

BETÃO ESTRUTURAL DE AGREGADOS LEVES DE RESISTÊNCIA NORMAL E ALTA: DOS ESTUDOS LABORATORIAIS À PRODUÇÃO NO LOCAL - CASO DE ESTUDO

Miguel C. S. Nepomuceno¹, Luís F. A. Bernardo² e Hugo A. S. Pinto^{2*}

1: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
C-made: Centro de Materiais e Tecnologias Construtivas
Universidade da Beira Interior,
6201-001 Covilhã, Portugal
e-mail: mcsn@ubi.pt, web: <http://www.ubi.pt>

2: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
C-made: Centro de Materiais e Tecnologias Construtivas
Universidade da Beira Interior,
6201-001 Covilhã, Portugal
e-mail: luis.bernardo@ubi.pt, pinto.ha@gmail.com web: <http://www.ubi.pt>

Palavras-chave: betão estrutural de agregados leves, resistência à compressão, resistência normal, alta resistência, massa volúmica, desvio padrão

Resumo. Neste artigo descreve-se um estudo experimental que se desenvolveu em duas fases, compreendendo, na primeira fase, o estudo e a produção laboratorial de betões estruturais de agregados leves de argila expandida com classes de densidade seca entre 1,8 e 2,0 de acordo com a EN 206-1 e quatro classes distintas de resistência à compressão compreendidas entre os 20 MPa e os 65 MPa e, na segunda fase, a produção e aplicação do betão em condições semelhantes às de um estaleiro de pré-fabricação na betonagem de 26 vigas de betão armado com secção retangular e diversas taxas de armadura de flexão. Com esse objetivo foram estudadas e produzidas em laboratório quatro séries de betão: a Série 1 (20 a 25 MPa), a Série 2 (40 a 45 MPa), a Série 3 (50 a 55 MPa) e a Série 4 (60 a 65 MPa). Para a produção dos betões foram selecionados os cimentos CEM II/B-L32,5N e CEM I 42,5R, duas adições de microssilica, uma adição de fíler calcário, um superplastificante, uma areia natural rolada, dois agregados grossos de granito britado e um agregado leve de argila expandida com máxima dimensão de 12,7 mm. Os betões produzidos podem ser designados de "sand-lightweight concrete" de acordo com o ACI 318, uma vez que apenas se usou areia natural como agregado fino. A metodologia adotada para o estudo da composição baseou-se no método das curvas de referência, nomeadamente aquelas propostas por Faury, correntemente usadas em Portugal para o betão vibrado. Neste artigo são descritos os materiais selecionados, são apresentadas as composições estudadas, o processo de produção e curas dos betões, os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e endurecido e são ainda discutidos alguns parâmetros relevantes para a análise efetuada no âmbito do presente estudo, nomeadamente as correlações entre a resistência à compressão, a razão água-ligante e a massa volúmica. É ainda comparada a variabilidade dos resultados entre os betões produzidos em laboratório e em estaleiro de pré-fabricação. Os resultados obtidos revelaram que é possível produzir satisfatoriamente betões estruturais de agregados leves de elevada resistência em estaleiro de pré-fabricação com distribuição homogénea, sem segregação, mesmo para aplicações estruturais em vigas de betão armado.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento atual sobre os betões estruturais de agregados leves é já suficientemente avançado para permitir a construção de estruturas de grande porte, e são já muitos os exemplos de aplicação a nível mundial deste tipo de betão em edifícios, pontes, plataformas *offshore* (estruturas flutuantes e portuárias) e na prefabricação, entre outros [1]. A implementação deste tipo de betão em Portugal tem ainda pouca expressão e isso pode dever-se ao seu custo e à maior complexidade tecnológica na caracterização, controlo dos agregados leves e todo o conhecimento relativo ao transporte e colocação em obra. Em geral, para a mesma resistência, o betão estrutural de agregados leves tem teores de ligante maiores do que os betões normais, tornando este betão menos competitivo no que se refere ao seu custo de produção. As suas vantagens face aos betões correntes de massa volumica normal decorrem na sua maioria da redução do peso próprio, que pode atingir valores da ordem de 40% [1]. No caso de estruturas de grande porte, uma redução do peso próprio pode ser importante para reduzir as cargas exercidas sobre o solo de fundação ou para proporcionar uma redução das secções transversais dos elementos estruturais, conduzindo simultaneamente a uma menor massa inercial (com as vantagens inerentes para estruturas localizadas em zonas sísmicas). No caso da pré-fabricação, onde o controlo de qualidade pode ser mais apertado e inclui um menor número de variáveis, pode apresentar vantagens no aumento da produtividade, pela redução do peso próprio dos elementos a manusear e a transportar para o local da obra, bem como no processo de montagem.

