



DECivil

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO

**PROJECTO FCT
PTDC / ECM / 118372 / 2010**



Tarefa 6

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO (EXCELLentSUStainableCONCcrete)

DESENVOLVIMENTO DE UM CONJUNTO DE REGRAS PARA A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO

RELATÓRIO

Maio de 2015

Financiamento FCT/POCTI



Governo da República Portuguesa



União Europeia

FEDER

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO E CONTEXTO	1
3. ENSAIOS AOS BED INCORPORANDO AR	3
4. PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO DE AR EM BED	12
4.1. Objecto	12
4.2. Enquadramento geral	12
4.3. Classificação dos agregados	13
4.4. Propriedades e requisitos mínimos	16
4.5. Regras de aplicação	19
4.6. Controlo de qualidade	19
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
6. BIBLIOGRAFIA	20

Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação dos agregados reciclados grossos	2
Tabela 2 - Classes de resistência e de exposição ambiental.....	2
Tabela 3 - Requisitos dos agregados segundo a especificação LNEC E 471.....	3
Tabela 4 - Massas volúmicas e absorção de água dos AR.....	3
Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias da 1ª fase	4
Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias da 2ª fase	5
Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias da 3ª fase	5
Tabela 8 - Composições selecionadas para o estabelecimento de regras.....	5
Tabela 9 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento.....	6
Tabela 10 - Resultados do ensaio de massa volúmica	6
Tabela 11 - Resultados de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias...	6
Tabela 12 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias	7
Tabela 13 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	8
Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	8
Tabela 15 - Resultados de absorção de água por capilaridade às 72 horas.....	9
Tabela 16 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 dias	9
Tabela 17 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias.....	10
Tabela 18 - Deformações por retracção aos 91 dias	11
Tabela 19 - Deformações por fluência aos 91 dias, para os diversos betões	11
Tabela 20 - Classificação dos AR em função dos desempenhos atingidos pelos betões	13
Tabela 21 - Composições selecionadas para o estabelecimento de regras.....	14
Tabela 22 - Desempenhos de resistência à compressão em cubos aos 28 dias	14
Tabela 23 - Desempenhos resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias.	14
Tabela 24 - Desempenhos de módulo de elasticidade aos 28 dias	15
Tabela 25 - Desempenhos de absorção de água por imersão	15
Tabela 26 - Desempenhos de absorção de água por capilaridade às 72 horas	15
Tabela 27 - Desempenhos de carbonatação aos 28 dias	16
Tabela 28 - Desempenhos de difusão de cloretos aos 91 dias.....	16
Tabela 29 - Incorporação máxima de AR de cada tipo de composição para cada classe	19
Tabela 30 - Validação das percentagens de incorporação de AR através dos resultados das diferentes propriedades	18
Tabela 31 - Propriedades e requisitos mínimos de conformidade dos AR	19

Abreviaturas

AFRB	Agregados finos reciclados de betão
AGR	Agregados grossos reciclados
AGRB	Agregados grossos reciclados de betão
AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
BAR	Betões com agregados reciclados
BED	Betões de elevado desempenho
BER	Betões de elevada resistência
BO	Betões de origem
BR	Betões de referência
PF 65	Produtos rejeitados da pré-fabricação
RCD	Resíduos da construção e demolição
Relação a/l_e	Relação água / ligante efectiva
SF	Sílica de fumo

1. Introdução

O presente relatório tem como objectivo desenvolver um conjunto de regras para a utilização de agregados reciclados (AR) em betões de elevado desempenho (BED) e surge no âmbito da tarefa 6 do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 (EXCELlent-SUStainableCONcrete).

Os resultados alcançados nas tarefas anteriores mostram que a utilização de AR, em BED, é possível e que poderá constituir uma abordagem sustentável na concepção de composições de betão. Dado os agregados ocuparem 55-80% do volume de betão (Tu et al., 2006), a reutilização de resíduos da construção e demolição (RCD) será, certamente, um dos caminhos a seguir no sentido de se minimizar o impacte ambiental e a energia associada ao seu fabrico.

Apesar do valor intrínseco dos RCD, estes apenas têm vindo a ser utilizados em aplicações com menor grau de exigência, como bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários.

A falta de regulamentação que assegure a manutenção dos requisitos de segurança e utilização dos elementos construídos é uma das justificações para o cepticismo existente.

Assim, com base nos valores obtidos na campanha experimental do projecto, procurou-se fornecer um conjunto de recomendações para a utilização de AR (finos e grossos) em betões de elevado desempenho, de forma a contrariar o facto de não existir qualquer norma ou especificação sobre a temática. O trabalho realizado pretende ser um complemento da especificação LNEC E 471 (2009), que estabelece as condições de utilização de agregados grossos reciclados (AGR) no fabrico de betões de ligantes hidráulicos.

2. Enquadramento e contexto

Em Portugal, o mercado destinado ao reaproveitamento de RCD praticamente não existe. A alteração deste paradigma implica, entre outras medidas, a criação de um quadro legislativo, quer em termos da gestão de resíduos quer no que respeita à existência de normas que permitam a sua aplicação.

Neste contexto, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil desenvolveu uma especificação (LNEC E471) que apresenta os requisitos que os AR devem cumprir, assim como as regras para a sua aplicação.

Relativamente às condições de aplicação dos AR, a especificação agrupa os agrega-

dos grossos reciclados em três classes: ARB1, ARB2 e ARC (Tabela 1). As classes ARB1 e ARB2 são constituídas essencialmente por betão, misturado ou não com agregados não ligados. A classe ARC tem como constituintes principais o betão, agregados não ligados e elementos de alvenaria, não havendo exigências quanto às percentagens relativas de cada um deles.

Tabela 1 - Classificação dos agregados reciclados grossos segundo a especificação LNEC E 471

Proporção dos constituintes	Classe		
	ARB1	ARB2	ARC
Betão, produtos de betão e argamassas (%)	≥ 90	≥ 70	≥ 90
Agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos (%)			
Alvenaria (%)	≤ 10	≤ 30	
Materiais betuminosos (%)	≤ 5	≤ 5	≤ 10
Vidro e outros materiais ¹ (%)	≤ 0,5	≤ 1	≤ 2
Material flutuante em volume (%)	≤ 2	≤ 2	≤ 2

¹ Solos argilosos, plásticos, borrachas, metais, madeira não flutuante e estuque.

