR	7573,4	7245,0	7551,0	7221,1	7543,6	7213,3
B20R	7338,8	7284,8	7314,7	7259,8	7308,1	7252,8
B50R	7268,3	7165,6	7241,1	7139,2	7236,6	7132,1
B100R	7132,7	6826,8	7106,3	6799,4	7098,8	6792,0
HBR	7691,0	7668,2	7689,6	7666,4	7686,8	7664,3
HB20R	7585,0	7506,4	7581,5	7503,5	7578,7	7501,0
HB50R	7482,1	7418,3	7475,6	7411,8	7472,2	7410,9
HB100R	7318,9	7308,3	7312,2	7300,8	7308,8	7300,2
HBRIA	7449,9	7397,8	7447,3	7395,6	7446,5	7394,6
HB20RIA	7131,5	7379,2	7128,6	7376,4	7127,8	7373,9
HB50RIA	7221,3	7114,8	7216,4	7110,4	7216,1	7108,9
HB100RIA	6956,2	6958,4	6947,5	6952,8	6947,3	6952,0
Betão	Ciclos - 36		Ciclos - 55		Ciclos - 91	
	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
BR	7542,4	7211,8	7538,0	7206,0	7522,4	7191,2
B20R	7305,7	7249,8	7301,4	7244,5	7283,8	7230,1
B50R	7228,7	7128,9	7225,9	7122,2	7211,7	7108,2
B100R	7092,4	6788	7075,5	6779,5	7067,7	6753,0
HBR	7685,1	7663,9	7684,9	7662,3	7683,6	7661,1
HB20R	7577,9	7499,2	7576,6	7497,7	7575,9	7496,9
HB50R	7471,6	7410,6	7470,8	7409,1	7469,3	7403,8
HB100R	7307,0	7297,8	7306,5	7296,9	7305,6	7293,1
HBRIA	7444,6	7393,3	7444,0	7391,6	7442,8	7390,0
HB20RIA	7126,1	7373,6	7125,4	7372,1	7123,8	7370,7
HB50RIA	7215,5	7108,4	7214,6	7106,5	7213,3	7106,1
HB100RIA	6947,0	6951,5	6946,1	6949,0	6944,1	6949,2
Betão	Ciclos - 121		Ciclos - 181		Ciclos - 300	
	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
BR	7493,0	7151,4	7404,0	7018,0	6595,5	6359,3
B20R	7225,1	7174,1	7130,8	7160,2	6427,8	5390,3
B50R	7185,1	7033,5	7112,3	6952,2	6336,4	6327,7
B100R	7001,7	6593,9	6895,5	6505,3	4518,5	4153,0
HBR	7682,8	7659,9	7674,9	7652,5	7674,3	7652,1
HB20R	7574,8	7495,9	7568,5	7488,8	7567,8	7489,3
HB50R	7467,9	7396,1	7464,4	7389,7	7461,8	7389,3
HB100R	7303,5	7284,1	7300,7	7278,1	7289,0	7250,4
HBRIA	7442,1	7389,7	7434,2	7381,9	7433,6	7381,4
HB20RIA	7123,4	7370,3	7115,5	7362,3	7114,3	7362,1
HB50RIA	7212,7	7105,7	7204,5	7105,4	7202,0	7097,1
HB100RIA	6943,3	6948,0	6937,7	6946,7	6935,4	6940,0

