



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 3

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

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BETÕES DE ELEVADA RESISTÊNCIA INCORPORANDO SIMULTANEAMENTE AGREGADOS FINOS E GROSSOS RECICLADOS

RELATÓRIO

Setembro de 2014

Financiamento FCT/POCTI



Governo da República Portuguesa



União Europeia

FEDER

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	1
3. MATERIAIS UTILIZADOS	5
4. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO	6
4.1. Abaixamento (cone de Abrams)	6
4.2. Massa volúmica	7
5. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	8
5.1. Propriedades em termos mecânicos	8
5.1.1. Resistência à compressão em cubos	9
5.1.2. Resistência à compressão em cilindros	12
5.1.3. Resistência à tracção por compressão diametral	15
5.1.4. Módulo de elasticidade	16
5.1.5. Velocidade de propagação dos ultra-sons	19
5.1.6. Resistência à abrasão	20
5.2. Propriedades em termos de durabilidade	22
5.2.1. Absorção de água por imersão	22
5.2.2. Absorção de água por capilaridade	24
5.2.3. Resistência à carbonatação	28
5.2.4. Resistência à penetração de cloretos	32
5.2.5. Retracção	35
5.2.6. Fluência	40
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44

Índice de figuras

Figura 1 - Resultados do ensaio de massa volúmica.....	7
Figura 2 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na massa volúmica.....	8
Figura 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	10
Figura 4 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica.....	10
Figura 5 - Influência da incorporação AFRB e AGRB na resistência à compressão	11
Figura 6 - Evolução resistência à compressão ao longo do tempo dos betões PF 65	12
Figura 7 - Evolução resistência à compressão ao longo do tempo dos betões LC 65	12
Figura 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros	13
Figura 9 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à compressão em cilindros	14
Figura 10 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e em cilindros	14
Figura 11 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral....	15
Figura 12 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à tracção.....	16
Figura 13 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.....	17
Figura 14 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB no módulo de elasticidade .	18
Figura 15 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.....	18
Figura 16 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons.....	19
Figura 17 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade	20
Figura 18 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão	21
Figura 19 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à abrasão	21
Figura 20 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.....	23
Figura 21 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na absorção de água por imersão	24
Figura 22 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão	24
Figura 23 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas.....	25
Figura 24 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na absorção de água por capilaridade.....	26
Figura 25 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões PF 65	26

Figura 26 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões LC 65.....	27
Figura 27 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade	28
Figura 28 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão	28
Figura 29 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 e 91 dias	30
Figura 30 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à carbonatação	30
Figura 31 - Evolução da resistência à carbonatação ao longo do tempo nos betões PF 65 MPa	31
Figura 32 - Evolução da resistência à carbonatação ao longo do tempo nos betões LC 65 MPa	32
Figura 33 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão	32
Figura 34 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 28 dias	34
Figura 35 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na difusão de cloretos.....	34
Figura 36 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção de água por imersão	35
Figura 37 - Relação entre resistência penetração de cloretos e resistência compressão.	36
Figura 38 - Deformações devido retracção ao longo do tempo nos betões PF 65 MPa .	37
Figura 39 - Deformações devido retracção ao longo do tempo nos betões LC 65 MPa.	37
Figura 41 - Deformações por retracção aos 91 dias.....	39
Figura 42 - Relação entre retracção aos 91 dias e resistência compressão aos 56 dias ..	40
Figura 43 - Resultados do ensaio de fluência dos betões PF.....	40
Figura 44 - Resultados do ensaio de fluência dos betões LC	41
Figura 45 - Deformações por fluência aos 91 dias	42
Figura 46 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na fluência	43
Figura 47 - Relação entre fluência aos 91 dias e resistência à compressão aos 56 dias .	43

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades dos agregados.....	5
Tabela 2 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento.....	6
Tabela 3 - Resultados do ensaio de massa volúmica.....	7
Tabela 4 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.....	9
Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.....	9
Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 56 dias.....	9
Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros.....	13
Tabela 8 - Relações das resistências obtidas aos 28 dias em cubos e cilindros.....	14
Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias.....	15
Tabela 10 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.....	17
Tabela 11 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons.....	19
Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão.....	21
Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.....	22
Tabela 14 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas.....	24
Tabela 15 - Resultados dos coeficientes de capilaridade.....	27
Tabela 16 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 dias.....	28
Tabela 17 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 dias.....	29
Tabela 18 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 56 dias.....	29
Tabela 19 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 91 dias.....	29
Tabela 20 - Resultados dos coeficientes de carbonatação.....	31
Tabela 21 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 28 dias.....	33
Tabela 22 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias.....	33
Tabela 23 - Deformações por retracção aos 7 dias, para os diversos betões.....	37
Tabela 24 - Deformações por retracção aos 91 dias, para os diversos betões.....	37
Tabela 25 - Deformações por fluência aos 91 dias, para os diversos betões.....	41
Tabela 26 - Perdas de desempenho devidas à utilização de AR.....	45

Abreviaturas

AFRB	Agregados finos reciclados de betão
AGRB	Agregados grossos reciclados de betão
AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
PF 65	Família de betão pré-fabricado
LC 65	Família de betão de laboratório
Relação a/c	Relação água / cimento
BAR	Betões com agregados reciclados

1. Introdução

Neste relatório, são apresentados os resultados experimentais, resultantes do cumprimento da tarefa 3 do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlent-SUStainableCONcrete)”.

O objectivo desta tarefa foi procurar perceber o impacte da variação de agregados finos e grossos reciclados nas propriedades do betão.

Para isso, foram produzidas duas famílias distintas de betões: PF 65 e LC 65. As misturas PF 65 utilizaram agregados reciclados (AR) com origem em produtos de pré-fabricação enquanto as misturas LC 65 utilizaram AR provenientes de betões produzidos em laboratório. Os betões a partir dos quais foram produzidos ambos os agregados reciclados possuíam uma resistência à compressão de cerca de 65 MPa.

Relativamente às taxas de substituição de agregados finos e grossos reciclados (AFRB/AGRB%), foram consideradas as seguintes: 25/25, 50/50; 100/0, 0/100 e 100/100%. Por facilidade de linguagem, as taxas de 25/25, 50/50 e 100/100% também serão designadas, neste relatório, por 25, 50 e 100%, respectivamente.

Na avaliação realizada, foram efectuados ensaios de carácter 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.

Assim, como referido em relatórios anteriores, pretende-se estabelecer uma base científica sólida e inovadora, assente em análise experimental e formulação matemática, que permita à indústria da pré-fabricação a utilização sem restrições dos resíduos por si gerados.

2. Estado da arte

Devido aos enormes consumos de betão, a indústria da construção tem vindo a enfrentar uma série de problemas: esgotamento de agregados naturais; elevadas emissões de dióxido de carbono (associadas ao consumo de cimento Portland); elevadas quantidades de resíduos gerados e reduzido espaço para aterro (Radonjanin et al., 2013). De notar que, em 2002, foram produzidos no mundo inteiro cerca de 2,7 biliões de m³

de betão, o que representa mais do que 0,4 m³ de betão / pessoa / ano (Naik, 2008). Segundo Mehta e Monteiro (2006), a procura continuará a crescer, atingindo um valor de cerca de 7,5 biliões de m³/ano até 2050.

Neste contexto, a sustentabilidade da indústria passa pela adopção de várias medidas (Meyer, 2005): aumento do uso de materiais cimentícios alternativos; aumento da utilização de materiais reciclados; melhoria da durabilidade; melhoria das propriedades mecânicas e reutilização da água de lavagem.

Deste modo, o presente estudo centra-se na utilização de agregados reciclados, vector que permite não só a poupança de recursos naturais como também a libertação de espaço nos aterros.

Desde o seu início que a aplicação de AR tem sido frequentemente limitada a fins de baixo valor acrescentado, como betões não estruturais ou bases de estrada. As principais causas desta situação devem-se a uma percepção negativa sobre o desempenho dos betões reciclados (Buck, 1977; Hansen, 1992). Apesar de já existir alguma investigação que prova o contrário, este paradigma ainda não foi alterado (Malešev et al., 2010).

Na verdade, os agregados reciclados de betão são em princípio de qualidade inferior à dos agregados naturais. Esta situação deve-se à presença de argamassa aderida que é responsável por diminuir a massa volúmica e aumentar a absorção de água e porosidade dos AR face aos AN (Padmini et al., 2009; Kou e Poon, 2010-; Tam e Tam, 2007). As características referidas podem conduzir a uma diminuição da quantidade de água eficaz para o processo de hidratação e, por conseguinte, originar uma ITZ (*Interfacial Transition Zone*) mais fraca entre o agregado reciclado e a pasta de cimento (Poon et al., 2004). Contudo, existe actualmente conhecimento suficiente para controlar estas desvantagens.

O controlo da qualidade dos BAR pode ser feito através de diversos aspectos: quantidades de água e cimento (González-Fonteboa e Martínez Abella, 2006; Katz, 2003); condições de cura (Amorim et al., 2012); recurso a adições (Berndt, 2009; Kalla et al., 2013) e a adjuvantes (Pereira et al. 2011; Pereira et al., 2012). Também a origem, as condições de humidade e o processo de trituração dos AR são aspectos a ter em atenção (Pedro et al., 2014a; Pedro et al. 2014b; Poon et al., 2004; Ferreira et al., 2011; Nagataki and Lida, 2001; Nagataki et al., 2004; Matias et al. 2013). Os AR utilizados nos betões podem ainda ser objecto de tratamentos, de maneira a melhorar as suas propriedades (Kou e Poon, 2010; Tsujino et al., 2007).

Desta forma, existem vários estudos que, mostram que é possível produzir betão com agregados grossos reciclados com resistências semelhantes às dos betões conven-

cionais (Tabsh e Abdelfatah, 2009; Pedro et al., 2014a; Gonzalez e Etxeberria, 2014).

No trabalho desenvolvido por Pedro et al. (2014a), observa-se que, em termos de durabilidade, os BAR parecem ser mais sensíveis à incorporação de AGRB. Contudo, em misturas de média / elevada resistência, os BAR continuam a apresentar valores aceitáveis. Ainda nesta investigação, os ensaios de longo prazo mostraram aumentos de retracção significativos (na ordem de 60%), em relação ao BR, sendo esta a propriedade mais afectada.

Relativamente à utilização de agregados finos de betão, constata-se não existir um número significativo de estudos. Esta realidade pode ser justificada pela crença de que a incorporação de AFRB compromete o desempenho dos BAR, sobretudo para taxas de substituição superiores a 30% (P.C.A., 2002).

Nas investigações de Khatib (2005) e Sim e Park (2011), foram verificadas diminuições de resistência à compressão de cerca de 35%, para uma taxa de incorporação de 100%. Os resultados são justificados pelos investigadores pela presença de impurezas, argamassa aderida e maior taxa de absorção de água dos AFRB, uma vez que contribuem para a degradação das ligações entre os agregados e a nova matriz cimentícia. A menor massa específica dos AFRB em comparação com os AN poderá ser outra das causas para as perdas de desempenho registadas.

Contudo, na investigação de Evangelista e Brito (2007), foram obtidas diminuições menos significativas devido à presença de AFRB. Foram registadas perdas de resistência, aos 28 dias, de 4 e 8% para as taxas de substituição de 30 e 100%, respectivamente. As diferenças de desempenho entre investigações mostram a importância de aspectos já referidos, como a origem dos AR. No que respeita ao módulo de elasticidade, Khatib (2005) e Evangelista e Brito (2007) evidenciaram diminuições de módulo de elasticidade de cerca de 20%, em betões incorporando 100% de agregados finos reciclados.

Apesar dos resultados mecânicos serem satisfatórios, Evangelista e Brito (2010) afirmam que a substituição total de agregados finos naturais por AFRB será bastante difícil, devido a razões de durabilidade. Por exemplo, para os BAR produzidos apenas com AFRB, foram registados aumentos (em relação ao BR) de cerca de 46, 70, 35 e 70% nas propriedades de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos e carbonatação, respectivamente. Os autores consideram que, para a produção de betão estrutural, devem ser adoptadas taxas de incorporação inferiores (cerca de 30%).

No que respeita à utilização conjunta de AFRB e de AGRB, a informação é ainda mais reduzida. Um dos poucos estudos existentes tem cerca de 30 anos. Foi realizado por Ravindrarajah et al. (1987) e pretendeu analisar os efeitos da utilização de AR sobre a resistência e a deformação do betão. Os resultados mostraram que, para um betão de força média, a resistência e o módulo de elasticidade foram reduzidos em cerca de 10 e 35%, respectivamente. No que respeita à retracção, os valores desta propriedade quase que duplicaram quando agregados reciclados substituíram agregados naturais. Relativamente às propriedades do betão no estado fresco, verificou-se apenas uma variação marginal devida ao uso de AR.

Noutro estudo, Poon et al. (2002) procuraram desenvolver uma técnica para a produção de tijolos e blocos de pavimento em betão. Foram consideradas taxas de substituição até 100% (em peso), com ou sem incorporação de cinzas volantes. Os resultados mostraram que a substituição de agregados naturais (finos e grossos) por AR, em níveis de 25 e 50%, tem um impacto mínimo sobre a resistência à compressão (variações de 5%). No entanto, para a taxa de substituição de 100%, os betões com resistências de 40-65 MPa, exibiram uma diminuição, em relação ao BR, de cerca de 14%. Nos betões com resistências de 11-17 MPa, essa diminuição foi de 30%. No que respeita aos ensaios de longo prazo, nomeadamente na propriedade de retracção, foram observados também desempenhos satisfatórios, para os níveis de 25 e 50% (variações de cerca de 15%, relativamente ao BR). Relativamente à incorporação máxima de AR, foram registados aumentos de 30-44%.

No trabalho de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), analisou-se a influência de agregados reciclados nas propriedades mecânicas dos betões de elevada resistência/elevado desempenho. Os autores concluíram que a incorporação de 100% de AFRB e AGRB provocou diminuições de resistência à compressão de cerca de 10-20%. Na retracção, foram verificados aumentos, em relação ao BR, entre 35 e 45%. No que respeita à fluência, foram obtidos resultados inesperados, registando-se diminuições, em relação ao BR, de cerca de 20%.

Sim e Park (2011) pretenderam avaliar a influência de AFRB e de AGRB, em betões estruturais. Nesta investigação, foram consideradas várias taxas de substituição de agregados finos naturais por AFRB, enquanto os agregados grossos naturais foram completamente substituídos por AGRB. Foram também utilizados vários níveis de adição de cinzas volantes. Os resultados mostraram que a resistência à compressão diminuiu com a taxa de incorporação de AR. Foram verificadas diminuições de cerca de 6,

9, 15, 25 e 30%, para as taxas de substituição de 30, 50, 60, 70 e 100%, respectivamente. Contudo, independentemente das condições de cura e da adição de cinzas volantes, a resistência dos BAR foi maior do que a resistência de projecto definida (40 MPa), para as situações de substituição total de agregados grossos e níveis de incorporação de AFRB até 60%. Em termos de durabilidade, o BAR atingiu uma resistência suficiente à penetração de iões cloreto. Foram observados valores semelhantes entre o BR e BAR de 100% (sem cinzas volantes). Relativamente à profundidade de carbonatação, apesar de o BAR conseguir desempenhos adequados, parece não existir uma relação clara com a taxa de substituição de AFRB.

Muito recentemente, no trabalho de Khoshkenari et al. (2014), teve-se como objectivo investigar o papel da fracção 0-2 mm nas propriedades do betão. Os resultados mostraram que agregados finos e grossos reciclados, provenientes de um betão de origem de 30 MPa, apresentavam cerca de 11,5 e 3,5 vezes mais absorção de água relativamente a agregados naturais finos e grossos, respectivamente. A densidade dos AR foi cerca de 20% menor do que a dos AN e, conseqüentemente, a densidade do BAR foi aproximadamente 8-13,5% menor do que a do BR. No que respeita à resistência à compressão e à tracção por compressão diametral, ocorrem também diminuições de desempenho com a utilização de agregados reciclados.

3. MATERIAIS UTILIZADOS

Na presente campanha experimental, foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos naturais (areia de rio), agregados grossos naturais (pedra calcária triturada), agregados reciclados (finos e grossos) de betão, cimento e água. Foi adicionado ainda superplastificante (SikaPlast 898) na proporção de 1% da massa de cimento. Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades dos agregados.

Tabela 1 – Propriedades dos agregados

Tipo de agregado	Massa volúmica (kg/m ³)			Absorção de água (%)
	Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
Areia fina	2663	2662	2617	0,2
Areia grossa	2640	2610	2615	0,5
Brita 1	2700	2680	2670	0,6
Brita 2	2710	2670	2690	0,6
AFRB PF	2855	2433	2580	6,1
AGRB PF	2614	2371	2464	3,9
AFRB LC	2756	2337	2489	6,5
AGRB LC	2484	2280	2362	3,6

No que respeita à absorção de água, devido à quantidade residual de argamassa aderida, os valores dos AR são muito superiores aos dos agregados naturais. Esta realidade é ainda mais evidente para a fracção fina. Por conseguinte, é expectável que os BAR apresentem maiores relações a/c.

No entanto, os AR utilizados conseguem cumprir os requisitos necessários para a sua aplicação em betão (Building Contractors Society of Japan, 1981). Estes limites para agregados grossos e finos reciclados foram fixados em 7 e 13%, respectivamente.

Relativamente aos valores de massa volúmica, verifica-se uma maior proximidade entre AR e AN. As diferenças não ultrapassam 12%.

Além disso, utilizando o sistema de classificação proposto por Silva et al. (2014), constata-se que todos os agregados reciclados desta campanha, em termos de valores de massa volúmica, poderiam pertencer à classe A (agregados de melhor qualidade).

4. Ensaio ao betão no estado fresco

Neste capítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado fresco (trabalhabilidade e massa volúmica). Estes ensaios pretendem avaliar a conformidade da classe de consistência definida para todos os betões (S3) e a densidade dos betões produzidos.

4.1. Abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento foi efectuado segundo a norma NP EN 12350-2 (2009). Foi definido um abaixamento alvo de 125 mm, com uma tolerância máxima de 15 mm relativamente a este valor. Na Tabela 2, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 2 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento

	PF 65 MPa		LC 65 MPa	
	Relação a/c	Abaixamento (mm)	Relação a/c	Abaixamento (mm)
BR 0/0	0,47	115	0,47	115
B 25/25	0,47	122	0,48	132
B 50/50	0,48	135	0,48	123
B 100/0	0,49	127	0,49	131
B 0/100	0,47	122	0,47	134
B 100/100	0,49	128	0,49	130

Através da observação da tabela, constata-se que todos os betões produzidos respeitam o intervalo 125 ± 15 mm. De forma a garantir trabalhabilidades idênticas, foi necessário aumentar a relação água / cimento dos BAR. 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.

4.2. Massa volúmica

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-6 (2009). Na Tabela 3 e Figura 1, são apresentados os resultados.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de massa volúmica

	PF 65 MPa		LC 65 MPa	
	Massa volúmica (kg/m^3)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Massa volúmica (kg/m^3)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	2428,3	0,0	2428,3	0,0
B 25/25	2371,8	-2,3	2330,3	-4,0
B 50/50	2352,2	-3,1	2278,9	-6,2
B 100/0	2337,3	-3,7	2255,9	-7,1
B 0/100	2357,3	-2,9	2301,6	-5,2
B 100/100	2300,8	-5,3	2209,4	-9,0

Analisando a Tabela 2, verifica-se que a massa volúmica do betão no estado fresco diminui com o aumento da percentagem de AR. Esta diminuição parece ocorrer de forma aproximadamente linear (Figura 1).