Os agregados reciclados das classes ARB1 e ARB2 podem ser usados no fabrico de betão para aplicar em elementos de betão simples ou betão armado. Para aplicações em betão armado, a proporção máxima de agregados reciclados de betão, no conjunto dos agregados, é de 25% para os agregados da classe ARB1 e de 20% para os agregados da classe ARB2. Para betões simples, de enchimento ou de regularização, em ambientes não agressivos, a percentagem de incorporação não fica sujeita a qualquer limite. Na Tabela 2, é apresentada a classe máxima de resistência e as condições ambientais permitidas, segundo a E 471 (2009).

Tabela 2 - Classes de resistência e de exposição ambiental segundo a especificação LNEC E 471

Classe dos agregados	Classe de resistência	Percentagem de incorporação	Classe de exposição ambiental ¹
ARB1	C 40/50	25%	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1 ²
ARB2	C 35/45	20%	

¹ Conforme definida na norma NP EN 206-1.

² Em fundações.

A utilização de agregados reciclados da classe ARC só é autorizada em betões de enchimento ou de regularização, sem qualquer função estrutural, e em ambientes não agressivos.

No que respeita aos requisitos dos AR (Tabela 3), a especificação estabelece valores limites para determinadas propriedades.

Tabela 3 - Requisitos dos agregados segundo a especificação LNEC E 471

Propriedades	Requisitos para cada classe		
	ARB1	ARB2	ARC
Massa volúmica (kg/m ³)	≥ 2200		≥ 2000
Absorção de água (%)	≤ 7		- ¹
Teor em finos (%)	≤ 4		≤ 3
Teor de sulfatos solúveis em água (%)	≤ 0,2		≤ 0,2
Teor de sulfatos solúveis em ácido (%)	≤ 0,8		≤ 0,8
Teor de enxofre total (%)	≤ 1,0		≤ 1,0

¹ Classe a declarar

Os agregados ARB1 e ARB2 apresentam, para a massa volúmica e absorção de água, exigências idênticas sendo expectável que os agregados ARB1 (dada a sua composição) apresentem maior facilidade no seu cumprimento.

Contudo, é provável que os ARB2 apenas tenham dificuldade em verificar as exigências quando, tanto o betão como a alvenaria, apresentem uma quantidade significativa de argamassa, pois, numa situação *standard*, a massa volúmica dos agregados de betão é de cerca de 2300 kg/m³ e a dos de alvenaria de cerca de 2000 kg/m³, cumprindo em ambos os casos as exigências requeridas.

Com base nos requisitos destas duas propriedades, estabeleceu-se que, neste trabalho, apenas seriam considerados os AR provenientes dos produtos rejeitados da indústria da pré-fabricação com resistências superiores a 65 MPa (PF 65). Assim, pretendeu-se cumprir o especificado na E 471. Através da análise da Tabela 4, verifica-se que tanto os finos como os grossos reciclados respeitam as exigências.

Tabela 4 - Massas volúmicas e absorção de água dos AR

Agregados	Tipo	Designação	Massa volúmica (g/cm ³)			Absorção de água (%)
			Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
	Finos	PF-65PS	2,68	2,30	2,44	6,1
	Grossos	PF-65PS	2,61	2,37	2,46	3,9

3. Ensaio aos BED incorporando AR

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios aos betões de elevado desempenho incorporando agregados finos e grossos reciclados de origem PF 65. O comportamento exibido por estes betões será a base para o novo conjunto de regras a estabelecer.

Os ensaios realizados tiveram origem em três fases distintas. Na primeira, os betões

produzidos procuraram replicar a resistência do betão de origem (BO) dos AR e pretendeu-se perceber qual o impacte da variação destes agregados nas propriedades dos BED. Foram consideradas taxas de substituição de agregados finos e grossos reciclados (AFRB/AGRB%) de 25/25, 50/50; 100/0, 0/100 e 100/100%. Na composição do betão foi utilizado cimento CEM I 42,5R com um teor de 350 kg/m³. Foi também adicionado superplastificante (SikaPlast 898) na proporção de 1% da massa de cimento. Na avaliação realizada, foram efectuados ensaios de carácter reológico, mecânico e de durabilidade: resistência à compressão em cubos e cilindros; resistência à tracção por compressão diametral; módulo de elasticidade; ultra-sons; resistência à abrasão; absorção de água por imersão e capilaridade; resistência à penetração de cloretos; resistência à carbonatação; retracção e fluência.

No que respeita à segunda e terceira fase, procurou-se otimizar o desempenho dos betões reciclados (BAR). Para isso, decidiu-se introduzir nas composições adições (sílica de fumo e cinzas volantes) e aumentar o teor de superplastificante. Além disso, modificou-se a classe de resistência do cimento para 52,5R, tendo o seu teor variado entre 320 e 550 kg/m³. As taxas de substituição foram idênticas às anteriores, com excepção da 25/25 e da 100/0% que não foram consideradas. Na segunda fase, a sílica de fumo (SF) e as cinzas volantes foram utilizadas como substitutos do cimento enquanto na terceira fase como materiais adicionais na composição de betão.

Foi também realizada uma avaliação em termos reológicos, mecânicos e de durabilidade: resistência à compressão em cubos; resistência à tracção por compressão diametral; módulo de elasticidade; ultra-sons; aderência aço-betão; absorção de água por imersão e capilaridade; resistência à penetração de cloretos; resistência à carbonatação; permeabilidade ao oxigénio; retracção e fluência.

No estabelecimento das regras, não foram tidos em conta todos os ensaios efectuados nem todos os betões produzidos. O critério de escolha das famílias de betão teve como base o seu desempenho na propriedade de resistência à compressão (Tabelas 5, 6 e 7).

Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias da 1ª fase

Tipo de betão	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	72,6	0,0	1,7
B 25/25	68,2	-6,1	1,2
B 50/50	66,5	-8,5	0,3
B 100/0	65,4	-10,0	2,2
B 0/100	68,7	-5,4	1,6
B 100/100	61,8	-14,9	1,2

Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias da 2ª fase

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	82,9	0,0	1,9	75,2	0,0	2,5	68,6	0,0	1,9
B 50/50	79,6	-3,9	3,0	70,2	-6,7	1,9	65,3	-4,9	1,3
B 0/100	80,6	-2,7	3,6	71,7	-4,6	2,7	66,2	-3,6	1,9
B 100/100	77,6	-6,4	1,4	66,7	-11,3	3,1	61,3	-10,7	1,6

Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias da 3ª fase

Tipo de betão	0% SF			5% SF			10% SF		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	93,4	0,0	2,9	97,9	0,0	2,0	102,2	0,0	1,7
B 50/50	90,9	-2,7	3,0	95,5	-2,4	3,0	99,3	-2,9	1,0
B 0/100	91,1	-2,5	1,8	96,0	-1,9	1,6	100,4	-1,8	0,4
B 100/100	90,1	-3,5	2,0	93,7	-4,2	1,9	97,3	-4,8	1,4

Deste modo, as famílias foram seleccionadas considerando a classe de resistência mínima (C50/60) definida pela NP EN 206-1 (2005) para betões de elevada resistência (BER) e a classe de resistência máxima atingida pelos betões produzidos.

Assim, foram seleccionados três tipos de famílias (uma de cada fase) que procuraram representar os valores mínimos, intermédios e máximos obtidos nos betões classificados como BER, segundo a NP EN 206-1. As composições procuraram ainda englobar diferentes composições (Tabela 8).

Tabela 8 - Composições seleccionadas para o estabelecimento de regras

Características	Composições tipo I (1ª fase)	Composições tipo II (0% SF - 2ª fase)	Composições tipo III (10% SF - 3ª fase)
Classe de cimento	42,5R	52,5R	52,5R
Teor de cimento	350 kg/m ³	360 kg/m ³	550 kg/m ³
Máxima relação a/l _e	0,49	0,41	0,28
Adições	Sem adições	Cinzas volantes - 40 kg/m ³	Cinzas volantes - 55 kg/m ³ Sílica de fumo - 55 kg/m ³
Adjuvantes	Superplastificante (1% da massa de cimento)	Superplastificante (1% da massa de cimento e cinzas volantes)	(1% da massa de cimento e cinzas volantes)
Classe abaixamento	S3 (125 ± 15 mm)	S4 (190 ± 20 mm)	S4 (190 ± 20 mm)

Na Tabela 9, são apresentados os resultados do ensaio de abaixamento realizado, aos betões escolhidos, segundo a norma NP EN 12350-2 (2009). Os valores mostram que foi necessário aumentar a relação água / ligante dos betões reciclados.

Esta situação foi mais evidente para as maiores taxas de substituição e pode ser explicada através da elevada absorção do material reciclado e pela sua forma achatada e

angulosa. Através da tabela, observa-se também que as composições do tipo I e do tipo II e III respeitaram as classes de abaixamento definidas (S3 e S4, respectivamente).

Tabela 9 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento

	Percentagem de substituição dos agregados									
	0/0		25/25		50/50		100/100		0/100	
	Relação a/l	Abaixamento (mm)	Relação a/l	Abaixamento (mm)	Relação a/l	Abaixamento (mm)	Relação a/l	Abaixamento (mm)	Relação a/l	Abaixamento (mm)
Composição Tipo I	0,47	115	0,47	122	0,48	135	0,49	128	0,47	122
Composição Tipo II	0,37	205	- ¹		0,38	201	0,41	195	0,38	208
Composição Tipo III	0,28	209	- ¹		0,29	201	0,31	196	0,29	205

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Na Tabela 10, são apresentados os valores do ensaio de massa volúmica (estado fresco) realizado com base na norma NP EN 12350-6 (2009). Verifica-se que esta propriedade diminui com o aumento da percentagem de AR, sendo os resultados justificados com a menor massa volúmica dos AR, comparativamente aos agregados naturais (AN).

Tabela 10 - Resultados do ensaio de massa volúmica

	Percentagem de substituição dos agregados									
	0/0		25/25		50/50		100/100		0/100	
	Massa volúmica (kg/m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	
Composição Tipo I	2428,3	2371,8	-2,3	2352,2	-3,1	2300,8	-5,3	2357,3	-2,9	
Composição Tipo II	2416,5	- ¹		2377,0	-1,6	2320,4	-4,0	2397,2	-0,8	
Composição Tipo III	2356,9	- ¹		2309,6	-2,0	2270,9	-3,6	2333,1	-1,0	

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Relativamente às propriedades mecânicas, o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral foi efectuado, aos 28 dias, segundo a norma EN 12390-6 (2011). Analisando a Tabela 11, constata-se que as reduções de desempenho são semelhantes nas composições dos diferentes tipos (entre 15 e 30%), sendo visível que, quanto maior a quantidade de agregados reciclados, maior a diminuição da resistência.

Segundo Coutinho e Gonçalves (1997), esta propriedade não é tão afectada pela quantidade de cimento, como a resistência à compressão.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Resistência à tracção (MPa)	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)						
Composição Tipo I	4,6 ± 0,1	3,9 ± 0,0	-15,0	3,6 ± 0,1	-20,6	3,0 ± 0,1	-35,1	3,9 ± 0,2	-14,0
Composição Tipo II	5,3 ± 0,3	- ¹		4,2 ± 0,2	-20,7	3,8 ± 0,3	-28,7	4,4 ± 0,0	-16,1
Composição Tipo III	5,3 ± 0,2	- ¹		4,2 ± 0,2	-21,6	3,9 ± 0,1	-27,3	4,4 ± 0,2	-18,2

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Deste modo, a resistência à tracção não beneficia particularmente do cimento adicional que é incorporado juntamente com os AR, sobretudo com os agregados finos reciclados de betão. Portanto, é natural a ocorrência de maiores perdas de desempenho com a incorporação de AR, devido à estrutura mais porosa dos agregados reciclados.

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado com base na especificação LNEC E-397 (1993) aos 28 dias. Através da observação da Tabela 12, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da incorporação de agregados reciclados.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)						
Composição Tipo I	44,5 ± 0,1	42,1 ± 1,4	-5,4	38,3 ± 2,2	-14,0	35,4 ± 0,6	-20,5	40,4 ± 1,2	-9,1
Composição Tipo II	51,7 ± 30	- ¹		41,8 ± n.d	-20,7	40,6 ± 0,8	-28,7	44,9 ± 0,1	-16,1
Composição Tipo III	56,7 ± 0,9	- ¹		48,6 ± 2,4	-14,3	41,9 ± 4,0	-26,1	53,8 ± 2,2	-5,0

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Nos diversos betões, para taxas de substituição de 50 e 100%, observa-se reduções, em relação ao BR, de aproximadamente 14-21 e 21-29%, respectivamente.

