



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 2

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

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS BETÕES

RELATÓRIO

Março de 2013

Financiamento FCT/POCTI



Governo da República Portuguesa



União Europeia

FEDER

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO	3
2.1. Abaixamento (cone de Abrams)	4
2.2. Massa volúmica	5
3. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	7
3.1. Propriedades em termos mecânicos	8
3.1.1. Resistência à compressão em cubos	8
3.1.2. Resistência à compressão em cilindros	13
3.1.3. Relação entre a resistência medida em provetes cúbicos e cilíndricos	14
3.1.4. Resistência à tracção por compressão diametral	17
3.1.5. Módulo de elasticidade	18
3.2. Propriedades em termos de durabilidade	22
3.2.1. Absorção de água por imersão	22
3.2.2. Absorção de água capilaridade	24
3.2.3. Resistência à carbonatação	28
3.2.4. Resistência à penetração de cloretos	34
3.2.5. Retracção	40
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
5. BIBLIOGRAFIA	44

Índice de figuras

Figura 1 - Pedreira da Tecnovia em Rio Maior: TP+TS	1
Figura 2 - Agregados reciclados provenientes da pré-fabricação e de laboratório obtidos através de TP+TS.....	2
Figura 3 - Britadeira de maxilas: TP.....	2
Figura 4 - Material resultante da TP	2
Figura 5 - Camião betoneira: betão produzido em laboratório.....	2
Figura 6 - Betonagem de um dos betões de laboratório.....	2
Figura 7 - Pulverização de um tipo de betão proveniente da pré-fabricação	3
Figura 8 - Variação da relação a/c para os vários betões	5
Figura 9 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica	6
Figura 10 - Influência do tipo e trituração no betão f_{cm} 20 MPa.....	6
Figura 11 - Influência do tipo de trituração no betão f_{cm} 45 MPa.....	7
Figura 12 - Influência do tipo de trituração no betão f_{cm} 65 MPa.....	7
Figura 13 - Resultados de resistência à compressão para os betões f_{cm} 20 MPa.....	9
Figura 14 - Resultados de resistência à compressão para os betões f_{cm} 45 MPa.....	9
Figura 15 - Resultados de resistência à compressão para os betões f_{cm} 65 MPa.....	10
Figura 16 - Efeito da relação a/c na resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 20 MPa	11
Figura 17 - Efeito da relação a/c na resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 45 MPa	11
Figura 18 - Efeito da relação a/c na resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 65 MPa	12
Figura 19 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões f_{cm} 20 MPa	12
Figura 20 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões f_{cm} 45 MPa	12
Figura 21 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões f_{cm} 65 MPa	13
Figura 22 - Resultados de resistência à compressão em cilindros aos 28 dias.....	14
Figura 23 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 dias dos betões f_{cm} 20	15

Figura 24 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 dias dos betões $f_{cm} 45$	15
Figura 25 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 dias dos betões $f_{cm} 65$	16
Figura 26 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias	18
Figura 27 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias	19
Figura 28 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros dos betões $f_{cm} 20$	21
Figura 29 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros dos betões $f_{cm} 45$	21
Figura 30 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros dos betões $f_{cm} 65$	21
Figura 31 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão	22
Figura 32 - Relação entre a água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões $f_{cm} 20$ MPa	23
Figura 33 - Relação entre a água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões $f_{cm} 45$ MPa	23
Figura 34 - Relação entre a água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões $f_{cm} 65$ MPa	24
Figura 35 - Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade.....	25
Figura 36 - Relação água por capilaridade com a relação a/c dos betões $f_{cm} 20$ MPa....	25
Figura 37 - Relação água por capilaridade com a relação a/c dos betões $f_{cm} 45$ MPa....	25
Figura 38 - Relação água por capilaridade com a relação a/c dos betões $f_{cm} 65$ MPa....	26
Figura 39 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade dos betões $f_{cm} 20$ MPa	26
Figura 40 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade dos betões $f_{cm} 45$ MPa	26
Figura 41 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade dos betões $f_{cm} 65$ MPa	27
Figura 42 - Relação entre água por capilaridade e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões $f_{cm} 20$ MPa	27

Figura 43 - Relação entre água por capilaridade e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 45 MPa	28
Figura 44 - Relação entre água por capilaridade e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 65 MPa	28
Figura 45 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 20 MPa..	30
Figura 46 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 45 MPa..	30
Figura 47 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 65 MPa..	30
Figura 48 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 20 MPa	31
Figura 49 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 45 MPa	31
Figura 50 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 65 MPa	32
Figura 51 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a absorção por imersão dos betões f_{cm} 20 MPa	32
Figura 52 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a absorção por imersão dos betões f_{cm} 45 MPa	33
Figura 53 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a absorção por imersão dos betões f_{cm} 65 MPa	33
Figura 54 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 20 MPa	33
Figura 55 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 45 MPa	34
Figura 56 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 65 MPa	34
Figura 57 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos dos betões f_{cm} 20 MPa	35
Figura 58 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos dos betões f_{cm} 45 MPa	36
Figura 59 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos dos betões f_{cm} 65 MPa	36
Figura 60 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 20 MPa.....	37

Figura 61 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 45 MPa.....	37
Figura 62 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 65 MPa.....	37
Figura 63 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção por imersão dos betões f_{cm} 20 MPa.....	38
Figura 64 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção por imersão dos betões f_{cm} 45 MPa.....	38
Figura 65 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção por imersão dos betões f_{cm} 65 MPa.....	39
Figura 66 - Relação entre resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 20 MPa.....	39
Figura 67 - Relação entre resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 45 MPa.....	39
Figura 68 - Relação entre resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 65 MPa.....	40
Figura 69 - Deformações devido retracção ao longo do tempo nos betões f_{cm} 20 MPa .	40
Figura 70 - Deformações devido retracção ao longo do tempo nos betões f_{cm} 45 MPa .	41
Figura 71 - Deformações devido retracção ao longo do tempo nos betões f_{cm} 65 MPa .	41

Índice de tabelas

Tabela 1 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento.....	4
Tabela 2 - Influência da incorporação de AGRB e britagem na relação a/c	5
Tabela 3 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica.....	5
Tabela 4 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.....	8
Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.....	8
Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 56 dias.....	9
Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros aos 28 dias.	13
Tabela 8 - Relações das resistências obtidas aos 28 dias em cubos e cilindros	14
Tabela 9 - Classes de resistência à compressão para os betões $f_{cm} 20$. NP EN 206-1.....	16
Tabela 10 - Classes de resistência à compressão para os betões $f_{cm} 45$. NP EN 206-1...	16
Tabela 11 - Classes de resistência à compressão para os betões $f_{cm} 65$. NP EN 206-1...	16
Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias	17
Tabela 13 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias	18
Tabela 14 - Relação entre tensão de compressão e módulo de elasticidade para os betões $f_{cm} 20$ MPa.....	20
Tabela 15 - Relação entre tensão de compressão e módulo de elasticidade para os betões $f_{cm} 45$ MPa.....	20
Tabela 16 - Relação entre tensão de compressão e módulo de elasticidade para os betões $f_{cm} 65$ MPa.....	20
Tabela 17 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão	22
Tabela 18 - Resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade às 72 horas	24
Tabela 19 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 7 dias	28
Tabela 20 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 28 dias	29
Tabela 21 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 56 dias	29
Tabela 22 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 91 dias	29
Tabela 23 - Resultados obtidos no ensaio de difusão de cloretos aos 28 dias	35
Tabela 24 - Resultados obtidos no ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias	35
Tabela 25 - Deformações por retracção aos 7 dias, para os diversos betões.....	42
Tabela 26 - Deformações por retracção aos 91 dias, para os diversos betões.....	42

Abreviaturas

AGRB	Agregados grossos reciclados de betão
AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
f_{cm} 20 MPa	Família de betão com resistência alvo 20 MPa
f_{cm} 45 MPa	Família de betão com resistência alvo 45 MPa
f_{cm} 65 MPa	Família de betão com resistência alvo 65 MPa
Relação a/c	Relação água / cimento
TP	Trituração primária
TP+TS	Trituração primária mais secundária

1. Introdução

Neste relatório, apresentam-se os resultados experimentais disponíveis, resultantes do cumprimento da tarefa 2 do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUStainableCONcrete)”.

Esta tarefa enquadra-se num plano de trabalhos que pretende 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.

Deste modo, na tarefa 2, avalia-se o desempenho (mecânico e de durabilidade) de betões executados com agregados grossos reciclados de betão (AGRB), obtidos através de dois processos de britagem (Figuras 1 a 4): trituração primária (TP) e trituração primária mais secundária (TP+TS). Com esta análise, pretende-se seleccionar o método mais eficaz de produção de agregados reciclados (AR), método que será adoptado nas restantes fases do projecto.

Os agregados reciclados utilizados têm origem em produtos da pré-fabricação (PF), com classes de resistência à compressão de 20, 45 e 65 MPa, e em betões produzidos em laboratório (LC), com classes de resistência à compressão idênticas (Figuras 5 a 7).



Figura 1 - Pedreira da Tecnovia em Rio Maior: TP+TS



Figura 2 - Agregados reciclados provenientes da pré-fabricação e de laboratório obtidos através de TP+TS



Figura 3 - Britadeira de maxilas: TP



Figura 4 - Material resultante da TP



Figura 5 - Camião betoneira: betão produzido em laboratório



Figura 6 - Betonagem de um dos betões de laboratório



Figura 7 - Pulverização de um tipo de betão proveniente da pré-fabricação

A avaliação das propriedades no estado fresco é efectuada através de ensaios de abaiamento no cone de Abrams e massa volúmica, enquanto o estado endurecido é caracterizado pelos seguintes ensaios: resistência à compressão em cubos; resistência à compressão em cilindros; resistência à tracção por compressão diametral; módulo de elasticidade; resistência à carbonatação; resistência à penetração por cloretos; absorção de água por capilaridade; absorção de água por imersão e retracção.

De salientar as dificuldades encontradas, resultantes do contexto socioeconómico do país, em encontrar parcerias que pudessem contribuir quer ao nível de logística, quer de equipamentos e de material, situação que constituiu uma séria complicação para o projecto. No entanto, ultrapassada esta realidade, foram já produzidos cerca de 7 m³ de betão de laboratório, sendo realizados na tarefa 2 18 tipos de betões (cerca de 2.5 m³).

2. 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.

A importância da análise destas propriedades está relacionada com a elevada influência que estas têm nas propriedades do betão endurecido, como aliás se irá tentar provar, testando regressões entre as várias propriedades e estudando as suas correlações. Ao longo do capítulo, são apresentadas tabelas, com colunas indicativas das variações dos resultados, devidas à incorporação de AGRB e do processo de britagem, de modo a perceber-se a influência destes no desempenho dos betões produzidos.

2.1. 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 1, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 1 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento

	f_{cm} 20 MPa		f_{cm} 45 MPa		f_{cm} 65 MPa	
	Relação a/c	Abaixamento (mm)	Relação a/c	Abaixamento (mm)	Relação a/c	Abaixamento (mm)
BR P	0,86	140,0	0,65	112,5	0,41	127,0
BR P+S	0,81	131,0	0,63	110,5	0,40	112,0
B100LC P	0,87	138,0	0,66	119,5	0,42	139,0
B100LC P+S	0,84	127,0	0,63	115,0	0,40	127,0
B100PF P	0,86	122,0	0,65	135,3	0,42	124,0
B100PF P+S	0,82	128,0	0,64	115,0	0,42	138,0

Observando a Tabela 1, conclui-se que tanto a incorporação de agregados reciclados como o seu processo de britagem influenciam a trabalhabilidade dos betões, sendo necessárias menores quantidades de água nos betões de referência e nos que utilizam agregados obtidos por TP+TS. Na Tabela 2 e na Figura 8, são apresentadas as variações resultantes da incorporação de agregados reciclados e do processo de britagem na relação a/c das misturas. Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que, para o mesmo processo de britagem, a incorporação de reciclados de betão tem um impacto ligeiramente negativo nesta propriedade, sendo as máximas variações de aproximadamente 6, 3 e 5% para as famílias f_{cm} 20, 45 e 65 MPa, respectivamente. Estes resultados podem ser explicados pela forma mais angulosa dos agregados obtidos por trituração primária, o que provoca um aumento de vazios no betão originando desta forma uma menor trabalhabilidade.

Tabela 2 - Influência da incorporação de AGRB e britagem na relação a/c

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Relação a/c	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Relação a/c	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Relação a/c	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	0,86	0,0	0,0	0,65	0,0	0,0	0,41	0,0	0,0
BR P+S	0,81	0,0	-5,8	0,63	0,0	-3,1	0,40	0,0	-2,4
B100LC P	0,87	1,2	0,0	0,66	1,5	0,0	0,42	2,4	0,0
B100LC P+S	0,84	3,7	-3,4	0,63	0,0	-4,6	0,40	0,0	-4,8
B100PF P	0,86	0,0	0,0	0,65	0,0	0,0	0,42	2,4	0,0
B100PF P+S	0,82	1,2	-4,7	0,64	1,6	-1,5	0,42	5,0	0,0

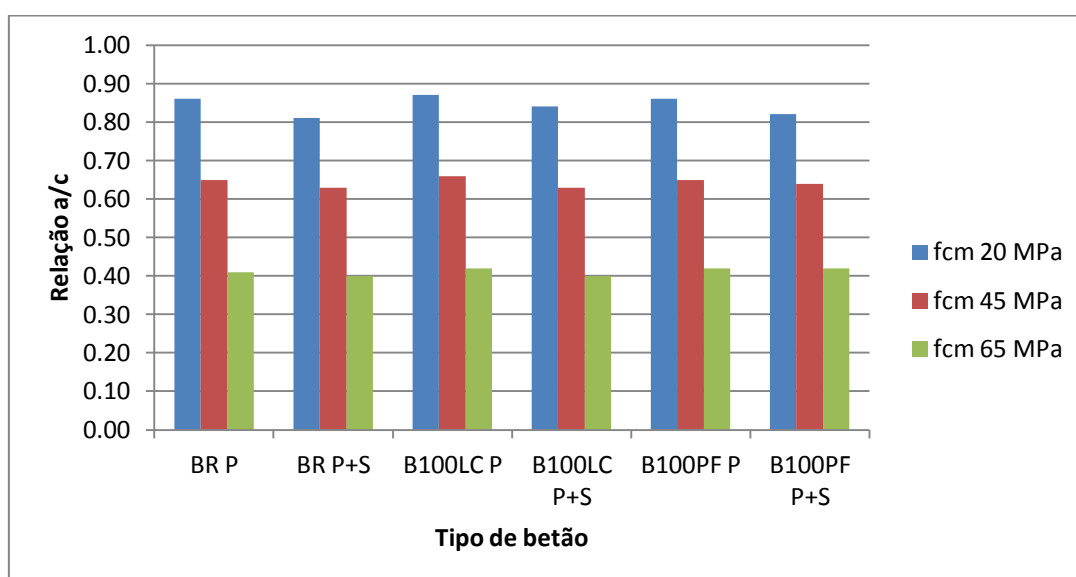


Figura 8 - Variação da relação a/c para os vários betões

2.2. Massa volúmica

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-6 (2009). Na Tabela 3 e na Figura 9, são apresentados os resultados.

Tabela 3 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Massa volúmica (kg/m ³)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	2336,0	0,0	0,0	2372,2	0,0	0,0	2459,8	0,0	0,0
BR P+S	2376,0	0,0	1,7	2402,2	0,0	1,3	2470,2	0,0	0,4
B100LC P	2266,0	-3,0	0,0	2289,3	-3,5	0,0	2404,4	-2,3	0,0
B100LC P+S	2288,0	-3,7	1,0	2351,3	-2,1	2,7	2412,3	-2,3	0,3
B100PF P	2220,4	-4,9	0,0	2273,8	-4,1	0,0	2380,0	-3,2	0,0
B100PF P+S	2245,0	-5,5	1,1	2318,4	-3,5	2,0	2388,4	-3,3	0,4

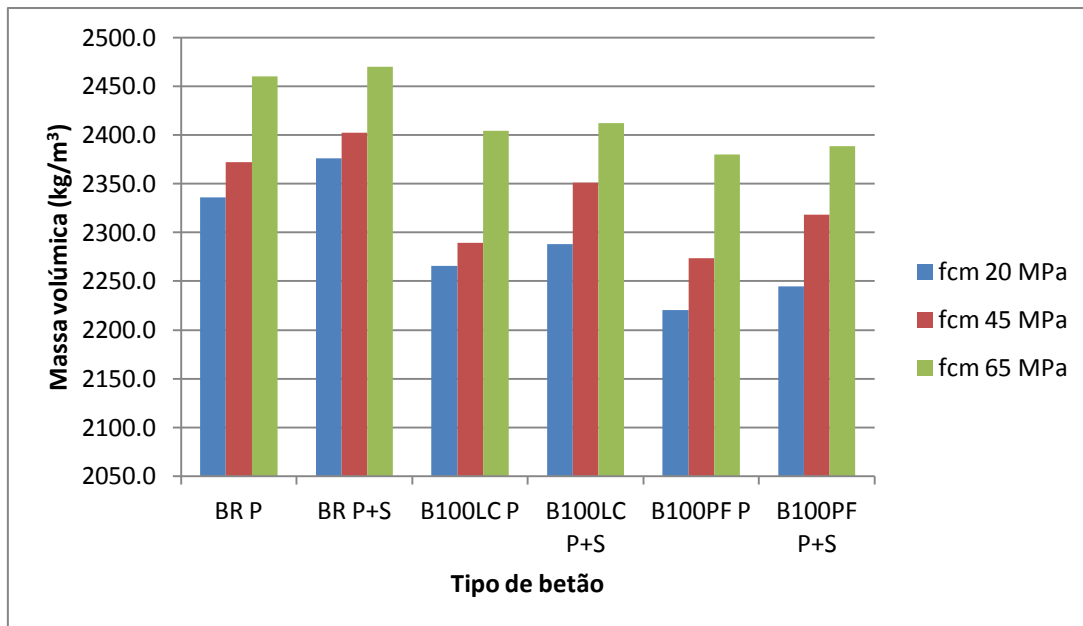


Figura 9 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica

A partir dos valores obtidos, verifica-se que a incorporação de agregados reciclados grossos é responsável por um decréscimo, pouco significativo, da massa volúmica dos betões, tendo-se obtido variações máximas de 5, 4 e 3 %, para os betões das famílias f_{cm} 20, 45 e 65 MPa, respectivamente.

No que respeita ao processo de britagem utilizado, observa-se que o método de trituração TP+TS conduz a valores de massa volúmica superiores (Figuras 10 a 12). Tal pode ser explicado pela forma mais angulosa dos agregados obtidos por trituração primária, o que provoca um aumento de vazios no betão originando desta forma uma menor massa volúmica.