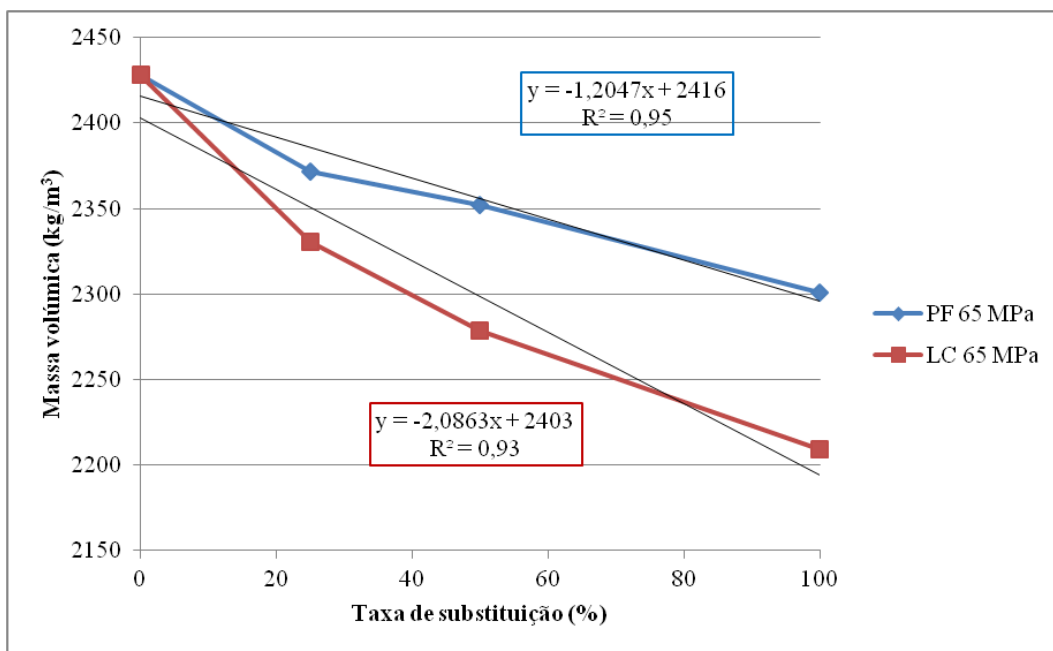


Figura 1 - Resultados do ensaio de massa volúmica

Os resultados podem ser justificados com a menor massa volúmica dos agregados reciclados, comparativamente aos agregados naturais.

Através da Figura 2, pode-se também observar que esta redução é mais significativa quando são utilizados AFRB. Nos betões em que AFN foram substituídos por AFRB, verificaram-se reduções de 4-9%, em relação ao BR, enquanto nos betões com 100% de AGRB as diminuições foram de apenas de 3-5%. A família LC parece evidenciar as maiores diferenças entre finos e grossos reciclados.

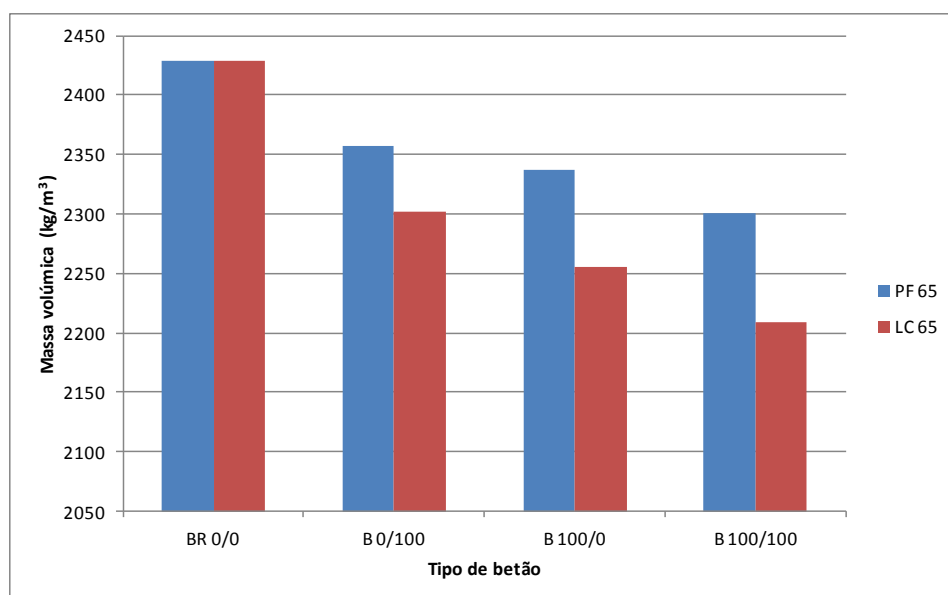


Figura 2 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na massa volúmica

5. Ensaio ao betão no estado endurecido

No capítulo 3, são apresentados de forma comentada os resultados obtidos para o betão no estado endurecido, caracterizando a influência da incorporação de agregados reciclados (finos e grossos). São ainda apresentadas tabelas, com colunas indicativas das variações dos resultados devidas à incorporação de AR, de modo a perceber-se a influência destes no desempenho dos betões produzidos.

5.1. Propriedades em termos mecânicos

Neste subcapítulo, são avaliadas as características mecânicas de betões com agregados reciclados, através da comparação com betões de referência.

5.1.1. Resistência à compressão em cubos

O ensaio de resistência compressão foi efectuado aos 7, 28 e 56 dias segundo a norma NP EN 12390-3 (2011). Nas Tabelas 4, 5 e 6, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	65,4	0,0	1,6	65,4	0,0	1,6
B 25/25	59,8	-8,6	1,8	58,7	-10,3	1,8
B 50/50	58,8	-10,2	1,4	54,0	-17,5	1,4
B 100/0	53,9	-17,6	1,2	50,9	-22,2	0,6
B 0/100	59,3	-9,3	2,0	58,9	-9,9	1,0
B 100/100	55,5	-15,2	1,3	52,9	-19,2	3,6

Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	72,6	0,0	1,7	72,6	0,0	1,7
B 25/25	68,2	-6,1	1,2	68,9	-5,1	2,1
B 50/50	66,5	-8,5	0,3	63,8	-12,1	1,5
B 100/0	65,4	-10,0	2,2	61,5	-15,4	1,7
B 0/100	68,7	-5,4	1,6	66,9	-7,9	1,9
B 100/100	61,8	-14,9	1,2	61,0	-16,0	0,5

Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 56 dias

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	74,3	0,0	0,4	74,3	0,0	0,4
B 25/25	72,1	-3,0	2,0	72,3	-2,7	4,2
B 50/50	69,0	-7,2	2,4	67,2	-9,6	1,3
B 100/0	68,3	-8,2	0,7	64,8	-12,8	1,6
B 0/100	71,8	-3,4	1,0	70,0	-5,8	3,0
B 100/100	64,3	-13,5	1,1	64,7	-13,0	1,0

Relativamente aos betões PF, aos 28 dias (Tabela 2) e para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, observa-se uma diminuição de resistência, relativamente ao betão de referência, de cerca de 6, 9 e 15%, respectivamente. No que respeita à família LC, foram registadas diminuições semelhantes (5, 12 e 16%).

Os resultados mostram que existe uma tendência para a diminuição linear da resistência com o aumento da quantidade de AR (Figura 3).

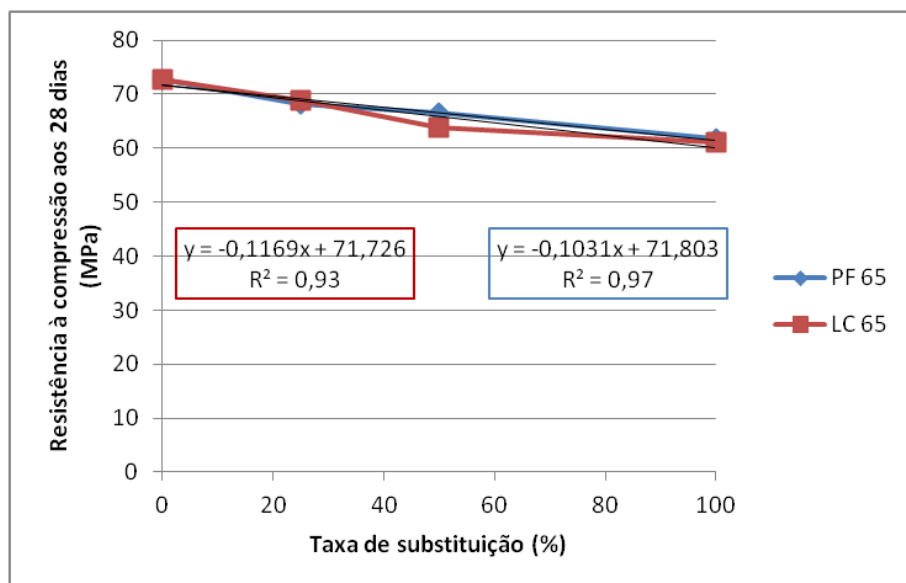


Figura 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Esta situação poderá ser explicada pela pior qualidade dos AR, que tem origem na sua argamassa aderida, responsável por diminuir a massa volúmica e aumentar a absorção destes agregados (Juan e Gutierrez, 2009; Debieb et al., 2010). Além das consequências referidas, a presença de argamassa aderida poderá também prejudicar a ligação entre o agregado e a matriz de cimento e, conseqüentemente, piorar as características de transferência de carga, provocando uma redução de resistência (Sagoe-Crentsil et al, 1988).

Por estes motivos, relativamente aos betões convencionais, os BAR tendem a apresentar menores massas volúmicas e relações a/c superiores, o que prejudica o seu desempenho. Na Figura 4, é possível verificar a diminuição da resistência do betão com a da sua massa volúmica.

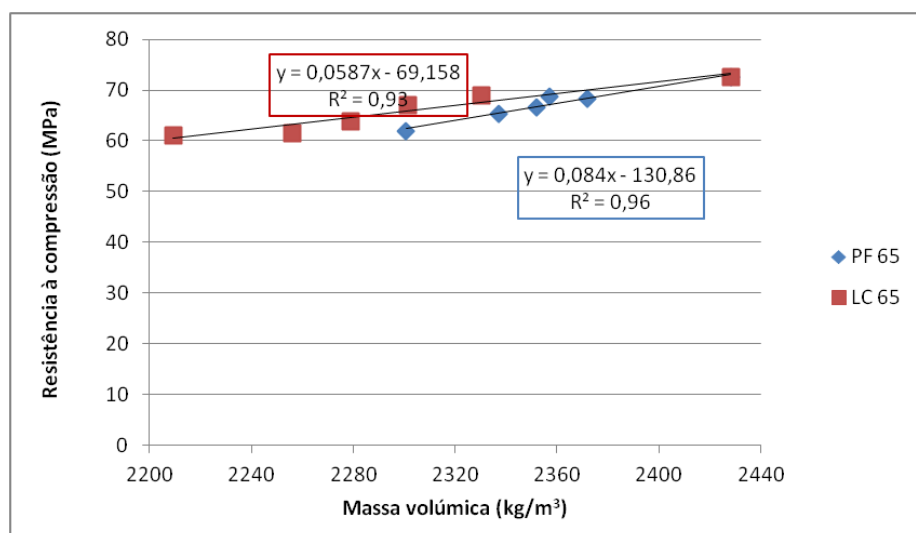


Figura 4 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) obtiveram resultados semelhantes. Os BAR com 100% de agregados reciclados (finos e grossos) exibiram uma diminuição máxima, em relação ao BR, de cerca de 20%. No trabalho de Poon et al. (2002), as reduções encontram-se dentro da mesma gama de valores, cerca de 14%, para as misturas de blocos de betão.

Analisando a Figura 5, verifica-se que a incorporação de 100% de agregados grossos reciclados PF e LC provoca reduções de resistência, em relação ao BR, de aproximadamente 5 e 8%, respectivamente.

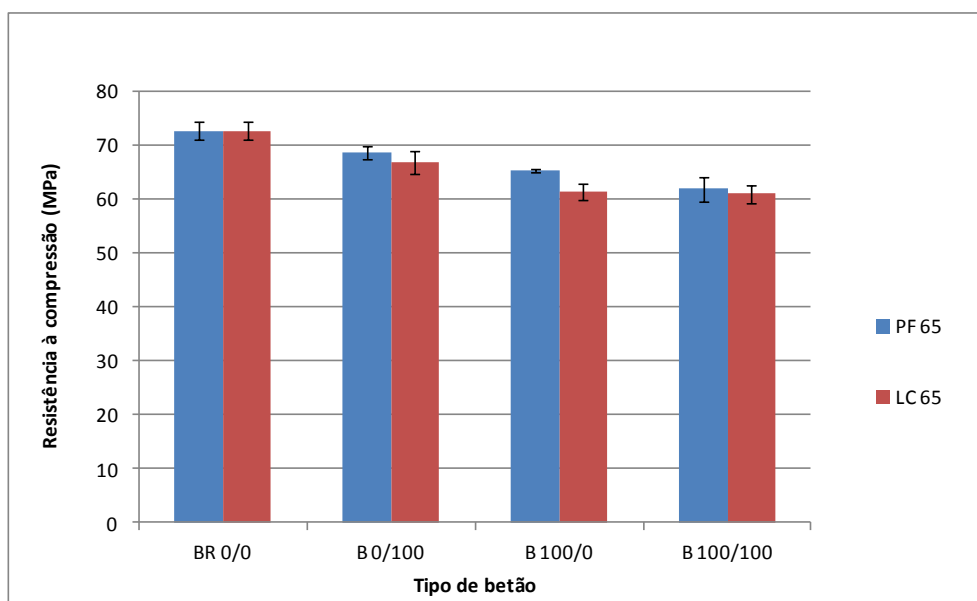


Figura 5 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à compressão

Nos betões em que a totalidade dos AFN foi substituída, as reduções observadas foram de cerca de 10-15%. Esta situação era expectável, uma vez que os agregados finos reciclados evidenciam maiores necessidades de água. Deste modo, a incorporação de AFR parece ser mais prejudicial ao desempenho dos betões (Hansen, 1992; Mehta, 1986).

Os resultados estão de acordo com as investigações de Evangelista (2007) e de Limbachiya et al. (2000) onde as substituições de finos e de grossos provocaram diminuições de cerca de 7 e 3%, respectivamente.

O desenvolvimento da resistência com o tempo é apresentado nas Figuras 6 e 7. Os resultados mostram que, em todas as idades, os BAR exibem os menores valores de resistência do que o BR. No entanto, verificam-se taxas de ganho semelhantes, para todas as misturas, independentemente da origem e do tipo de agregado utilizado.

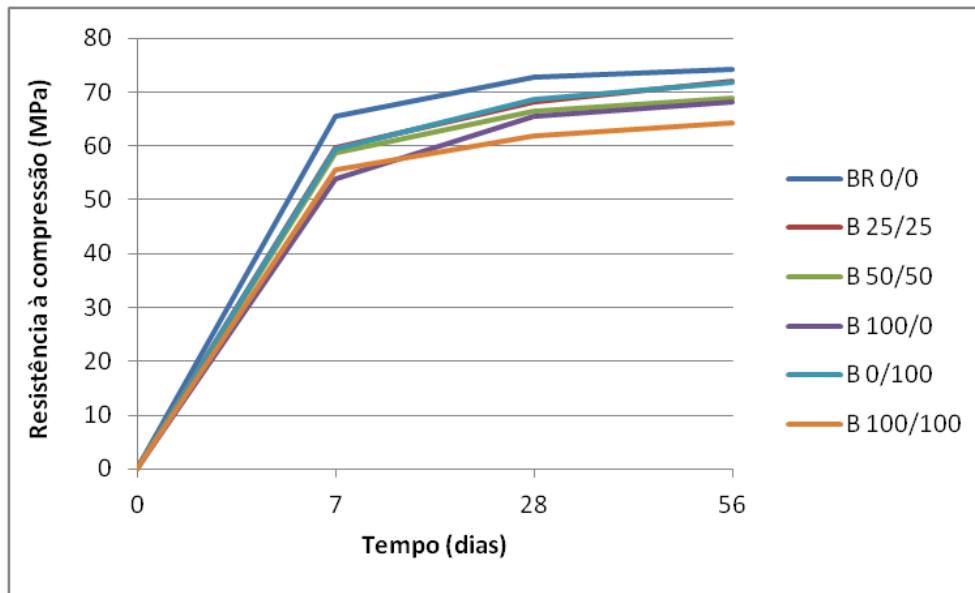


Figura 6 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões PF 65

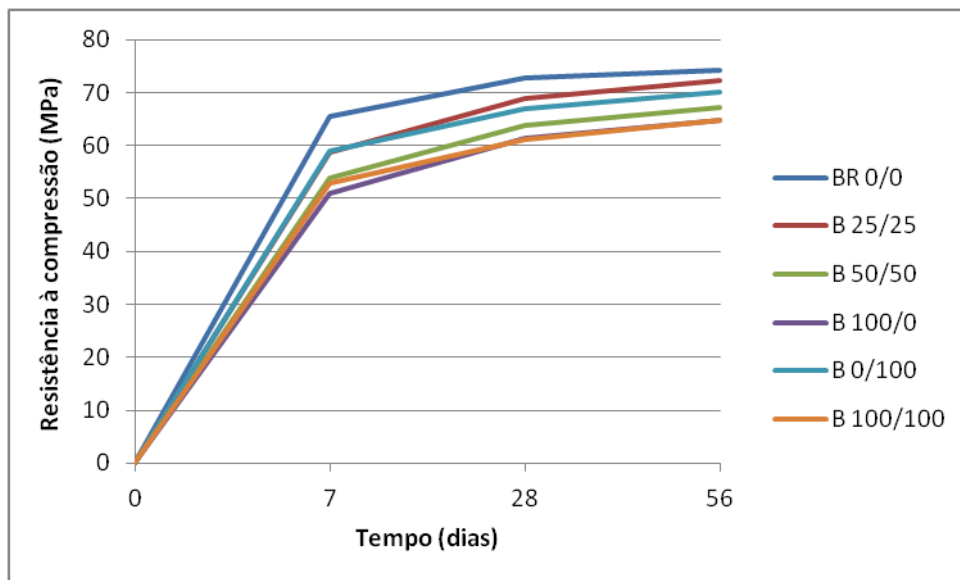


Figura 7 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões LC 65

Os resultados apresentados parecem indicar que, em termos de resistência à compressão, é possível a utilização de agregados reciclados na grande maioria dos elementos estruturais, cuja resistência se situa, geralmente, abaixo de 50 MPa.

5.1.2. Resistência à compressão em cilindros

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12390-3 (2011) aos 28 dias. Na Tabela 7, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	58,4	0,0	1,1	58,4	0,0	1,1
B 25/25	54,7	-6,3	1,0	55,4	-5,1	0,8
B 50/50	53,6	-8,2	1,0	51,6	-11,6	0,9
B 100/0	49,6	-15,1	0,6	49,4	-15,5	0,6
B 0/100	54,8	-6,1	0,9	53,6	-8,2	1,0
B 100/100	49,4	-15,4	1,2	49,4	-15,5	1,0

Tal como a resistência à compressão em cubos, também a resistência à compressão em cilindros diminui com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão. Através da análise da Tabela 6, verifica-se que os betões que utilizaram agregados de pré-fabricação e de laboratório apresentaram valores entre 49.4 e 54.8 MPa e entre 49.4 e 55.4 MPa, respectivamente. O BR evidenciou uma resistência de 58.4 MPa. Deste modo, para ambas as famílias, observa-se uma diminuição máxima de aproximadamente 15%. Os resultados são justificados pelos motivos anteriores, ou seja, pela argamassa aderida à superfície dos AR. Nesta propriedade, constata-se igualmente uma diminuição linear da resistência para taxas de substituição de 25, 50 e 100% (Figura 8) e uma maior influência dos finos no desempenho dos betões (Figura 9).