Neste trabalho apresenta-se e discute-se uma campanha experimental que teve por objetivo o estudo laboratorial e a produção de betões estruturais de agregados leves para a betonagem de elementos de betão armado em condições semelhantes às de um estaleiro de pré-fabricação, onde as variáveis relativas ao transporte, e colocação não existem, sendo o betão colocado nos elementos estruturais por descarga direta escassos minutos após a amassadura. O estudo abrange uma gama alargada de resistência à compressão previstas na NPEN 1992-1-1 [2] e na NPEN 206-1 [3] e com a sua divulgação pretende-se contribuir para um maior conhecimento deste tipo de betões.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo do presente estudo consistiu na produção de 26 vigas de betão armado de agregados leves em condições semelhantes às de um estaleiro de pré-fabricação (adiante designado apenas por estaleiro), distribuídas por quatro classes distintas com resistências médias à compressão entre os 20 MPa os 65 MPa, avaliada em provetes cúbicos de 150 mm de aresta. Adicionalmente, definiu-se que as resistências médias das quatro classes de betão deveriam situar-se nos seguintes intervalos: 20 a 25 MPa (Série 1), 40 a 45 MPa (Série 2), 50 a 55 MPa (Série 3) e 60 a 65 MPa (Série 4). Por outro lado, as classes de densidade seca dos betões leves deveriam situar-se entre 1,8 e 2,0 de acordo com a EN 206-1 [3], ou seja, entre 1601 e 2000 kg/m³.

Tendo por base os objetivos definidos e a necessidade de assegurar a obtenção dos valores das resistências médias à compressão e respetivas massas volúmicas com uma margem de erro estreita, delineou-se um programa experimental em duas fases: Na primeira fase foram produzidas misturas em laboratório compreendendo as gamas de resistência e de massas volúmicas pretendidas, bem como analisados os resultados e estabelecidas as necessárias correlações para os parâmetros das misturas. Na segunda fase foram calculadas as misturas a produzir em estaleiro suportadas pelos estudos e correlações desenvolvidos na primeira fase, foram efetuadas as respetivas betonagens e avaliados os resultados obtidos para as vigas no que diz respeito aos parâmetros requeridos.

Nos itens que se seguem são descritos os materiais selecionados, são apresentados os estudos das composições produzidas e o processo de produção, amostragem e ensaio dos betões.

2.1. Materiais utilizados

Para a produção dos betões foram selecionados os seguintes materiais, tendo por base a sua disponibilidade local e a gama de resistências a obter:

Ligantes

Cimento portland de calcário (CEM II/B-L32,5N) com massa volúmica de 3040 kg/m^3 e superfície específica de $461,7 \text{ m}^2/\text{kg}$ e Cimento portland (CEM I 42,5R) com massa volúmica de 3140 kg/m^3 e superfície específica de $384,8 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Adições minerais

Fíler calcário (Micro 100 AB) com massa volúmica de 2720 kg/m^3 e superfície específica de $508,8 \text{ m}^2/\text{kg}$; Microssílica 1 (Sikacrete HD) com massa volúmica de 2170 kg/m^3 e superfície específica de $129,5 \text{ m}^2/\text{kg}$ e Microssílica 2 (Meyco MS610) com massa volúmica de 2300 kg/m^3 .