Anexo L - Valores da variação de comprimento ao longo de vários ciclos

VARIÇÃO DE COMPRIMENTO [mm]								
Betão	início				Ciclos - 10			
	Provete 1		Provete 2		Provete 1		Provete 2	
	med1	med2	med1	med2	med1	med2	med1	med2
BR	-0,189	-0,187	-0,024	-0,023	-0,204	-0,204	-0,037	-0,035
B20R	0,011	-0,010	0,010	0,014	-0,022	-0,024	-0,007	-0,004
B50R	-0,090	-0,087	-0,069	-0,054	-0,101	-0,102	-0,088	-0,080
B100R	-0,716	-0,759	-0,864	-0,854	-0,759	-0,789	-0,890	-0,853
HBR	-0,099	-0,095	-0,934	-0,932	-0,119	-0,119	-0,948	-0,945
HB20R	0,790	0,814	-0,197	-0,195	0,747	0,786	-0,218	-0,216
HB50R	0,032	0,037	-0,004	-0,004	0,020	0,021	-0,027	-0,026
HB100R	-0,306	-0,300	-0,580	-0,596	-0,327	-0,322	-0,597	-0,595
HBRIA	-0,039	-0,037	-0,145	-0,144	-0,049	-0,048	-0,167	-0,102
HB20RIA	0,068	0,068	-1,146	-1,086	0,054	0,054	-1,140	-1,184
HB50RIA	-0,328	-0,355	-0,041	-0,041	-0,218	-0,222	-0,056	-0,056
HB100RIA	0,002	0,001	-0,210	-0,210	-0,008	-0,008	-0,223	-0,221
Betão	Ciclos - 20				Ciclos - 36			
	Provete 1		Provete 2		Provete 1		Provete 2	
	med1	med2	med1	med2	med1	med2	med1	med2
BR	-0,208	-0,206	-0,038	-0,036	-0,185	-0,182	-0,021	-0,018
B20R	-0,023	-0,023	-0,006	-0,002	-0,003	-0,006	0,016	0,019
B50R	-0,101	-0,101	-0,082	-0,075	-0,082	-0,083	-0,053	-0,057
B100R	-0,789	-0,793	-0,899	-0,849	-0,742	-0,784	-0,900	-0,820
HBR	-0,112	-0,111	-0,955	-0,954	-0,094	-0,093	-0,934	-0,933
HB20R	0,741	0,752	-0,212	-0,212	0,749	0,769	-0,189	-0,190
HB50R	0,021	0,023	-0,022	-0,022	0,043	0,044	0,002	0,002
HB100R	-0,329	-0,317	-0,694	-0,662	-0,307	-0,302	-0,566	-0,568
HBRIA	-0,055	-0,055	-0,164	-0,161	-0,031	-0,032	-0,141	-0,137
HB20RIA	0,052	0,051	-1,124	-1,167	0,064	0,062	-1,117	-1,169
HB50RIA	-0,238	-0,236	-0,052	-0,052	-0,210	-0,211	-0,032	-0,032
HB100RIA	-0,011	-0,011	-0,221	-0,220	0,005	0,003	-0,206	-0,205

Betão	Ciclos - 55				Ciclos - 91			
	Provete 1		Provete 2		Provete 1		Provete 2	
	med1	med2	med1	med2	med1	med2	med1	med2
BR	-0,074	-0,072	0,053	0,054	0,067	0,068	0,219	0,219
B20R	0,018	0,014	0,055	0,056	0,173	0,174	0,046	0,046
B50R	-0,022	-0,024	0,002	0,002	-0,026	-0,026	0,010	0,010
B100R	-0,774	-0,794	-0,822	-0,822	-0,699	-0,717	-0,758	-0,758
HBR	-0,081	-0,084	-0,922	-0,922	-0,091	-0,092	-0,932	-0,932
HB20R	0,755	0,774	-0,167	-0,168	0,740	0,807	-0,187	-0,187
HB50R	0,050	0,056	0,013	0,013	0,040	0,042	0,010	0,010
HB100R	-0,303	-0,303	-0,574	-0,578	-0,322	-0,323	-0,571	-0,571
HBRIA	-0,019	-0,019	-0,128	-0,131	-0,027	-0,027	-0,152	-0,152
HB20RIA	0,075	0,076	-1,167	-1,111	0,072	0,072	-1,116	-1,116
HB50RIA	-0,199	-0,201	-0,040	-0,040	-0,207	-0,204	-0,018	-0,018
HB100RIA	-0,008	-0,011	-0,202	-0,202	0,020	0,018	-0,197	-0,197
Betão	Ciclos - 121				Ciclos - 181			
	Provete 1		Provete 2		Provete 1		Provete 2	
	med1	med2	med1	med2	med1	med2	med1	med2
BR	0,646	0,647	0,420	0,420	0,85	0,85	0,516	0,516
B20R	0,724	0,723	0,479	0,479	0,699	0,711	0,533	0,533
B50R	-0,012	-0,012	0,301	0,299	0,201	0,202	0,349	0,349
B100R	-0,316	-0,310	-0,649	-0,651	0,241	-0,229	-0,117	-0,117
HBR	0,053	0,053	-0,932	-0,929	0,094	0,094	-0,929	-0,927
HB20R	0,835	0,836	-0,071	-0,072	0,859	0,858	0,046	0,048
HB50R	0,030	0,030	0,061	0,062	0,111	0,110	0,072	0,073
HB100R	-0,300	-0,299	-0,560	-0,561	-0,253	-0,252	-0,540	-0,539
HBRIA	-0,029	-0,029	-0,123	-0,122	-0,024	-0,023	-0,095	-0,093
HB20RIA	0,075	0,072	-1,110	-1,116	0,082	0,076	-1,103	-1,112
HB50RIA	-0,180	-0,188	0,001	0,002	-0,195	-0,196	0,014	0,015
HB100RIA	0,024	0,025	-0,030	-0,031	-0,133	-0,131	-0,187	-0,187
Betão	Ciclos - 300							
	Provete 1		Provete 2					
	med1	med2	med1	med2				
BR	-	-	-	-				
B20R	-	-	-	-				
B50R	-	-	-	-				
B100R	-	-	-	-				
HBR	0,100	0,100	-0,569	-0,567				
HB20R	0,857	0,856	0,070	0,071				
HB50R	0,066	0,067	0,075	0,077				
HB100R	-0,245	-0,247	-0,532	-0,525				
HBRIA	0,050	0,048	-0,088	-0,086				
HB20RIA	0,088	0,086	-1,097	-1,102				
HB50RIA	-0,189	-0,191	0,027	0,026				
HB100RIA	-0,124	-0,126	-0,178	-0,182				