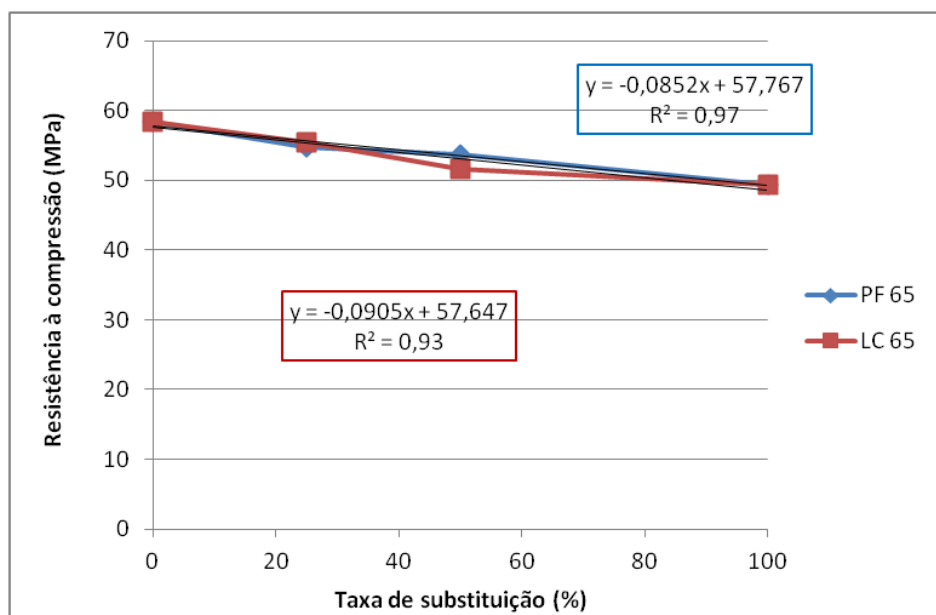


Figura 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros

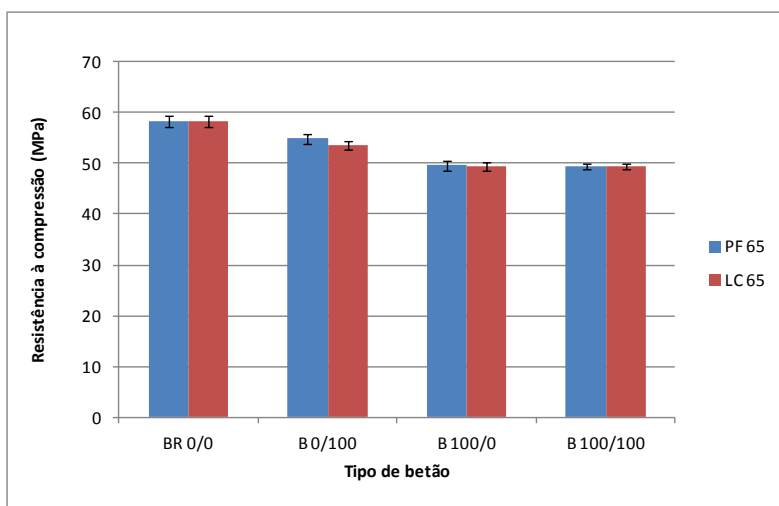


Figura 9 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à compressão em cilindros

No que se refere à relação entre resistência em cilindros e em cubos, verifica-se que, aos 28 dias, a tensão de rotura nos cilindros é em média 79,5 e 80,5% da tensão de rotura dos cubos, para os betões PF e LC, respectivamente (Tabela 8 e Figura 10).

Tabela 8 - Relações das resistências obtidas aos 28 dias em cubos e cilindros

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Resistências médias obtidas $f_{cm,28}$ (MPa)		Relação da resistência cilindro / cubo	Resistências médias obtidas $f_{cm,28}$ (MPa)		Relação da resistência cilindro/cubo
	Cubo	Cilindro		Cubo	Cilindro	
BR 0/0	72,6	58,4	0,80	72,6	58,4	0,80
B 25/25	68,2	54,7	0,80	68,9	55,4	0,80
B 50/50	66,5	53,6	0,81	63,8	51,6	0,81
B 100/0	65,4	49,6	0,76	61,5	49,4	0,80
B 0/100	68,7	54,8	0,80	66,9	53,6	0,80
B 100/100	61,8	49,4	0,80	61,0	49,4	0,81

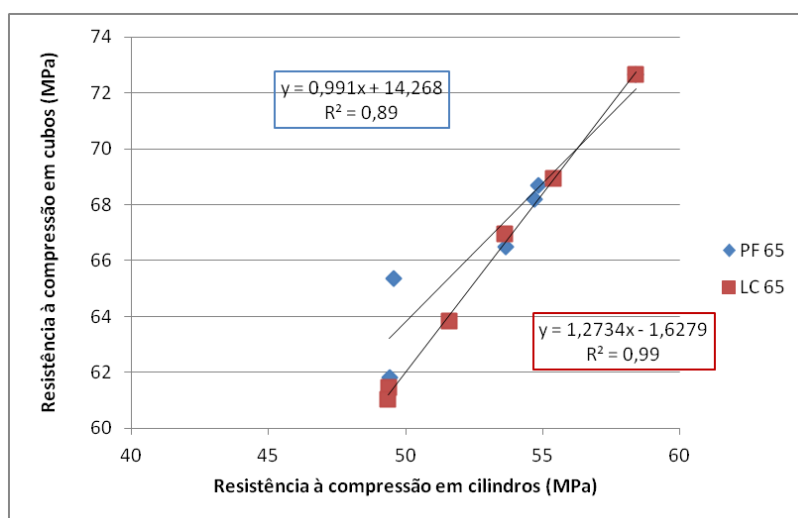


Figura 10 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e em cilindros

5.1.3. Resistência à tracção por compressão diametral

Este ensaio foi efectuado aos 28 dias segundo a norma EN 12390-6 (2011). Na Tabela 9, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	4,6	0,0	0,1	4,6	0,0	0,1
B 25/25	3,9	-15,0	0,0	3,7	-18,8	0,2
B 50/50	3,6	-20,6	0,1	3,5	-24,2	0,0
B 100/0	3,3	-28,4	0,3	2,9	-36,0	0,3
B 0/100	3,9	-14,0	0,2	3,8	-17,2	0,2
B 100/100	3,0	-35,1	0,1	2,8	-38,2	0,3

Observando a tabela, constata-se que o BR apresentou uma resistência à tracção por compressão diametral de 4,6 MPa. No que respeita aos betões com agregados reciclados de pré-fabricação e de laboratório, os valores variaram entre 3,0 e 3,9 MPa e entre 2,8 e 3,7 MPa, respectivamente.

Na Figura 11, é visível a diminuição desta propriedade com a incorporação de AR, ocorrendo variações máximas de 35 e 38% para os betões de PF e LC, respectivamente.

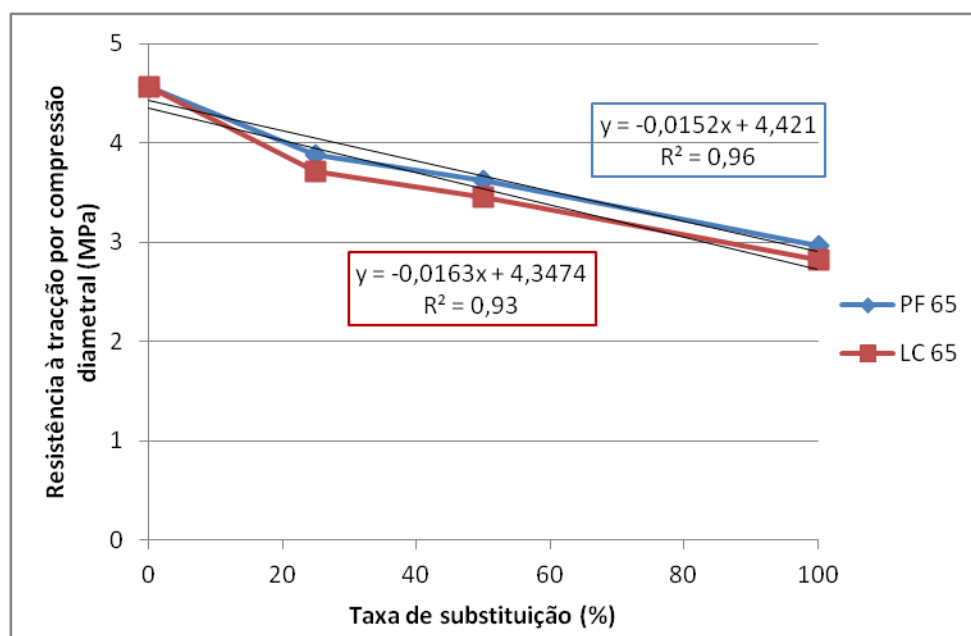


Figura 11 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

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

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

Os valores obtidos estão de acordo com os de Khoshkenari et al. (2014). Neste estudo, observou-se uma diminuição de cerca de 26-32%, quando agregados naturais (finos e grossos) foram substituídos por agregados reciclados. Verificou-se, igualmente, que a diminuição de resistência à tracção por compressão diametral foi mais acentuada do que a ocorrida na resistência à compressão.

Através da Figura 12, é possível detectar a maior influência dos AFRB no desempenho dos BAR. Deste modo, são visíveis diminuições de 14-17 e de 28-36%, em relação ao BR, caso a substituição integral ocorra nos AGN ou nos AFN, respectivamente. No que respeita à substituição de agregados finos naturais por AR, os resultados estão de acordo com os de Evangelista e Brito (2007). Os autores, para a taxa de incorporação de 100%, constataram reduções de aproximadamente 30%. Relativamente à incorporação de AGRB, os valores obtidos poderão ser validados através de Yang et al. (2011), onde foram registadas diminuições de cerca de 14%.

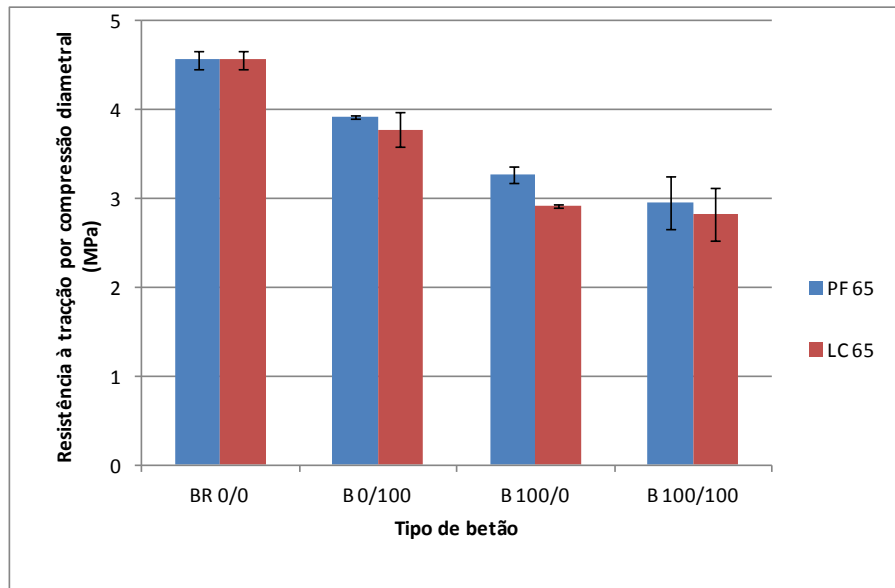


Figura 12 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à tracção

5.1.4. Módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado com base na especificação LNEC E-397 (1993) aos 28 dias. Na Tabela 10, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	44,5	0,0	0,1	44,5	0,0	0,1
B 25/25	42,1	-5,4	1,4	37,7	-15,2	0,8
B 50/50	38,3	-14,0	2,2	35,6	-20,1	1,4
B 100/0	38,3	-14,0	2,0	33,0	-25,8	1,0
B 0/100	40,4	-9,1	1,2	40,7	-8,5	0,5
B 100/100	35,4	-20,5	0,6	31,9	-28,3	1,4

Os BAR com AR de pré-fabricação apresentaram valores entre 35.4-42.1 GPa enquanto os betões com AR de laboratório obtiveram valores entre 31.9-40.7 GPa. O BR obteve um valor de 44.5 MPa.

Analisando os resultados, constata-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da incorporação de agregados reciclados (Figura 13). Nos betões PF, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, observam-se reduções, em relação ao BR, de aproximadamente 5, 14 e 21%, respectivamente. Nos betões de laboratório, para as mesmas percentagens de incorporação, as diminuições foram de 15, 20 e 28%.

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.

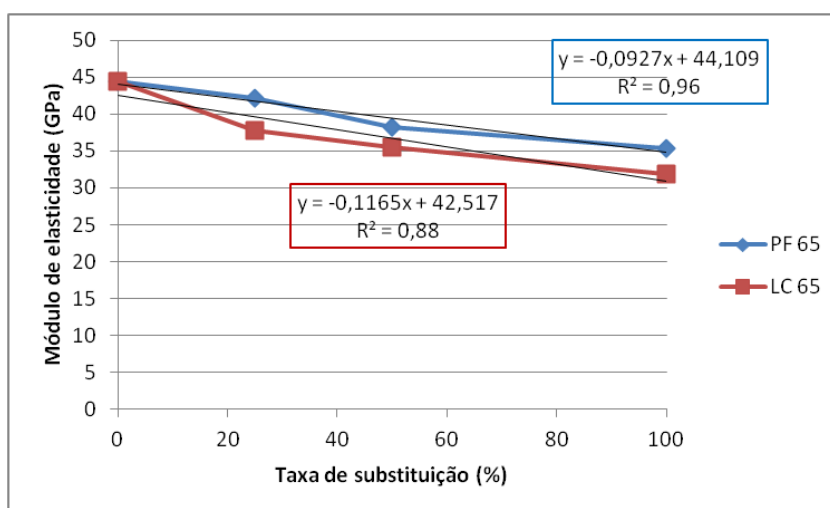


Figura 13 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

Comparando os valores obtidos com os de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), verifica-se uma proximidade acentuada entre ambos. Por exemplo, para a taxa de substituição de 100%, os autores observaram diminuições de 20-30%, em relação ao BR.

Na Figura 14, é ainda possível que a fracção fina dos AR parece conduzir a maiores diminuições nesta propriedade. Nos betões em que apenas AGN foram substituídos por agregados reciclados, verificaram-se reduções de 8,5-9,1%, em relação ao BR, enquanto nos betões integralmente produzidos com AR as diminuições foram de 20,5-28,3%. Esta situação é justificada pelo facto de o módulo de elasticidade depender não só da rigidez dos agregados grossos mas também da rigidez da argamassa, da sua porosidade e da ligação entre ambos (Neville,1981; Coutinho e Gonçalves, 1997). Como a incorporação de AFRB leva uma redução significativa da rigidez da argamassa em face do aumento da relação a/c, tal afecta consideravelmente o módulo de elasticidade do betão.

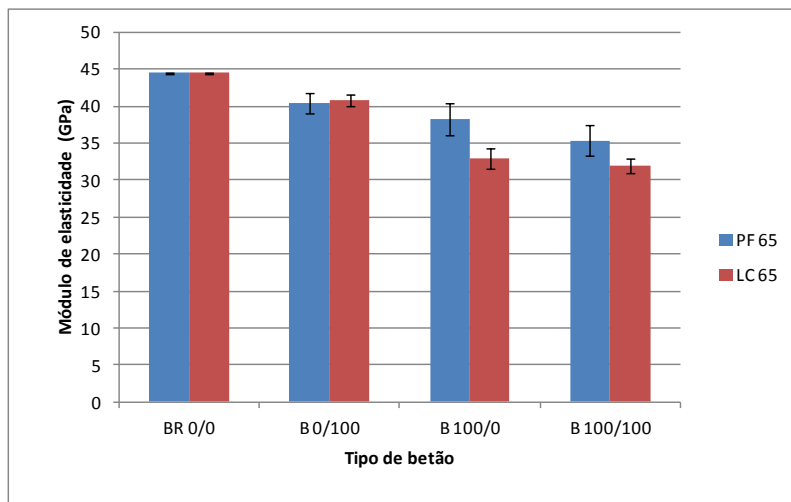


Figura 14 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB no módulo de elasticidade

Através da Figura 15, verifica-se a existência de uma estreita relação entre a resistência dos betões à compressão e os respectivos módulos de elasticidade, através de uma relação exponencial.

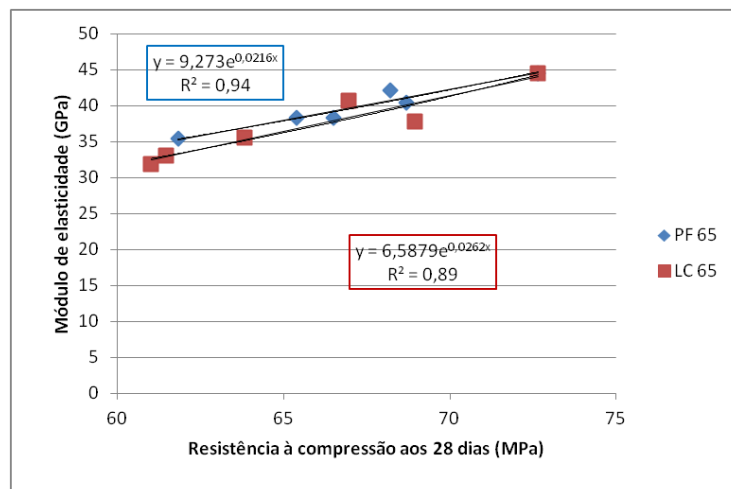


Figura 15 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão

5.1.5. Velocidade de propagação dos ultra-sons

A determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons realizou-se de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007). Na Tabela 11 e na Figura 16, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	5168,8	0,0	53,5	5168,8	0,0	53,5
B 25/25	5018,0	-2,9	96,5	4907,8	-5,0	60,4
B 50/50	4923,6	-4,7	32,9	4771,3	-7,7	81,6
B 100/0	4795,8	-7,2	21,2	4748,7	-8,1	40,2
B 0/100	4978,3	-3,7	55,1	4767,2	-7,8	45,1
B 100/100	4746,3	-8,2	88,8	4571,6	-11,6	7,1

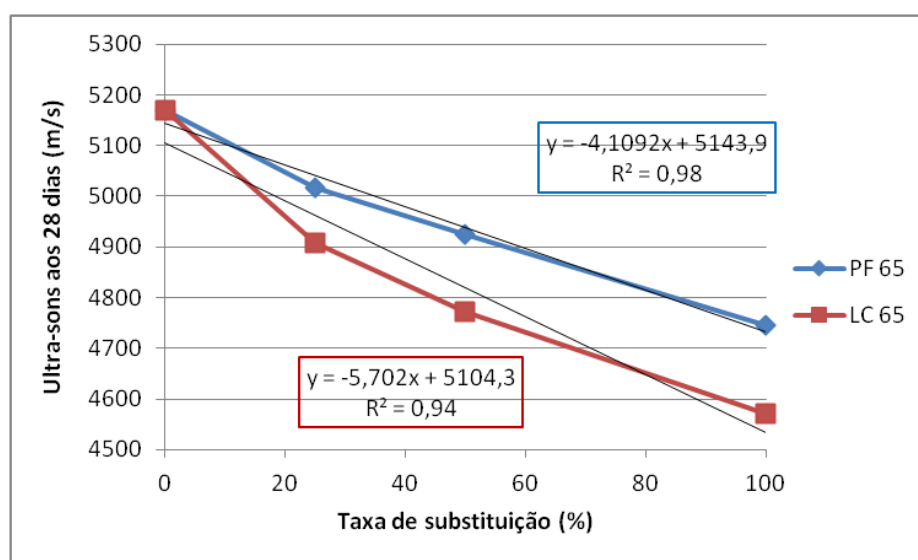


Figura 16 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Através da observação da Tabela 10 e da Figura 16, constata-se uma diminuição aproximadamente linear ($R^2 = 0,98$; $R^2 = 0,94$) da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa da incorporação de agregados reciclados. Esta situação é explicada pela maior porosidade dos BAR.

Deste modo, o BR registou a maior velocidade de propagação, cerca de 5169 m/s. Os BAR com agregados reciclados PF apresentaram valores de 4746-5018 m/s enquanto os betões com AR de laboratório obtiveram valores de 4571-4907 m/s. As variações máximas do BAR PF e LC, em relação ao BR, não excederam 9 e 12%, respectivamente.