O pior desempenho dos BAR pode ser explicado pelo menor módulo de elasticidade dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais (Xiao et al., 2005). Por este motivo e pelo facto de o módulo de elasticidade do betão depender significativamente dos agregados (Neville, 1981), existe uma maior propensão para deformação dos BAR.

Finalmente, a determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons realizou-se

de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007). Na Tabela 13, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

	Porcentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Ultra-sons (m/s)	Ultra-sons (m/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)						
Composição Tipo I	5169 ± 54	5018 ± 97	-2,9	4924 ± 33	-4,7	4746 ± 89	-8,2	4978 ± 55	-3,7
Composição Tipo II	5136 ± 88	- ¹		4790 ± 58	-6,7	4705 ± 43	-8,4	4992 ± 94	-2,8
Composição Tipo III	5092 ± 40	- ¹		4931 ± 31	-2,6	4828 ± 26	-4,7	4980 ± 65	-1,7

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições tipo II e III.

Através da observação da Tabela 13, constata-se uma diminuição da velocidade de propagação de ultra-sons (VPUS) com o aumento da taxa da incorporação de agregados reciclados. Deste modo, os betões de referência registaram a maior velocidade de propagação, apresentando valores de aproximadamente 5100 m/s. Por seu turno, os valores dos BAR variaram entre cerca de 4700 e 5000 m/s. As perdas de desempenho que não ultrapassaram 10% são explicadas pela maior porosidade dos BAR.

De acordo com a classificação sugerida por Malhotra (1976), todas os betões podem ser classificados como “bons” uma vez que até os valores mais baixos de VPUS caem na gama de 3660-4580 m/s. Isto significa que os betões não contêm espaços vazios ou fissuras que possam afectar a integridade estrutural.

No que respeita às propriedades de durabilidade, serão apresentados os seguintes ensaios: absorção de água por imersão e capilaridade; resistência a carbonatação e resistência à penetração de cloretos.

O ensaio de absorção de água por imersão foi feito aos 28 dias segundo a especificação LNEC E-394 (1993). Na Tabela 14, são apresentados os resultados obtidos.

Os resultados mostram que os betões de referência apresentaram os valores mais baixos de absorção, cerca de 7,4-11,9%. Os betões reciclados registaram valores entre 8,9 e 19%. Estes valores eram expectáveis, uma vez que os agregados reciclados, ao possuírem uma estrutura mais porosa, fazem aumentar o número de poros abertos na matriz de betão (Gómez-Soberón, 2002). Um outro aspecto a ter em consideração é a maior absorção dos AR que condiciona decisivamente a porosidade aberta dos BAR.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Absorção de água por imersão (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
Composição Tipo I	11,9 ± 0,1	13,3 ± 0,2	11,1	14,5 ± 0,1	21,3	19,0 ± 0,4	58,8	14,5 ± 0,5	21,9
Composição Tipo II	9,3 ± 0,1	- ¹		12,9 ± 0,1	38,9	16,6 ± 0,1	78,8	12,1 ± 0,3	30,8
Composição Tipo III	7,4 ± 0,2	- ¹		10,7 ± 0,2	43,5	13,3 ± 0,4	79,7	8,9 ± 0,1	20,3

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi efectuado segundo a especificação LNEC E-393 (1993), 42 dias após a amassadura dos betões. Observando a Tabela 15, verifica-se que ocorrem aumentos de absorção com o aumento da quantidade de AR. Os betões correspondentes à taxa de substituição de 100% apresentam os piores resultados, com agravamentos de desempenho, relativamente aos BR, de cerca de 47-132%. Estes resultados são explicados pela presença de AR que é responsável pela formação de mais e maiores capilares (Wirquin et al., 2000).

Tabela 15 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
Composição Tipo I	1,84E-03 ± 1,6E-04	2,47E-03 ± 5,1E-05	34,1	2,85E-03 ± 2,8E-04	54,9	4,27E-03 ± 1,7E-04	132,2	2,62E-03 ± 4,3E-04	42,7
Composição Tipo II	2,30E-03 ± 5,9E-05	- ¹		2,97E-03 ± 1,8E-04	28,9	3,65E-03 ± 2,1E-04	58,7	2,70E-03 ± 1,0E-04	17,5
Composição Tipo III	1,25E-03 ± 6,2E-05	- ¹		1,68E-03 ± 4,6E-05	33,8	1,84E-03 ± 1,1E-04	47,4	1,50E-03 ± 3,4E-05	20,0

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

O ensaio de resistência à carbonatação foi executado segundo a especificação LNEC E 391 (1993). As médias dos resultados obtidos aos 28 dias são apresentadas na Tabela 16.

Os valores obtidos mostraram que a carbonatação tende a aumentar com o aumento da taxa de substituição. Esta situação é justificada pela natureza mais permeável dos BAR, causada pela argamassa aderida aos AR. Contudo, as variações (em termos absolutos) foram pouco significativas muito devido às características dos AR utilizados e ao

facto de se estar a trabalhar com betões de elevado desempenho. Melhorar a microestrutura das zonas de transição pode assim melhorar o desempenho do betão, uma vez que estas são compostas por um elevado número de poros e fissuras (Kong et al., 2010). Face aos resultados, conclui-se que, quando se pretende produzir betões com baixas relações a/c e com AR de elevada qualidade, é possível aos BAR evidenciar um comportamento comparável ao do BR.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 dias

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Profundi- dade de carbonata- ção aos 28 dias (mm)	Profundi- dade de carbonata- ção aos 28 dias (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)						
Composição Tipo I	1,5 ± 0,3	1,9 ± 0,3	26,7	2,2 ± 0,2	46,7	2,6 ± 0,5	73,3	2,1 ± 0,2	40,0
Composição Tipo II	0,3 ± 0,1	- ¹		0,3 ± 0,1	0,0	0,5 ± 0,1	66,7	0,3 ± 0,1	0,0
Composição Tipo III	0,1 ± 0,1	- ¹		0,2 ± 0,1	100,0	0,3 ± 0,1	200,0	0,2 ± 0,1	100,0

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Por último, o ensaio de determinação da resistência à penetração dos iões cloreto por ensaio de migração, em regime não estacionário, foi realizado com base na especificação LNEC E 463 (2004). Na Tabela 17, são apresentados os resultados aos 91 dias.