Adjuvante

Superplastificante (Rheobuild 1000) com massa volúmica de 1200 kg/m^3 , usado na dosagem de 4 a 20 ml por kg de cimento, proporcionando uma redução de água entre os 5 e os 21% em massa.

Agregado fino de massa volúmica normal

Areia natural rolada (Areia 0/5) com massa volúmica de 2610 kg/m^3 , baridade seca compactada de 1570 kg/m^3 e absorção de água de 0,42%. A análise granulométrica é ilustrada na Figura 1, tendo-se obtido um módulo de finura de 2,705.

Agregados grossos de massa volúmica normal

Granito britado 1 (Brita 3/6) com massa volúmica de 2710 kg/m^3 , baridade seca compactada de 1520 kg/m^3 e absorção de água de 0,15% e Granito britado 2 (Brita 6/15) com massa volúmica de 2700 kg/m^3 , baridade seca compactada de 1540 kg/m^3 e absorção de água de 0,14%. A análise granulométrica dos dois agregados é ilustrada na Figura 1, tendo-se obtido um módulo de finura de 5,084 para a Brita 3/6 e de 6,471 para a Brita 6/15.

Agregado grosso leve de argila expandida

Argila expandida (Leca 4/12) com massa volúmica de 1310 kg/m^3 em partículas saturadas com superfície seca, absorção de água de 14,1% às 24 h, 3,98% aos 30 minutos e 3,56% aos 15 minutos. A análise granulométrica apresenta-se na Figura 1, tendo-se obtido um módulo de finura de 5,958.

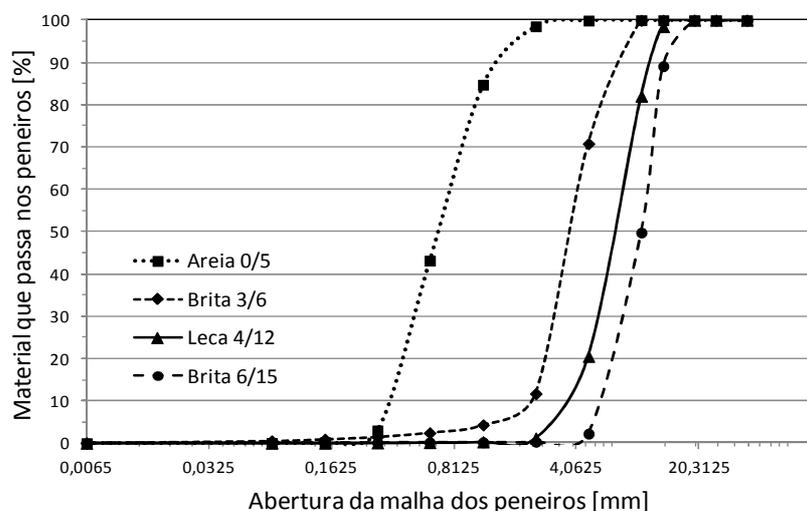


Figura 1. Curvas granulométricas dos agregados finos e grossos.

2.2. Estudos de composição

A metodologia adotada para o estudo da composição baseou-se no método das curvas de referência propostas por Faury, correntemente usadas em Portugal para o betão vibrado, com as necessárias adaptações [4]. Os betões produzidos podem ser designados de "sand-lightweight concrete" de acordo com o ACI 318 [5], uma vez que apenas se usou areia natural como agregado fino. Nos itens seguintes apresentam-se as misturas produzidas em laboratório e aquelas produzidas em estaleiro.