Tal como nas restantes propriedades, a incorporação de finos reciclados é mais prejudicial ao desempenho dos BAR do que a de grossos reciclados, embora as diferenças não sejam tão significativas. Nos betões em que a totalidade dos agregados finos é subs-

tituída, observa-se uma diminuição de velocidade de propagação, em relação ao BR, de cerca de 7-8%. Na investigação conduzida por Pereira (2010), foram verificados aumentos ligeiramente superiores (aproximadamente 15%). Por seu turno, os BAR com 100% de AGRB apresentam reduções de desempenho de 4-8%. Estas variações são semelhantes às obtidas por Ismail e Ramli (2014). Os autores desse estudo registaram, para a máxima taxa de incorporação de AGRB, diminuições da velocidade de ultra-sons, em relação ao BR, de cerca de 6%.

Na Figura 17, é apresentada a relação aproximadamente linear entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade ($R^2 = 0,73$; $R^2 = 0,92$). Este facto está de acordo com Bogas (2011) que afirma que as principais propriedades físicas que influenciam a velocidade de propagação de ultra-sons são o módulo de elasticidade e a massa volúmica.

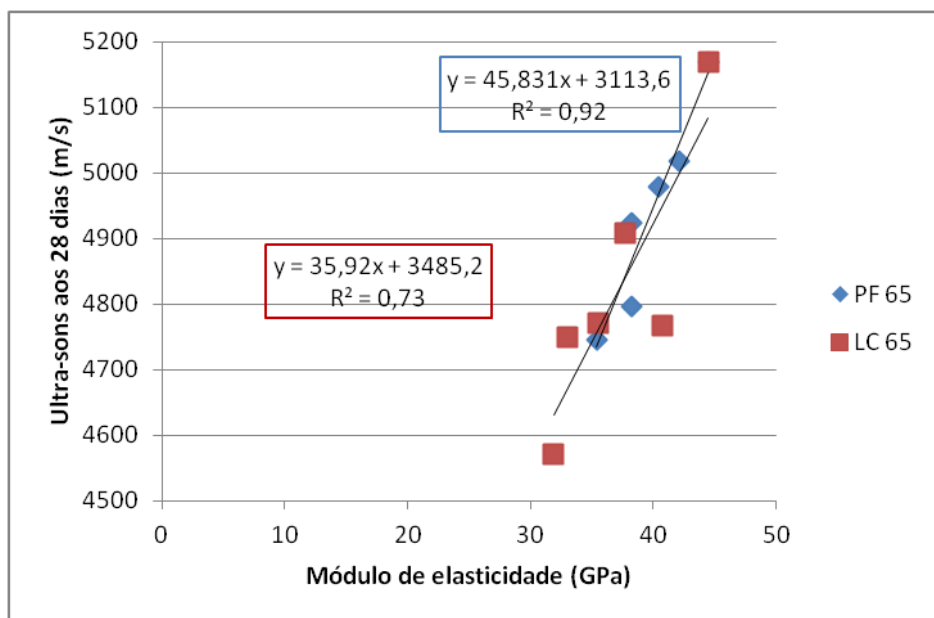


Figura 17 - Relação entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o módulo de elasticidade

5.1.6. Resistência à abrasão

Este ensaio foi efectuado segundo a norma DIN 52108. Na Tabela 12, são apresentados os resultados obtidos.

Os betões que utilizaram AR da pré-fabricação apresentaram, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, diminuições de resistência à abrasão de aproximadamente 1, 10 e 33%, respectivamente. Os BAR com agregados reciclados de laboratório obtiveram perdas semelhantes (1, 13 e 39%).

Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Perda de espessura (%)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Perda de espessura (%)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	3,4	0,0	0,1	3,4	0,0	0,1
B 25/25	3,4	0,8	0,1	3,4	0,4	0,2
B 50/50	3,7	9,6	0,1	3,8	12,5	0,2
B 100/0	4,7	40,4	0,2	4,9	46,9	0,6
B 0/100	2,9	-13,8	0,2	3,2	-5,8	0,1
B 100/100	4,5	33,2	0,6	4,7	38,6	0,4

Através da observação da Figura 18, verifica-se uma diminuição aproximadamente linear ($R^2 = 0,93$) desta propriedade com a taxa da incorporação de agregados reciclados.

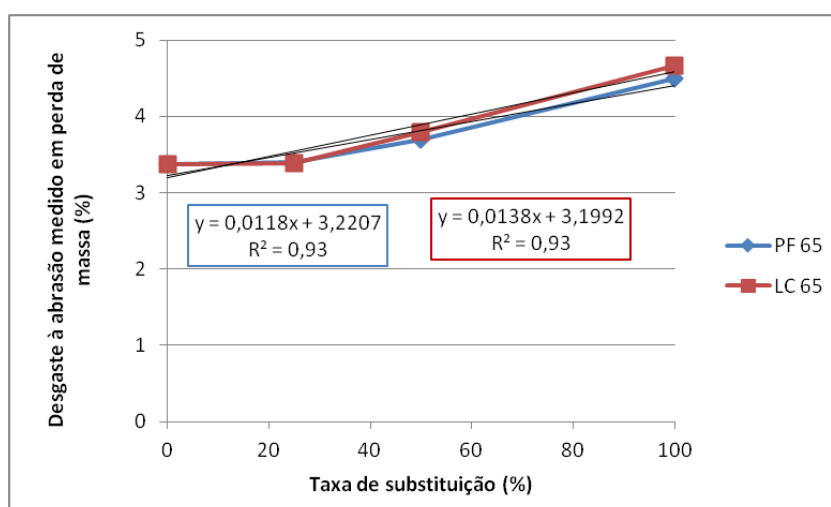


Figura 18 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão

Contudo, esta tendência parece verificar-se apenas a partir da taxa de substituição de 25%. Analisando a Figura 19, constata-se que os BAR são mais sensíveis à incorporação de AFRB do que à de AGRB.

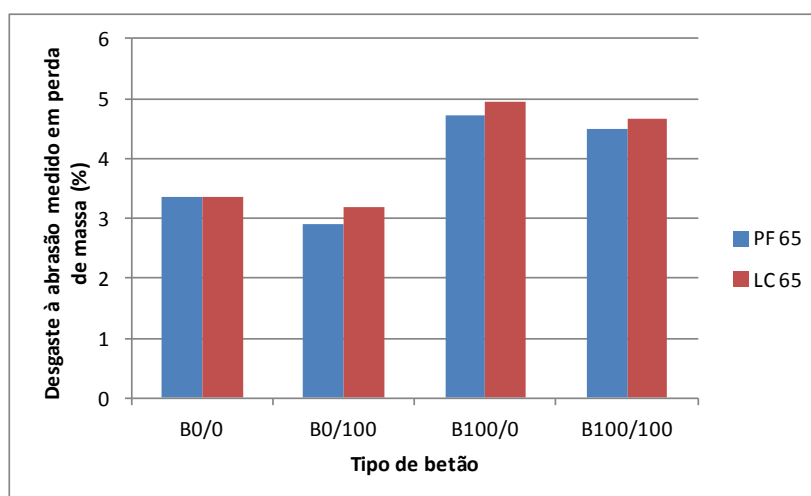


Figura 19 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à abrasão

Foram verificadas, nas famílias PF e LC, diminuições de resistência à abrasão de 40 e 47%, em relação ao BR, quando a substituição ocorre nos agregados finos. Por outro lado, para o mesmo nível de substituição, os agregados grossos reciclados provocam aumentos de resistência de 6-14%.

Deste modo, para pequenas incorporações, o efeito nefasto dos AFRB pode ser compensado pelos AGRB, explicando o valor obtido para a taxa de 25%.

Os aumentos de desempenho observados com a introdução de agregados grossos reciclados podem ser explicados pela sua maior rugosidade, o que permite uma melhor ligação entre eles e a matriz cimentícia. Deste modo, a resistência à abrasão que depende da dureza e rugosidade dos agregados grossos é melhorada (Brito, 2005). Os resultados de Limbachiya et al. (2000) mostram, igualmente, que é possível obter desempenhos idênticos utilizando um betão convencional ou um BAR com 100% de AGRB. Os autores verificaram diferenças entre um betão produzido com agregados naturais e betões com 100% AGRB de 0,03-0,04 mm. Por outro lado, os aumentos de relação água / cimento efectiva, observados nos betões com AFRB, bem como a maior porosidade destes agregados, justificam os piores resultados destes betões. Esta realidade é também corroborada por Evangelista e Brito (2007). Nessa investigação, para a incorporação de 100% de AFRB, foram observadas diminuições significativas de resistência à abrasão (cerca de 30%, relativamente ao BR).

5.2. Propriedades em termos de durabilidade

No subcapítulo 3.2, pretende-se estudar a influência da incorporação de agregados reciclados (finos e grossos) no desempenho, em termos de durabilidade, de betões.

5.2.1. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi feito aos 28 dias segundo a especificação LNEC E394-1993. Na Tabela 13, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Absorção de água por imersão (%)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	11,9	0,0	0,1	11,9	0,0	0,1
B 25/25	13,3	11,1	0,2	14,4	20,4	0,5
B 50/50	14,5	21,3	0,1	15,6	31,0	0,5
B 100/0	15,9	33,2	0,4	17,1	43,2	0,4
B 0/100	14,5	21,9	0,5	16,3	36,7	0,5
B 100/100	19,0	58,8	0,4	20,4	70,7	0,4

Verifica-se que o BR registou o valor mais baixo de absorção, cerca de 11,9%. Os BAR com agregados reciclados PF apresentaram valores de 13,3-19,0% enquanto os betões com AR de laboratório obtiveram valores de 14,4-20,4%.

Deste modo, nos betões de pré-fabricação, para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, registaram-se aumentos de absorção, em relação ao BR, de aproximadamente 11, 21 e 59%, respectivamente. No que respeita aos betões de laboratório, os aumentos registados foram de 20, 31, 71% (Figura 20).

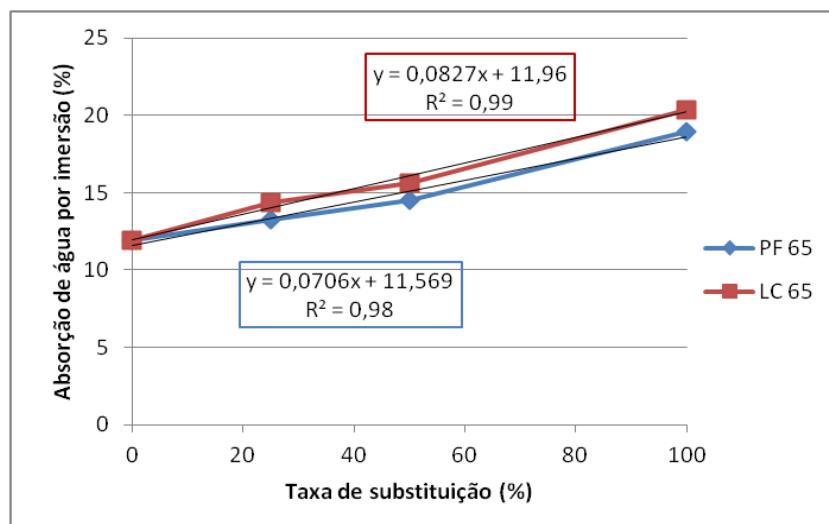


Figura 20 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Estes resultados 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.

O desempenho destes betões parecer ser mais sensível à incorporação dos finos reciclados. Na Figura 21, constata-se que a substituição de AFN por AFRB provoca aumentos de absorção, em relação ao BR, de cerca de 33,2-43,2%. Evangelista e Brito (2010) registaram aumentos semelhantes (aproximadamente 45%). No entanto, para a substituição de AGN por AGRB, foram verificados aumentos menores (21,9-36,7%), idênticos aos exibidos no estudo de Rao et al. (2011), onde se registaram aumentos de cerca de 30%. Esta realidade pode ser justificada pela maior absorção dos agregados finos reciclados.

Finalmente, através da Figura 22, é mostrada a relação que existe entre a resistência à compressão dos betões e a sua absorção de água por imersão. Foram obtidas correlações satisfatórias, nas diferentes famílias ($R^2 = 0,90$; $R^2 = 0,80$), o que demonstra a ligação entre estas propriedades.

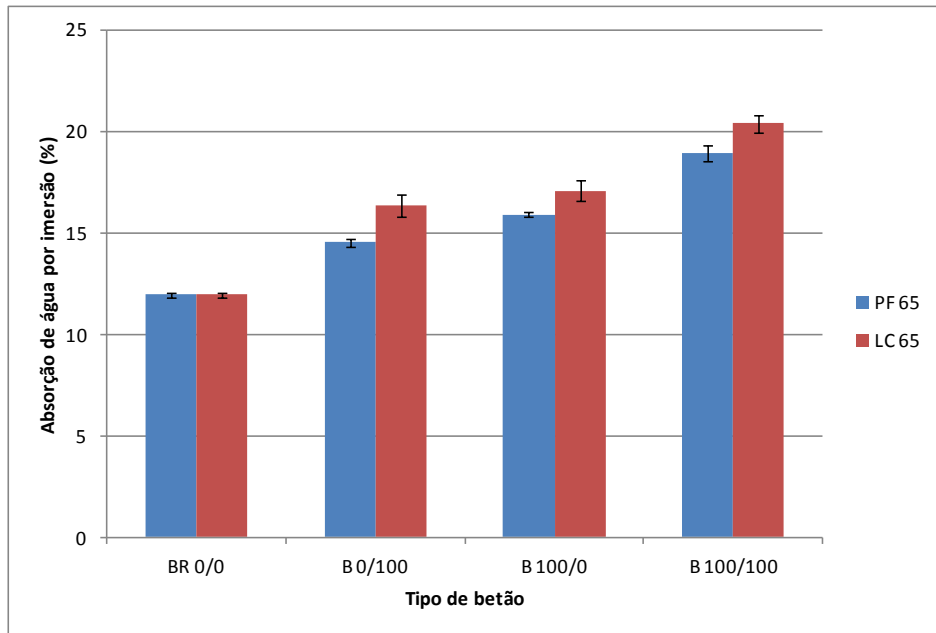


Figura 21 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na absorção de água por imersão

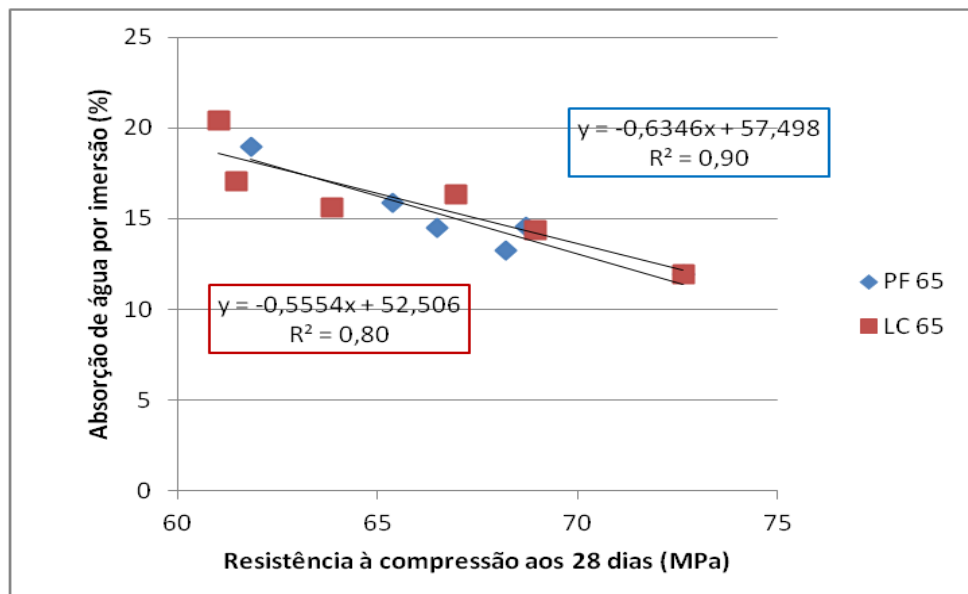


Figura 22 - Relação entre a absorção de água por imersão e a resistência à compressão

5.2.2. Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E393-1993, 42 dias após a amassadura dos betões. Na Tabela 14, são apresentados os resultados obtidos.

Os valores dos coeficientes às 72 horas dos BAR situaram-se entre $2,47$ e $4,27 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2\text{h}^{1/2}$, para a família PF, e entre $2,66$ e $4,65 \text{ g/mm}^2\text{h}^{1/2}$, para a família LC. O BR registou um valor de $1,84 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2\text{h}^{1/2}$. Assim, verificam-se, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, aumentos de absorção, relativamente ao BR, de cerca de 34-44, 55-69 e

132-153 %, respectivamente.

Tabela 14 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P	Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	1,84E-03	0,0	1,6E-04	1,84E-03	0,0	1,6E-04
B 25/25	2,47E-03	34,1	5,1E-05	2,66E-03	44,4	1,0E-04
B 50/50	2,85E-03	54,9	2,8E-04	3,12E-03	69,4	2,3E-05
B 100/0	3,76E-03	104,6	1,6E-04	4,05E-03	120,4	2,4E-04
B 0/100	2,62E-03	42,7	4,3E-05	2,89E-03	57,2	6,9E-05
B 100/100	4,27E-03	132,2	1,7E-04	4,65E-03	153,0	2,3E-05

Os resultados podem ser explicados pela maior porosidade e pelas maiores quantidades de água empregues nos BAR. Através da Figura 23, observa-se um aumento linear da absorção de água por capilaridade com o aumento da taxa de substituição.

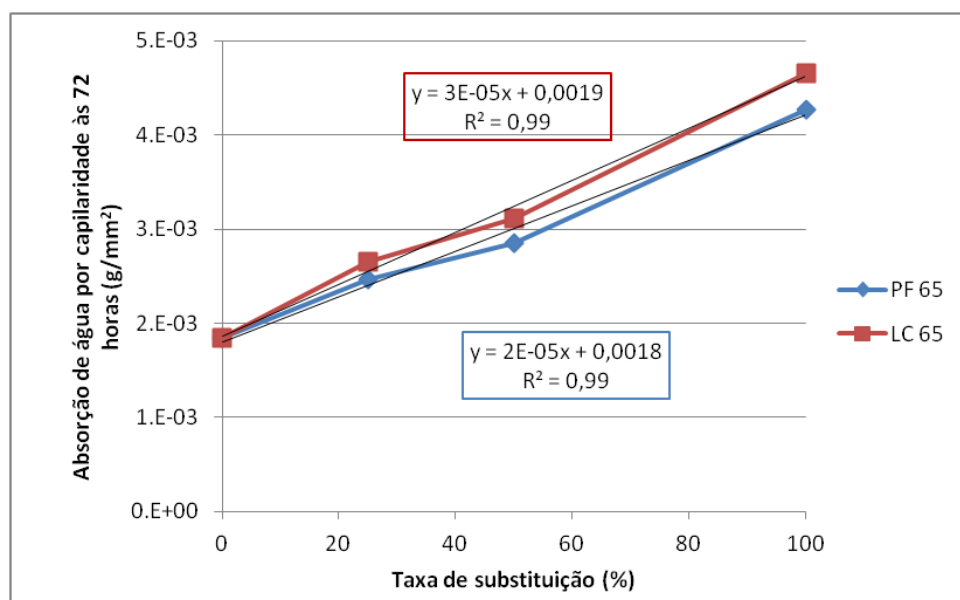


Figura 23 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas

A dimensão dos agregados reciclados parece influenciar decisivamente o comportamento dos betões (Figura 24). A incorporação de 100% de AFRB provoca um acréscimo de absorção, em relação ao BR, de 104-120%. Os resultados de Cartuxo (2013) mostram tendências semelhantes, observando-se aumentos de cerca de 95%.

Por outro lado, quando agregados grossos naturais são substituídos por AGRB, os aumentos verificados são de apenas de 42-57%. Para misturas idênticas, incorporando agregados grossos reciclados, Pedro et al. (2014) registaram acréscimos de 26-44%. Deste modo, conclui-se que o desempenho dos BAR é significativamente condicionado pelos finos reciclados.