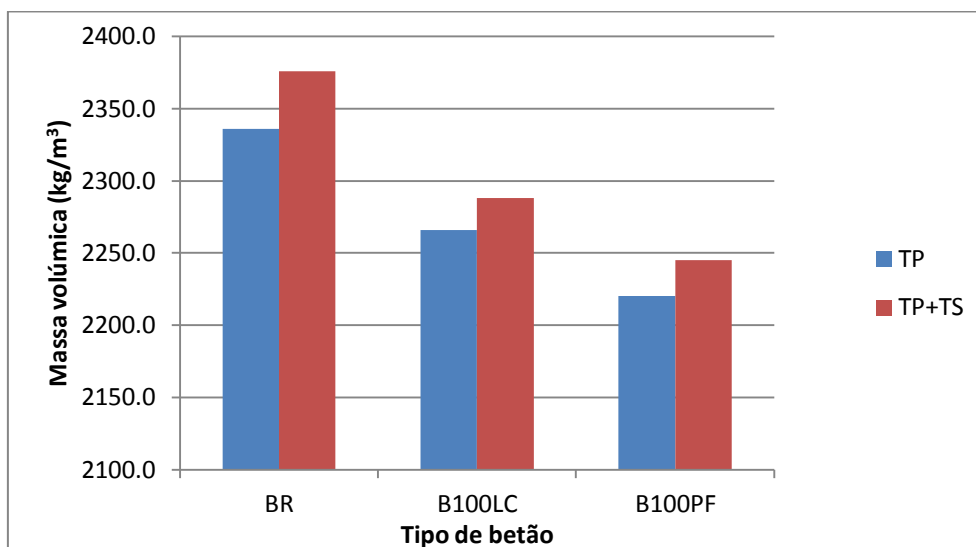


Figura 10 - Influência do tipo e trituração no betão f_{cm} 20 MPa

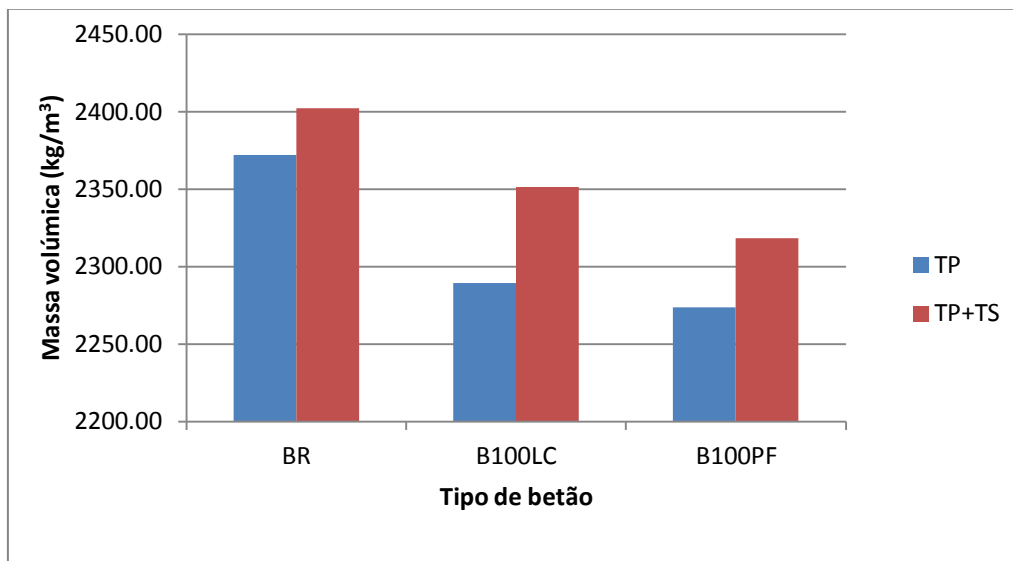


Figura 11 - Influência do tipo de trituração no betão f_{cm} 45 MPa

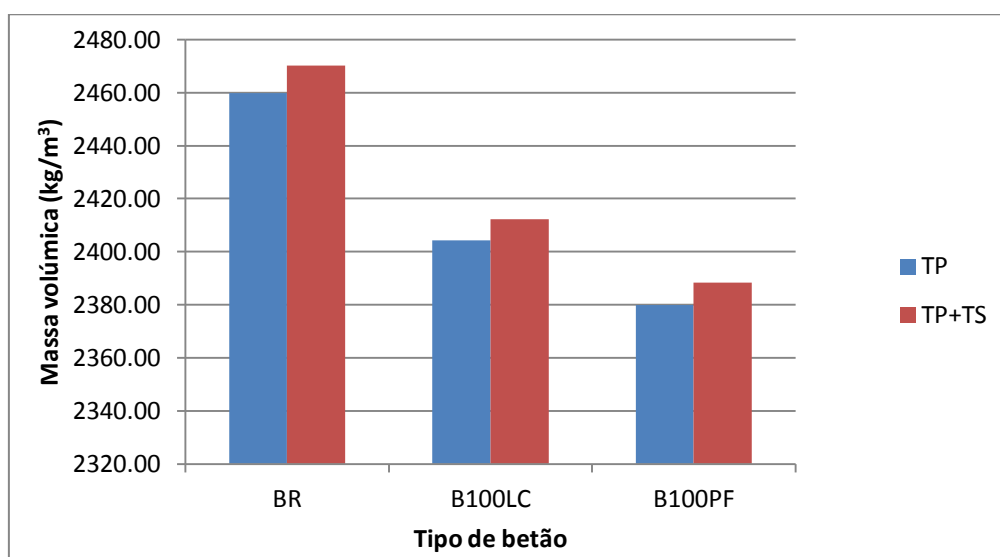


Figura 12 - Influência do tipo de trituração no betão f_{cm} 65 MPa

3. 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 e do processo de britagem. São ainda apresentadas tabelas, com colunas indicativas das variações dos resultados devidas à incorporação de AGRB e do processo de britagem, de modo a perceber-se a influência destes no desempenho dos betões produzidos.

3.1. Propriedades em termos mecânicos

Neste subcapítulo, são avaliadas as características mecânicas de betões com agregados grossos reciclados de betão sujeitos a diferentes processos de britagem, através da comparação com betões de referência.

3.1.1. 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 e nas Figuras 13 a 15, são apresentados os resultados obtidos.

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

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	17,9	0,0	0,0	30,8	0,0	0,0	62,0	0,0	0,0
BR P+S	20,5	0,0	14,7	33,4	0,0	8,3	63,5	0,0	2,4
B100LC P	13,5	-24,6	0,0	25,8	-16,2	0,0	56,3	-9,3	0,0
B100LC P+S	15,5	-24,5	14,8	30,2	-9,5	17,1	57,4	-9,7	1,9
B100PF P	15,5	-13,6	0,0	24,2	-21,6	0,0	59,5	-4,0	0,0
B100PF P+S	18,2	-11,2	17,8	30,7	-8,0	27,0	54,9	-13,5	-7,7

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

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	23,9	0,0	0,0	38,7	0,0	0,0	71,1	0,0	0,0
BR P+S	27,5	0,0	15,1	42,4	0,0	9,8	72,3	0,0	1,8
B100LC P	19,7	-17,7	0,0	35,7	-7,6	0,0	66,8	-6,1	0,0
B100LC P+S	21,0	-23,8	6,7	41,1	-3,2	15,0	70,2	-3,0	5,1
B100PF P	21,8	-9,0	0,0	36,1	-6,7	0,0	68,5	-3,6	0,0
B100PF P+S	23,6	-14,3	8,5	39,7	-6,6	9,9	66,5	-8,1	-3,0

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

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR_B} (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR_B} (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão (MPa)	Δ_{AGR_B} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	25,3	0,0	0,0	40,9	0,0	0,0	72,7	0,0	0,0
BR P+S	29,9	0,0	18,2	44,9	0,0	9,8	73,8	0,0	1,5
B100LC P	21,5	-15,3	0,0	39,4	-3,6	0,0	67,0	-7,8	0,0
B100LC P+S	22,7	-24,1	5,8	44,7	-0,5	13,4	71,5	-3,1	6,7
B100PF P	23,8	-6,1	0,0	37,9	-7,3	0,0	69,2	-4,9	0,0
B100PF P+S	26,4	-11,7	11,2	42,6	-5,1	12,5	68,2	-7,5	-1,3

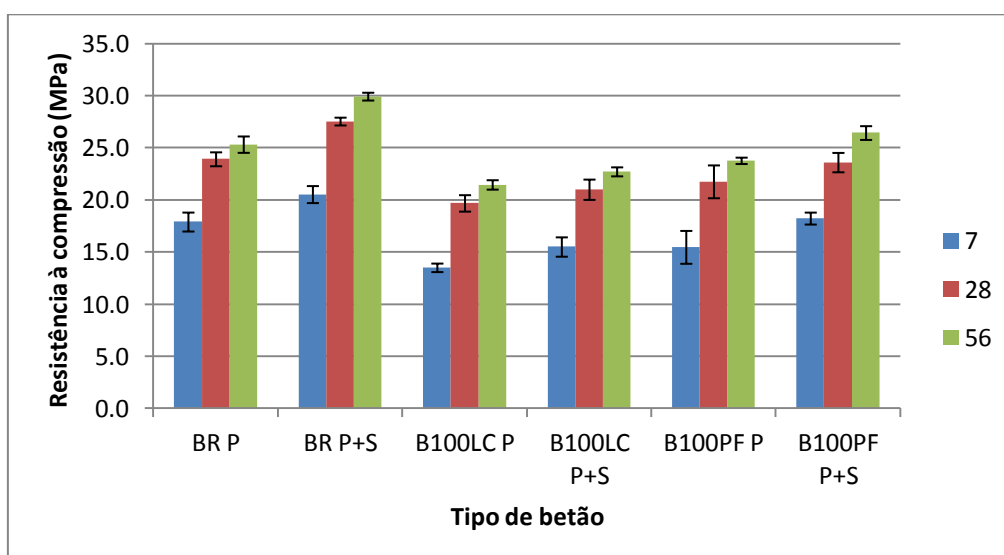


Figura 13 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão para os betões f_{cm} 20 MPa

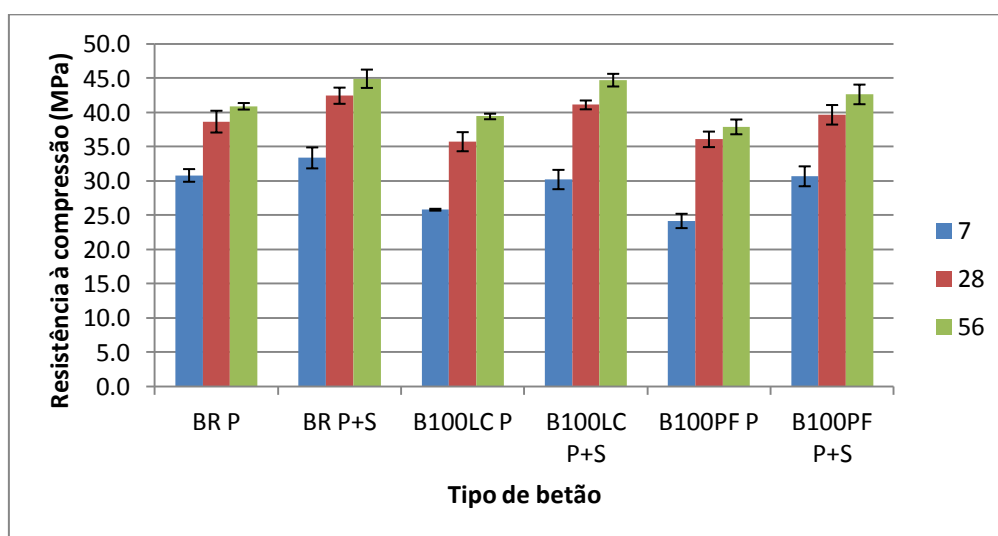


Figura 14 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão para os betões f_{cm} 45 MPa

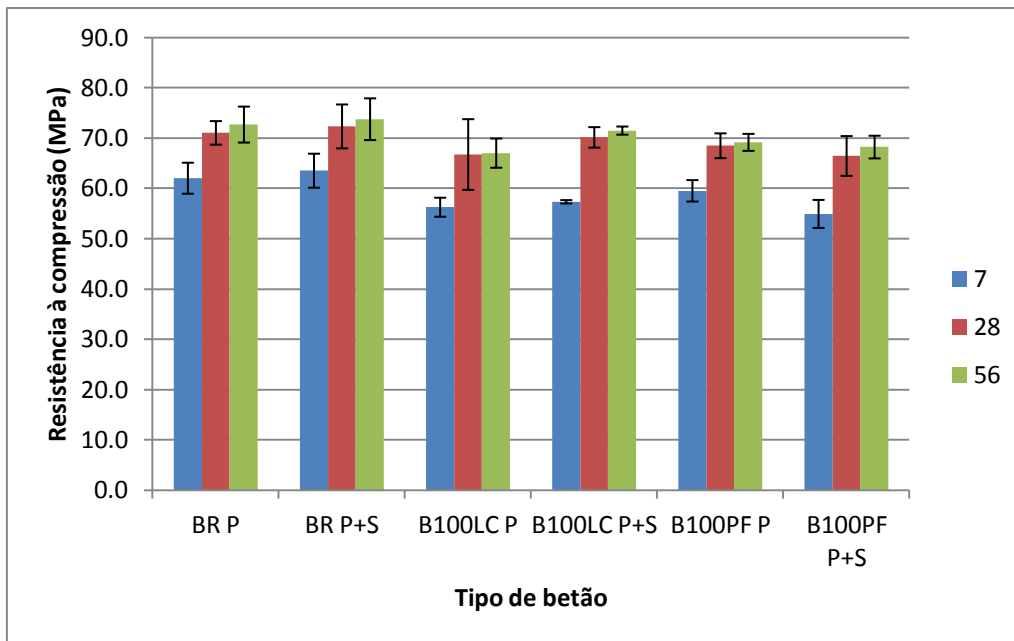


Figura 15 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão para os betões f_{cm} 65 MPa

Na Tabela 5, observa-se que, para a família f_{cm} 20 MPa, o processo de britagem teve uma maior influência nos betões de referência, registando-se uma variação máxima de cerca de 15%, contrastando com 8% obtidos nos betões com AGRB. Relativamente ao efeito da incorporação de agregados reciclados, constata-se uma diminuição máxima de 20%.

No que respeita aos betões f_{cm} 45 MPa, verifica-se uma diminuição da resistência, relativamente ao betão de referência, tendo sido obtidas variações máximas de 7.57% e 6.55%, para os betões de trituração primária e primária mais secundária, respectivamente. Deste modo, conclui-se que os betões produzidos com agregados com trituração primária mais secundária apresentam melhores resultados.

Finalmente, nos betões f_{cm} 65 MPa, para o caso da trituração primária mais secundária, observa-se também uma diminuição desta propriedade, relativamente ao betão de referência. Contudo, os valores obtidos são bastantes semelhantes, registando-se uma variação máxima de cerca de 8%. No que concerne à trituração primária, verificou-se uma perda máxima de 6%.

Em conclusão, os betões que utilizaram agregados obtidos pelo processo de britagem (TP+TS), apresentaram os melhores resultados. Os valores de f_{cm} alvo foram de uma forma geral alcançados.

Nas Figuras 16, 17 e 18, estabelece-se uma relação entre a quantidade de água e a resistência à compressão. Os resultados obtidos mostram correlações bastante positivas, exceção feita para a família de betão f_{cm} 20 MPa, onde os valores registados são mais

baixos ($R^2 = 0,57$; $R^2 = 0,77$; $R^2 = 0,74$). Esta situação demonstra a forte ligação entre estas propriedades. No caso da massa volúmica (Figuras 19 a 21), as correlações obtidas, são igualmente satisfatórias ($R^2 = 0,50$; $R^2 = 0,85$; $R^2 = 0,72$), podendo-se afirmar existir uma relação entre a massa volúmica e a resistência à compressão. Verifica-se, de igual modo, valores inferiores para os betões f_{cm} 20 MPa.

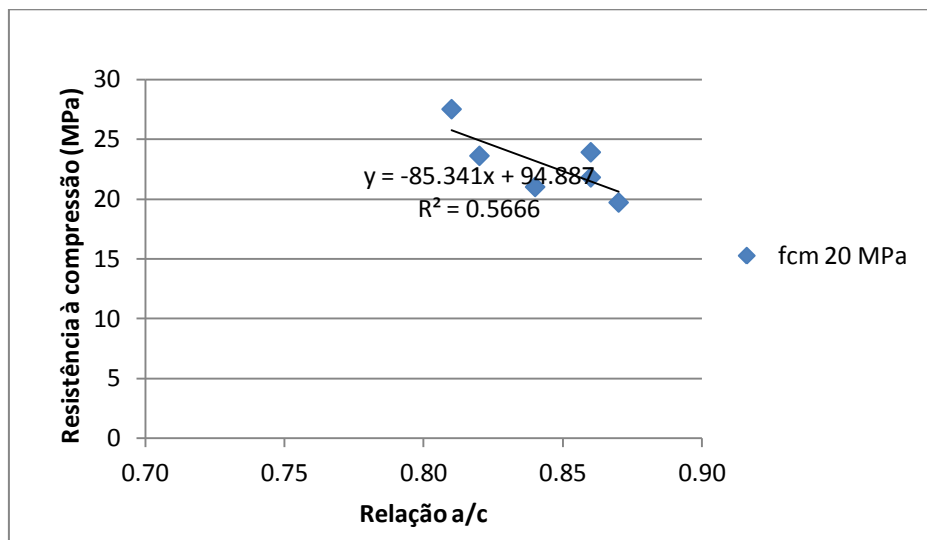


Figura 16 - Efeito da relação a/c na resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 20 MPa

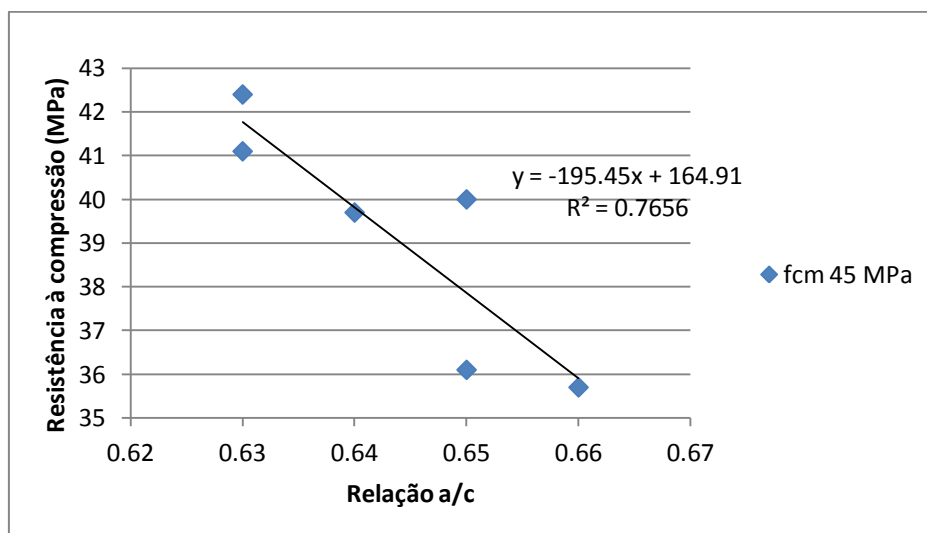


Figura 17 - Efeito da relação a/c na resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 45 MPa

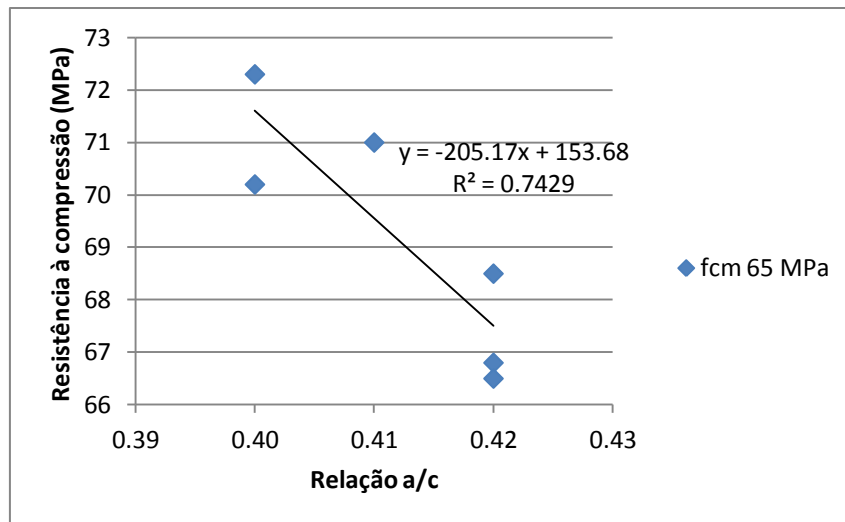


Figura 18 - Efeito da relação a/c na resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 65 MPa