Tabela 17 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Coefficiente de difusão dos iões clore- to aos 28 dias (x10 ⁻¹² m ² /s)	Coefficiente de difusão dos iões cloreto aos 28 dias (x10 ⁻¹² m ² /s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de difusão dos iões cloreto aos 28 dias (x10 ⁻¹² m ² /s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de difusão dos iões cloreto aos 28 dias (x10 ⁻¹² m ² /s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de difusão dos iões cloreto aos 28 dias (x10 ⁻¹² m ² /s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
Composição Tipo I	7,8 ± 0,6	8,0 ± 0,9	2,6	8,7 ± 0,7	11,5	9,0 ± 0,7	15,4	8,1 ± 1,1	3,8
Composição Tipo II	3,7 ± 0,2	- ¹		5,0 ± 0,2	36,5	5,7 ± 0,3	55,5	4,4 ± 0,8	21,0
Composição Tipo III	3,3 ± 0,2	- ¹		4,5 ± 0,3	34,6	4,8 ± 0,2	44,1	4,1 ± 0,1	22,9

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Analisando a tabela, é possível observar o aumento dos coeficientes com o aumento da incorporação de AR, apesar de as variações não ultrapassarem 2,4 x10⁻¹² m²/s. Mais uma vez, a qualidade tanto dos AR como dos betões produzidos poderá contribuir para a dimi-

nuição dos efeitos interfaciais pasta / agregado que prejudicam o desempenho dos BAR.

Um outro factor que poderá explicar esta situação é a dimensão das fissuras dos agregados reciclados. De facto, no estudo de Xiao et al. (2012), concluiu-se que a largura de fissuras existentes na antiga argamassa aderida está correlacionada com o coeficiente de difusão de cloretos, verificando-se maior difusividade para maiores larguras de fissuras.

De seguida, são apresentados os ensaios às propriedades reológicas: retracção e fluência. Nesta avaliação, apenas existem dados disponíveis para as composições do tipo I.

O ensaio de determinação da retracção foi realizado segundo a especificação LNEC E 398 (1993).

Tabela 18 - Deformações por retracção aos 91 dias

	Percentagem de substituição dos agregados										
	0/0		25/25			50/50		100/100		0/100	
	Retracção aos 91 dias (m/m)	Retracção aos 91 dias (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Retracção aos 91 dias (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Retracção aos 91 dias (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Retracção aos 91 dias (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)		
Composição Tipo I	-2,63E-04 ± 1,41E-05	-3,04E-04 ± 1,94E-05	15,71	-3,90E-04 ± 6,36E-05	48,57	-5,31E-04 ± 8,84E-06	102,38	-4,05E-04 ± 3,18E-05	54,29		

Os resultados mostram que a retracção é uma propriedade muito afectada pela incorporação de agregados reciclados. Os piores resultados dos BAR estão de acordo com as expectativas pois este tipo de betões, ao ter uma menor restrição interna devido ao facto de os AR possuírem um menor módulo de elasticidade, permite maiores deformações por retracção. Assim, o maior teor de vazios causado pela argamassa aderida nos AR parece levar a um aumento de deformabilidade e de retracção dos betões.

O ensaio de determinação da fluência foi realizado segundo a especificação LNEC E399 (1993). Na Tabela 19, são apresentadas as deformações por fluência aos 91 dias.

Tabela 19 - Deformações por fluência aos 91 dias, para os diversos betões

	Percentagem de substituição dos agregados										
	0/0		25/25			50/50		100/100		0/100	
	Fluência sem retracção (m/m)	Fluência sem retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)								
Composição Tipo I	-4.19E-04	-6.11E-04	79,10	-6.23E-04	82,86	-7.73E-04	126,62	-5.68E-04	66,48		

Os resultados parecem indicar um aumento da fluência com a taxa de substituição.

Aos 91 dias, os BAR, para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, apresentam aumentos de fluência, em relação ao BR, de cerca de 79, 83 e 126%, respectivamente.

Os valores parecem estar de acordo com os obtidos por Sato et al. (2007). Neste estudo, os betões apenas com agregados reciclados, registaram, em relação ao BR, aumentos de fluência de aproximadamente 150%.

4. Proposta de especificação para utilização de AR em BED

4.1. Objecto

A presente proposta de especificação apresenta recomendações e estabelece requisitos mínimos para a utilização de agregados reciclados (finos e grossos) no fabrico de betões de ligantes hidráulicos. Os agregados reciclados utilizados na sua elaboração tiveram origem em produtos rejeitados de elevada qualidade provenientes da indústria da pré-fabricação.

4.2. Enquadramento geral

A indústria da construção é um dos sectores mais importantes da economia de vários países, envolvendo um grande fluxo de recursos materiais e humanos.

No caso da indústria da União Europeia, o sector apresenta uma importância considerável em termos de emprego e de produção económica. Nas questões ambientais, o sector é dos maiores emissores de CO₂, gerando elevadas quantidades de resíduos e sendo responsável por uma utilização muito significativa de recursos naturais.

Deste modo, a utilização de agregados reciclados em betão poderá ser a solução de dois problemas: gestão de resíduos e escassez de recursos naturais. No que respeita aos resíduos da construção e demolição, o Eurostat menciona um total de 970 milhões de toneladas/ano de RCD com uma taxa média de reciclagem de apenas 47%. Para modificar esta situação a União Europeia, através da directiva 2008/98/CE, estabeleceu que pelo menos 70%, em peso, dos RCD produzidos terão que ser reciclados até ao ano de 2020. Relativamente ao tema da escassez de recursos naturais, estima-se que o consumo de agregados no mundo seja de cerca de 20,000 milhões de toneladas/ano. Mais de um terço deste consumo está relacionado com a produção de betão que é o material de construção mais usado no Planeta.