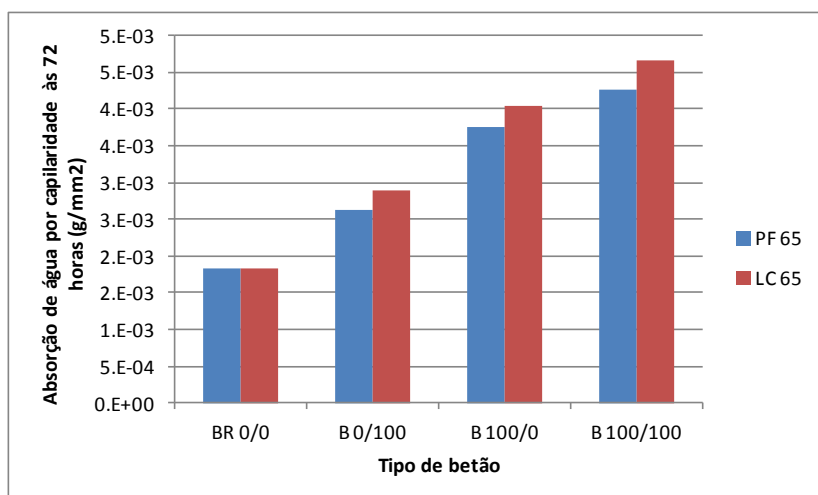


Figura 24 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na absorção de água por capilaridade

Através da observação das Figuras 25 e 26, constata-se ainda que a absorção de água por capilaridade ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas.

No que respeita aos coeficientes de capilaridade (Tabela 14), verifica-se igualmente que os betões com agregados reciclados conduzem a piores resultados do que o BR.

Relativamente aos betões PF, observa-se, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, um aumento dos valores dos coeficientes, relativamente aos do BR, de cerca de 37, 57, 130 %, respectivamente. No que respeita à família LC, os aumentos foram de 43, 70 e 150%, respectivamente. Estes resultados são explicados pela presença de AR (sobretudo os AFR) que é responsável pela formação de mais e maiores capilares (Wirquin et al., 2000).

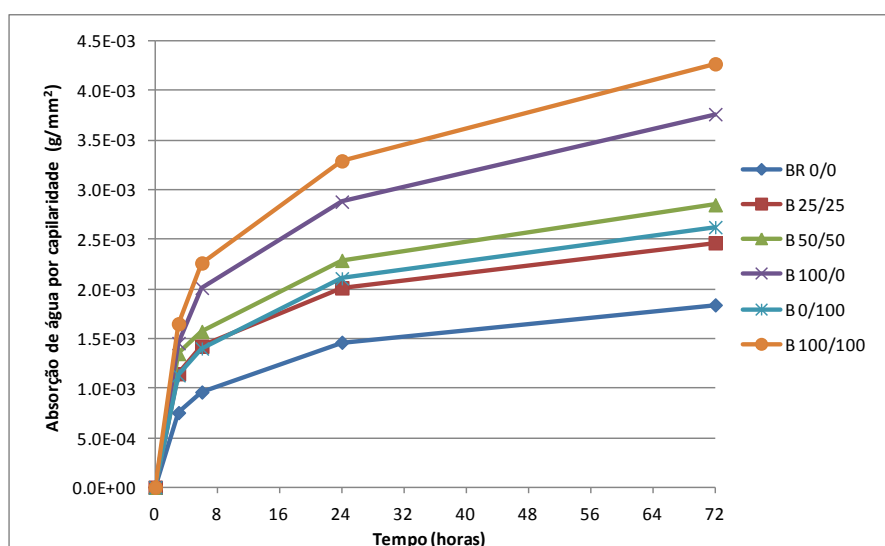


Figura 25 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões PF 65

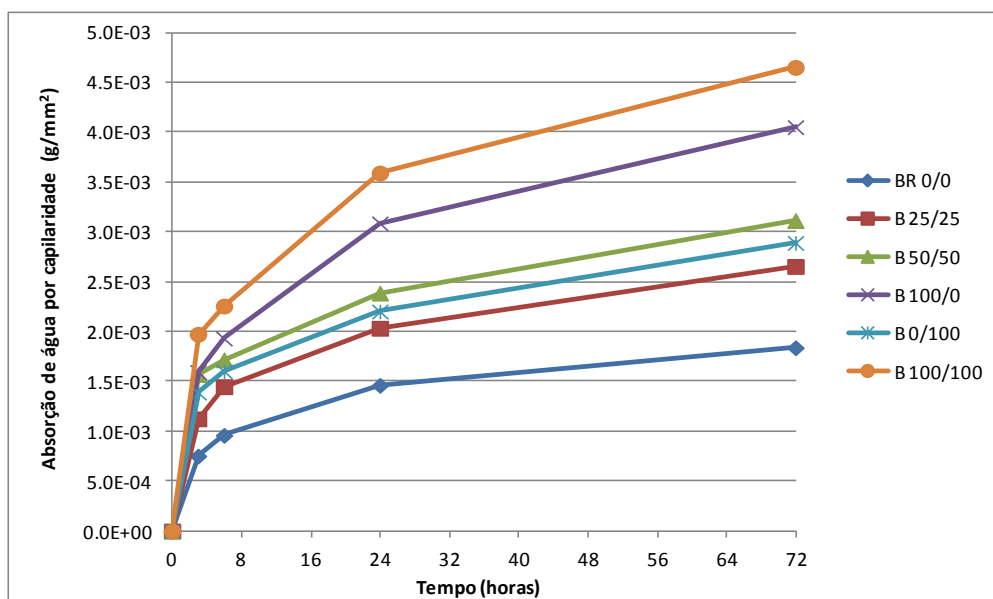


Figura 26 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo nos betões LC 65

Tabela 15 - Resultados dos coeficientes de capilaridade

Tipo de betão	PF 65		LC 65	
	Coefficiente de capilaridade (g/mm ² h ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coefficiente de capilaridade (g/mm ² h ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	2,52E-04	0,0	2,52E-04	0,0
B 25/25	3,45E-04	36,9	3,62E-04	43,7
B 50/50	3,96E-04	57,1	4,29E-04	70,2
B 100/0	5,09E-04	102,0	5,43E-04	115,5
B 0/100	3,62E-04	43,7	3,97E-04	57,5
B 100/100	5,79E-04	129,8	6,29E-04	149,6

Na Figura 27, estabelece-se uma relação entre as absorções de água por capilaridade e por imersão. Os coeficientes de determinação elevados ($R^2=0,90$; $R^2=0,91$) mostram que a absorção de água por capilaridade às 72 horas varia exponencialmente com a absorção de água por imersão. Esta situação está de acordo com a constatada por Ferreira (2000).

Por último, de forma a relacionar as propriedades em termos de durabilidade dos betões com o seu desempenho mecânico, são apresentadas, na Figura 28, as correlações obtidas entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade nas diversas famílias. A regressão utilizada foi a não-linear potencial uma vez que é a que se melhor ajusta aos valores obtidos. Esta situação é explicada pela forte ligação entre esta propriedade e o desempenho mecânico dos betões e pelo facto de o número de capilares não crescer linearmente com a porosidade dos mesmos.

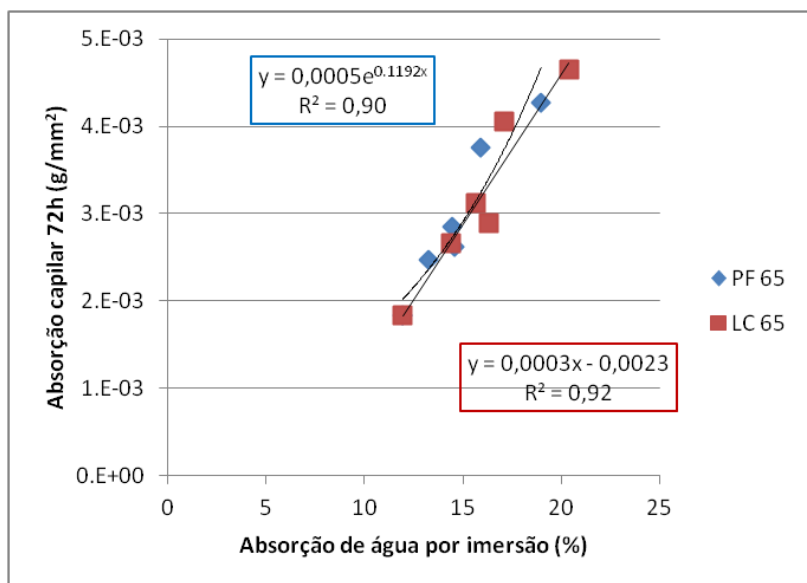


Figura 27 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade

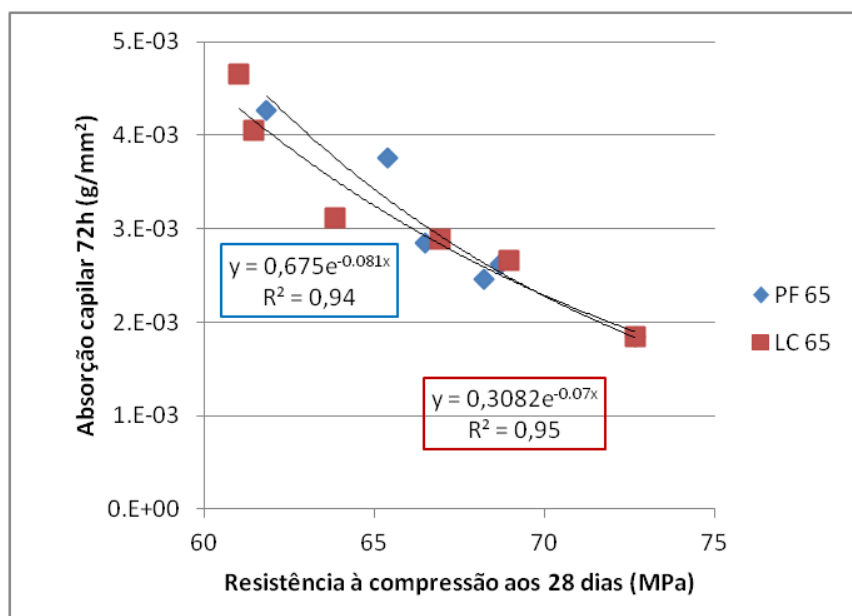


Figura 28 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão

5.2.3. Resistência à carbonatação

O ensaio de resistência à carbonatação foi efectuado aos 7, 28, 56 e 91 dias, segundo a especificação LNEC E-391-1993. As médias dos resultados obtidos para a resistência à carbonatação são apresentadas nas Tabelas 16 a 19.

Analisando as Tabelas 16 a 19 e a Figura 29, observa-se que, tanto para idades jovens como para idades mais avançadas, a carbonatação tende a aumentar com o aumento da taxa de substituição. Esta situação era expectável, uma vez que a absorção de água por capilaridade apresentou uma tendência idêntica.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 dias

Tipo de betão	PF 65 MPa			LC 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P
BR 0/0	0,19	0,0	0,11	0,19	0,0	0,11
B 25/25	0,48	155,6	0,13	0,90	380,7	0,24
B 50/50	0,46	144,4	0,16	1,23	557,6	0,03
B 100/0	0,71	277,8	0,07	1,53	715,1	0,16
B 0/100	0,58	211,1	0,10	1,15	515,8	0,12
B 100/100	0,79	322,2	0,25	1,84	881,1	0,14

Tabela 17 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 28 dias

Tipo de betão	PF 65 MPa			LC 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P
BR 0/0	1,0	0,0	0,3	1,0	0,0	0,3
B 25/25	1,2	18,0	0,3	2,5	136,6	0,5
B 50/50	1,3	22,0	0,2	2,3	124,9	0,3
B 100/0	1,4	34,0	0,0	3,0	192,0	0,4
B 0/100	1,1	2,0	0,2	2,1	100,6	0,4
B 100/100	2,6	154,0	0,5	3,1	202,0	0,2

Tabela 18 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 56 dias

Tipo de betão	PF 65 MPa			LC 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P
BR 0/0	3,1	0,0	0,3	3,1	0,0	0,3
B 25/25	4,5	45,9	0,2	4,5	47,2	0,8
B 50/50	4,5	44,5	0,2	5,1	64,2	0,5
B 100/0	4,9	58,8	0,3	6,3	104,9	0,5
B 0/100	4,1	33,0	0,0	4,2	34,8	0,5
B 100/100	5,7	83,8	0,2	7,3	137,2	0,5

Tabela 19 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 91 dias

Tipo de betão	PF 65 MPa			LC 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P	Profundidade de carbonatação (mm)	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P
BR 0/0	5,0	0,0	0,2	5,0	0,0	0,2
B 25/25	7,1	40,9	0,8	7,7	52,3	0,5
B 50/50	7,3	44,5	0,4	8,1	59,7	0,2
B 100/0	7,4	46,2	0,6	10,1	99,4	0,4
B 0/100	6,3	25,2	0,8	6,2	23,7	0,3
B 100/100	7,9	56,0	0,6	10,6	111,2	1,3

No trabalho de Sim e Park (2011), não existiu nenhuma relação com o nível de substituição. Verificou-se que as profundidades de carbonatação globais, para as incorporações de 60 e 100% de AFRB (e 100 AGRB%), foram inferiores às de 0 e 30%. Os autores afirmaram que os resultados podem dever-se a erros na realização dos ensaios ou à natureza do agregado reciclado. Contudo, aos 28 dias, todos os betões (sem cinzas volantes), evidenciaram profundidades de carbonatação inferiores a 4 mm, concordando com os valores obtidos na presente investigação.

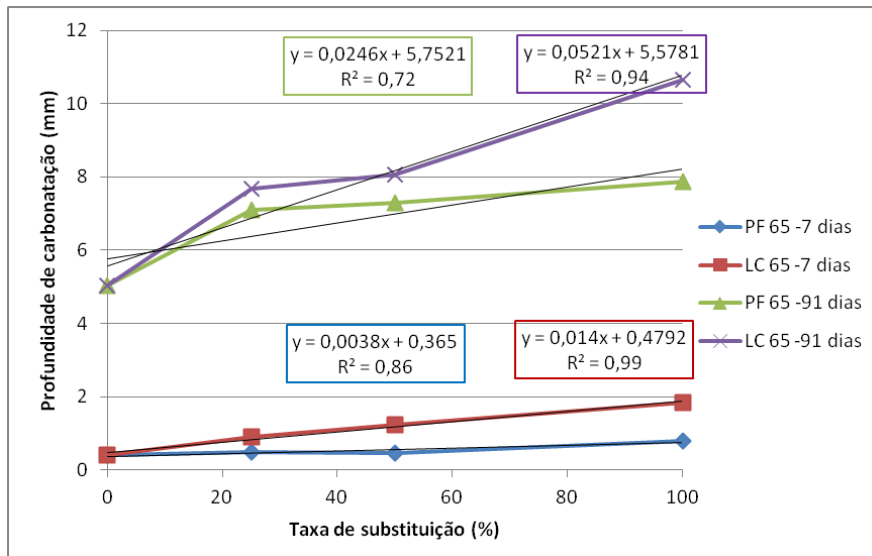


Figura 29 - Resultados do ensaio de carbonatação aos 7 e 91 dias

Além disto, a resistência à carbonatação dos BAR parece ser mais prejudicada pela incorporação de finos reciclados. Aos 91 dias, foram verificados, nas famílias PF e LC, acréscimos de carbonatação de 46 e 99%, em relação ao BR, quando a substituição ocorre nos agregados finos. Por outro lado, para o mesmo nível de substituição, os agregados grossos reciclados provocam aumentos de 23.7-25.2% (Figura 30). Os resultados enquadram-se com a investigação de Limbachiya et al. (2012), que obteve para a incorporação de 100% de AGRB diminuições de cerca de 25% e com a de Evangelista e Brito (2010), que em betões produzidos na totalidade por AFRB registaram diminuições de aproximadamente 70%.

Na idade de 7 dias, não foram registadas, em termos absolutos, diferenças significativas.

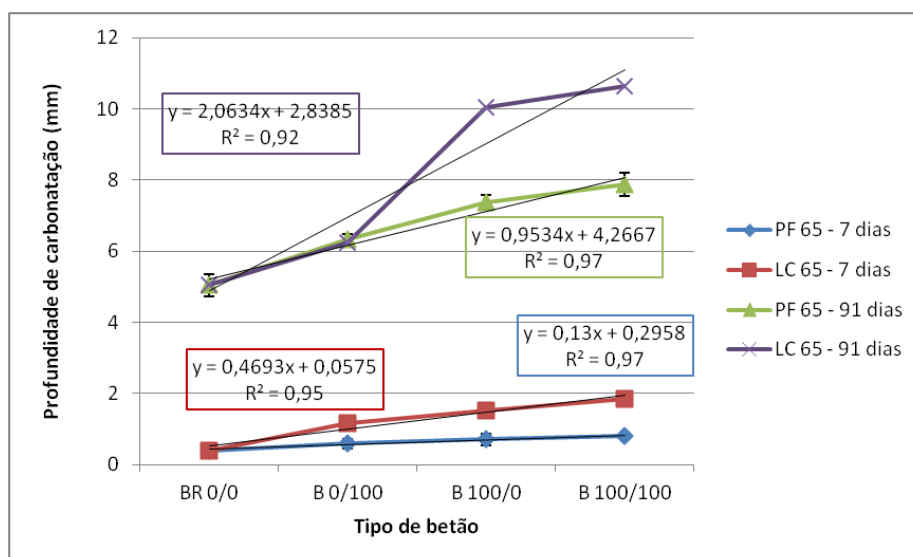


Figura 30 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à carbonatação

Os resultados dos coeficientes de carbonatação (Tabela 20) estão coerentes com esta realidade, ou seja, a família LC apresentou valores superiores aos da família PF. Como era expectável, para as taxas de substituição de 100/0 e 100/100%, registaram-se as maiores variações, em relação ao BR, cerca de 50 e 42%, respectivamente. Os coeficientes de carbonatação foram calculados através da expressão:

$$x = k \sqrt{t} \quad (1)$$

em que x é a profundidade de carbonatação (mm), k é o coeficiente de carbonatação e t é o tempo (dias).

Tabela 20 - Resultados dos coeficientes de carbonatação

Tipo de betão	PF 65		LC 65	
	Coeficiente de carbonatação (mm/dia ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Coeficiente de carbonatação (mm/dia ^{1/2})	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	0,4	0,0	0,4	0,0
B 25/25	0,6	42,9	0,7	59,5
B 50/50	0,6	45,2	0,7	69,0
B 100/0	0,6	52,4	0,9	114,3
B 0/100	0,5	28,6	0,6	35,7
B 100/100	0,7	73,8	1,0	133,3

Nas Figuras 31 e 32, é apresentada a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo. Os resultados mostram que esta propriedade aumenta com a idade dos betões.