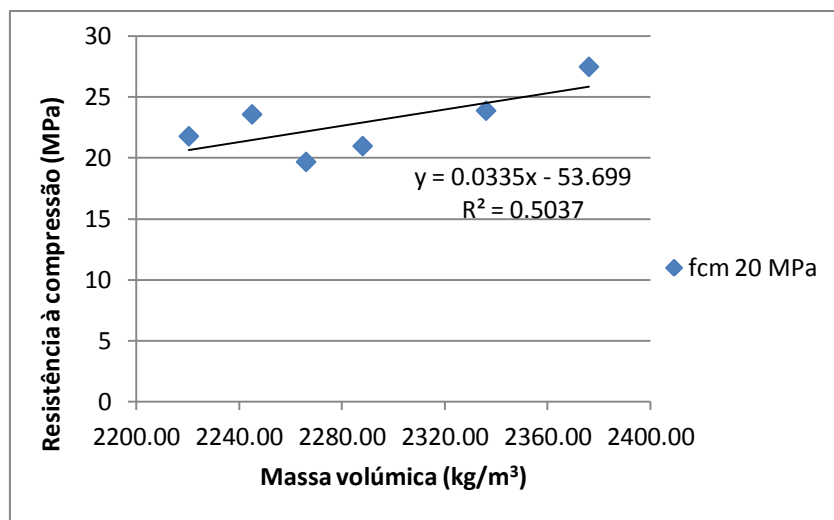


Figura 19 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões f_{cm} 20 MPa

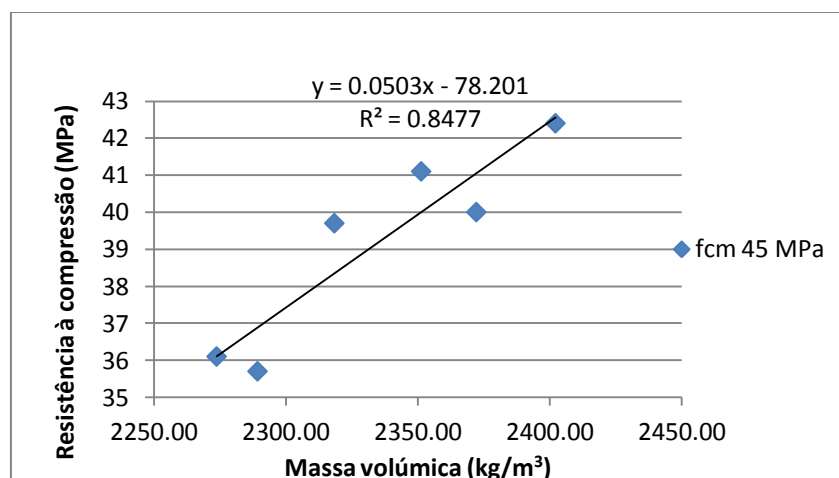


Figura 20 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões f_{cm} 45 MPa

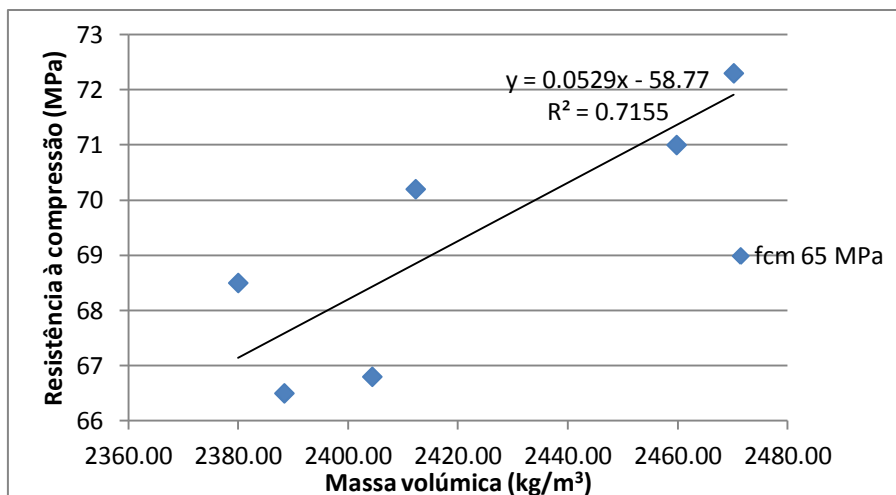


Figura 21 - Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica dos betões f_{cm} 65 MPa

3.1.2. Resistência à compressão em cilindros

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12390-3 (2011) aos 28 dias. Na Tabela 7 e na Figura 22, são apresentados os resultados obtidos.

Através da análise da Figura 22, para os betões f_{cm} 20 MPa, observa-se uma diminuição dos valores com a substituição de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados de betão. As variações ocorridas situaram-se entre 18 e 26%. No que respeita ao processo de britagem, os betões utilizando o método TP+TS obtiveram melhores resultados, apresentando valores superiores, em cerca de 15%, relativamente à trituração primária.

Relativamente à família de betões f_{cm} 45 MPa, verifica-se que, em ambos os processos de britagem, ocorre uma diminuição dos valores obtidos, em relação aos betões de referência, com variações máximas de 14 e 16%, para a TP e TP+TS, respectivamente.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros aos 28 dias

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Resistência à compressão em cilindros (MPa)	Δ_{AGR_B} (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão em cilindros (MPa)	Δ_{AGR_B} (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à compressão em cilindros (MPa)	Δ_{AGR_B} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	19,6	0,0	0,0	29,7	0,0	0,0	58,0	0,0	0,0
BR P+S	22,8	0,0	16,2	33,1	0,0	11,5	59,4	0,0	2,5
B100LC P	14,7	-25,0	0,0	28,2	-5,1	0,0	55,3	-4,6	0,0
B100LC P+S	16,9	-25,8	15,0	32,9	-0,5	16,9	58,5	-1,6	5,7
B100PF P	16,3	-17,1	0,0	28,5	-4,2	0,0	56,1	-3,3	0,0
B100PF P+S	18,7	-17,8	15,1	31,5	-4,8	10,7	55,0	-7,5	-2,0

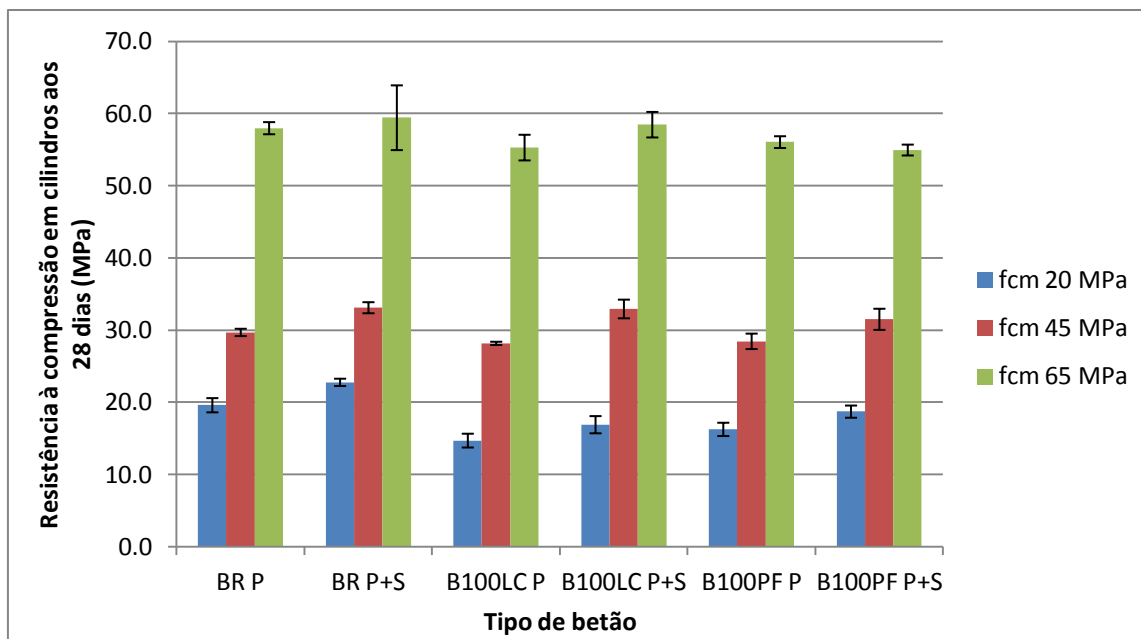


Figura 22 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros aos 28 dias

Finalmente, os betões f_{cm} 65 MPa apresentam um comportamento semelhante aos anteriores com variações máximas de 11.9 e 12.7%, para a TP e TP+TS, respectivamente.

Em resumo, os resultados mostram que a incorporação de agregados reciclados e o processo de trituração influenciam ligeiramente o desempenho dos betões nesta propriedade, sendo claro, nas diversas famílias, que os valores mais baixos são obtidos nos betões com reciclados de betão triturados de forma primária.

3.1.3. Relação entre a resistência medida em provetes cúbicos e cilíndricos

Determinada a resistência à compressão em provetes cúbicos e cilíndricos foi efectuado neste subcapítulo uma relação dos valores obtidos. Na Tabela 8, são apresentados os resultados obtidos.

Através da análise da Tabela 8, verifica-se que, aos vinte e oito dias, a tensão de rotura nos cilindros é em média 79,0, 78,7 e 82,4% da tensão de rotura dos cubos, para os betões correspondentes às famílias f_{cm} 20, 45 e 65 MPa, respectivamente. Observam-se ainda, correlações bastante elevadas nos valores obtidos (Figuras 23 a 25).

Nas Tabelas 9 a 11, são apresentados os valores de resistência característica obtida e especificada tanto nos cubos como nos cilindros. Desta forma, pretende-se avaliar a conformidade com os critérios de controlo de qualidade e segurança especificados na NP EN 206-1.

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

	f _{cm} 20 MPa		Relação da resistência cilindro / cubo	f _{cm} 45 MPa		Relação da resistência cilindro / cubo	f _{cm} 65 MPa		Relação da resistência cilindro / cubo
	Resistências médias obtidas f _{cm,28} (MPa)			Resistências médias obtidas f _{cm,28} (MPa)			Resistências médias obtidas f _{cm,28} (MPa)		
	Cubo	Cilindro	Cubo	Cilindro	Cubo	Cilindro			
BR P	23,9	19,6	0,82	38,7	29,7	0,77	71,1	58,0	0,8
BR P+S	27,5	22,8	0,77	42,4	33,1	0,78	72,3	59,4	0,8
B100LC P	19,7	14,7	0,75	35,7	28,2	0,79	66,8	55,3	0,8
B100LC P+S	21,0	16,9	0,81	41,1	32,9	0,80	70,2	58,5	0,8
B100PF P	21,8	16,3	0,75	36,1	28,5	0,79	68,5	56,1	0,8
B100PF P+S	23,6	18,7	0,79	39,7	31,5	0,79	66,5	55,0	0,8

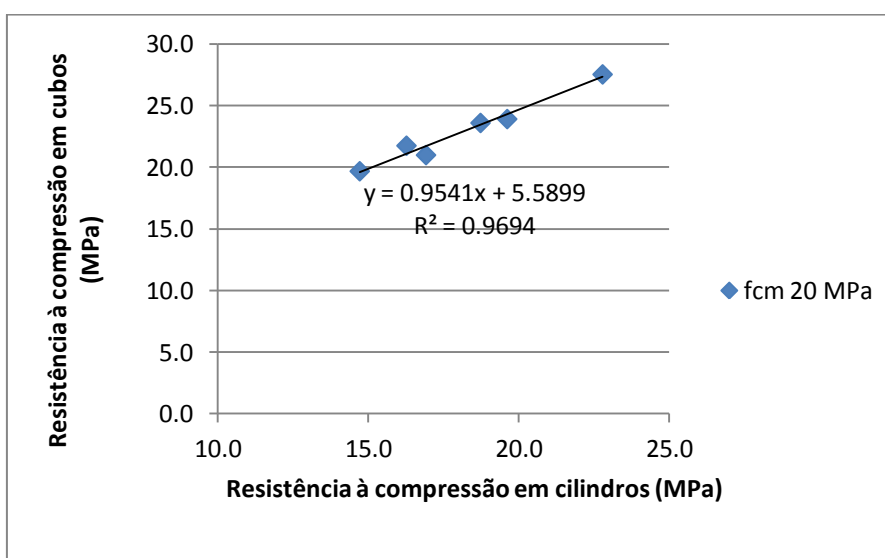


Figura 23 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 dias dos betões f_{cm} 20

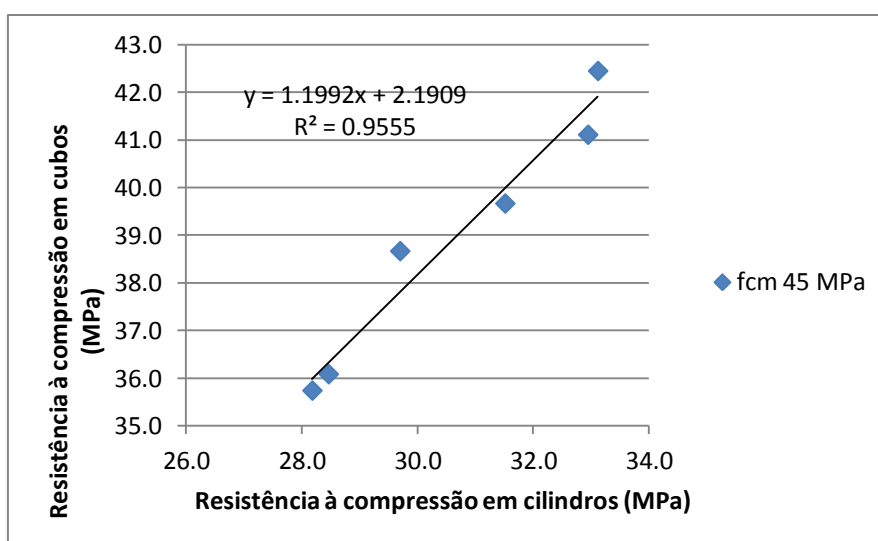


Figura 24 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 dias dos betões f_{cm} 45

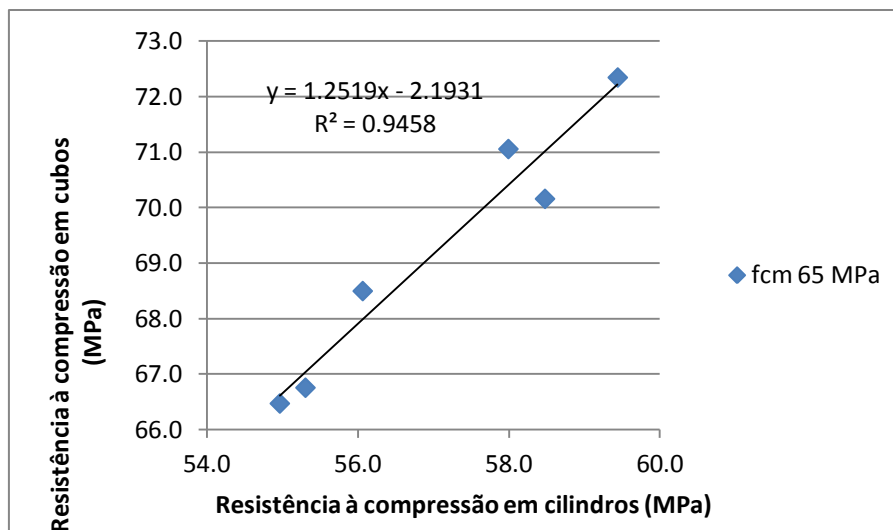


Figura 25 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros aos 28 dias dos betões f_{cm} 65

Tabela 9 - Classes de resistência à compressão para os betões f_{cm} 20. NP EN 206-1

	Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima especificada em cilindros (MPa)	Resistência característica mínima especificada em cubos (MPa)	Resistência característica mínima obtida em cilindros (MPa)	Resistência característica mínima obtida em cubos (MPa)
BR P	C16/20	16	20	18,0	22,8
BR P+S	C20/25	20	25	21,9	26,4
B100LC P	C12/15	12	15	13,1	18,6
B100LC P+S	C16/20	16	20	14,9	19,9
B100PF P	C12/15	12	15	14,7	20,7
B100PF P+S	C16/20	16	20	17,3	22,5

Tabela 10 - Classes de resistência à compressão para os betões f_{cm} 45. NP EN 206-1

	Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima especificada em cilindros (MPa)	Resistência característica mínima especificada em cubos (MPa)	Resistência característica mínima obtida em cilindros (MPa)	Resistência característica mínima obtida em cubos (MPa)
BR P	C25/30	25	30	27,8	36,0
BR P+S	C30/37	30	37	31,9	39,8
B100LC P	C25/30	25	30	27,8	33,1
B100LC P+S	C30/37	30	37	30,8	38,5
B100PF P	C25/30	25	30	26,7	33,5
B100PF P+S	C30/37	30	37	29,1	37,0

Os resultados mostram que, em quase todos os tipos de betão, a tensão de rotura característica nos cubos e cilindros é igual ou superior à classe de resistência esperada, significando que a maioria dos betões está dentro dos critérios de controlo e qualidade estabelecidos na NP EN 206-1.

Tabela 11 - Classes de resistência à compressão para os betões f_{cm} 65. NP EN 206-1

	Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima especificada em cilindros (MPa)	Resistência característica mínima especificada em cubos (MPa)	Resistência característica mínima obtida em cilindros (MPa)	Resistência característica mínima obtida em cubos (MPa)
BR P	C55/67	50	60	56,6	67,2
BR P+S	C50/60	50	60	52,0	68,5
B100LC P	C50/60	50	60	52,4	62,9
B100LC P+S	C50/60	50	60	55,6	66,3
B100PF P	C50/60	50	60	54,7	64,6
B100PF P+S	C50/60	50	60	53,7	62,6

Na família f_{cm} 20 MPa, apenas o betão B100LC P+S não está conforme. Os valores de desvio padrão associados aos cubos e cilindros ($S = 0,9$ e 1 , respectivamente) justificam a não conformidade.

Relativamente à família f_{cm} 45 MPa, apenas o betão B100PF P+S encontra-se em não conformidade, resultado também explicado pelo valor de desvio padrão associado aos cilindros ($S=1,5$) que corresponde a 5 % do valor de f_{cm} obtido.

Finalmente na família f_{cm} 65 MPa todos os betões verificam os critérios presentes na NP EN 206-1. O desvio padrão do betão BR P+S associado aos cilindros foi bastante mais elevado ($S=4.5$) do que o registado no betão BR P ($S=0.8$) facto que não permitiu que atingisse a mesma classe de resistência.

3.1.4. Resistência à tracção por compressão diametral

O ensaio de resistência à tracção por compressão diametral foi efectuado aos 28 dias segundo a norma EN 12390-6 (2011), Na Tabela 12 e na Figura 26, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Resistência à tracção (MPa)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à tracção (MPa)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Resistência à tracção (MPa)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	2,5	0,0	0,0	3,2	0,0	0,0	5,2	0,0	0,0
BR P+S	2,9	0,0	16,0	3,3	0,0	4,4	5,5	0,0	4,5
B100LC P	2,0	-19,1	0,0	2,9	-9,2	0,0	4,6	-12,2	0,0
B100LC P+S	2,1	-26,3	5,6	3,2	-2,7	11,9	5,4	-0,4	18,5
B100PF P	2,0	-21,7	0,0	2,9	-7,9	0,0	4,0	-24,5	0,0
B100PF P+S	2,3	-20,8	17,2	3,2	-2,7	10,3	4,6	-16,3	15,9

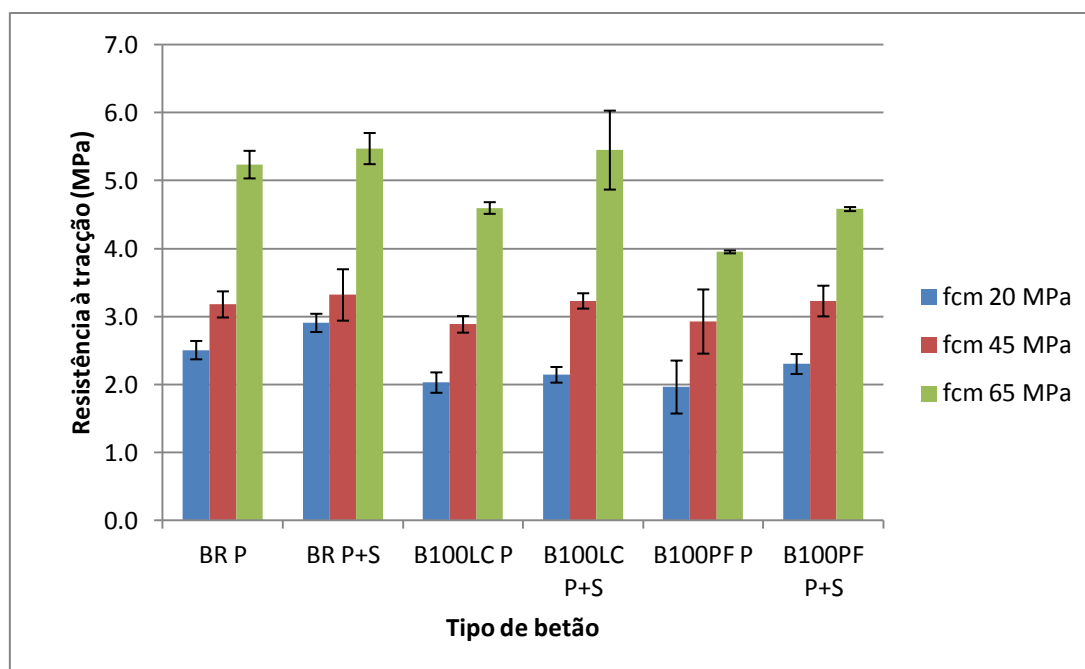


Figura 26 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

Os resultados mostram que, para o mesmo processo de britagem, a incorporação de reciclados de betão influencia negativamente esta propriedade, sendo a máxima variação registada de cerca de 26%. A Figura 26 permite ainda concluir que, à semelhança das propriedades anteriores, os betões que utilizaram agregados obtidos pelo processo TP+TS apresentaram melhores resultados.