Anexo M - Valores da velocidade de propagação de ultrassons

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS [μ s]						
Betão	início		Ciclos - 10		Ciclos - 20	
	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
BR	60,2	59,9	61,7	61,5	61,8	61,9
B20R	61,9	62	62,1	62	62,6	62,5
B50R	63,6	63,3	64,6	65,2	64,6	65,6
B100R	65,5	65,6	65,8	65,9	66,2	66
HBR	58,9	57,2	59,8	59,5	59,9	59,9
HB20R	60,2	60,1	61,1	60,7	61,3	60,8
HB50R	61,4	61,0	62,1	61,8	62,4	61,8
HB100R	62,6	62,2	63,0	63,3	63,7	63,7
HBRIA	60,3	60,2	60,7	61,1	60,7	61,9
HB20RIA	61,2	61,5	61,2	62,8	62,4	62,9
HB50RIA	62,3	62,6	62,5	63,8	63,0	63,8
HB100RIA	64,9	64,7	65,1	64,7	65,9	64,9
Betão	Ciclos - 36		Ciclos - 55		Ciclos - 91	
	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
BR	62,0	62,3	63,4	64,7	72,8	73,1
B20R	62,4	62,6	64,8	64,5	70,0	70,9
B50R	64,2	65,9	65,6	65,9	65,0	66,8
B100R	66,8	66,8	66,8	66,9	70,5	67,5
HBR	60,0	60	60,4	60,2	60,5	60,3
HB20R	61,4	60,9	61,5	61,0	61,6	61,2
HB50R	62,7	61,8	62,8	62,7	62,9	62,8
HB100R	63,9	63,9	64,0	64,0	64,7	64,1
HBRIA	60,8	61,9	61,1	62,0	61,9	62,4
HB20RIA	62,5	62,9	62,5	63,0	63,0	63,2
HB50RIA	63,7	63,8	63,8	63,9	63,9	64,2
HB100RIA	65,9	65,0	66,5	65,1	66,8	65,5
Betão	Ciclos - 121		Ciclos - 181		Ciclos - 300	
	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
BR	116,3	110,3	128,4	125,6	-	-
B20R	107,6	103,6	104,7	107,8	-	-
B50R	63,7	70,1	98,9	109,5	-	-
B100R	70,4	68,2	134,0	83,8	-	-
HBR	60,9	60,5	61,6	61,2	64,3	61,5
HB20R	61,7	61,5	61,9	62,6	62,1	62,7
HB50R	63,0	62,8	63,2	62,9	63,8	63,2
HB100R	64,8	64,8	64,9	64,9	65,5	66,4
HBRIA	62,0	62,7	62,6	62,8	63,6	62,9
HB20RIA	63,7	63,9	63,9	64,0	64,0	64,1
HB50RIA	63,9	64,3	64,1	64,8	64,2	64,9
HB100RIA	66,9	65,5	67,2	65,7	67,3	65,8