2.2.1. Betões produzidos em laboratório

A Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados no estudo da composição dos betões com recurso ao método das curvas de referência de Faury, enquanto a Tabela 2 mostra as dosagens obtidas para a produção de um metro cúbico de betão. No presente artigo, as séries são identificadas pela sigla S1 a S4, seguidas da respetiva composição estudada para essa série A, B ou C. Para garantir a gama de resistência pretendida para as Séries 3 e 4, foi necessário utilizar microssilica. Em especial a partir da Série 3 entendeu-se adequado alterar as coordenadas da curva de referência de modo a permitir uma redução significativa da necessidade de vibração, prevenindo a segregação do agregado leve. Concomitantemente, introduziu-se uma pequena quantidade de fíler calcário para densificar a estrutura do betão, aumentar a viscosidade da mistura, aumentar a capacidade de retenção de água sem exsudação e reduziu-se a tensão inicial de corte recorrendo ao uso do superplastificante. Os resultados obtidos nas propriedades do betão no estado endurecido serão apresentados no item 3.

Tabela 1. Parâmetros para a composição dos betões produzidos em laboratório.

Parâmetro	Valor(es) adotado(s)					
	S1-A	S2-A	S3-A	S3-B	S4-A	S4-B
Dimensão máxima do agregado (D _{máx}), em mm	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	19,1
Efeito de parede (R/D)	1	1	1	1	1	1
Índice de vazios de Faury (K; K')	0,35; 0,003	0,35; 0,003	0,36; 0,003	0,36; 0,003	0,36; 0,003	0,36; 0,003
Volume de vazios (m ³ /m ³)	0,040	0,040	0,040	0,040	0,035	0,035
Razão água/(materiais cimentícios): W/B (massa)	0,55	0,36	0,32	0,28	0,25	0,25
Substituição do ligante por microssilica (massa)	---	---	8%	12%	12%	11%
Dosagem de fíler calcário (m ³ /m ³)	---	---	0,025	0,012	---	---
Dosagem do superplastificante por kg de cimento	---	8 ml	12 ml	15 ml	22 ml	25 ml
Coordenadas da curva de referência (A; B)	28; 2	28; 2	32; 2	32; 2	32; 2	32; 2

Tabela 2. Dosagens dos betões produzidos em laboratório.

Materiais	Dosagens por metro cúbico					
	S1-A	S2-A	S3-A	S3-B	S4-A	S4-B
Cimento portland	CEM II/B-L32,5N (kg)	333	---	---	---	---
	CEM I 42,5R (kg)	---	430	460	472	510
Adição mineral	Fíler calcário (kg)	---	---	68	32	---
	Microssilica (kg)	---	---	40**	64*	70*
Superplastificante (l)	---	3,44	5,40	7,08	11,2	13,1
Água (l)	183	155	160	150	145	145
Areia natural (Areia 0/5) (kg)	829	728	715	752	760	688
Agregado grosso (Brita 3/6) (kg)	---	---	---	---	89	67
Agregado grosso (Brita 6/15) (kg)	---	---	---	---	---	288
Agregado grosso leve (LECA 4/12) (kg)	458	523	440	435	397	301

*Microssilica Meyco MS610 **Microssilica Sikacrete HD

2.2.2. Betões produzidos em estaleiro

Os parâmetros adotados e as dosagens por metro cúbico dos betões produzidos em estaleiro são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respetivamente. As formulações apresentadas refletiram os resultados obtidos na primeira fase, que se apresentarão oportunamente no item 3. É notório que, à exceção da Série 4 em que não houve alterações na mistura, as restantes três séries viram a sua composição ajustada face aos resultados obtidos na primeira fase. Para a amassadura da Série 1 houve necessidade de introduzir um superplastificante para obter uma ligeira redução de água e a consequente redução da razão W/C de 0,55 para 0,52. O mesmo sucedeu na Série 2, onde se procedeu a um acréscimo de superplastificante para reduzir a razão W/C de 0,36 para 0,33. Na Série 3 aumentou-se a dosagem de superplastificante para aumentar a capacidade de deformação.

Tabela 3. Parâmetros para a composição dos betões produzidos em estaleiro.