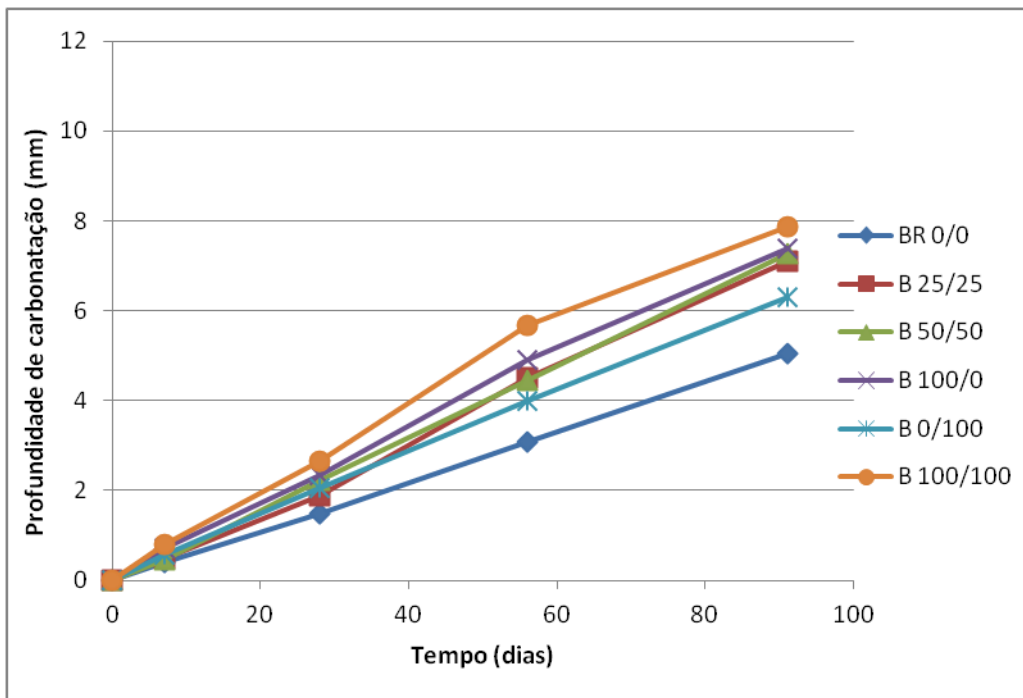


Figura 31 - Evolução da resistência à carbonatação ao longo do tempo nos betões PF 65 MPa

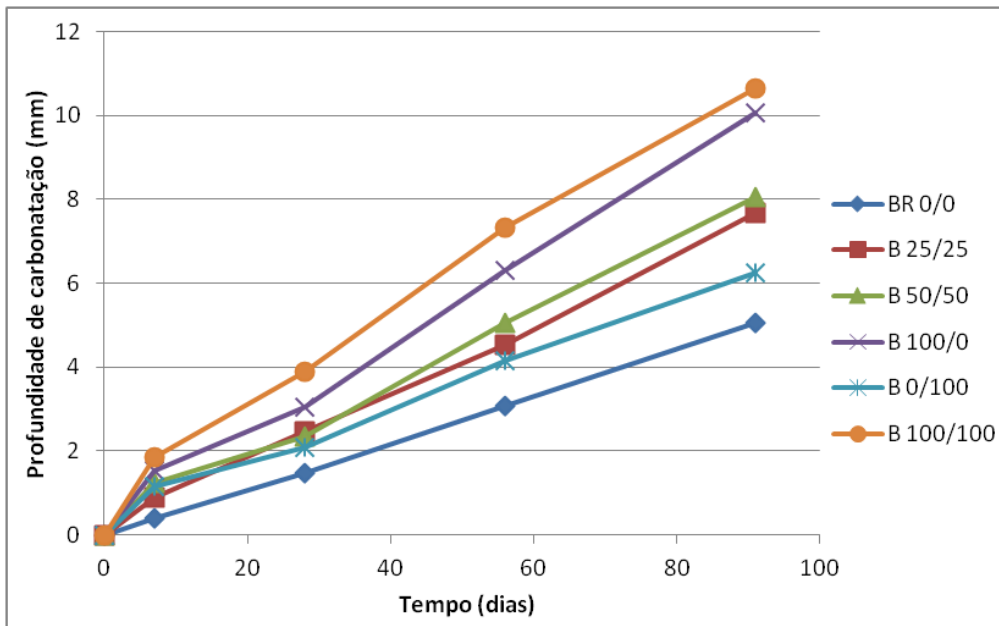


Figura 32 - Evolução da resistência à carbonatação ao longo do tempo nos betões LC 65 MPa

Na Figura 33, dado o elevado valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,97; 0,87$), é possível constatar uma relação linear entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão, aos 56 dias.

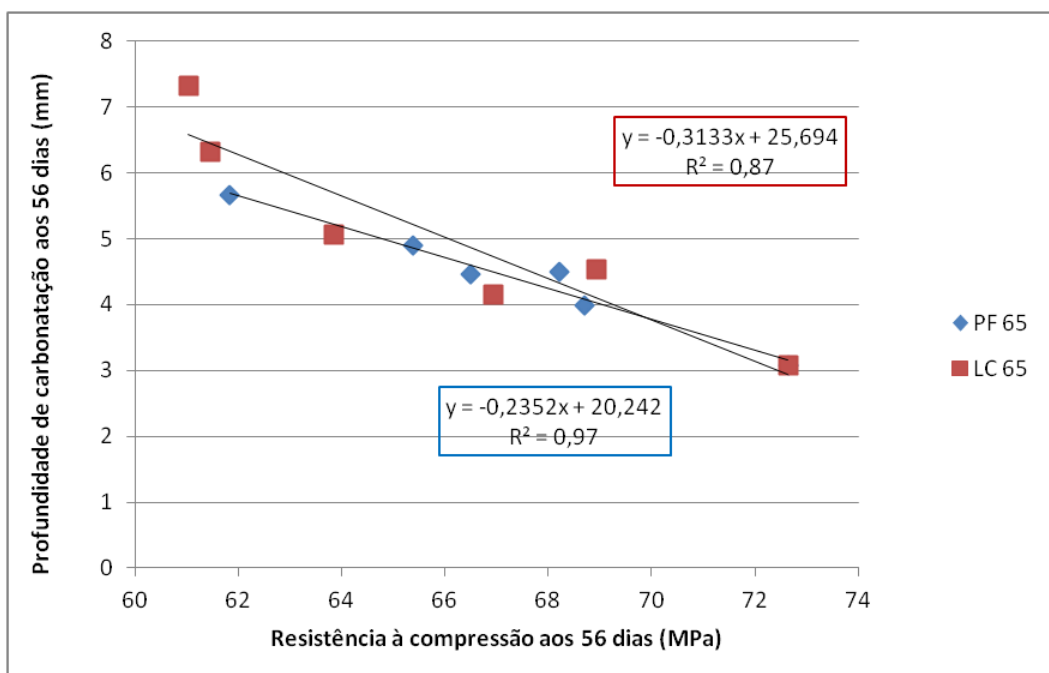


Figura 33 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão

5.2.4. Resistência à penetração de cloretos

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E463-2004, aos 28 e 91

dias. Nas Tabelas 21 e 22, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 28 dias

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	$D_{0\text{méd}} (x10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P	$D_{0\text{méd}} (x10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P
BR 0/0	9,2	0,0	1,0	9,2	0,0	1,0
B 25/25	9,8	6,7	0,7	9,4	2,1	0,2
B 50/50	10,4	12,6	1,8	10,3	11,6	0,3
B 100/0	10,7	16,2	1,6	11,2	21,3	1,5
B 0/100	10,2	11,1	0,1	9,6	4,0	0,5
B 100/100	11,3	22,2	0,2	12,6	37,1	1,0

Tabela 22 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias

Tipo de betão	PF 65			LC 65		
	$D_{0\text{méd}} (x10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P	$D_{0\text{méd}} (x10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	$\Delta_{\text{betão}} (\%)$	D.P
BR 0/0	7,8	0,0	0,6	7,8	0,0	0,0
B 25/25	8,0	2,0	0,9	8,8	12,6	0,4
B 50/50	8,7	11,9	0,7	9,0	14,6	0,5
B 100/0	8,9	14,5	1,0	9,9	26,6	0,5
B 0/100	8,1	3,9	1,1	7,7	-1,4	0,6
B 100/100	9,0	15,5	0,7	10,8	37,9	0,5

Aos 28 dias, o BR registou um valor de coeficiente de difusão de cloretos de $9,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Para a mesma idade, os BAR com agregados reciclados de pré-fabricação apresentaram valores de $9,8-11,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ enquanto os betões com AR de laboratório obtiveram valores de $9,4-12,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Na Figura 34, é possível observar o aumento linear dos coeficientes com o aumento da incorporação de AR. Assim aos 28 dias, nos betões PF, são visíveis para as taxas de substituição de 25, 50 e 100 %, aumentos dos coeficientes de difusão de cloretos de cerca de 7, 13 e 22%. No que respeita aos betões LC, os aumentos registados foram de 2, 12 e 37%. Os resultados são justificados pela natureza mais permeável dos BAR.

Na investigação de Sim e Park (2011), são também analisados os efeitos da incorporação de agregados finos e grossos reciclados. Contudo, nesse estudo, não é visível uma tendência clara da penetração dos iões cloretos com o aumento dos níveis de substituição. Por exemplo, aos 21 dias, para a taxa de 60 % de AFRB (e 100% de AGRB), verifica-se um aumento de carga total passada de cerca de 15% (betões sem cinzas volantes), em relação ao BR. Contudo, para a taxa de 100% de AFRB (e 100% de AGRB), já é visível uma diminuição de cerca de 10%. Deste modo, serão necessários mais estudos para averiguar o efeito da substituição simultânea de agregados finos e grossos reciclados.

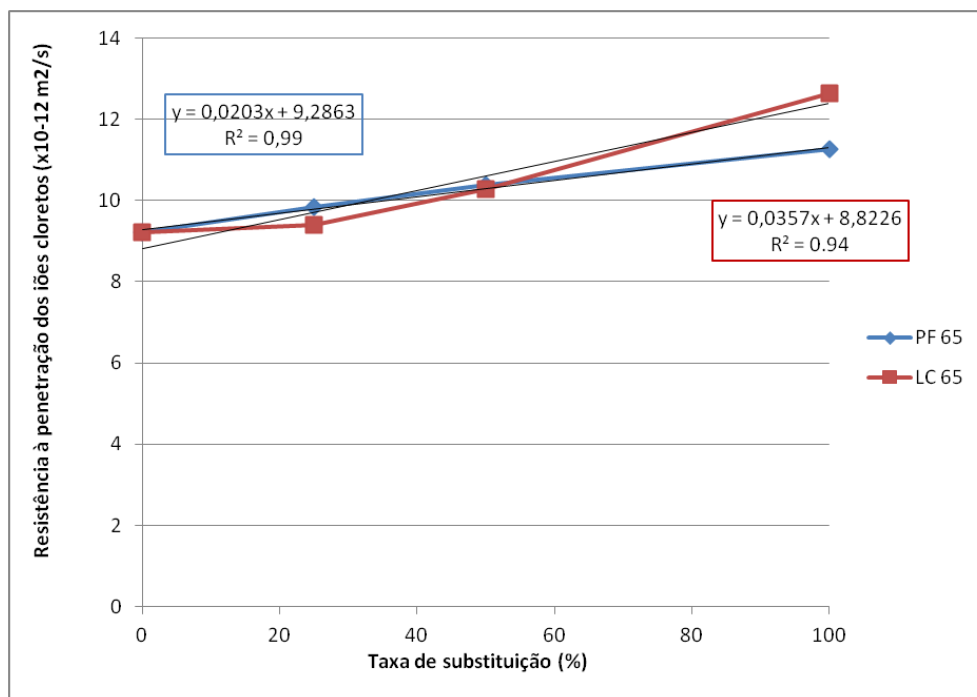


Figura 34 - Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 28 dias

Tal como nas propriedades anteriores, verifica-se que os AFRB dos betões LC conduzem a resultados significativamente piores (Figura 35).

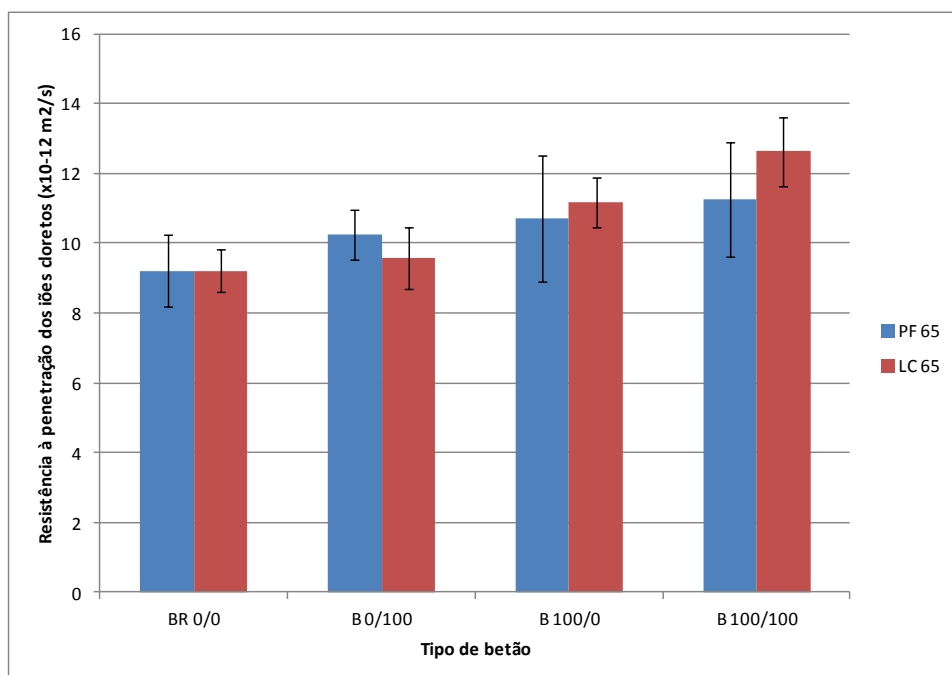


Figura 35 – Influência da incorporação de AFRB e AGRB na difusão de cloretos

Assim, para incorporação de 100% de AFRB, observa-se, nos betões LC, um aumento do coeficiente de penetração de cloretos, em relação ao BR, de cerca de 21%, contrastando com o acréscimo de 16%, nos betões PF. Evangelista e Brito (2010), para o mesmo nível de substituição, relataram um aumento de cerca de 30%.

No que respeita à substituição da totalidade da fracção grossa, as variações situaram-se entre 4 e 11%. Em termos absolutos, estes valores estão muito próximos dos de Pedro et al. (2014) que obteve valores de $9.5-11.3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, para uma composição semelhante.

Relativamente aos ensaios aos 91 dias, são visíveis diminuições dos coeficientes de aproximadamente 20% para as famílias LC e PF. Esta situação poderá ser explicada pelo maior tempo de cura dos provetes, responsável por hidratar maiores teores de cimento e assim diminuir o volume de vazios. No entanto, segundo a especificação LNEC E-465, eram expectáveis descidas mais significativas, devendo o valor do coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias ser da ordem de 60% do valor registado aos 28 dias.

Através da análise da Figura 36, é possível observar a existência de uma estreita relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e a absorção de água por imersão, nas diversas famílias.

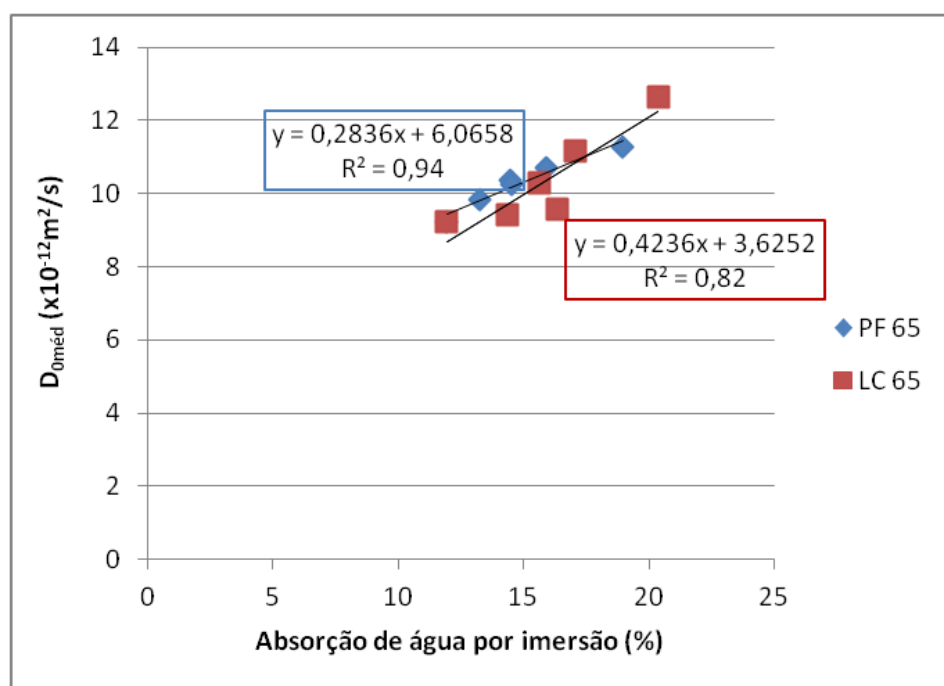


Figura 36 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção de água por imersão

De forma a relacionar esta propriedade com a resistência mecânica dos betões, é apresentada a Figura 37, que relaciona a resistência à compressão com o coeficiente de difusão de cloretos, para as diferentes famílias.

5.2.5. Retracção

O ensaio de determinação da deformação por retracção foi realizado através da especificação LNEC E-391-1993, durante 91 dias. Nas Figuras 38 a 39, são apresentados os resultados obtidos.

Através da análise das figuras, verifica-se para todos os betões que a deformação aumenta ao longo do tempo, de forma não-linear. Observa-se um rápido crescimento durante os primeiros dias, que posteriormente tende a estabilizar. A utilização de regressões logarítmicas permitiu obter coeficientes de correlação (R^2) bastante elevados (entre 0,97 e 0,99).

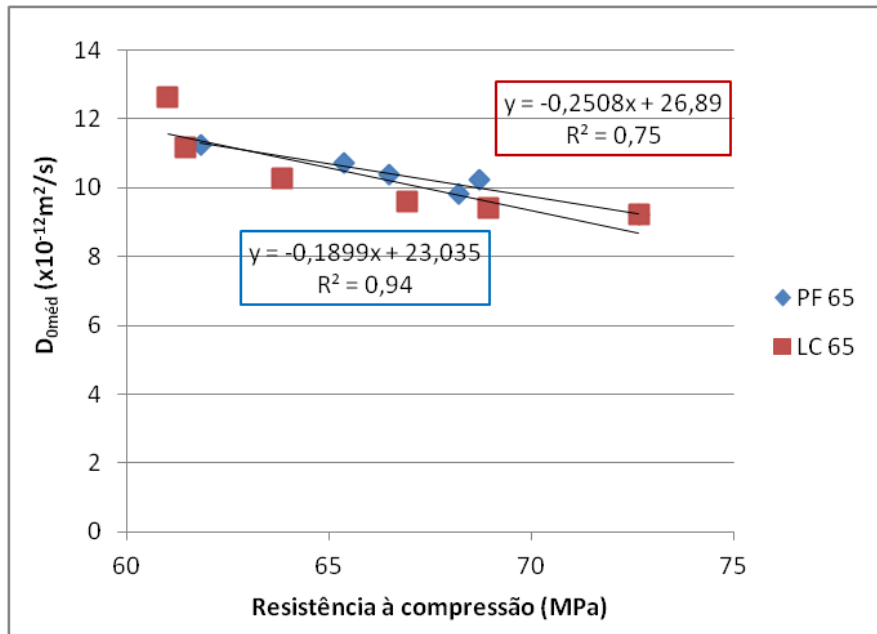


Figura 37 - Relação entre resistência à penetração de cloretos e resistência à compressão

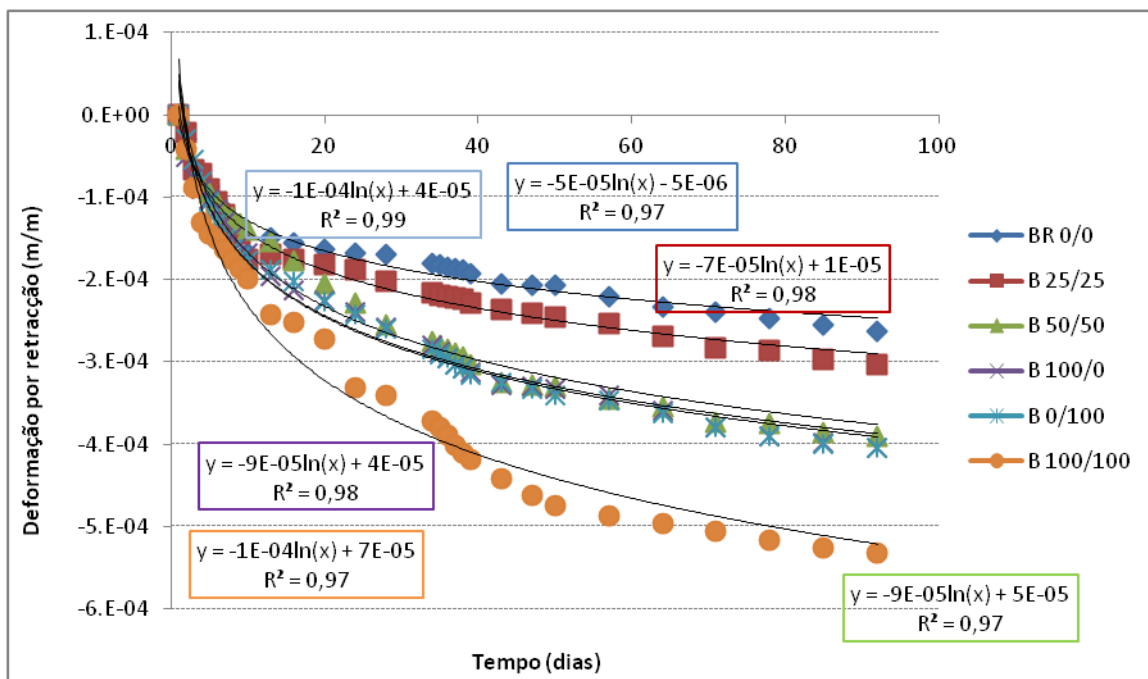


Figura 38 - Deformações devido a retracção ao longo do tempo nos betões PF 65 MPa