**Anexo N - Valores da resistência à tracção ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo,
para provetes que sofreram e que não sofreram essa acção**

Betão	Provete	Sem acção do gelo-degelo			Com acção do gelo-degelo		
		ft [MPa]	DESVAP	CV [%]	ft [MPa]	DESVAP	CV [%]
BR	1	13,4	0,2	1,6	0,3	0,2	141,4
	2	13,1			0,0		
B20R	1	10,7	0,2	2,2	0,0	0,2	141,4
	2	11,0			0,3		
B50R	1	10,6	0,3	3,2	0,6	0,1	15,7
	2	10,1			0,5		
B100R	1	9,6	0,2	2,1	0,0	0,0	0,0
	2	9,3			0,0		
HBR	1	15,2	0,0	0,0	12,7	0,2	1,4
	2	-			12,9		
HB20R	1	12,5	0,9	7,0	11,9	0,1	1,2
	2	13,8			11,7		
HB50R	1	11,1	0,4	3,6	11,5	1,3	12,0
	2	11,7			9,7		
HB100R	1	10,2	0,3	2,5	8,1	0,4	4,7
	2	10,6			8,6		
HBRIA	1	11,9	0,7	5,9	9,8	1,2	11,6
	2	11,0			11,6		
HB20RIA	1	10,3	0,1	0,8	10,5	1,0	10,1
	2	10,5			9,1		
HB50RIA	1	9,9	0,2	2,2	9,7	0,2	1,9
	2	10,2			9,4		
HB100RI A	1	9,4	0,3	3,7	8,9	0,4	5,1
	2	8,9			8,3		

Anexo O - Valores da resistência à compressão ao fim de 300 ciclos de gelo-degelo, para provetes que sofreram e que não sofreram essa acção

Betão	Provete	f _c [MPa]		DESVAP	CV [%]	f _c [MPa]		DESVPAD	CV [%]
		Parte 1	Parte2			Parte 1	Parte2		
BR	1	49,8	42,0	4,0	8,9	8,1	5,8	32,4	120,3
	2	-	44,1			-	7,8		
B20R	1	44,8	41,4	1,8	4,2	4,4	4,4	27,8	83,1
	2	53,9	42,3			6,2	6,2		
B50R	1	47,7	37,1	5,5	13,4	9,4	4,8	23,1	72,3
	2	42,6	35,9			9,0	8,0		
B100R	1	43,5	41,2	1,4	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	41,0	-			0,0	0,0		
HBR	1	63,0	62,8	5,0	8,4	26,0	54,8	41,0	120,5
	2	-	54,2			-	54,2		
HB20R	1	58,0	-	8,0	13,6	32,5	-	31,7	71,7
	2	66,8	50,9			38,3	41,7		
HB50R	1	63,6	42,6	10,6	21,2	29,0	31,8	29,0	97,4
	2	57,6	28,2			32,4	42,8		
HB100R	1	48,3	43,0	3,3	7,4	26,2	26,0	27,9	79,0
	2	54,3	42,4			25,6	41,2		
HBRIA	1	57,1	-	1,9	3,3	36,7	-	31,2	82,4
	2	54,5	-			32,9	-		
HB20RIA	1	-	53,3	7,4	15,3	-	35,0	23,0	97,0
	2	40,0	52,4			40,6	34,7		
HB50RIA	1	44,6	44,3	0,8	1,7	31,6	30,6	25,7	84,4
	2	46,1	45,2			25,5	32,1		
HB100RIA	1	-	38,5	1,8	4,8	-	22,6	1,8	8,1
	2	-	36,0			-	20,1		