Neste âmbito, os resíduos da indústria da pré-fabricação poderão afirmar-se como

um potencial concorrente dos agregados naturais. A indústria da pré-fabricação é um ramo da construção em franca expansão a nível mundial, uma vez que permite uma aceleração dos processos construtivos, garantindo níveis de qualidade superiores nos elementos executados, tanto em termos da qualidade dos materiais empregues, como da fiabilidade das peças produzidas. O rigoroso controlo de qualidade destas empresas leva ao aparecimento de quantidades apreciáveis de desperdícios, decorrentes dos elementos rejeitados. Por conseguinte, e ao contrário dos RCD, que apresentam uma elevada variabilidade, devido às suas diferentes naturezas e dimensões, os desperdícios da pré-fabricação resultam de produtos certificados, diminuindo as dificuldades de gestão deste tipo de resíduos. Aliás, a variação das propriedades dos resíduos da construção e demolição poderá tornar impraticável o uso dos RCD como agregados devido à necessidade de frequências de amostragem muito elevadas, para o controlo da produção.

4.3. Classificação dos agregados

Para efeitos de utilização dos agregados reciclados abrangidos por esta proposta de especificação, são definidas cinco classes distintas de utilização.

Em cada classe, são estabelecidos requisitos mínimos para as seguintes propriedades do betão: resistência à compressão em cubos aos 28 dias; resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias; módulo de elasticidade aos 28 dias; absorção de água por imersão aos 28 dias; absorção de água por capilaridade; resistência à carbonatação aos 28 dias; resistência à penetração dos iões cloreto aos 91 dias. As propriedades de retracção e fluência não foram consideradas por não existir uma quantidade significativa de resultados. Os melhores e piores desempenhos estão associados às classes 1 e 5, respectivamente (Tabela 20).

Tabela 20 - Classificação dos AR em função dos desempenhos atingidos pelos betões

Classificação/ Propriedades	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Resistência à compressão em cubos (MPa)	> 95	82-95	75-82	68-75	< 68
Resistência à tracção por compressão diametral (MPa)	> 4,4	4,2-4,4	4,1-4,2	3,9-4,1	< 3,9
Módulo de elasticidade (GPa)	> 41	39-41	38-39	37-38	< 37
Absorção de água por imersão (%)	≤ 9,0	9,0- 11	11- 13	13- 15	> 15
Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	≤ 1,5x10 ⁻³	1,50x10 ⁻³ - 2,00x10 ⁻³	2,00x10 ⁻³ - 2,70x10 ⁻³	2,70x10 ⁻³ - 3,50x10 ⁻³	> 3,50x10 ⁻³
Resistência à carbonatação (mm)	≤ 0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	> 2,0
Resistência à penetração de iões cloreto (m ² /s)	≤ 5,0x10 ⁻¹²	5,0x10 ⁻¹² - 6,0x10 ⁻¹²	6,0x10 ⁻¹² - 7,5x10 ⁻¹²	7,5x10 ⁻¹² - 8,5x10 ⁻¹²	> 8,5x10 ⁻¹²

As percentagens máximas de incorporação foram definidas em função dos requisitos da Tabela 20, para três tipos de composições. As conclusões da especificação são apenas válidas para estas composições (Tabela 21).

Tabela 21 - Composições seleccionadas para o estabelecimento de regras

Características	Composições tipo I	Composições tipo II	Composições tipo III
Classe de cimento	42,5R	52,5R	52,5R
Teor de cimento	350 kg/m ³	360 kg/m ³	550 kg/m ³
Máxima relação a/l _e	0,49	0,41	0,28
Adições	Sem adições	Cinzas volantes - 40 kg/m ³	Cinzas volantes - 55 kg/m ³ Sílica de fumo - 55 kg/m ³
Adjuvantes	Superplastificante (1% da massa de cimento)	Superplastificante (1% da massa de cimento cinzas volantes)	(1% da massa de cimento e cinzas volantes)
Classe abaixamento	S3 (125 ± 15 mm)	S4 (190 ± 20 mm)	S4 (190 ± 20 mm)

Nas Tabelas 22 a 28, pode-se observar os desempenhos obtidos nos diversos ensaios, para cada tipo de composição. Para facilitar a análise, os valores que cumprem os requisitos das classes 1, 2, 3 e 4 encontram-se a verde, amarelo, laranja e azul, respectivamente. Por fim, os resultados que não cumprem os requisitos anteriores pertencem à classe 5 e encontram-se a vermelho.

Tabela 22 - Desempenhos de resistência à compressão em cubos aos 28 dias

	Percentagem de substituição dos agregados										
	0/0			25/25		50/50		100/100		0/100	
	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)								
Composição Tipo I	72,6 ± 1,7	68,2 ± 1,2	-6,1	66,5 ± 0,3	-8,5	61,8 ± 1,2	-14,9	68,7 ± 1,6	-10,0		
Composição Tipo II	82,9 ± 1,9	- ¹		79,6 ± 3,0	-3,9	77,6 ± 1,4	-6,4	80,6 ± 3,6	-2,7		
Composição Tipo III	102,2 ± 1,7	- ¹		99,3 ± 1,0	-4,3	97,3 ± 1,4	-6,3	100,4 ± 0,4	-3,3		

*¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Tabela 23 - Desempenhos de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

	Percentagem de substituição dos agregados										
	0/0			25/25		50/50		100/100		0/100	
	Resistência à tracção (MPa)	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)								
Composição Tipo I	4,6 ± 0,1	3,9 ± 0,0	-15,0	3,6 ± 0,1	-20,6	3,0 ± 0,1	-35,1	3,9 ± 0,2	-14,0		
Composição Tipo II	5,3 ± 0,3	- ¹		4,2 ± 0,2	-20,7	3,8 ± 0,3	-28,7	4,4 ± 0,0	-16,1		

Composição Tipo III	5,3 ± 0,2	- ¹	4,2 ± 0,2	-21,6	3,9 ± 0,1	-27,3	4,4 ± 0,2	-18,2
----------------------------	-----------	----------------	-----------	-------	-----------	-------	-----------	-------

¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Tabela 24 - Desempenhos de módulo de elasticidade aos 28 dias

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)						
Composição Tipo I	44,5 ± 0,1	42,1 ± 1,4	-5,4	38,3 ± 2,2	-14,0	35,4 ± 0,6	-20,5	40,4 ± 1,2	-9,1
Composição Tipo II	51,7 ± 30	- ¹		41,8 ± n.d	-20,7	40,6 ± 0,8	-28,7	44,9 ± 0,1	-16,1
Composição Tipo III	56,7 ± 0,9	- ¹		48,6 ± 2,4	-14,3	41,9 ± 4,0	-26,1	53,8 ± 2,2	-5,0

¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Tabela 25 - Desempenhos de absorção de água por imersão

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Absorção de água por imersão (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
Composição Tipo I	11,9 ± 0,1	13,3 ± 0,2	11,1	14,5 ± 0,1	21,3	19,0 ± 0,4	58,8	14,5 ± 0,5	21,9
Composição Tipo II	9,3 ± 0,1	- ¹		12,9 ± 0,1	38,9	16,6 ± 0,1	78,8	12,1 ± 0,3	30,8
Composição Tipo III	7,4 ± 0,2	- ¹		10,7 ± 0,2	43,5	13,3 ± 0,4	79,7	8,9 ± 0,1	20,3

¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Tabela 26 - Desempenhos de absorção de água por capilaridade às 72 horas

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0/0	25/25		50/50		100/100		0/100	
	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
Composição Tipo I	1,84E-03 ± 1,6E-04	2,47E-03 ± 5,1E-05	34,1	2,85E-03 ± 2,8E-04	54,9	4,27E-03 ± 1,7E-04	132,2	2,62E-03 ± 4,3E-04	42,7
Composição Tipo II	2,30E-03 ± 5,9E-05	- ¹		2,97E-03 ± 1,8E-04	28,9	3,65E-03 ± 2,1E-04	58,7	2,70E-03 ± 1,0E-04	17,5
Composição Tipo III	1,25E-03 ± 6,2E-05	- ¹		1,68E-03 ± 4,6E-05	33,8	1,84E-03 ± 1,1E-04	47,4	1,50E-03 ± 3,4E-05	20,0

¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Tabela 27 - Desempenhos de carbonatação aos 28 dias

	Percentagem de substituição dos agregados									
	0/0		25/25		50/50		100/100		0/100	
	Profundi- dade de carbonata- ção aos 28 dias (mm)	Profundi- dade de carbonata- ção aos 28 dias (mm)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)							
Composição Tipo I	1,5 ± 0,3	1,9 ± 0,3	26,7	2,2 ± 0,2	46,7	2,6 ± 0,5	73,3	2,1 ± 0,2	40,0	
Composição Tipo II	0,3 ± 0,1	- ¹		0,3 ± 0,1	0,0	0,5 ± 0,1	66,7	0,3 ± 0,1	0,0	
Composição Tipo III	0,1 ± 0,1	- ¹		0,2 ± 0,1	100,0	0,3 ± 0,1	200,0	0,2 ± 0,1	100,0	

¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Tabela 28 - Desempenhos de difusão de cloretos aos 91 dias

	Percentagem de substituição dos agregados									
	0/0		25/25		50/50		100/100		0/100	
	Coefficiente de difusão dos íons cloreto aos 28 dias ($\times 10^{-12}$ m^2/s)	Coefficiente de difusão dos íons clore- to aos 28 dias ($\times 10^{-12}$ m^2/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de difusão dos íons clore- to aos 28 dias ($\times 10^{-12}$ m^2/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de difusão dos íons clore- to aos 28 dias ($\times 10^{-12}$ m^2/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de difusão dos íons cloreto aos 28 dias ($\times 10^{-12}$ m^2/s)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	
Composição Tipo I	7,8 ± 0,6	8,0 ± 0,9	2,6	8,7 ± 0,7	11,5	9,0 ± 0,7	15,4	8,1 ± 1,1	3,8	
Composição Tipo II	3,7 ± 0,2	- ¹		5,0 ± 0,2	36,5	5,7 ± 0,3	55,5	4,4 ± 0,8	21,0	
Composição Tipo III	3,3 ± 0,2	- ¹		4,5 ± 0,3	34,6	4,8 ± 0,2	44,1	4,1 ± 0,1	22,9	

¹ Esta taxa de substituição não foi considerada para as composições do tipo II e III.

Através dos resultados evidenciados nas Tabelas 22 a 28, procedeu-se à determinação da percentagem máxima de incorporação de AR de cada um dos três tipos de composição, para corresponder a cada uma das cinco classes (Tabela 29).

A Tabela 30 resume a validação das percentagens máximas de incorporação de AR efectuada através da análise dos resultados das diversas propriedades.

4.4. Propriedades e requisitos mínimos

As incorporações de agregados reciclados pertencentes às classes 1, 2, 3, 4 e 5 devem cumprir os requisitos estabelecidos na presente especificação, relativamente a determinadas propriedades (Tabela 31).

Tabela 29 - Validação das percentagens de incorporação de AR através dos resultados das diferentes propriedades

Incorporação máxima de agregados finos reciclados	Classe	Resultados aos ensaios mecânicos			Resultados aos ensaios de durabilidade			
		Compressão em cubos (MPa)	Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Imersão (%)	Capilaridade (g/mm ²)	Carbonatação (mm)	Cloretos (x10 ⁻¹² m ² /s)
0/100 % Composição tipo III	1	100,4	4,4	53,8	8,9	1,50E-03	0,2	4,1
50/50 % Composição tipo III	2	99,3	4,2	48,6	10,7	1,68E-03	0,2	4,5
0/100 % Composição tipo II	3	80,6	4,4	44,9	12,1	2,70E-03	0,3	4,4
25/25 % Composição tipo I	4	68,2	3,9	42,1	13,3	2,47E-03	1,9	8,0
0/100 % Composição tipo I		68,7	3,9	40,4	14,5	2,62E-03	2,1	8,1
50/50 % Composição tipo II		79,6	4,2	41,8	12,9	2,97E-03	0,3	5,0
100/100 % Composição tipo III		97,3	3,9	41,9	13,3	1,84E-03	0,3	4,8
50/50 % Composição tipo I	5	66,5	3,6	38,3	14,5	2,85E-03	2,2	8,7
100/100 % Composição tipo I		61,8	3,0	35,4	19,0	4,27	2,6	9,0
100/100 % Composição tipo II		77,6	3,8	40,6	16,6	3,65E-03	0,5	5,7

Tabela 30 - Incorporação máxima de AR de cada tipo de composição para cada classe