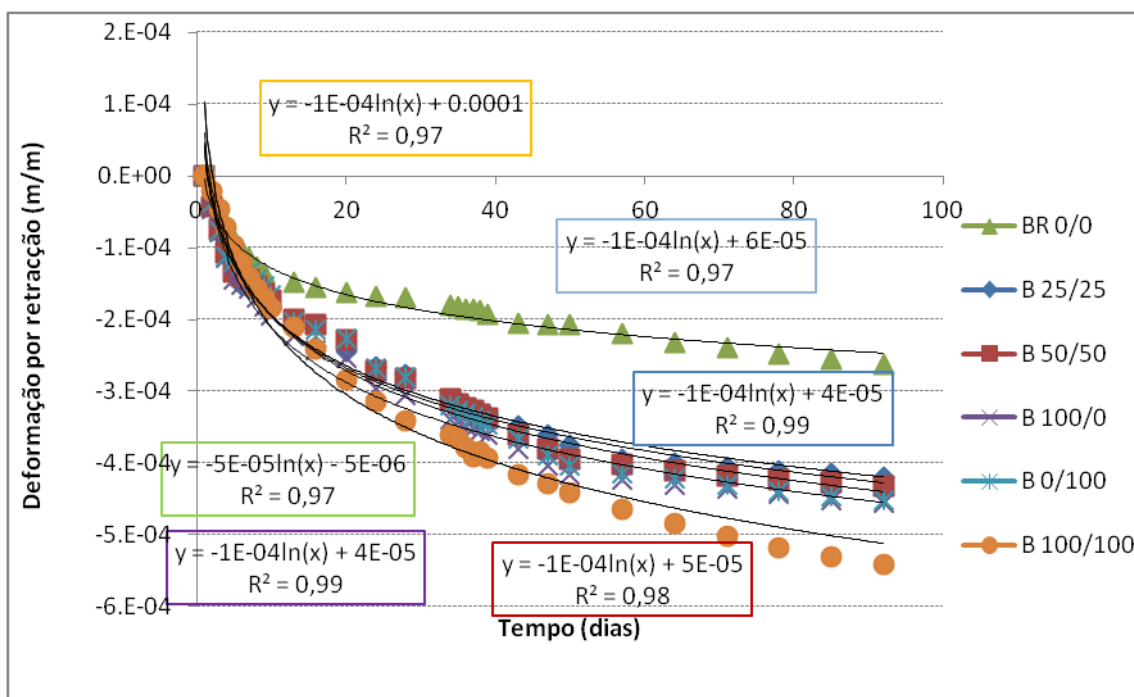


Figura 39 - Deformações devido a retracção ao longo do tempo nos betões LC 65 MPa

Nas Tabelas 23 e 24, são apresentados os valores da deformação por retracção, para as idades de 7 e 91 dias.

Tabela 23 - Deformações por retracção aos 7 dias, para os diversos betões

Tipo de betão	PF 65		LC 65	
	Retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	-1,15E-04	0,0	-1,15E-04	0,0
B 25/25	-1,21E-04	5,4	-1,56E-04	35,9
B 50/50	-1,20E-04	4,3	-1,44E-04	25,0
B 100/0	-1,30E-04	13,0	-1,58E-04	37,0
B 0/100	-1,51E-04	31,5	-1,34E-04	16,3
B 100/100	-1,64E-04	42,4	-1,41E-04	22,8

Tabela 24 - Deformações por retracção aos 91 dias, para os diversos betões

Tipo de betão	PF 65		LC 65	
	Retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	-2,63E-04	0,0	-2,6E-04	0,0
B 25/25	-3,04E-04	15,7	-4,2E-04	60,0
B 50/50	-3,90E-04	48,6	-4,3E-04	64,8
B 100/0	-4,05E-04	54,3	-4,6E-04	73,8
B 0/100	-4,05E-04	54,3	-4,5E-04	71,9
B 100/100	-5,31E-04	102,4	-5,4E-04	106,2

Os resultados mostram que os BAR apresentaram piores desempenhos. Esta situação,

que é comum à maioria das investigações (Shayan e Xu, 2003; Tam e Tam, 2007; Kou et al., 2008; Yang et al., 2008; Amorim et al., 2012; Ajdukiewicz e Kliszczewicz, 2002), poderá ser explicada por uma menor rigidez global destes betões.

Para idades jovens (7 dias), os betões com agregados reciclados PF apresentaram, para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, aumentos de deformação, em relação ao BR, de cerca de 5, 4 e 42%, respectivamente, enquanto para idades mais avançadas (91 dias), esses aumentos foram de 16, 49 e 102%. Relativamente aos betões LC, registaram-se, aos 7 dias, aumentos de 22.8-35.9% e, aos 91 dias, aumentos de 60.0-106%.

As maiores variações aos 91 dias são justificadas pelo fenómeno de cura interna desencadeado pelos AR que permite para idades jovens a compensação da água de evaporação através da água existente nos mesmos. Deste modo, enquanto houver disponibilidade de água no agregado reciclado, as variações dimensionais são relativamente reduzidas.

Analisando a Figura 40, constata-se que, ao contrário de outras propriedades, a utilização de AFRB origina resultados semelhantes de deformação por retracção aos dos obtidos com o uso de AGRB. Esta situação poderá ser justificada com a semelhança dos módulos de elasticidade destes betões. Conclusão idêntica foi obtida em Ravindrarajah et al. (1987).

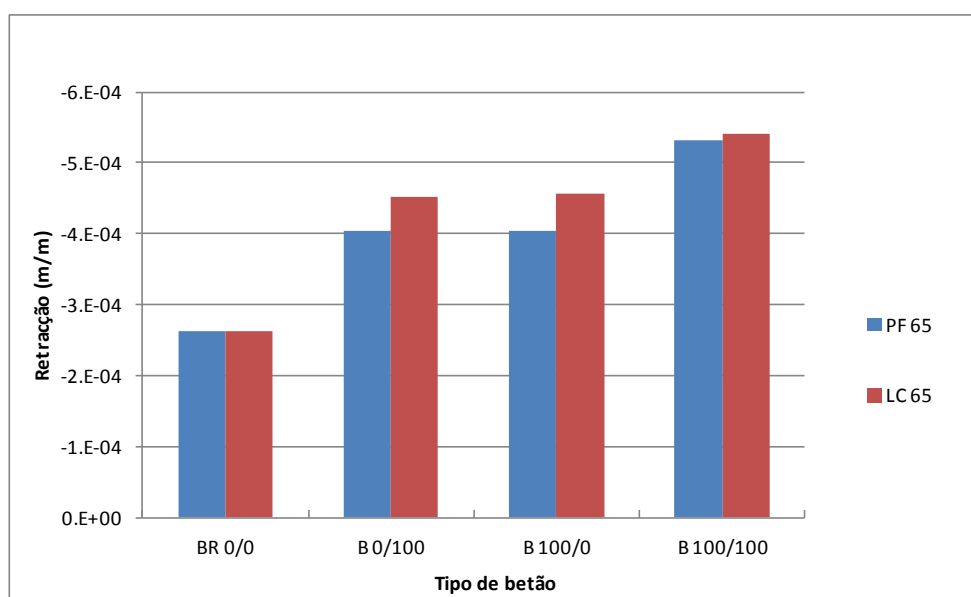


Figura 40 - Influência da incorporação de AFRB e AGRB na retracção aos 91 dias

Através de um levantamento bibliográfico exaustivo, Silva et al. (2014) constataram que a probabilidade de um betão produzido com 100% de AGRB apresentar um aumento de retracção inferior a 1,8 vezes, em relação ao BR, é de 95%. Esta situação concorda com os valores obtidos. Relativamente à fracção fina, não foi encontrado nenhum estudo deste género, muito provavelmente, devido à escassez de dados. Para isso, contribui

o facto de a utilização de AGRB ser considerada uma abordagem mais segura, na obtenção de betões de melhor qualidade.

Apesar disso, continua-se a verificar uma perda de desempenho, aproximadamente linear, com a incorporação de agregados reciclados (Figura 41).

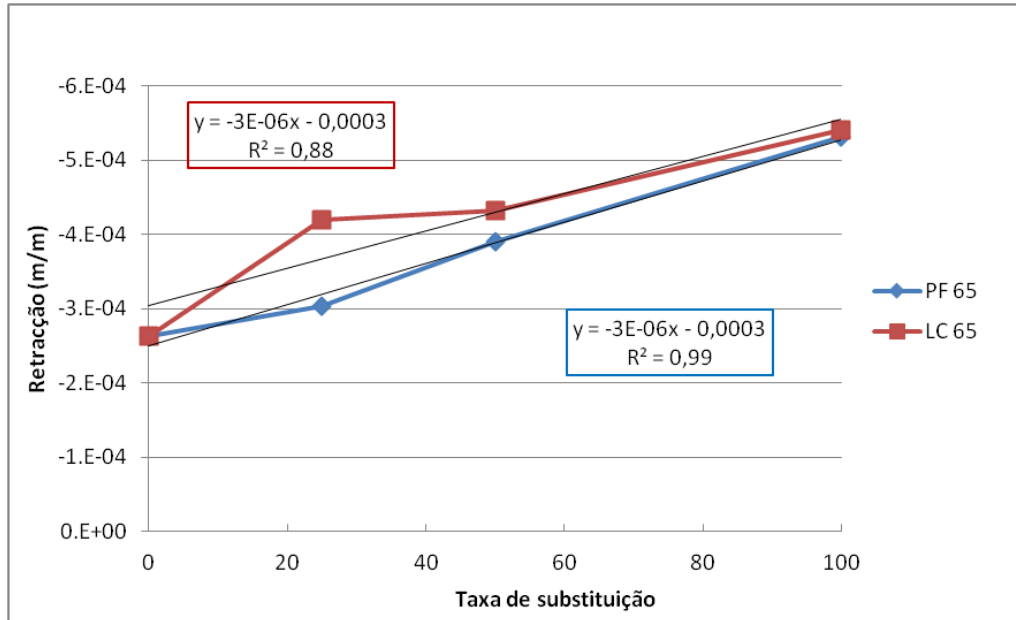


Figura 41 - Deformações por retração aos 91 dias

Finalmente, na Figura 42, apresenta-se a correlação obtida entre a deformação por retração aos 91 dias e a resistência à compressão dos betões aos 56 dias. Os resultados permitem concluir da existência de uma tendência aproximadamente linear de diminuição da retração com o aumento da resistência.

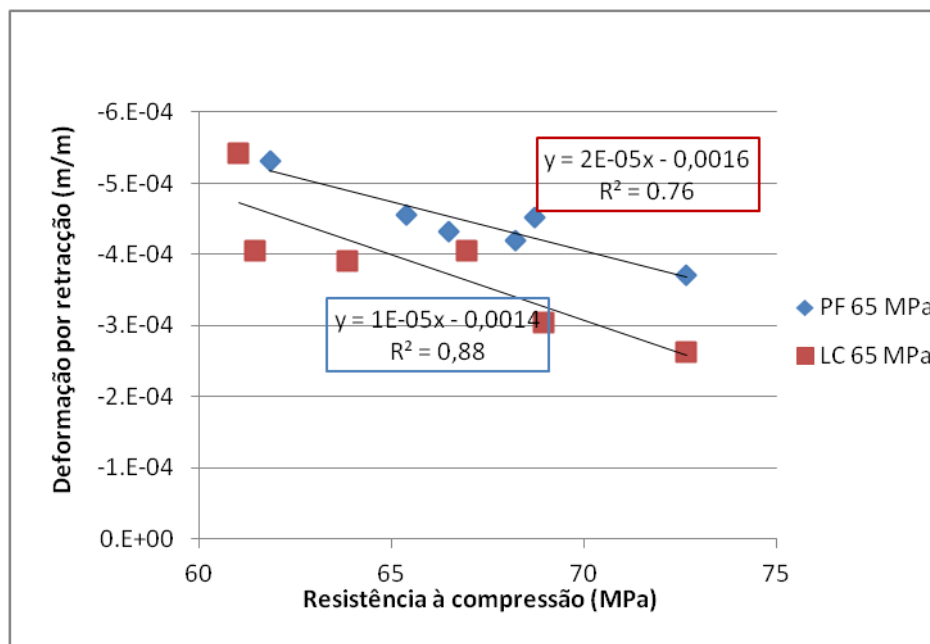


Figura 42 - Relação entre a retração aos 91 dias e resistência à compressão aos 56 dias

5.2.6. Fluência

O ensaio de determinação da fluência foi realizado segundo a especificação LNEC E399 (1993). Os provetes de betão foram colocados em carga aos 28 dias de idade, durante 91 dias. Nas Figuras 43 e 44, são apresentados os resultados obtidos.

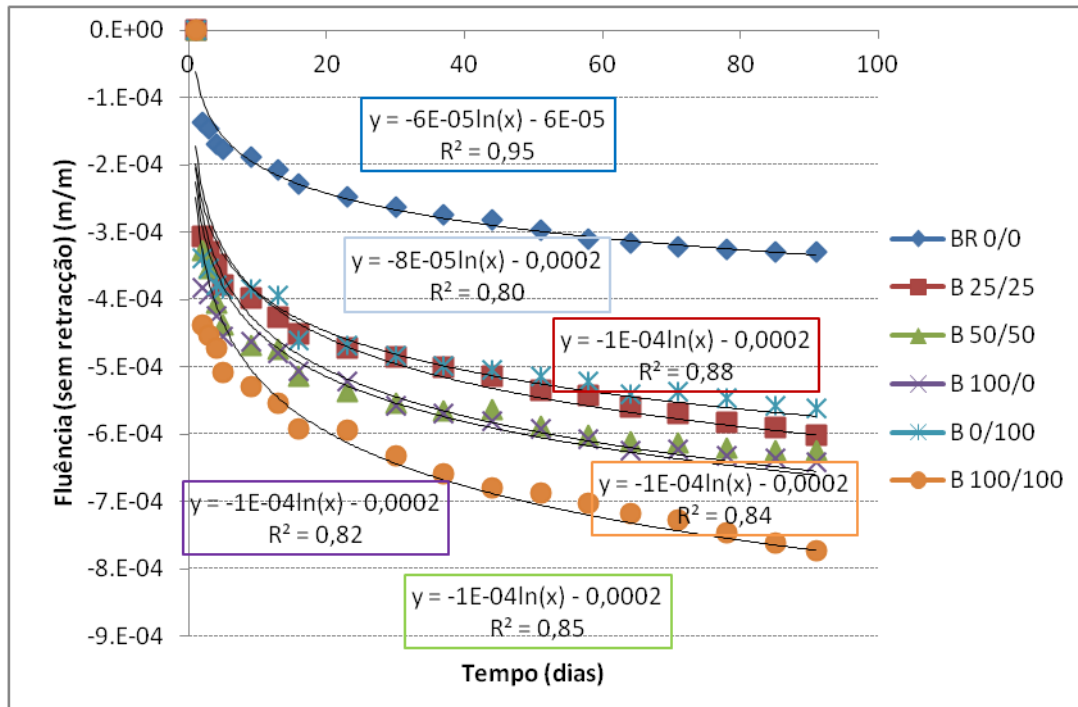


Figura 43 - Resultados do ensaio de fluência dos betões PF

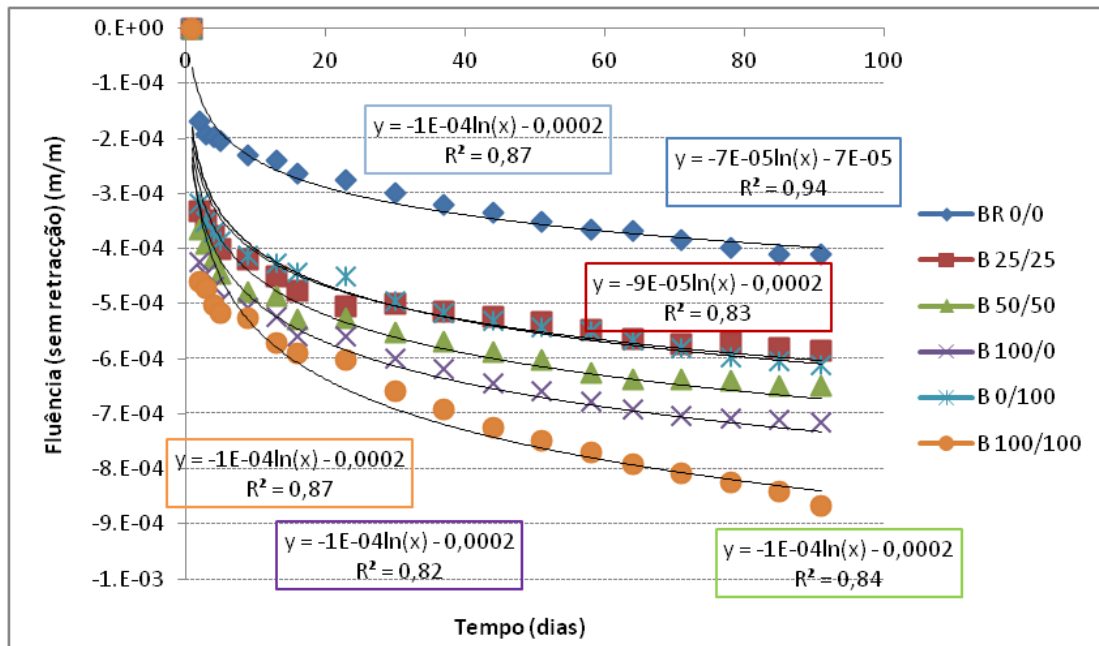


Figura 44 - Resultados do ensaio de fluência dos betões LC

De forma idêntica à retração, a fluência aumenta ao longo do tempo de forma não linear. A utilização de regressões logarítmicas conduziu novamente a coeficientes de correlação (R^2) elevados (entre 0,81 e 0,95).

Através da Tabela 25 e Figura 45, pode-se verificar que os betões com agregados reciclados apresentaram piores resultados.