3.1.5. Módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado com base na especificação LNEC E-397 (1993) aos 28 dias. Na Tabela 13 e na Figura 27, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

	f _{cm} 20 MPa			f _{cm} 45 MPa			f _{cm} 65 MPa		
	Módulo de elasticidade (GPa)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)
BR P	27,8	0,0	0,0	36,7	0,0	0,0	46,9	0,0	0,0
BR P+S	29,1	0,0	4,7	38,3	0,0	4,6	47,6	0,0	1,4
B100LC P	25,2	-9,4	0,0	29,5	-19,6	0,0	40,3	-14,2	0,0
B100LC P+S	25,9	-11,1	2,8	31,2	-18,6	5,9	40,4	-15,2	0,3
B100PF P	26,5	-4,9	0,0	30,0	-18,1	0,0	40,3	-14,1	0,0
B100PF P+S	27,8	-4,6	5,0	31,5	-17,8	4,9	40,2	-15,5	-0,3

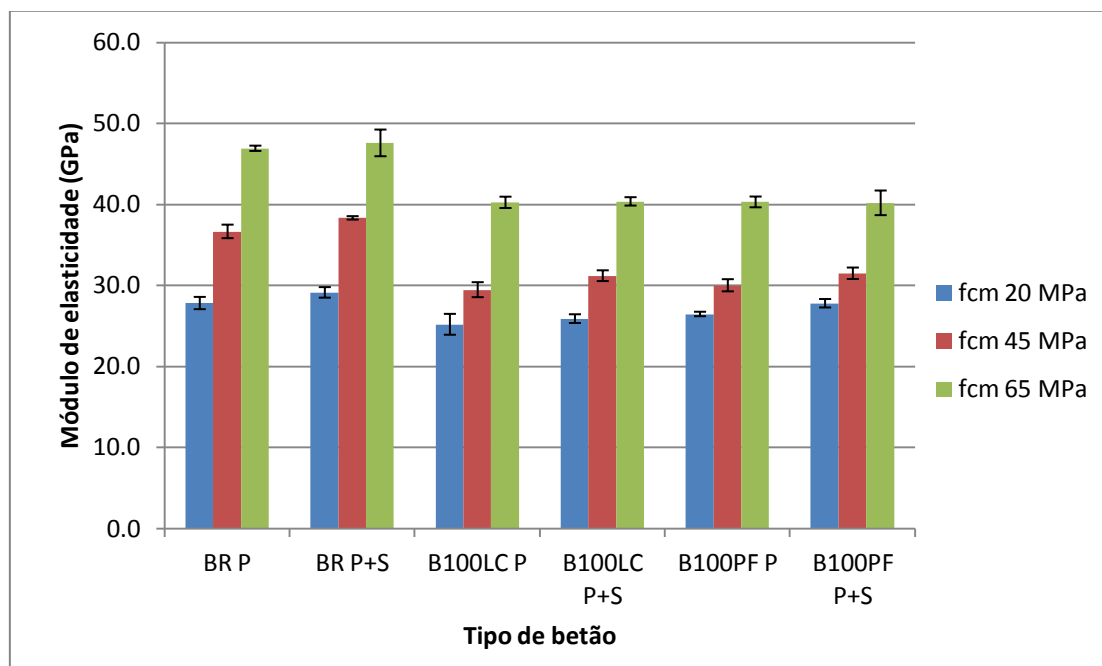


Figura 27 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

Através da observação da Tabela 13 e Figura 27, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão, registando-se variações máximas de aproximadamente 11, 20 e 15% nas famílias f_{cm} 20, 45 e 65 MPa, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com o Eurocódigo 2, verificando-se que as deformações elásticas do betão dependem em grande parte da sua composição.

Relativamente ao processo de britagem conclui-se que os betões que utilizaram agregados provenientes de TP+TS obtiveram melhores desempenhos. No entanto, nas diferentes famílias estudadas, a maior variação registada foi de apenas 5%.

Deste modo, os valores obtidos mostram que esta propriedade é influenciada pela pasta de cimento, tipo de agregado, ligações e distribuição dos constituintes do betão, factores que afectam a rigidez e a deformabilidade do conjunto.

Nas Tabelas 14 a 16, são comparados os resultados com os valores obtidos através da relação definida no Eurocódigo 2, que relaciona o módulo de elasticidade com a tensão de rotura em cilindros.

Através da análise das tabelas, constata-se que, contrariamente ao esperado, os betões com agregados reciclados apresentaram valores de módulo de elasticidade superiores aos definidos no EC2 para agregados naturais. Além disto, os betões de referência que deveriam apresentar valores idênticos registam aumentos de cerca de 20% em relação ao estabelecido no documento normativo.

Tabela 14 - Relação entre tensão de compressão e módulo de elasticidade para os betões f_{cm} 20 MPa

	Resistências médias obtidas (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	
	Cilindro	Valor do Eurocódigo 2	Valor obtido
BR P	19,6	26,9	27,8
BR P+S	22,8	28,2	29,1
B100LC P	14,7	24,7	25,2
B100LC P+S	16,9	25,8	25,9
B100PF P	16,3	25,5	26,5
B100PF P+S	18,7	26,6	27,8

Tabela 15 - Relação entre tensão de compressão e módulo de elasticidade para os betões f_{cm} 45 MPa

	Resistências médias obtidas (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	
	Cilindro	Valor do Eurocódigo 2	Valor obtido
BR P	29,7	30,5	36,7
BR P+S	33,1	31,5	38,3
B100LC P	28,2	30,0	29,5
B100LC P+S	32,9	31,5	31,2
B100PF P	28,5	30,1	30,0
B100PF P+S	31,5	31,0	31,5

Tabela 16 - Relação entre tensão de compressão e módulo de elasticidade para os betões f_{cm} 65 MPa

	Resistências médias obtidas (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	
	Cilindro	Valor do Eurocódigo 2	Valor obtido
BR P	58,0	37,3	46,9
BR P+S	59,4	37,6	47,6
B100LC P	55,3	36,7	40,3
B100LC P+S	58,5	37,4	40,4
B100PF P	56,1	36,9	40,3
B100PF P+S	55,0	36,7	40,2

Nas Figuras 28 a 30, são mostradas as correlações obtidas no presente trabalho entre estas duas propriedades. Foram obtidos valores de R^2 de 84, 84 e 87% nas famílias f_{cm} 20, 45 e 65 MPa, respectivamente.

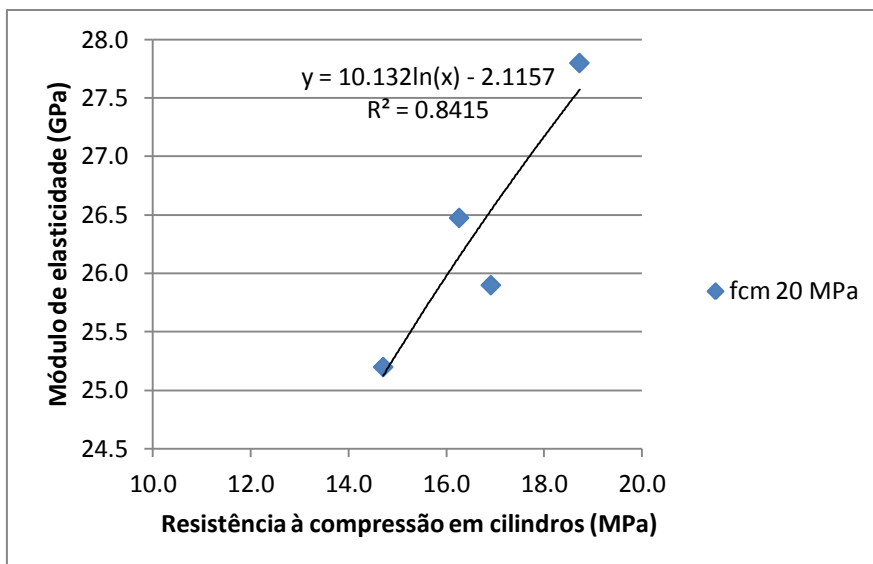


Figura 28 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros dos betões f_{cm} 20

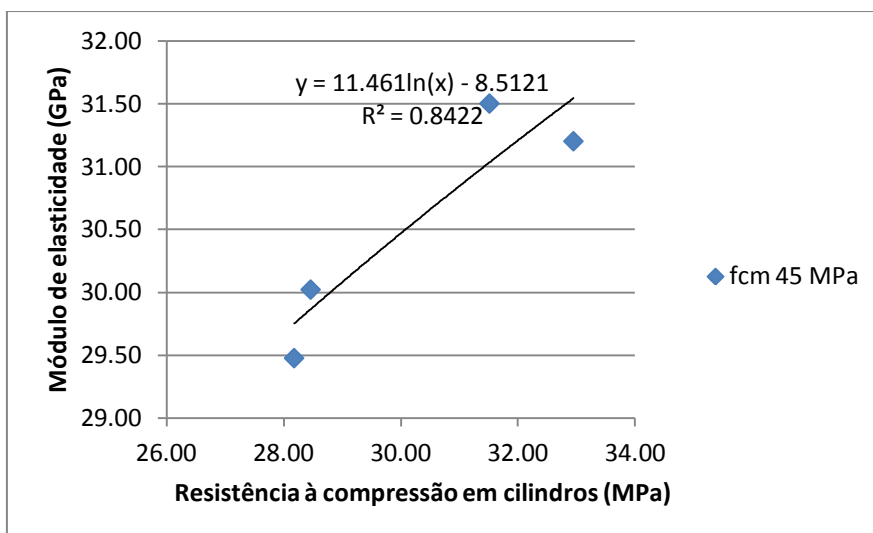


Figura 29 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros dos betões f_{cm} 45

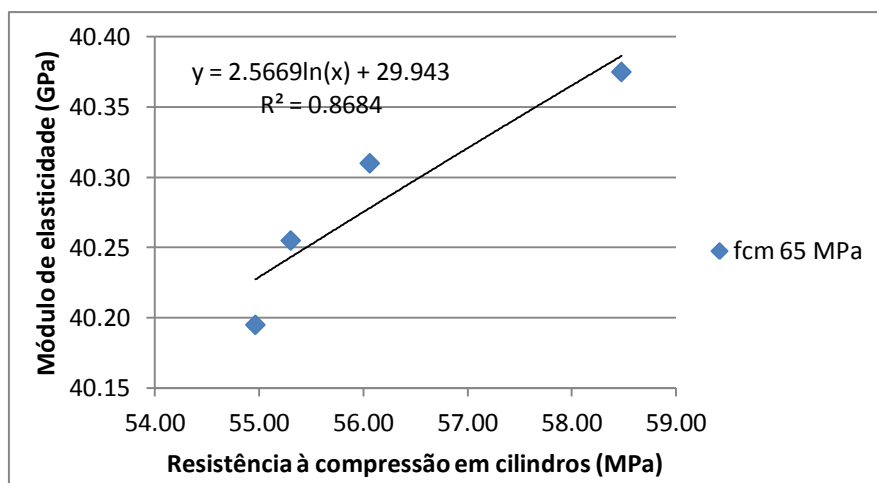


Figura 30 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em cilindros dos betões f_{cm} 65

3.2. Propriedades em termos de durabilidade

No subcapítulo 3,2, pretende-se estudar a influência do processo de britagem no desempenho, em termos de durabilidade, de betões compostos com agregados grossos reciclados de betão.

3.2.1. 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 17 e na Figura 31, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 17 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão

	f _{cm} 20 MPa			f _{cm} 45 MPa			f _{cm} 65 MPa		
	Absorção de imersão (%)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Absorção de imersão (%)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Absorção de imersão (%)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)
BR P	15,6	0,0	0,0	14,7	0,0	0,0	9,7	0,0	0,0
BR P+S	13,5	0,0	-13,3	13,8	0,0	-6,1	9,4	0,0	-3,7
B100LC P	19,1	22,8	0,0	18,3	24,8	0,0	14,6	50,4	0,0
B100LC P+S	17,7	31,4	-7,2	17,1	24,0	-6,8	13,5	44,9	-7,2
B100PF P	20,0	28,4	0,0	18,7	27,0	0,0	14,5	49,4	0,0
B100PF P+S	18,3	35,4	-8,6	16,0	16,3	-14,1	14,1	51,0	-2,6

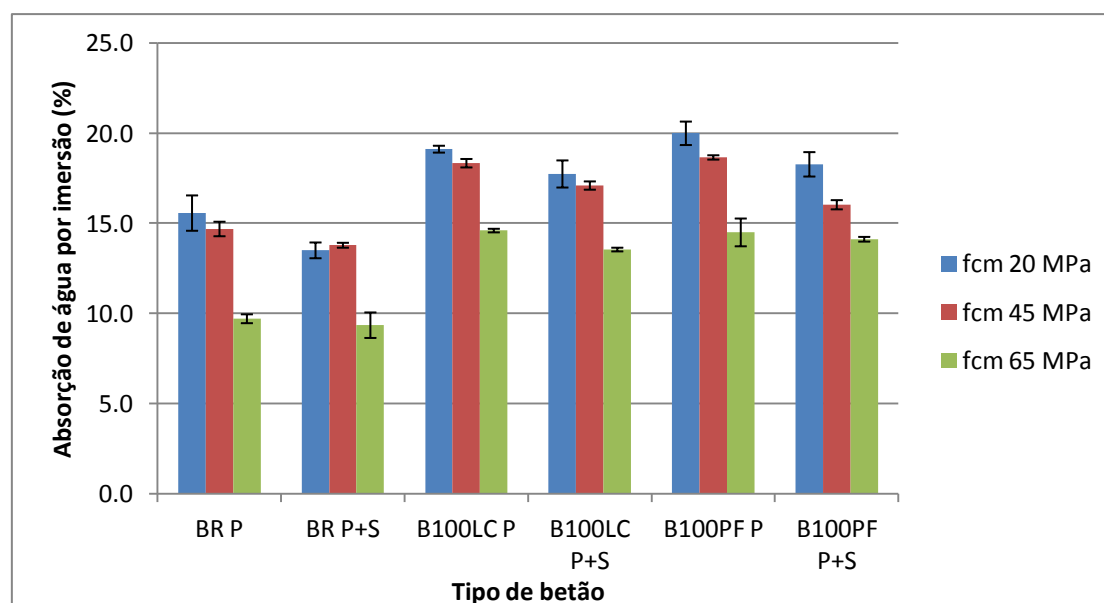


Figura 31 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão

Através da observação da Figura 31, constata-se que os betões que apresentaram um melhor desempenho mecânico obtiveram nesta propriedade os valores mais satisfatórios.

Deste modo, a família f_{cm} 65 MPa registou os melhores resultados, seguida da f_{cm} 45 MPa e da f_{cm} 20 MPa.

Por observação da Figura 31, constata-se que, nas diversas famílias, os betões com incorporação de agregados reciclados apresentam uma maior absorção por imersão, relativamente ao betão de referência. De igual modo, é possível concluir que a trituração primária conduz a piores resultados comparativamente ao outro processo de britagem: trituração primária mais secundária.

Finalmente, através das Figuras 32 a 34, pode-se observar a relação que existe entre a resistência à compressão e a absorção de água por imersão dos betões. Obtiveram-se correlações satisfatórias nas diferentes famílias ($R^2 = 0,72$; $R^2 = 0,71$; $R^2 = 0,74$), o que demonstra a ligação entre estas propriedades.

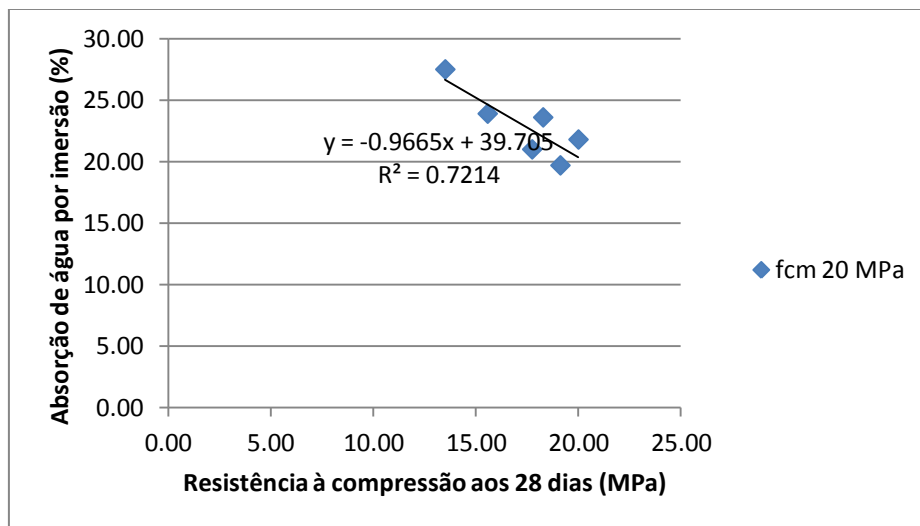


Figura 32 - Relação entre a água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 20 MPa

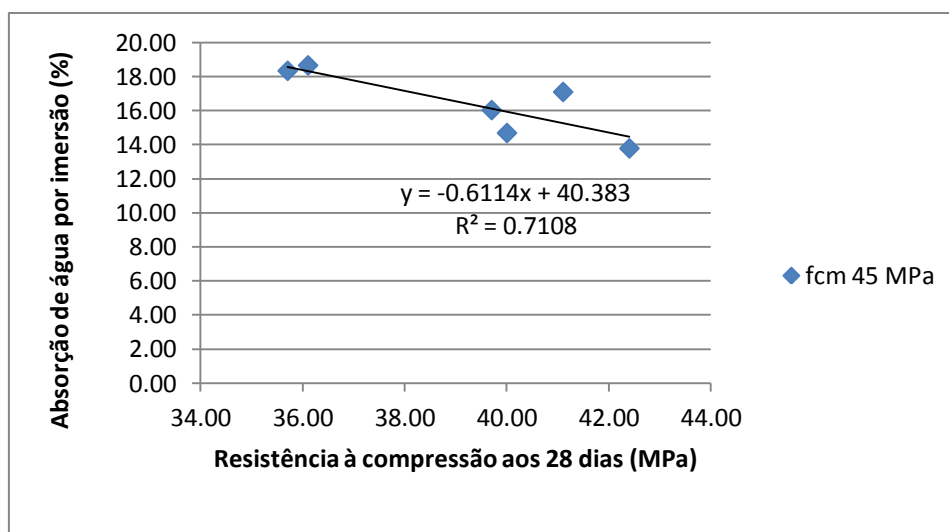


Figura 33 - Relação entre a água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 45 MPa

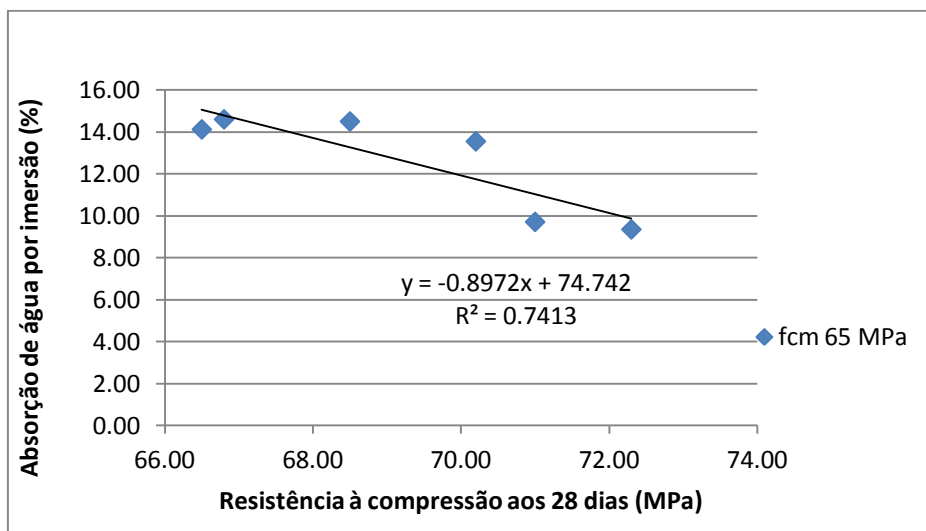


Figura 34 - Relação entre a água por imersão e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 65 MPa

3.2.2. Absorção de água capilaridade

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E393-1993, 42 dias após a amassadura dos betões. Na Tabela 18 e na Figura 35, são apresentados os resultados obtidos. Estes mostram que os valores registados nesta propriedade aumentam com a substituição de agregados naturais por agregados de betão. É ainda possível observar que os betões que utilizaram agregados obtidos por trituração primária e secundária apresentaram melhores resultados. Estas conclusões são semelhantes às verificadas para a absorção de água por imersão.