Classificação	Incorporação máxima de AR (AFRB/AGRB%)
Classe 1	0/0 % Composição tipo I
	0/0 % Composição tipo II
	0/100 % Composição tipo III
Classe 2	0/0 % Composição tipo I
	0/0 % Composição tipo II
	50/50; 0/100% Composição tipo III
Classe 3	0/0 % Composição tipo I
	0/100 % Composição tipo II
	50/50; 0/100% Composição tipo III
Classe 4	25/25; 0/100 % Composição tipo I
	50/50; 0/100 % Composição tipo II
	100/100% Composição tipo III
Classe 5 (Betão de não elevado desempenho)	100/100 % Composição tipo I
	100/100 % Composição tipo II
	100/100 % Composição tipo III

Tabela 31 - Propriedades e requisitos mínimos de conformidade dos AR

Propriedades	Norma de ensaio	Requisitos de conformidade
Massa volúmica (kg/m ³)	EN 1097-6	≥ 2200
Absorção de água (%)	EN 1097-6	≤ 7

4.5. Regras de aplicação

A utilização de agregados reciclados com origem em BO pré-fabricado de elevada qualidade no fabrico de betões de ligantes hidráulicos fica sujeita às condições estabelecidas na presente especificação. A utilização de AR de origem e/ou composição diferentes implica a execução de novos estudos para avaliar o seu impacte nas propriedades fundamentais para o desempenho do betão.

As percentagens de incorporação de AR, para cada tipo de composição, devem variar em função das exigências de cada situação. Estas exigências devem ser especificadas utilizando as classes definidas na Tabela 20. O dono de obra poderá indicar apenas uma classe global (todas as propriedades devem apresentar uma classe menor ou igual) ou especificar, para cada propriedade, a classe pretendida.

4.6. Controlo de qualidade

O controlo de qualidade dos AR poderá ser feito, de uma forma conservativa, através da resistência do seu betão de origem (f_{cm}) que deverá ser sempre superior a 65 MPa. No entanto, caso seja exigido, poderão ser realizados ensaios para averiguar se os AR respeitam os requisitos mínimos estabelecidos na Tabela 30.

5. Considerações finais

O presente relatório procurou estabelecer um conjunto de regras para a utilização de agregados reciclados de betão pré-fabricado (finos e grossos) em betões de elevado desempenho. Para isso, foi elaborada uma proposta de especificação técnica que pretende ser um complemento da especificação LNEC E 471, onde apenas são definidas as condições de utilização de agregados grossos reciclados no fabrico de betões de ligantes hidráulicos.

A proposta elaborada foi baseada nos valores obtidos no decurso da campanha experimental do projecto, quer nos ensaios aos AR quer nos ensaios aos BED.

Com o trabalho realizado, mostrou-se ser possível a incorporação de agregados reciclados em betões de elevado desempenho. No entanto, verificou-se a necessidade de serem estabelecidos limites máximos de substituição de AN por AR de acordo com as exigências preconizadas em cada situação. Deste modo, a proposta de especificação define classes de classificação dos AR em função dos desempenhos atingidos pelos betões num conjunto de propriedades (resistência à compressão em cubos aos 28 dias; resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias; módulo de elasticidade aos 28 dias; absorção de água por imersão aos 28 dias; absorção de água por capilaridade; resistência à carbonatação aos 28 dias e resistência à penetração dos iões cloreto aos 91 dias).

6. Bibliografia

Coutinho, A.; Gonçalves, A. - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II, III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 1997.

Gómez-Soberón J. - Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. Cement and Concrete Research. Vol. 32. N.º 8. 2002. pp. 1301–11.

Kong, D.; Lei, T.; Zheng, J.; Ma, C.; Jiang, J.; Jiang, J. - Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. Vol.24. N.º 5. 2010. pp. 701–708.

LNEC E 471 - Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. LNEC. Lisboa 2009.

LNEC E-391 - Betões: Determinação da resistência à carbonatação. LNEC. Lisboa 1993.

LNEC E-393 - Betões: Determinação da absorção da água por capilaridade. LNEC. Lisboa 1993.

LNEC E-394 - Betões: Determinação da absorção da água por imersão. Ensaio pressão atmosférica. LNEC. Lisboa 1993.

LNEC E-397 - Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC. Lisboa 1993.

LNEC E-398 - Betões: Determinação da retracção e da expansão. LNEC. Lisboa 1993.

LNEC E-399 - Betões: Determinação da fluência em compressão. LNEC. Lisboa 1993.

LNEC E-463 - Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. LNEC. Lisboa 2004.

Malhotra, V. - Testing hardened concrete: nondestructive methods. American Concrete Institute. 1976.

Neville, A.M.- Properties of concrete. Pitman, London. 1981. 844p.

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

NP EN 12350-6 - Ensaio do betão fresco: Massa volúmica. IPQ. Lisboa 2009.

NP EN 12390-6 - Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes. IPQ. Lisboa 2011.

NP EN 12504-4 - Ensaio do betão nas estruturas: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. IPQ. Lisboa 2007.

NP EN 206-1 - Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ. Lisboa 2005.

Sato, R.; Maruyama, I.; Sogabe, T.; Sog, M. - Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams. Journal of Advanced Concrete Technology. Vol. 5. N.º 1. 2007. pp. 43-61.

Silva, R.V.; de Brito, J.; Dhir, R.K. - Properties and composition of recycled aggregates. Construction and Building Materials, Vol. 65. 2014. pp. 201-217.

Tu, T.Y.; Chen, Y.Y.; Hwang, C.L. - Properties of HPC with recycled aggregates. Cement and Concrete Research. Vol. 36. N.º 5. 2006. pp. 943-950.

Wirquin, E.; Hadjieva-Zaharieva, R.; Buyle-Bodin, F. - Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete - Application to recycled aggregate concrete. Materials and Structures. Vol.33. N.º 6. 2000. pp. 403-408.

Xiao, J.; Li, J.; Zhang, C. - Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement and Concrete Research. Vol. 35. 2005. Pp. 1187-1194.

Xiao, J.; Ying, J.; Shen, L. - FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. Vol.29. 2012. pp. 12-23.

Lisboa, 26 de Maio de 2015

Autores

Diogo Pedro
Bolsheiro de Investigação

Miguel Bravo
Investigador

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Luís Evangelista
Professor Adjunto

Pedro Silva
Professor Adjunto