Tabela 25 - Deformações por fluência aos 91 dias, para os diversos betões

Tipo de betão	PF 65		LC 65	
	Fluência (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	Fluência (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	-4,2E-04	0,0	-3,41E-04	0,0
B 25/25	-5,9E-04	39,9	-6,11E-04	79,1
B 50/50	-6,6E-04	56,7	-6,23E-04	82,9
B 100/0	-7,3E-04	73,5	-6,45E-04	89,1
B 0/100	-6,2E-04	48,4	-5,68E-04	66,5
B 100/100	-8,8E-04	110,9	-7,73E-04	126,6

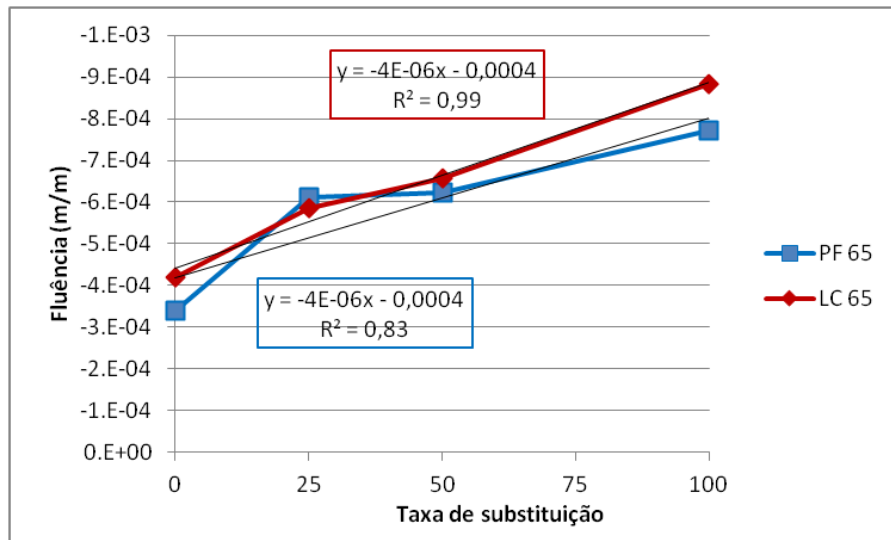


Figura 45 - Deformações por fluência aos 91 dias

Os resultados parecem indicar um aumento, aproximadamente linear, da fluência com a taxa de substituição. Aos 91 dias, os betões PF, para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, apresentam aumentos de fluência, em relação ao BR, de cerca de 40, 56 e 111%, respectivamente. No que respeita à família LC, foram registadas aumentos semelhantes, de 79, 83 e 127%.

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%.

Contudo, na investigação conduzida por Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), foram obtidos resultados inesperados. Foram observadas diminuições de cerca de 20%, em relação ao BR, quando os AR substituíram na íntegra os agregados naturais.

Na Figura 46, observa-se piores desempenhos na substituição de agregados finos, comparativamente com a substituição dos agregados grossos. Verifica-se que a incorporação de 100% de AGRB PF e LC provoca aumentos de fluência, em relação ao BR, de aproximadamente 48 e 66%, respectivamente. Nos betões em que a totalidade dos AFN é substituída, as reduções observadas são de cerca de 73-90%.

Na investigação realizada por Cartuxo (2013), os betões com agregados finos reciclados apresentaram resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho. Assim, para a taxa de substituição de 100%, as misturas com superplastificante de alto desempenho (idêntico ao usado nesta campanha) evidenciaram aumentos de fluência de cerca de 65%.

Relativamente à incorporação de 100% de AGRB, o estudo conduzido por Domingo-Cabo et al. (2009) apresentou também resultados idênticos (aumentos de 51%, em relação ao BR).

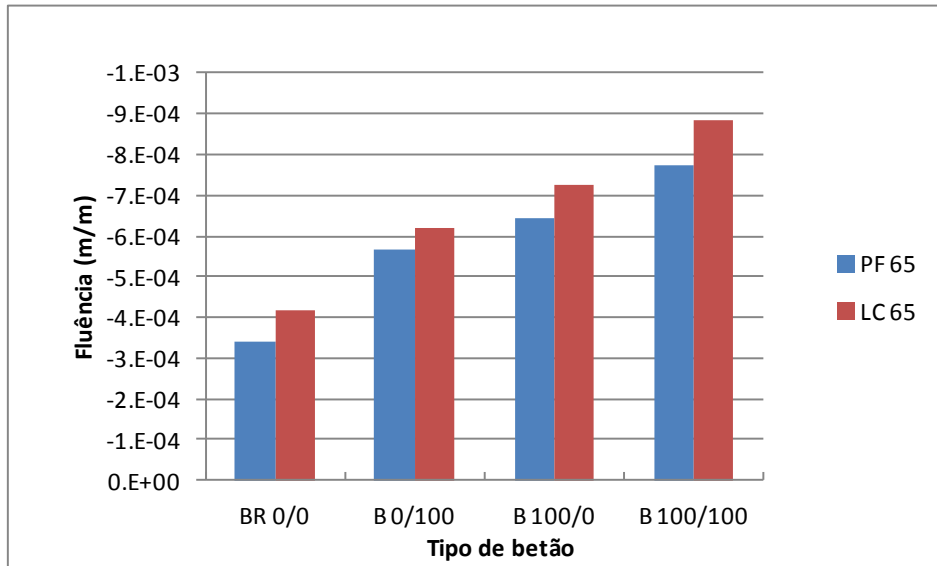


Figura 46 – Influência da incorporação de AFRB e AGRB na fluência

Na Figura 47, é possível observar a existência de uma relação linear entre a fluência e a resistência à compressão dos diversos betões, demonstrada através do valor obtido para o coeficiente de determinação da regressão linear efectuada ($R^2 = 0,99; 0,74$).

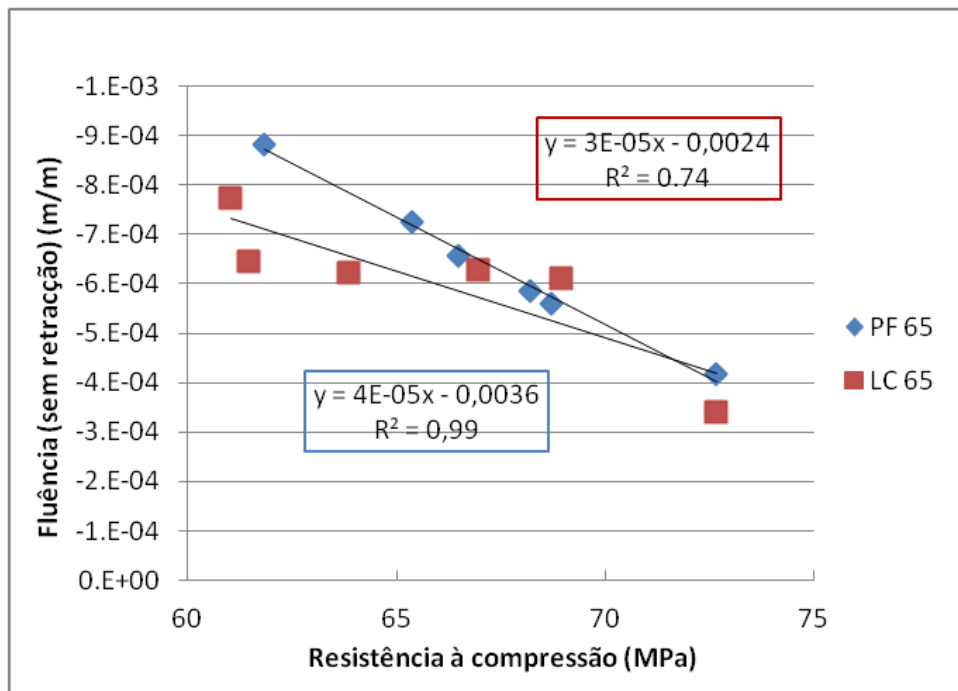


Figura 47 - Relação entre a fluência aos 91 dias e resistência à compressão aos 56 dias

6. Considerações finais

Com o presente relatório, pretendeu-se analisar os resultados experimentais obtidos durante a realização da tarefa 3. Nesta tarefa, além dos BR foram produzidos 10 tipos de betões com agregados reciclados. Consideram-se duas famílias de BAR (PF 65 e LC 65) e cinco taxas de substituição de agregados finos e grossos reciclados (25/25, 50/50; 100/0, 0/100 e 100/100%). No total, foram produzidos aproximadamente 1.8 m³ de betão.

Os resultados obtidos nas propriedades do estado fresco, nomeadamente no abaixamento, mostram que foi necessário aumentar a relação a/c dos BAR, para se atingirem trabalhabilidades idênticas. Esta situação deveu-se principalmente à utilização de AFRB. Esta situação deveu-se à maior absorção dos agregados reciclados, afectada pela presença de argamassa aderida. Os finos reciclados foram os mais afectados com valores 13 vezes superiores aos dos AFN. Relativamente aos AGRB, foram registados valores de absorção de água cerca de 6 vezes superiores aos dos AGN.

No que respeita à massa volúmica, verificou-se uma diminuição desta propriedade com a incorporação de AR. Foram obtidas variações máximas ente 5 e 9%, para os betões com 100% de agregados reciclados. Os resultados estão de acordo com os valores de massa volúmica dos agregados reciclados, cerca de 12% inferiores aos dos AN.

No que respeita ao estado endurecido, constatou-se uma diminuição de desempenho dos BAR, em relação ao BR, em todas as propriedades. Apesar disto, é importante salientar os valores extremamente satisfatórios obtidos em termos mecânicos. Por exemplo, na resistência à compressão (em cubos), aos 28 dias, verifica-se que até o BAR produzido apenas com agregados reciclados conseguiu atingir valores suficientes (cerca de 60 MPa), para poder ser utilizado na maioria dos elementos estruturais. Situação análoga foi verificada no módulo de elasticidade. De acordo com o Eurocódigo 2, os valores obtidos para o BAR com 100% de AR podem ser enquadrados em betões com classes de resistência C30/37 e C40/50. Na propriedade de tracção por compressão diametral, apesar das diminuições, em relação ao BR terem sido mais significativas, continuaram a registar-se valores muito próximos dos de betões C30/37.

No entanto, em termos de durabilidade, os valores obtidos mostram que a utilização de 100% de agregados reciclados apresenta maiores dificuldades e terá de ser avaliada em função de cada caso específico. A utilização de menores taxas de substituição poderá ser uma solução.

Na Tabela 26, é apresentado um resumo dos resultados obtidos, em que um sinal negativo corresponde a uma perda de desempenho.

Tabela 26 – Perdas de desempenho devidas à utilização de AR

Ensaio	Perda de desempenho dos BAR em relação ao BR			
	Taxa de substituição 0/100 %		Taxa de substituição 100/100 %	
	PF 65	LC 65	PF 65	LC 65
Resistência à compressão cubos (aos 28 dias)	-5,4 %	- 7,9 %	-14,9 %	- 16,0 %
Resistência à compressão em cilindros	-6,1 %	- 8,2 %	-15,4 %	- 15,5 %
Resistência à tracção	- 14,0 %	-17,2 %	- 35,1 %	-38,2 %
Módulo de elasticidade	-9,1 %	-8,5 %	-20,5 %	-28,3 %
Velocidade de propagação dos ultra-sons	-3,7 %	-7,8 %	-8,2 %	-11,6 %
Resistência à abrasão	+13,8 %	+5,8 %	-33,2 %	-38,6 %
Absorção de água por imersão	-21,9 %	-36,7 %	-58,8 %	-70,7 %
Absorção de água por capilaridade (às 72 horas)	-42,7 %	-57,2 %	-132,2 %	-153,0 %
Resistência à carbonatação (aos 91 dias)	-25,2 %	-23,7 %	-56,0 %	-111,2 %
Resistência à penetração dos iões cloreto (aos 91 dias)	-3,9 %	+1,4%	-15,5 %	-10,8%
Retracção (aos 91 dias)	-54,3%	-71,9%	-110,9%	-126,6%
Fluência (aos 91 dias)	-48,4%	-66,5%	-102,4%	-106,2%

Os resultados mostram que os BAR utilizando AR provenientes da pré-fabricação e de laboratório apresentam valores semelhantes. As diferenças, apesar de pouco significativas, são justificadas através da variação das características entre estes agregados (Tabela 1).

Analisando a Tabela 14, constata-se que, para a taxa de substituição de 0/100%, apenas as propriedades de absorção de água por capilaridade, retracção e fluência registaram diminuições de desempenho superiores a 50%. Nas restantes propriedades, as variações não atingiram 25%.

No entanto, quando os agregados naturais são substituídos na íntegra por agregados reciclados, as reduções são significativamente agravadas. Por exemplo, na absorção de água por capilaridade, resistência à carbonatação, retracção e fluência são visíveis perdas de desempenho superiores a 100%.

Assim, é possível concluir que a incorporação de AFRB é mais prejudicial do que a de AGRB, sendo esta realidade mais condicionante em termos de durabilidade. Uma explicação para este facto reside nas piores propriedades dos agregados finos reciclados (absorção e massa volúmica).

7. Bibliografia

- Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A.** - Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 24. 2002. pp. 269-79.
- Amorim, P.; de Brito, J.; Evangelista, L.** - Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability. *ACI Materials Journal*. Vol. 109. N.º 2. 2012. pp. 195-204.
- Berndt, M.L.** - Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. N.º 7. 2009. pp. 2606-2613.
- Brito, J.** - Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões”, Lição de síntese para provas de Agregação em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2005.
- Buck, A.D.** - Recycled concrete as a source of aggregate. *ACI Journal Proceedings*. Vol. 74. N.º 5. 1977. pp. 212-219.
- Building Contractors Society of Japan** - Committee on disposal and reuse of construction waste. 1981.
- Cartuxo, F.** - Betões com agregados finos provenientes da trituração de betão: Influência dos plastificantes no desempenho em termos de durabilidade. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2013.
- Coutinho, A.; Gonçalves, A.** - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II, III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 1997.
- Debieb, F.; Courard, L.; Kenai, S.; Degeimbre, R.** - Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 32. 2010. pp. 421–426.
- Domingo-Cabo, A.; Lázaro, C.; López-Gayarre, F.; Serrano-López, M.A.; Serna, P.; Castaño-Tabares, J.O.** - Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. N.º 7. 2009. pp. 2545-2553.
- Etxeberria, M.; Vazquez, E; Mari, A; Barra, M.** - Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37. N.º 5. 2007. pp. 735-742.
- Evangelista, L.; de Brito, J.** - Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 32. N.º 1. 2010. pp. 9-14.
- Evangelista, L.; de Brito, J.** - Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29. N.º 5. 2007. pp. 397-401.

Ferreira, L.; de Brito, J.; Barra, M. - Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the fresh and hardened properties of concrete. Magazine of Concrete Research. Vol. 63. N.º 8. 2011. pp. 617-27.

Ferreira, R. - Avaliação de ensaios de durabilidade do betão. Trabalho Final de Curso em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Guimarães 2000. 248 p.

Frondestou-Yannas, S. - Waste concrete as aggregate for new concrete. American Concrete Institute Journal. Vol. 74. N.º 8. 1977. pp. 373-376.

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.

Gonzalez, A.; Etxeberria, M. - Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. Vol. 52. 2014. pp. 227-235.

González-Fonteboa, B.; Martínez-Abella, F. - Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. Building and Environment. Vol. 43. N.º 4. 2008. pp. 429-437.

Hansen, T.C. - Recycling of Demolished Concrete and Masonry, RILEM Report No. 6, E&FN Spon. London. 1992.

Ismail, S.; Ramli, M. - Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. Vol. 68. 2014. pp. 726-739.

Juan, M.S.; Gutierrez, P.A. - Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials. Vol. 23. 2009. pp. 872-877.

Kalla, P.; Misra, A.; Gupta, R.C.; Csetenyi, L.; Gahlot, V.; Arora, A. - Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite–fly ash combination. Construction and Building Materials. Vol. 40. 2013. pp. 1142-50.

Katz, A. - Properties of concrete with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 33. 2003. pp. 703-711.

Khatib, J. M. - Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and Concrete Research. Vol. 35. N.º 4. 2005. pp. 763-769.

Khoshkenari, A.G.; Shafigh, P.; Moghimi, M.; Mahmud, H.B. - The role of 0–2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. Materials and Design. Vol. 64. 2014. pp. 345-354.

- Kou, S.C.; Poon, C.S.** - Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 32. N.º 8. 2010. pp. 649-54.
- Kou, S.C.; Poon, C.S.; Chan, D.** - Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*. Vol. 41. N.º 7. 2008. pp. 1191-201.
- Limbachiya, M.C.; Leelawat, T.; Dhir, R.K.** - Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*. Vol. 33. 2000. pp. 574-80.
- Limbachiya, M.C.; Meddah, M.S.; Ouchagour, Y.** - Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 27. N.º 1. 2012. pp. 439-449.
- 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.
- Malešev, M.; Radonjanin, V.; Marinkovic, S.** - Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*. Vol. 2. N.º 5. 2010. pp. 1204-1225.
- Matias, D.; de Brito, J.; Rosa, A.; Pedro, D.** - Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*. Vol. 44. 2013. pp. 101-109.
- Mehta, P.K.** - *Concrete, Structures, Properties and Materials*. Prentice Hall Inc., 1986. pp. 231-233.
- Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.M.** - *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 3rd ed. McGraw-Hill. 2006.
- Meyer, C.** - Concrete as a green building material. In: *Proceedings of the Third Int. Conference on Construction Materials*. Vancouver. 2005.

- Nagataki, S.; Lida, K.** - Recycling of demolished concrete, In V.M. Malhotra (ed.), Recent Advances in Concrete Technology, Proc. fifth CANMET/ACI intern. conf., Singapore, Publication SP-200: 1-20, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute. 2001.
- Nagatakia, S.; Gokceb, A.; Saekic, T.; Hisada, M.** - Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Research. Vol. 34. N.º 6. 2004. pp. 965-971.
- Naik, T.R.** - Sustainability of concrete construction. Practice Periodical on Structural Design and Construction. Vol. 13. N.º 2. 2008. pp. 98-103.
- Neville, A.M.**- Properties of concrete. Pitman, London. 1981. 844p.
- NP EN 1992-1** - Eurocódigo 2, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2008.
- 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 12390-3** - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ. Lisboa 2011.
- 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.
- P.C.A** (Portland Cement Association) - Recycled aggregate for reinforced concrete? Concrete Technology Today. 2002. pp. 5–6.
- Padmini, A.K.; Ramamurthy, K.; Mathews, M.S.** - Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. Vol. 23. N.º 2. 2009. pp. 829-36.
- Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L.** - Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. Construction and Building Materials. 2014a. Aceite para publicação.
- Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L.** - Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste - Influence of the crushing process. Materials and Structures. 2014b. Aceite para publicação.
- Pereira, F.** - Betões estruturais com a incorporação de agregados finos reciclados de betão: Influência de superplastificantes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2010.

Pereira, P.; Evangelista, L.; de Brito, J. - The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 28. N.º 1. 2011. pp. 722-9.

Pereira, P.; Evangelista, L.; de Brito, J. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 9. N.º 34. 2012. pp. 1044-52.

Poon, C.S.; Kou, S.C.; Lam, L. - Use of recycled aggregate in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*. Vol. 16. N.º 5. 2002. pp. 281-289.

Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. - Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 18. N.º 6. 2004. pp. 461-8.

Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L.; Fok, H.; Kou, S.C. - Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34. N.º 1. 2004. pp. 31-6.

Radonjanin, V.; Malešev, M.; Marinkovic, S.; Al Maly, A. - Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 47. 2013. pp. 1503-1511.

Rahal, K. - Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*. Vol. 42. N.º 1. 2007. pp. 407-415.

Rao, M.C.; Bhattacharyya, S.K.; Barai, S.V. - Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*. Vol. 44. 2011. pp. 205-20.

Ravindrarajah, R.S.; Loo, Y.H.; Tam, C.T. - Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 39. N.º 141. 1987. pp. 214-20.

Sagoe-Crentsil, K.; Taylor, A; Brown, T. - Properties of concrete incorporating fly ash and recycled demolition waste. Division of Building, Construction and Engineering, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Melbourne. 1998.

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.

Shayan, A.; Xu, A.M. - Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. *ACI Materials Journal*. Vol. 100. N.º 5. 2003. pp. 371-80.

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.

- Sim, J.; Park, C.** - Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Management*. Vol. 31. 2011. pp. 2352-60.
- Tabsh, S.W.; Abdelfatah, A.S.** - Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. 2009. pp. 1163-7.
- Tam, V.W.Y.; Tam, C.M.** - Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*. Vol. 42. N.º 10. 2007. pp. 3592-602.
- Tsujino, M.; Noguchi, T.; Tamura, M.; Kanematsu, M.; Maruyama, I.** - Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 5. N.º 1. 2007. pp. 13-25.
- 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.
- Yang, J.; Du, Q.; Bao, Y.** - Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*. Vol. 25. 2011. pp. 1935-1945.
- Yang, K.; Chung, H.; Ashour, A.** - Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*. Vol. 105. N.º 3. 2008. pp. 289-96.

Lisboa, 11 de Setembro de 2014

Autores

Diogo Pedro
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Luís Evangelista
Professor Adjunto

Pedro Silva
Professor Adjunto