Através da observação das Figuras 36 a 38, constata-se a influência da relação a/c na absorção de água por capilaridade manifestada nos betões. As boas correlações registadas ($R^2 = 0,71$; $R^2 = 0,80$; $R^2 = 0,71$) permitem concluir que nas diferentes famílias as duas grandezas estão intimamente relacionadas.

Tabela 18 - Resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade às 72 horas

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Absorção capilar (g/mm^2)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)	Absorção capilar (g/mm^2)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)	Absorção capilar (g/mm^2)	Δ_{AGR} _B (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	4,88E-03	0,0	0,0	3,40E-03	0,0	0,0	9,94E-04	0,0	0,0
BR P+S	3,44E-03	0,0	-29,5	2,49E-03	0,0	-26,7	8,59E-04	0,0	-13,6
B100LC P	8,56E-03	75,2	0,0	5,51E-03	62,3	0,0	1,47E-03	47,3	0,0
B100LC P+S	6,02E-03	75,0	-29,6	3,78E-03	51,7	-31,4	1,19E-03	38,0	-19,1
B100PF P	7,30E-03	49,6	0,0	4,54E-03	33,7	0,0	1,51E-03	51,6	0,0
B100PF P+S	5,03E-03	46,0	-31,2	3,08E-03	23,7	-32,1	1,47E-03	71,0	-2,5

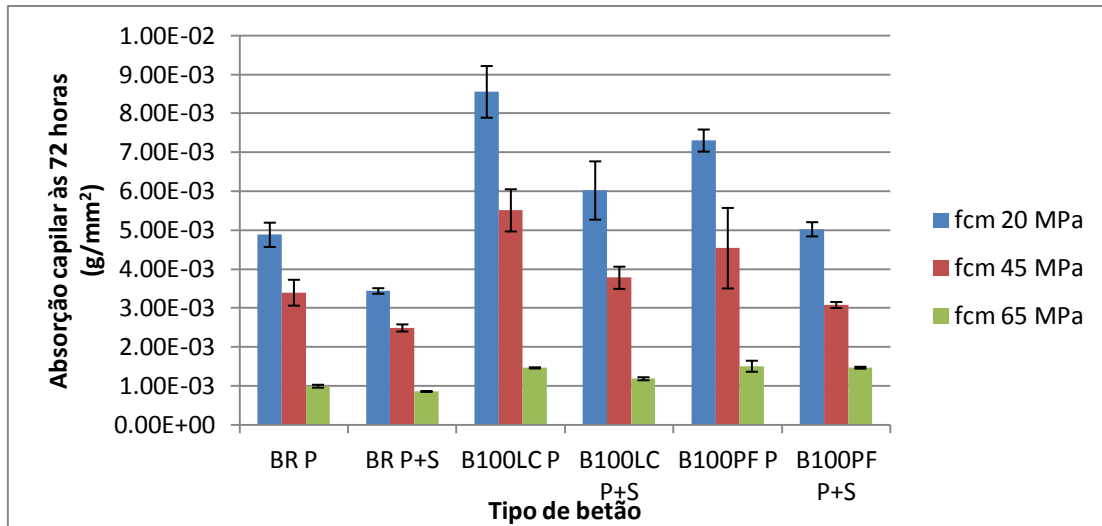


Figura 35 - Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade

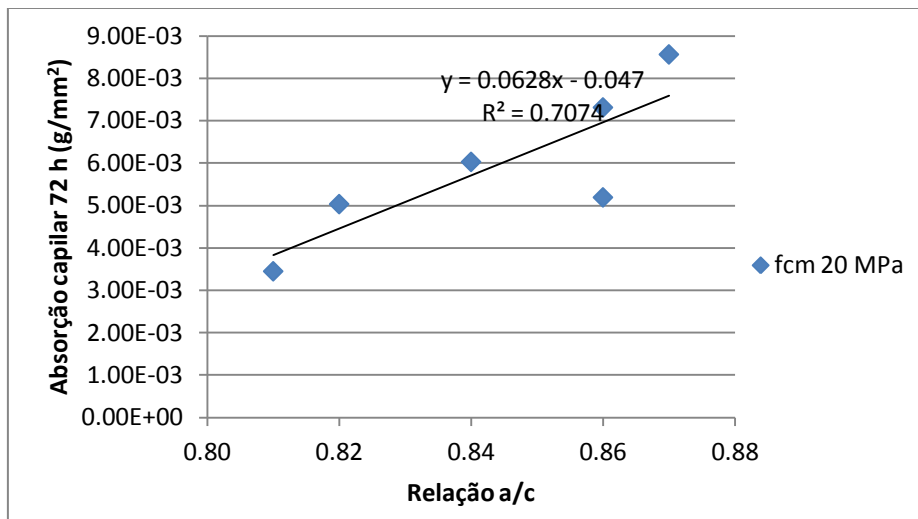


Figura 36 - Relação da água por capilaridade com a relação a/c dos betões fcm 20 MPa

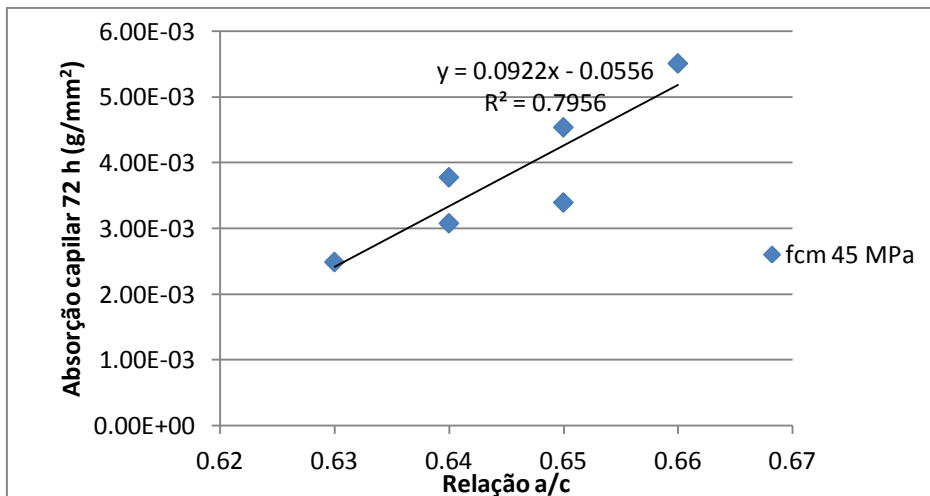


Figura 37 - Relação da água por capilaridade com a relação a/c dos betões fcm 45 MPa

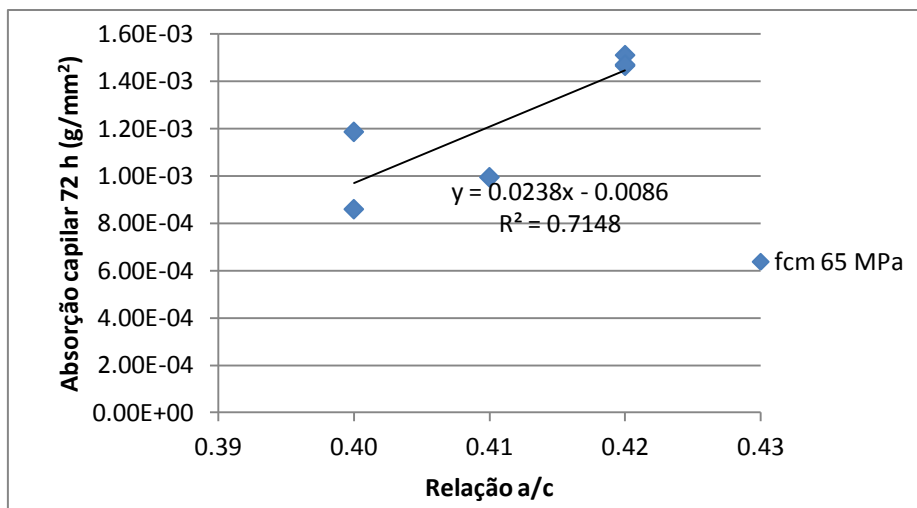


Figura 38 - Relação da água por capilaridade com a relação a/c dos betões f_{cm} 65 MPa

Nas Figura 39, 40 e 41, estabelece-se uma relação entre a absorção de água por capilaridade e por imersão. Os resultados mostram a existência de uma elevada correlação para as famílias de f_{cm} 65, 45 e 20 MPa ($R^2 = 0,90, 0,77$ e $0,71$, respectivamente).

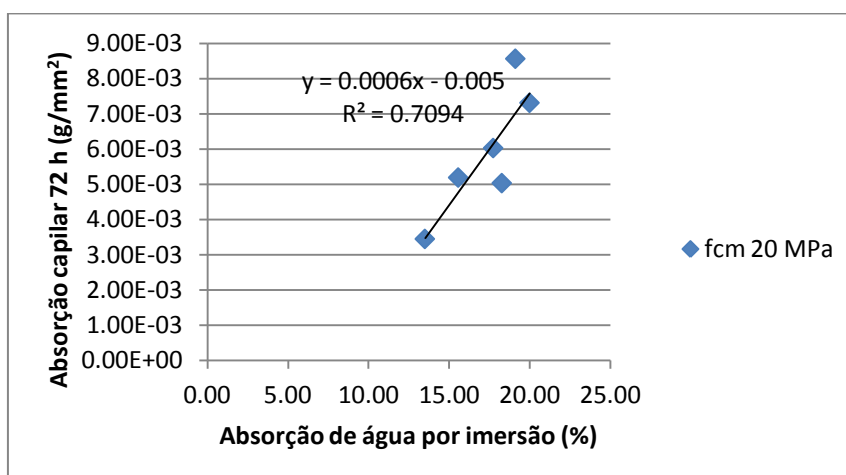


Figura 39 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade dos betões f_{cm} 20 MPa

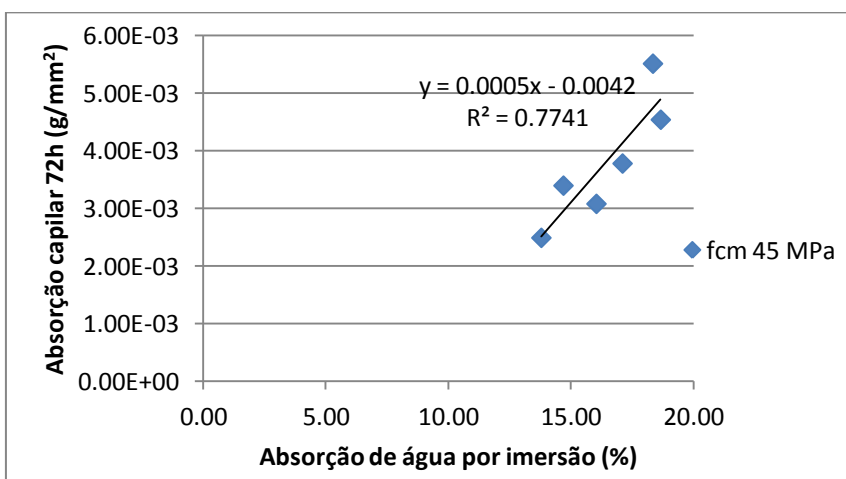


Figura 40 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade dos betões f_{cm} 45 MPa

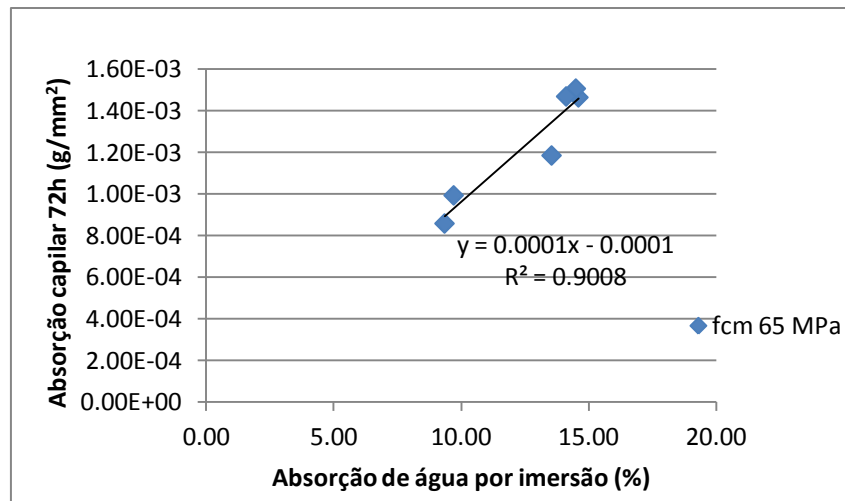


Figura 41 - Relação entre a absorção de água por imersão e capilaridade dos betões f_{cm} 65 MPa

Por último, de forma a relacionar as propriedades em termos de durabilidade dos betões com o seu desempenho mecânico, são apresentadas, nas Figura 42 a 44, 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.

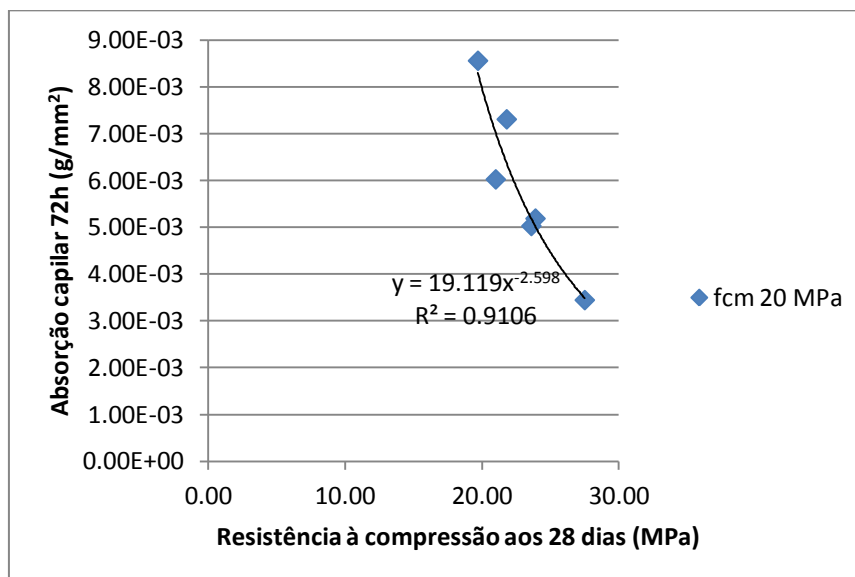


Figura 42 - Relação entre água por capilaridade e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 20 MPa

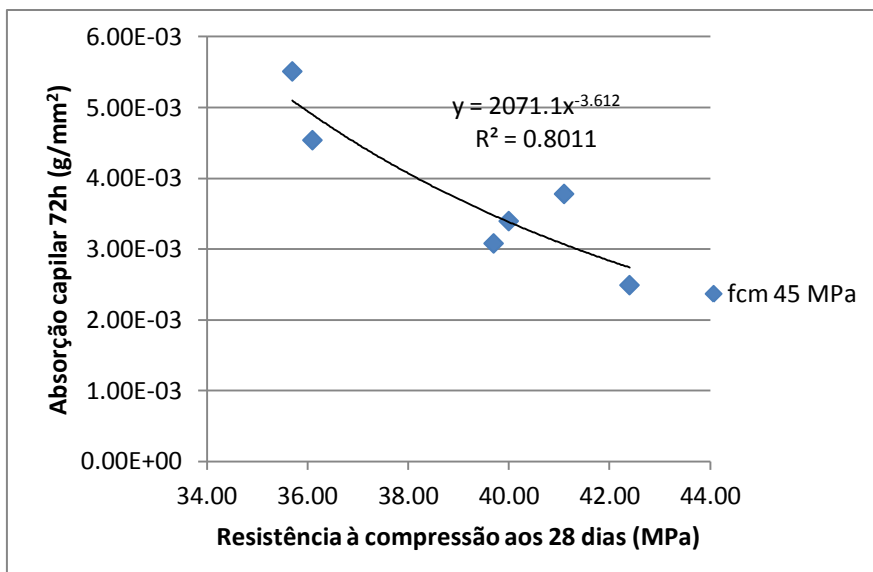


Figura 43 - Relação entre água por capilaridade e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 45 MPa

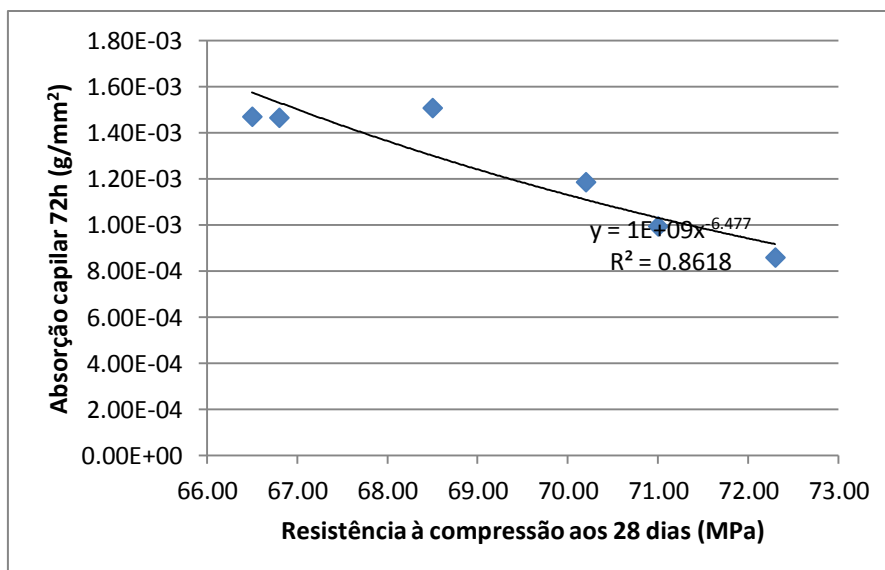


Figura 44 - Relação entre água por capilaridade e a resistência à compressão aos 28 dias dos betões f_{cm} 65 MPa

3.2.3. 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. Nas Tabelas 19 a 22 e nas Figuras 45 a 47, são apresentados os resultados obtidos.

Os resultados mostram que a profundidade da frente de carbonatação aumenta com o tempo em todos os betões. Através da observação dos gráficos, é ainda notória a diferença de escala da frente de carbonatação nas diversas famílias, apresentando esta propriedade valores maiores nas famílias com menores classes de resistência-alvo.