Parâmetro	Valor(es) adotado(s)			
	S1-B	S2-B	S3-C	S4-B
Dimensão máxima do agregado (D _{máx}), em mm	12,7	12,7	12,7	19,1
Efeito de parede (R/D)	1	1	1	1
Índice de vazios de Faury (K; K')	0,35; 0,003	0,35; 0,003	0,36; 0,003	0,36; 0,003
Volume de vazios (m ³ /m ³)	0,040	0,040	0,040	0,035
Razão água/(materiais cimentíceos): W/B (massa)	0,52	0,33	0,29	0,25
Substituição do ligante por microssílica (massa)	---	---	8%	11%
Dosagem de filler calcário na mistura (m ³ /m ³)	---	---	0,0129	---
Dosagem do superplastificante por kg de cimento	4 ml	12 ml	20 ml	25 ml
Coordenadas da curva de referência (A; B)	28; 2	28; 2	32; 2	32; 2

Tabela 4. Dosagens dos betões produzidos em estaleiro.

Materiais	Dosagens por metro cúbico			
	S1-B	S2-B	S3-C	S4-B
Cimento portland	CEM II/B-L32,5N (kg)	335	---	---
	CEM I 42,5R (kg)	---	445	494
Adição mineral	Filer calcário (kg)	---	---	35
	Microssílica (kg)	---	---	43**
Superplastificante (l)	1,34	5,34	9,88	13,1
Água (l)	174	146	153	145
Areia natural (Areia 0/5) (kg)	841	756	775	688
Agregado grosso (Brita 3/6) (kg)	---	---	---	67
Agregado grosso (Brita 6/15) (kg)	---	---	---	288
Agregado grosso leve (LECA 4/12) (kg)	463	501	426	301

*Microssílica Meyco MS610 **Microssílica Sikacrete HD

2.3. Produção, amostragem, cura e ensaios no estado fresco e endurecido

2.3.1. Betões produzidos em laboratório

Os betões produzidos em laboratório foram amassados numa misturadora de eixo vertical, de mistura forçada, com capacidade nominal de 25 litros. Todos os componentes foram medidos em massa e foram efetuadas as correções das misturas para compensar a absorção dos agregados leves tendo por base os valores registados aos 15 minutos. Em cada mistura foram moldados sete provetes para os ensaios da massa volúmica e da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade. Aos 28 dias foram ensaiados 3 provetes, enquanto aos 3 e 7 dias apenas se ensaiaram 2 provetes. A compactação do betão nos provetes fez-se através de uma agulha vibratória de 25 mm de diâmetro. Os provetes foram sujeitos a cura normalizada (20±2 °C e HR de 90%) e na altura do ensaio apresentavam-se saturados com a superfície seca. Os betões no estado fresco apresentaram um abaixamento no cone de Abrams entre os 8 e os 12 cm. Do ponto de vista das propriedades no estado endurecido, apenas foram avaliadas a massa volúmica e a resistência à compressão.

2.3.2. Betões produzidos em estaleiro

No estaleiro recorreu-se a uma misturadora de eixo vertical, de mistura forçada, com capacidade nominal de 75 litros. Todos os componentes foram medidos em massa. Na altura da amassadura a areia natural apresentava-se saturada e com a superfície seca, enquanto os agregados grossos leves se apresentavam secos. No caso dos agregados leves foram efetuadas as devidas compensações das dosagens de água efetiva considerando a absorção de água dos agregados aos 15 minutos. As vigas foram betonadas numa cofragem metálica construída para o efeito. A compactação do betão fez-se através de uma agulha vibratória de 25 mm de diâmetro, em camadas de 15 cm, com o cuidado de não aplicar vibração excessiva de modo a evitar a segregação dos agregados leves por

impulsão. O betão das vigas foi curado em ambiente exterior não controlado, mas com a preocupação de manter a superfície húmida durante os primeiros sete dias e protegida por uma tela plástica para evitar a perda prematura de água.

Em cada sequência de várias amassaduras realizadas no mesmo dia, para a mesma série de betão, foram recolhidos aleatoriamente dois a três provetes cúbicos de 150 mm de aresta por amassadura, os quais foram conservados em câmara de cura a 20 ± 2 °C e HR de 90% e ensaiados saturados com a superfície seca aos 28 dias de idade para caracterizar o processo de produção dessa série. Simultaneamente, para cada uma das vigas betonadas foram moldados 3 provetes, os quais foram curados juntamente com as vigas em ambiente exterior não controlado.