Tabela 19 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 7 dias

	f _{cm} 20 MPa			f _{cm} 45 MPa			f _{cm} 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)
BR P	9,1	0,0	0,0	5,9	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0
BR P+S	7,9	0,0	-13,5	4,1	0,0	-31,2	0,2	0,0	-52,4
B100LC P	11,4	24,9	0,0	5,6	-5,3	0,0	0,9	104,8	0,0
B100LC P+S	10,0	27,1	-12,0	4,8	16,3	-15,6	0,5	130,0	-46,5
B100PF P	11,1	21,7	0,0	6,1	3,2	0,0	2,4	452,4	0,0
B100PF P+S	9,9	25,0	-11,2	5,1	25,5	-16,3	1,6	680,0	-32,8

Tabela 20 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 28 dias

	f _{cm} 20 MPa			f _{cm} 45 MPa			f _{cm} 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)
BR P	19,8	0,0	0,0	10,2	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
BR P+S	17,6	0,0	-10,8	9,1	0,0	-10,7	0,7	0,0	-26,8
B100LC P	23,7	20,0	0,0	11,0	7,8	0,0	1,5	58,7	0,0
B100LC P+S	21,5	21,7	-9,5	9,8	8,3	-10,3	1,3	81,2	-16,4
B100PF P	23,0	16,7	0,0	11,4	11,9	0,0	2,1	123,9	0,0
B100PF P+S	20,3	15,4	-11,8	10,4	14,7	-8,4	1,7	146,5	-19,4

Tabela 21 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 56 dias

	f _{cm} 20 MPa			f _{cm} 45 MPa			f _{cm} 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)
BR P	41,1	0,0	0,0	12,8	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0
BR P+S	37,0	0,0	-9,8	11,0	0,0	-13,7	1,3	0,0	-21,4
B100LC P	46,9	14,1	0,0	16,0	24,8	0,0	2,5	48,4	0,0
B100LC P+S	43,3	16,8	-7,7	12,9	16,6	-19,3	2,1	61,9	-14,3
B100PF P	46,6	13,4	0,0	14,4	12,7	0,0	3,2	92,0	0,0
B100PF P+S	41,8	12,7	-10,4	11,8	7,2	-17,9	2,8	115,9	-11,7

Tabela 22 - Resultados obtidos no ensaio de carbonatação aos 91 dias

	f _{cm} 20 MPa			f _{cm} 45 MPa			f _{cm} 65 MPa		
	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)	Profundidade de carbonatação (mm)	Δ _{AGRB} (%)	Δ _{PB} (%)
BR P	50,0	0,0	0,0	16,6	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0
BR P+S	50,0	0,0	0,0	15,8	0,0	-4,5	2,9	0,0	-13,8
B100LC P	50,0	0,0	0,0	20,7	24,9	0,0	4,1	22,5	0,0
B100LC P+S	50,0	0,0	0,0	18,3	15,5	-11,7	3,8	33,3	-6,1
B100PF P	50,0	0,0	0,0	18,2	9,5	0,0	4,8	43,8	0,0
B100PF P+S	50,0	0,0	0,0	16,7	5,5	-8,0	4,6	59,4	-4,3

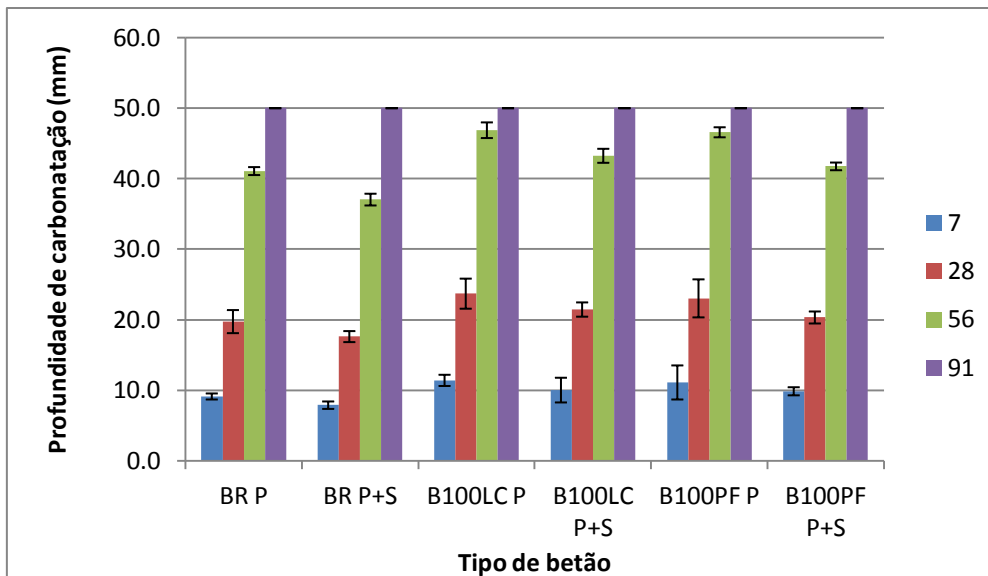


Figura 45 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 20 MPa

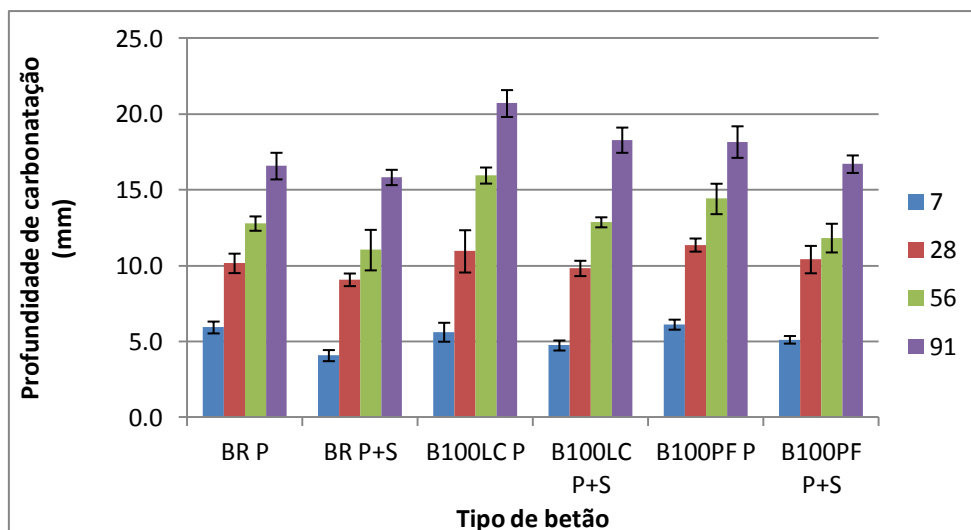


Figura 46 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 45 MPa

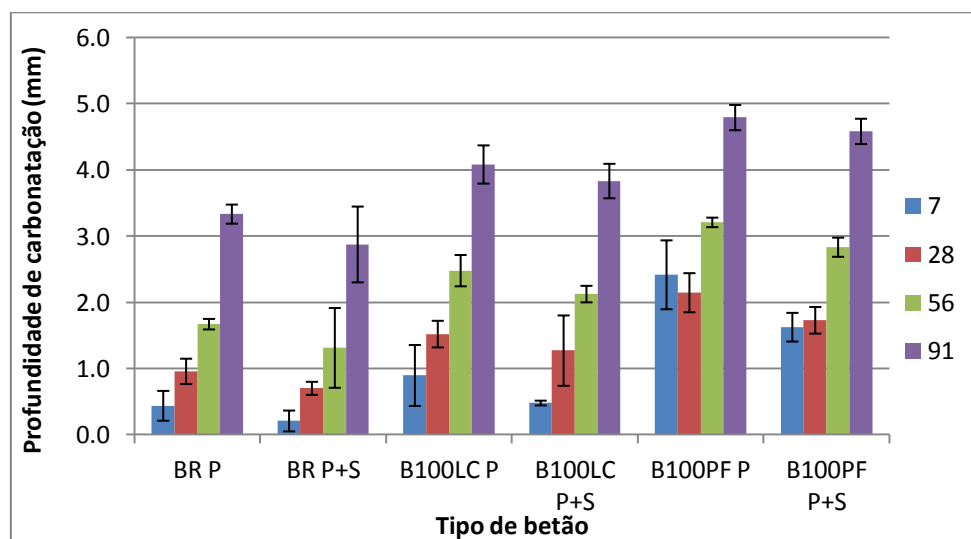


Figura 47 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 65 MPa

Assim, nas diferentes famílias, além de se concluir que os betões produzidos com agregados obtidos pelo processo TP+TS apresentam melhores resultados, verifica-se ainda que a incorporação de reciclados de betão influencia negativamente esta propriedade. Nas Figuras 48 a 50, pretende-se ilustrar a relação entre a profundidade de frente de carbonatação e a relação a/c. Os resultados obtidos mostram correlações satisfatórias nas diferentes famílias analisadas ($R^2 = 0,64$; $R^2 = 0,85$; $R^2 = 0,64$). Deste modo, conclui-se que a relação a/c tem uma forte influência na resistência à carbonatação dos betões.

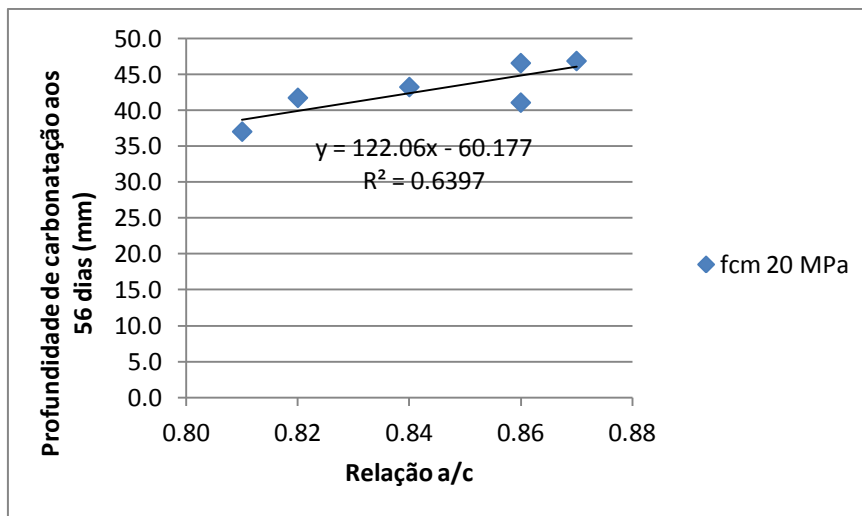


Figura 48 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a relação a/c dos betões $f_{cm} 20$ MPa

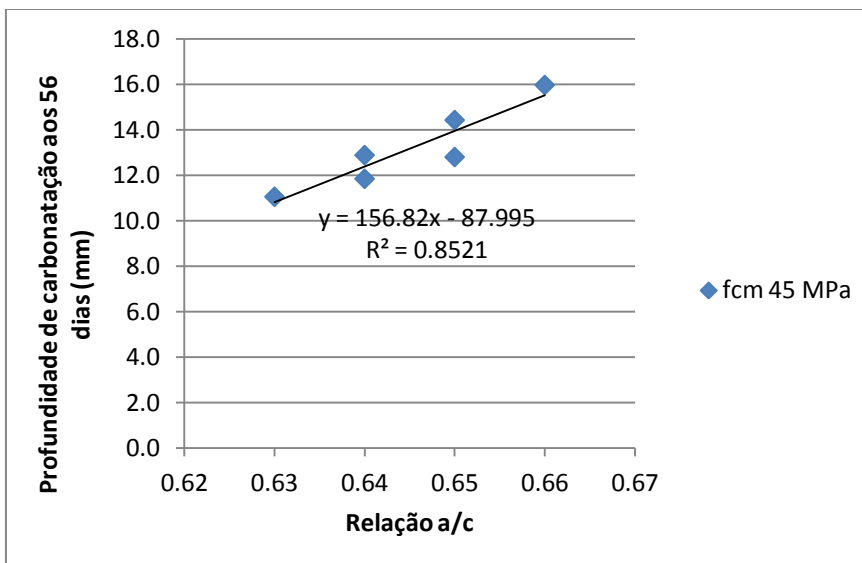


Figura 49 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a relação a/c dos betões $f_{cm} 45$ MPa

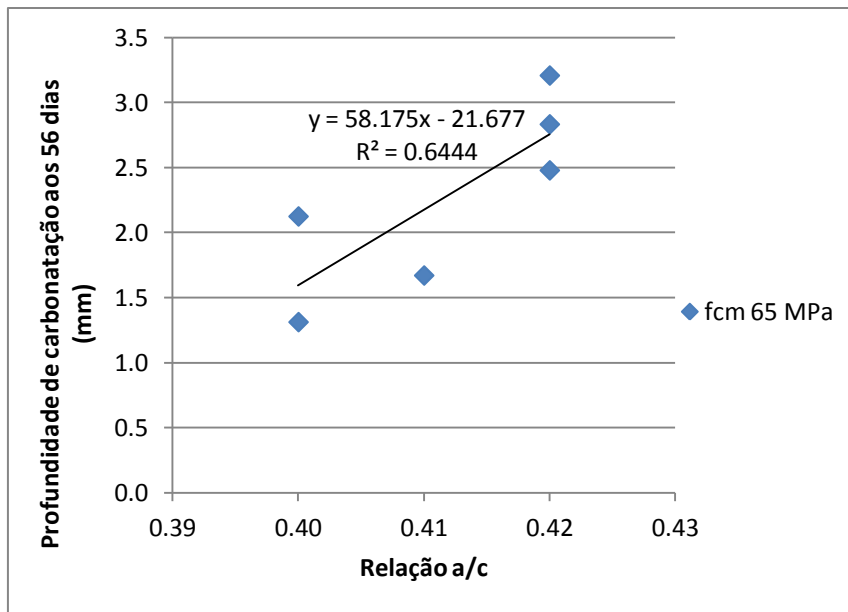


Figura 50 - Relação entre a profundidade de carbonatação aos 56 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 65 MPa

Uma vez que a porosidade dos betões é o principal parâmetro que influencia a água por imersão, será também natural que a resistência à carbonatação dos betões esteja intimamente ligada a esta propriedade. Através da análise das Figuras 51 a 53, verificam-se correlações satisfatórias para as famílias f_{cm} 20, 45 e 65 MPa ($R^2 = 0,87$, $R^2 = 0,71$ e $R^2 = 0,80$, respectivamente).

Nas Figuras 54 a 56, constata-se ainda a existência de uma estreita relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão,

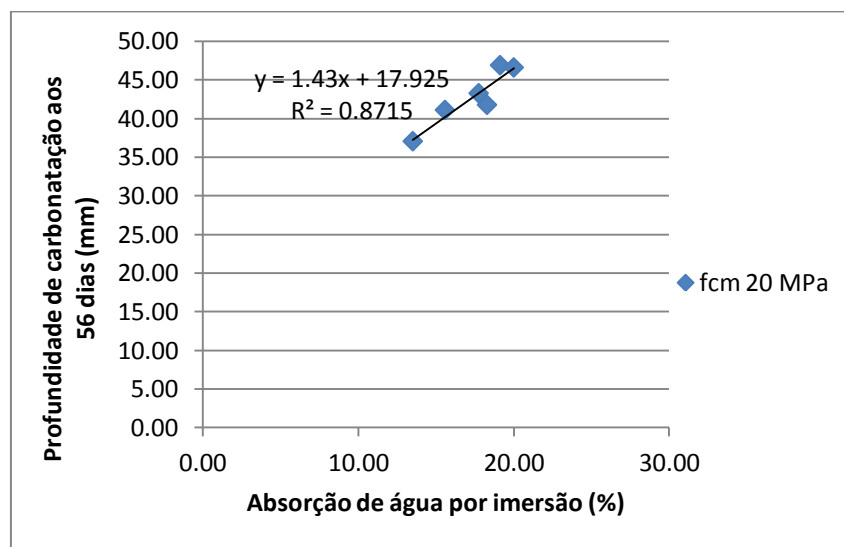


Figura 51 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a absorção por imersão dos betões f_{cm} 20 MPa

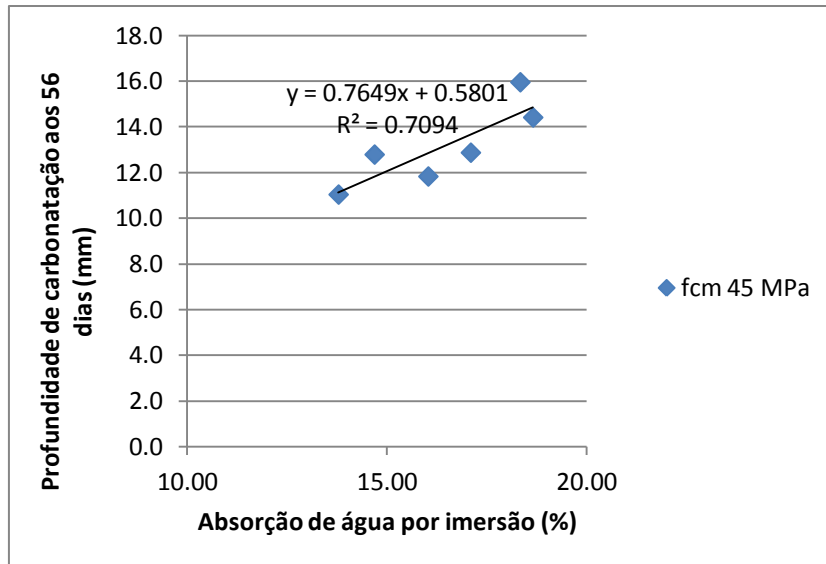


Figura 52 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a absorção por imersão dos betões f_{cm} 45 MPa

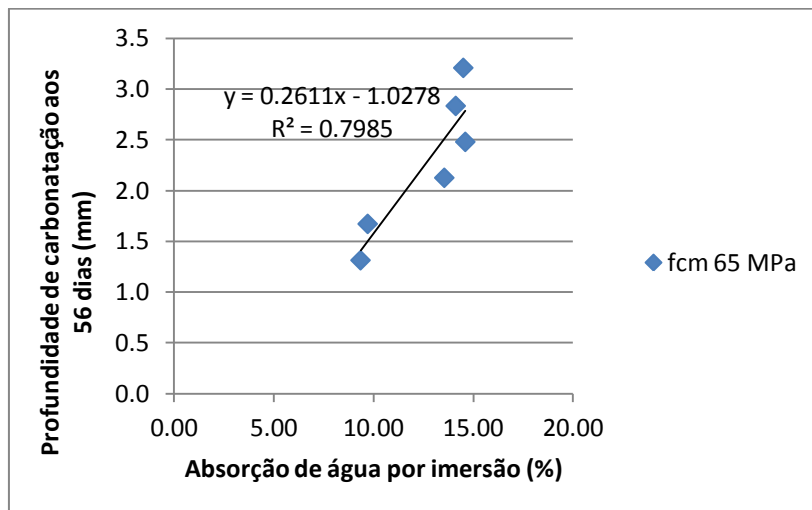


Figura 53 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a absorção por imersão dos betões f_{cm} 65 MPa

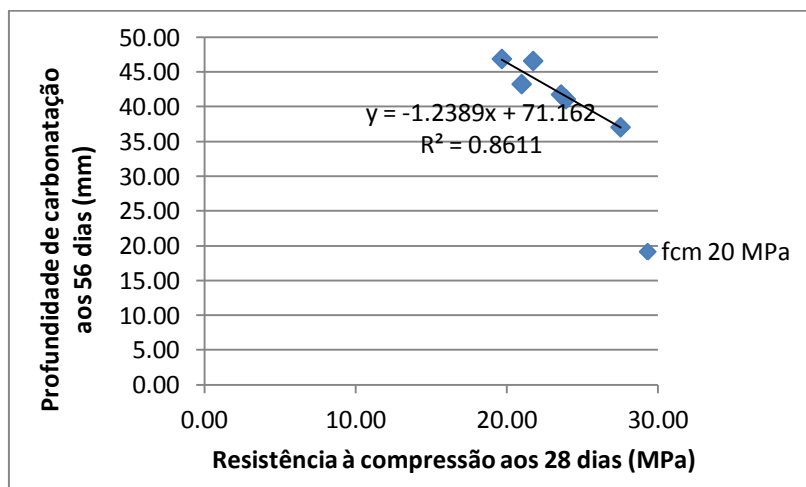


Figura 54 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 20 MPa

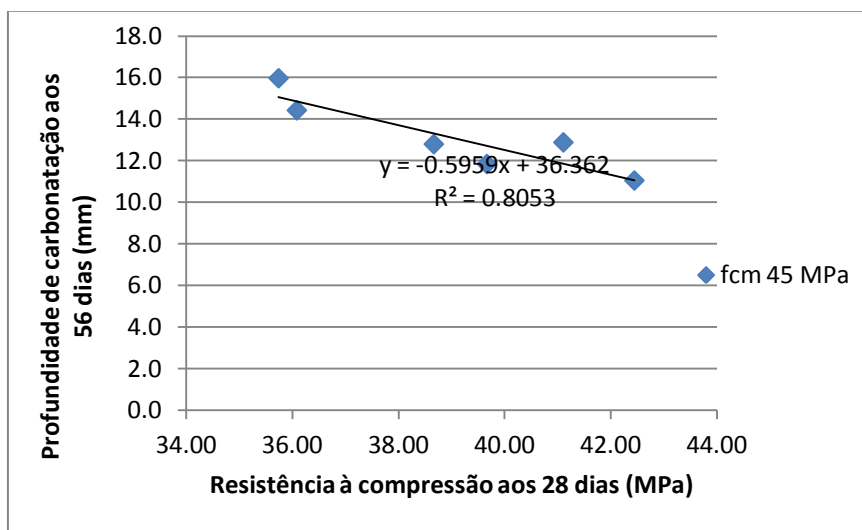


Figura 55 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 45 MPa

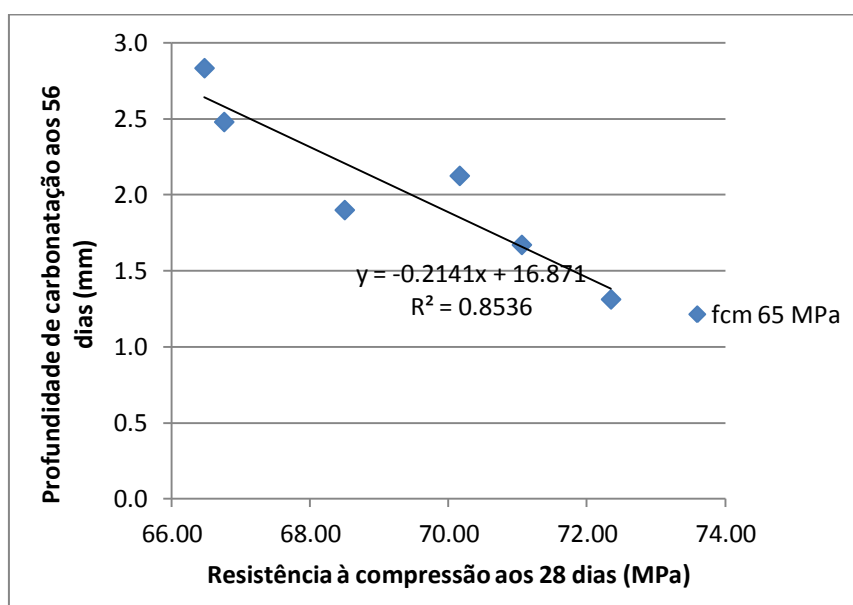


Figura 56 - Relação entre profundidade de carbonatação aos 56 dias e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 65 MPa

3.2.4. Resistência à penetração de cloretos

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E463-2004, aos 28 e 91 dias. Nas Tabelas 23 e 24 e nas Figuras 57 a 59, são apresentados os resultados obtidos.

Através da análise das figuras, verifica-se que os betões tendem a melhorar os seus desempenhos dos 28 para os 91 dias, observando-se uma diminuição dos coeficientes de difusão de cloretos. Esta situação é explicada pelo maior tempo de cura dos provetes, responsável por hidratar maiores quantidades 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.

Tabela 23 - Resultados obtidos no ensaio de difusão de cloretos aos 28 dias

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	$D_{0méd}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	$D_{0méd}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	$D_{0méd}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	26,0	0,0	0,0	22,4	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0
BR P+S	23,0	0,0	-11,4	21,8	0,0	-2,5	8,8	0,0	-7,7
B100LC P	31,9	23,0	0,0	23,3	4,1	0,0	11,3	17,9	0,0
B100LC P+S	31,2	35,5	-2,5	22,2	1,6	-4,9	9,5	7,8	-15,6
B100PF P	36,9	41,9	0,0	23,5	4,8	0,0	10,8	13,4	0,0
B100PF P+S	33,8	47,0	-8,3	22,1	1,1	-5,9	11,1	25,7	2,4

Tabela 24 - Resultados obtidos no ensaio de difusão de cloretos aos 91 dias

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	$D_{0méd}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	$D_{0méd}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	$D_{0méd}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	23,4	0,0	0,0	19,5	0,0	0,0	7,6	0,0	0,0
BR P+S	21,3	0,0	-9,0	18,3	0,0	-6,1	7,0	0,0	-7,2
B100LC P	28,9	23,2	0,0	21,0	7,8	0,0	9,0	19,5	0,0
B100LC P+S	28,0	31,3	-3,0	19,2	5,3	-8,3	7,6	8,8	-15,5
B100PF P	32,0	36,4	0,0	20,5	5,2	0,0	8,6	13,4	0,0
B100PF P+S	28,5	15,5	-10,9	19,1	4,4	-6,9	8,6	23,1	0,7

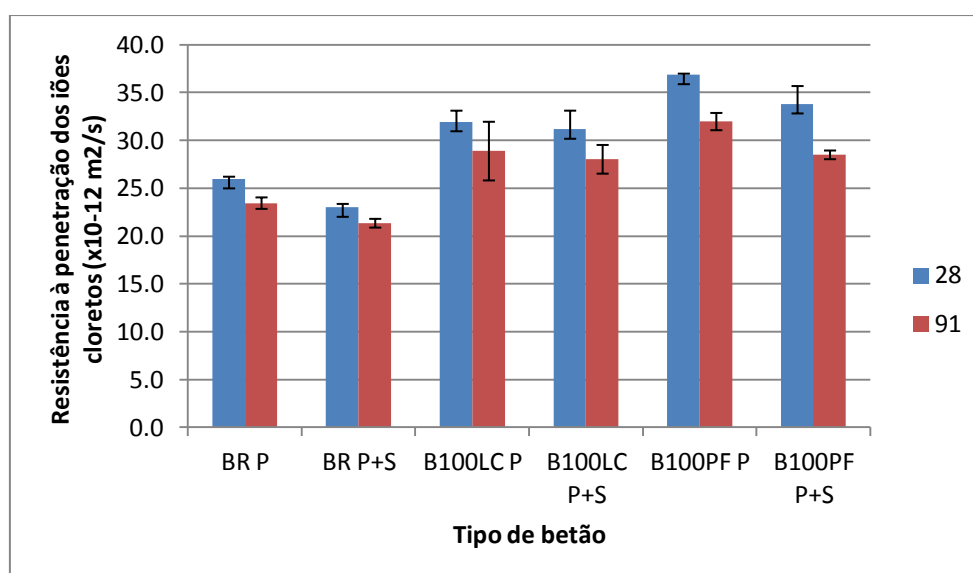


Figura 57 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos dos betões f_{cm} 20 MPa

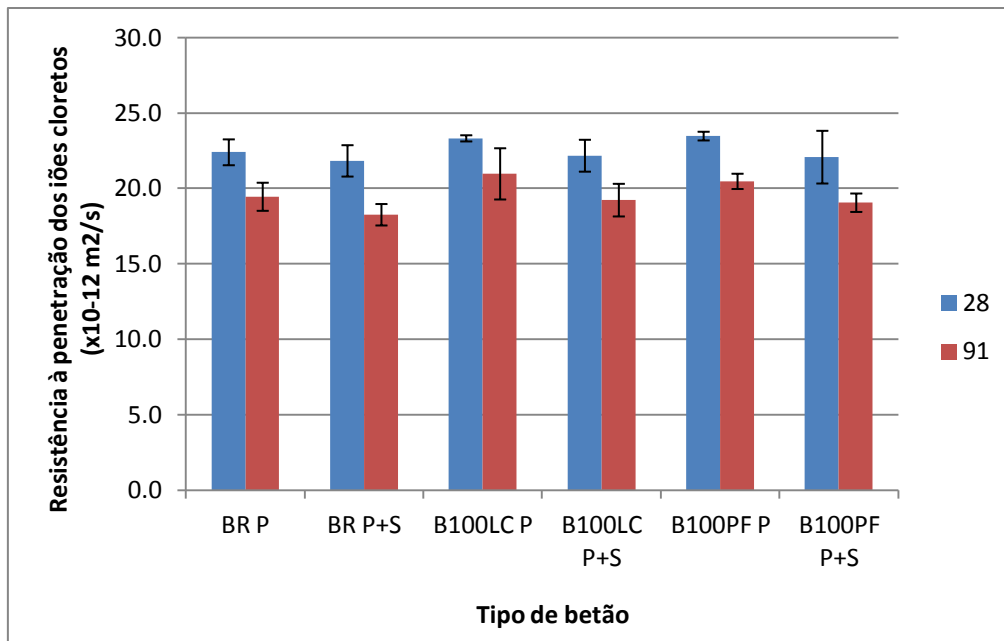


Figura 58 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos dos betões f_{cm} 45 MPa

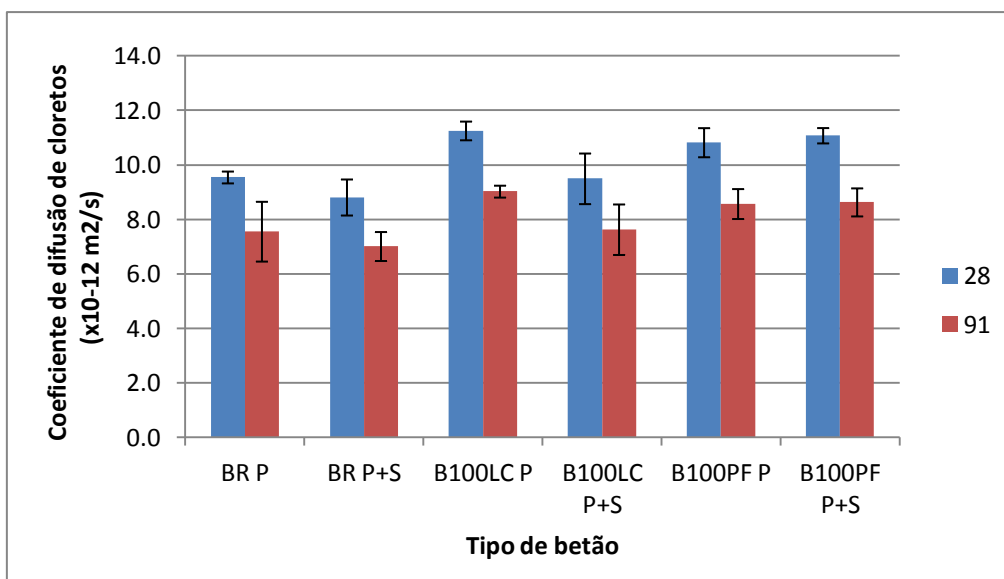


Figura 59 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos dos betões f_{cm} 65 MPa

É ainda possível observar que, nas diversas famílias, os betões produzidos com agregados obtidos pelo processo TP+TS apresentam melhores resultados, sendo que o efeito da incorporação de reciclados de betão é mais significativo para os betões f_{cm} 20 MPa. Nas Figuras 60 a 62, estabelece-se uma relação entre a relação a/c e o coeficiente de difusão de cloretos. Excluindo a família f_{cm} 20 MPa, verificam-se correlações bastante satisfatórias. Através da análise das Figuras 63 a 65, 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.

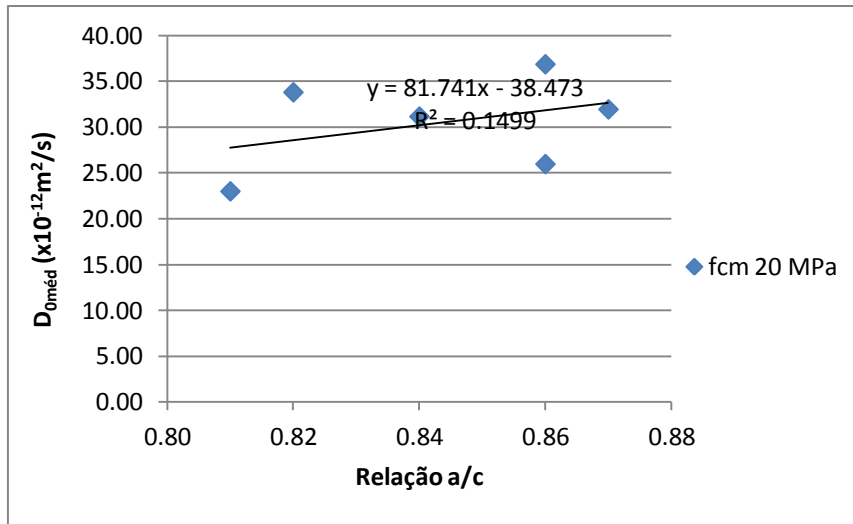


Figura 60 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 20 MPa

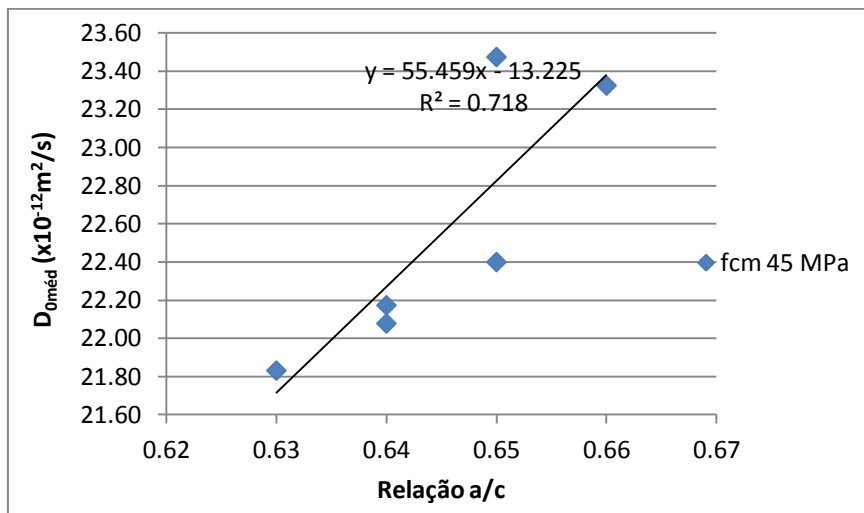


Figura 61 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 45 MPa

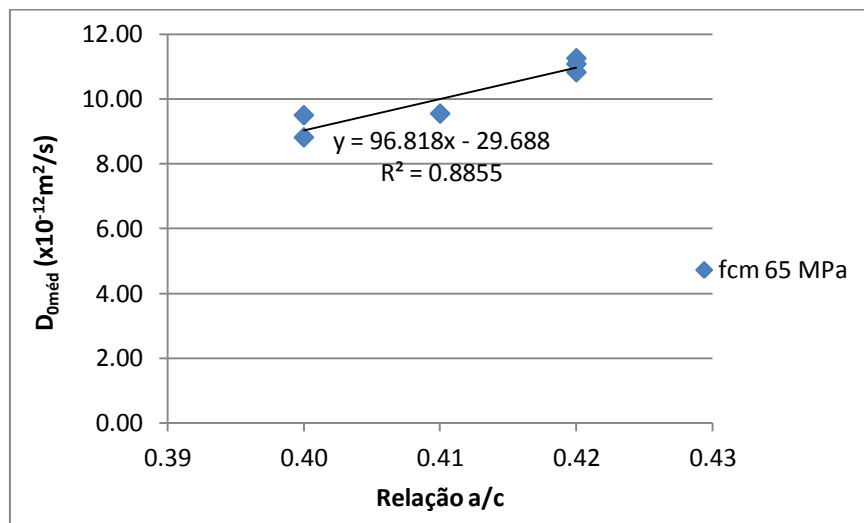


Figura 62 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e a relação a/c dos betões f_{cm} 65 MPa

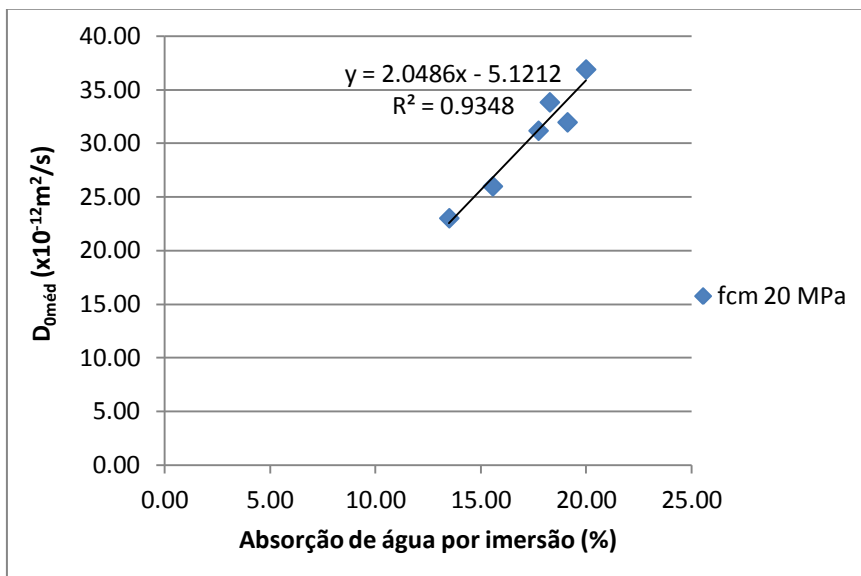


Figura 63 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção por imersão dos betões f_{cm} 20 MPa

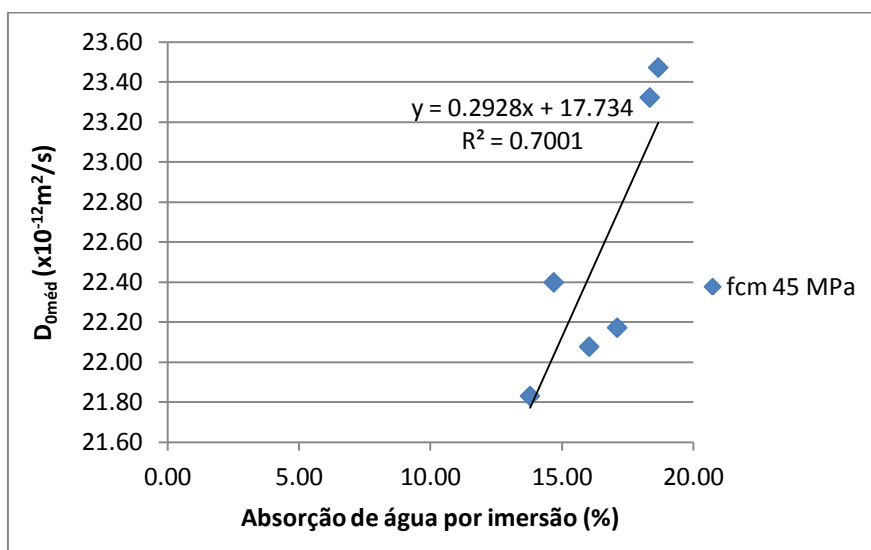


Figura 64 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção por imersão dos betões f_{cm} 45 MPa

De forma a relacionar esta propriedade com a resistência mecânica dos betões, são apresentadas as Figura 66 a 68, que relacionam a resistência à compressão com o coeficiente de difusão de cloretos, para as diferentes famílias.

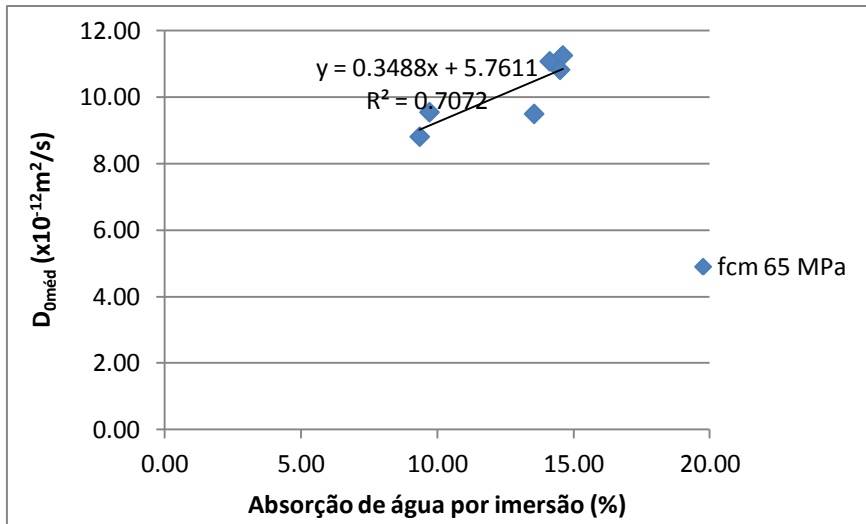


Figura 65 - Relação entre resistência à penetração de cloretos aos 28 dias e absorção por imersão dos betões f_{cm} 65 MPa

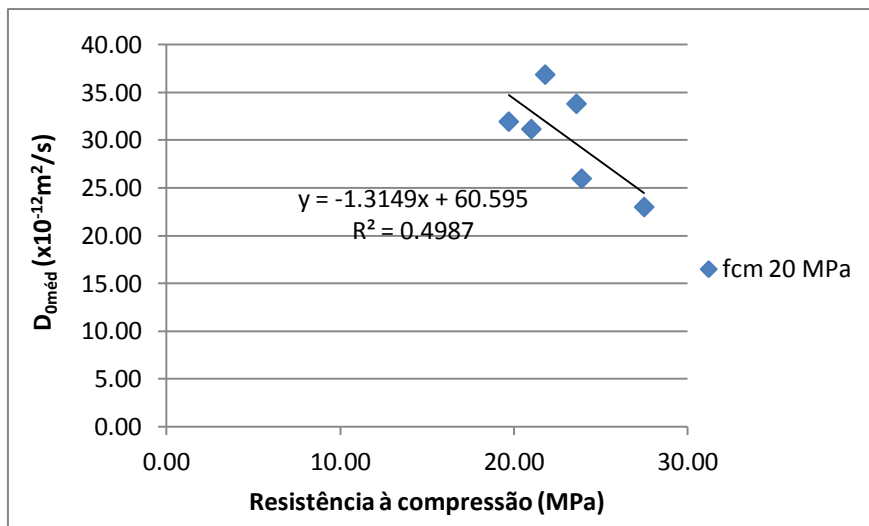


Figura 66 - Relação entre resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 20 MPa

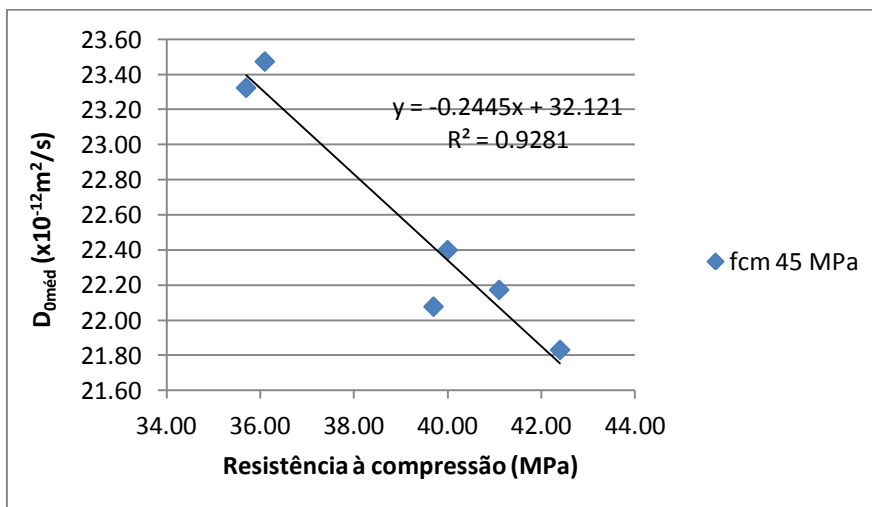


Figura 67 - Relação entre resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 45 MPa

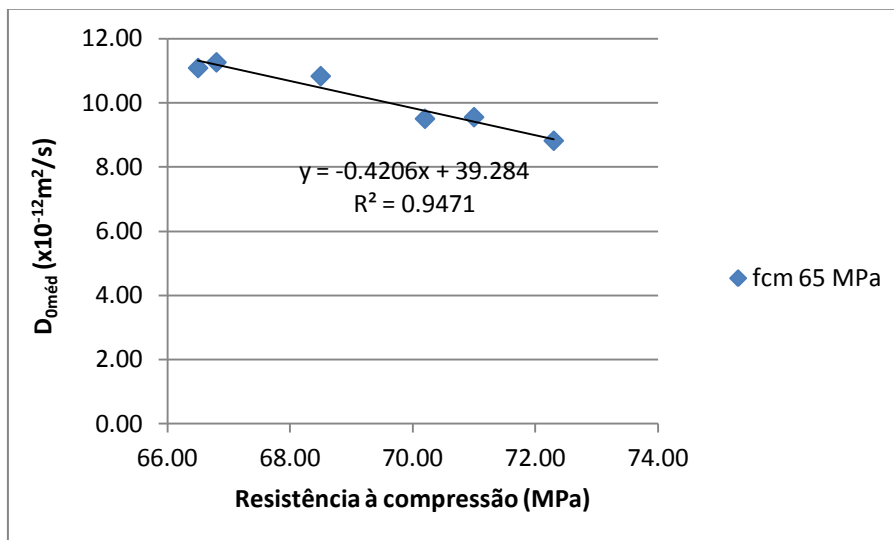


Figura 68 - Relação entre resistência à penetração de cloretos e a resistência à compressão dos betões f_{cm} 65 MPa

3.2.5. Retracção

O ensaio de determinação da deformação por retracção foi realizado através da especificação LNEC E-391-1993, durante 91 dias. Nas Figuras 69 a 71, são apresentados os resultados obtidos.

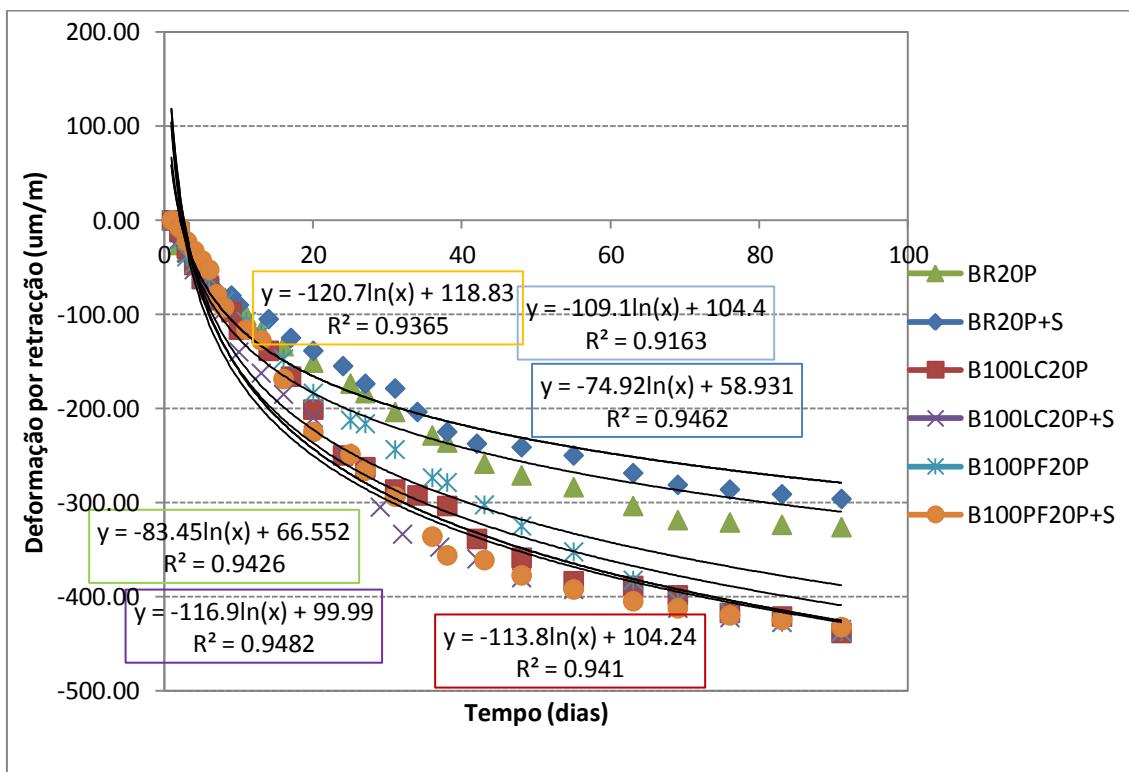


Figura 69 - Deformações devido a retracção ao longo do tempo nos betões f_{cm} 20 MPa

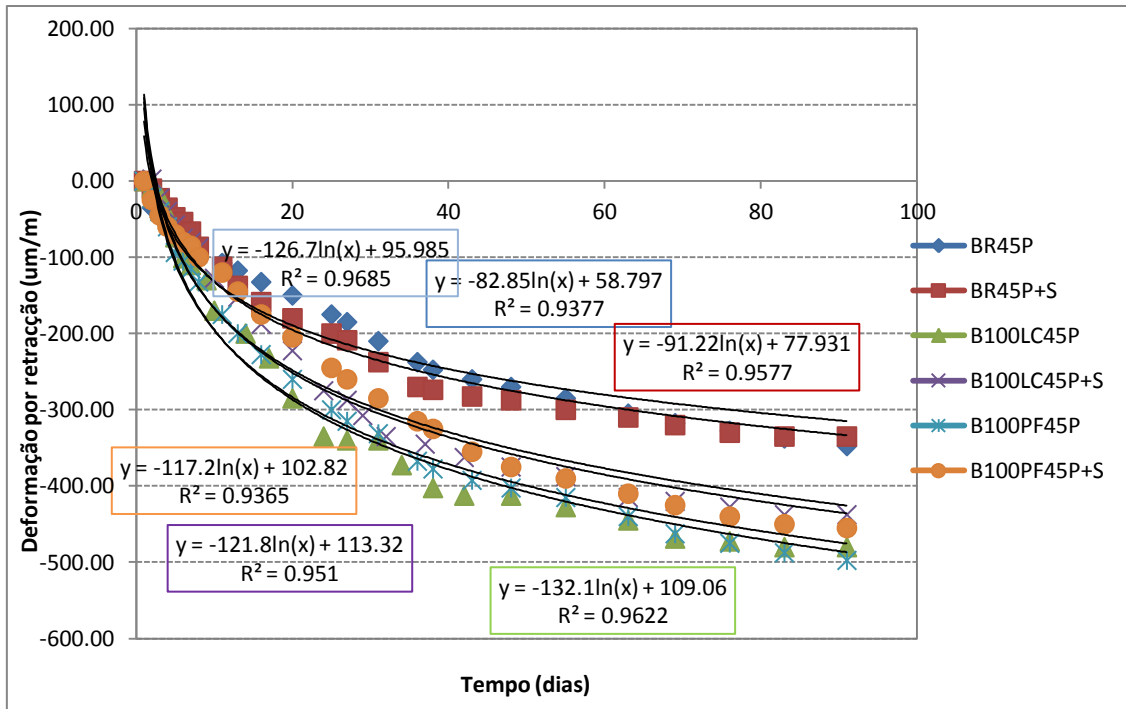


Figura 70 - Deformações devido a retracção ao longo do tempo nos betões fcm 45 MPa

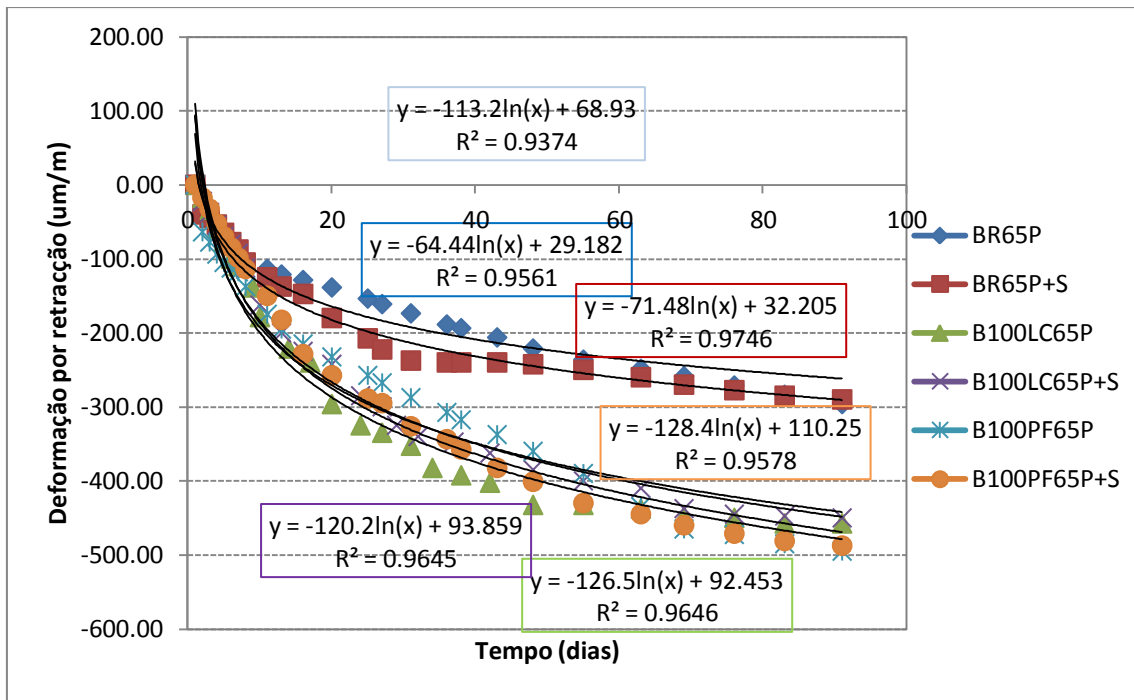


Figura 71 - Deformações devido a retracção ao longo do tempo nos betões fcm 65 MPa

Os resultados mostram que a deformação aumenta ao longo do tempo, de forma não-linear. Como é visível, esta propriedade tem um rápido crescimento nos primeiros dias, apresentando posteriormente uma tendência para estabilizar.

Deste modo, recorreu-se à utilização de regressões logarítmicas que, como esperado, apresentaram maiores valores de correlação (R^2).

Através da análise das Figuras 69 a 71, constata-se que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão leva a uma diminuição no desempenho dos betões. Observam-se significativos aumentos de deformação, aos 91 dias, podendo estes resultados ser explicados por uma menor rigidez global dos betões com agregados reciclados. Nas Tabelas 25 e 26, são apresentadas as deformações por retracção aos 7 e 91 dias. Desta forma, pretende-se analisar o comportamento desta propriedade em idades jovens e em mais adultas. Os resultados mostram comportamentos distintos.

Tabela 25 - Deformações por retracção aos 7 dias, para os diversos betões

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Retracção ($\mu\text{m/m}$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Retracção ($\mu\text{m/m}$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Retracção ($\mu\text{m/m}$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	-76,3	0,0	0,0	-87,5	0,0	0,0	-97,5	0,0	0,0
BR P+S	-75,0	0,0	-1,6	-66,3	0,0	-24,3	-87,5	0,0	-10,3
B100LC P	-85,0	11,5	0,0	-110,0	25,7	0,0	-110,0	12,8	0,0
B100LC PS	-83,8	11,7	-1,5	-80,0	20,8	-27,3	-92,5	5,7	-15,9
B100PF P	-82,5	8,2	0,0	-115,0	31,4	0,0	-117,5	20,5	0,0
B100PF PS	-78,8	5,0	-4,5	-85,0	28,3	-26,1	-98,8	12,9	-16,0

Tabela 26 - Deformações por retracção aos 91 dias, para os diversos betões

	f_{cm} 20 MPa			f_{cm} 45 MPa			f_{cm} 65 MPa		
	Retracção ($\mu\text{m/m}$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Retracção ($\mu\text{m/m}$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)	Retracção ($\mu\text{m/m}$)	Δ_{AGRB} (%)	Δ_{PB} (%)
BR P	-326,3	0,0	0,0	-347,5	0,0	0,0	-296,3	0,0	0,0
BR PS	-296,3	0,0	-9,2	-335,0	0,0	-3,6	-290,0	0,0	-2,1
B100LC P	-438,8	34,5	0,0	-480,0	38,1	0,0	-457,5	54,4	0,0
B100LC PS	-435,0	46,8	-0,9	-437,5	30,6	-8,9	-450,0	55,2	-1,6
B100PF P	-437,5	34,1	0,0	-497,5	43,2	0,0	-495,0	67,1	0,0
B100PF PS	-432,5	46,0	-1,1	-455,0	35,8	-8,5	-487,5	68,1	-1,5

Observando as tabelas, constata-se aumentos de deformação, aos 7 dias, de aproximadamente 12, 31 e 21% para as famílias f_{cm} 20, f_{cm} 45 e f_{cm} 65 MPa. Relativamente aos 91 dias, registam-se aumentos de 47, 43 e 68%, respectivamente.

Esta situação é explicada pelo fenómeno de cura interna desencadeado pelos agregados reciclados que permite a compensação da água de evaporação através da água existente nos AGRB. Deste modo, enquanto houver disponibilidade de água no agregado reciclado, as variações dimensionais são reduzidas.

No que respeita ao processo de britagem dos agregados reciclados, verifica-se que a trituração primária conduz a desempenhos ligeiramente inferiores relativamente à trituração primária mais secundária.

4. Considerações finais

Neste relatório, procurou-se analisar os resultados experimentais, decorrentes da realização da tarefa 2.

Esta tarefa consistiu em produzir 18 tipos de betão com agregados reciclados grossos (para uma taxa única de substituição de 100%) obtidos através de dois métodos de britagem distintos: trituração primária, processo corrente de trituração dos AR e trituração primária mais secundária, semelhante ao usado em agregados naturais pétreos. Estes dois processos foram efectuados para agregados de origem natural, de pré-fabricação e de laboratório e também para diferentes resistências alvo (20, 45, 65 MPa). Os betões com agregados reciclados foram comparados com outros que contêm apenas agregados naturais.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados às propriedades no estado fresco, nomeadamente ao abaixamento e massa volúmica, mostram uma semelhança de valores entre betões. Comparando a influência da incorporação de agregados reciclados e da variação do processo de britagem, verificam-se, nestas propriedades, variações de cerca de 5%, sendo os melhores desempenhos observados para o processo de britagem TP+TS (trituração primária mais secundária), em detrimento do processo TP (apenas trituração primária).

No que respeita ao estado endurecido, foram estudadas as seguintes propriedades a nível mecânico: resistência à compressão em cubos; resistência à compressão em cilindros; módulo de elasticidade e resistência à compressão por compressão diâmetro. Relativamente à resistência à compressão em cubos aos 28 dias, registam-se variações máximas de cerca de 8% para as diversas famílias, excepção feita para a f_{cm} 20 MPa, em que esse valor foi de aproximadamente 24%. Em relação à resistência em cilindros, existe uma tendência idêntica. Em ambas as propriedades, foram obtidos melhores desempenhos para a trituração primária mais secundária.

Relativamente à análise que foi feita em termos de durabilidade, observa-se que, tanto na absorção de água por imersão como na absorção de água por capilaridade, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão é prejudicial, verificando-se também que os betões que utilizaram agregados obtidos por trituração primária e secundária apresentaram melhores resultados

No que concerne à resistência por carbonatação, os resultados mostram uma degradação

desta propriedade com o aumento do tempo em todos os betões, sendo visível uma diferença de escala da frente de carbonatação nas diversas famílias. Verifica-se ainda que esta propriedade apresenta valores maiores nas famílias com menores classes de resistência.

Quanto à resistência por penetração de cloretos, observa-se uma perda de desempenho devido à incorporação de agregados reciclados e ao método de britagem de trituração primária. A variação máxima foi de cerca de 47%, tendo ocorrido na família f_{cm} 20 MPa, Constatase ainda uma diminuição dos coeficientes de difusão de cloretos dos 28 para os 91 dias.

Finalmente, na deformação por retracção verifica-se que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão leva a uma diminuição no desempenho dos betões, sendo essa diminuição maior para os betões produzidos com agregados obtidos por trituração primária. Verificam-se ainda aumentos de retracção aos 91 dias superiores aos registados aos 7, devido ao fenómeno de cura interna desencadeado pelos agregados reciclados.

5. Bibliografia

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

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 206-1 – Betão, Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, Lisboa, 2005.

NP EN 1992-1 - Eurocódigo 2, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2008.

Lisboa, 03 de Março de 2013

Autores

Diogo Pedro
Bolsheiro de Investigação

Miguel Bravo
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Luís Evangelista
Professor Adjunto

Pedro Silva
Professor Adjunto