Os betões no estado fresco apresentaram um abaixamento no cone de Abrams entre os 8 e os 12 cm. Do ponto de vista das propriedades no estado endurecido, apenas foram avaliadas a massa volúmica e a resistência à compressão, quer para os betões curados em condições normalizadas, quer para os betões curados juntamente com as vigas. O ensaio à compressão foi realizado à taxa de compressão de 13,5 kN/s. Enquanto os betões curados em condições normalizadas foram ensaiados aos 28 dias de idade para todas as séries, os betões curados juntamente com as vigas foram ensaiados em idades compreendidas entre os 27 e os 48 dias, à exceção da Série 4 em que os betões foram ensaiados decorrido cerca de 1 ano.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Betões produzidos em laboratório

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos estudos laboratoriais relativamente à resistência à compressão e à massa volúmica medidas aos 3, 7 e 28 dias de idade em provetes cúbicos de 150 mm de aresta saturados e com a superfície seca. A Figura 2 ilustra a evolução da resistência com a idade, observando-se que para o cimento CEM II/B-L32,5N se atingiu aos 3 e 7 dias, respetivamente, 56% e 79% da resistência aos 28 dias, enquanto para o cimento CEM I 42,5R se atingiu, em média, aos 3 e 7 dias, respetivamente, 82% e 89% da resistência aos 28 dias. Estes valores são superiores àqueles correntemente observados em betões correntes. Resultados similares foram obtidos por Silva *et al.* [6], em misturas de betões leves com CEM I 42,5R.

Tabela 5. Resistência à compressão e massa volúmica das misturas laboratoriais.

Id.	Razão W/C	Razão W/B	Idade do betão	Resistência à compressão			Massa volúmica		
				Valor médio	Desvio padrão	Coef. de variação	Valor médio	Desvio padrão	Coef. de variação
				[MPa]	[MPa]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
S1-A	0,550	0,550	3	12,11	0,74	6,1	1763	46	2,6
			7	16,87	1,24	7,4	1784	67	3,8
			28	21,43	0,80	3,7	1732	6	0,4
S2-A	0,360	0,360	3	32,91	1,94	5,9	1793	63	3,5
			7	34,27	1,92	5,6	1760	18	1,0
			28	37,93	1,82	4,8	1751	46	2,6
S3-A	0,348	0,320	3	40,00	2,84	7,1	1881	46	2,4
			7	43,52	1,57	3,6	1870	13	0,7
			28	47,87	2,11	4,4	1882	12	0,7
S3-B	0,318	0,280	3	43,48	1,65	3,8	1941	29	1,5
			7	48,94	0,06	0,1	1908	0	0,0
			28	55,79	3,55	6,4	1960	44	2,2
S4-A	0,284	0,250	3	40,96	1,36	3,3	1950	25	1,3
			7	45,25	0,76	1,7	1941	13	0,6
			28	52,58	0,89	1,7	1939	11	0,6
S4-B	0,276	0,246	3	51,38	0,18	0,3	2068	8	0,4
			7	54,95	0,11	0,2	2069	18	0,9
			28	61,54	2,47	4,0	2068	24	1,1

A Figura 3 mostra a relação entre a razão água/materiais cimentícios (W/B) e a resistência à compressão aos 28 dias. Ainda que fosse previsível que as correlações fossem diferentes para diferentes tipos de cimentos, optou-se por apresentar uma única correlação incluindo os dois cimentos uma vez que não se evidenciou uma diferença marcante, ainda que se admita a escassez de resultados para o CEM II/B-L32,5N que permita confirmar esta tendência. Esta correlação foi determinante para decidir as alterações a introduzir nas misturas a produzir em estaleiro visando as gamas de resistência pretendidas. Na Figura 4 apresentam-se as correlações entre a resistência e massa volúmica dos provetes saturados com a superfície seca, separados em função do tipo de cimento. Estimou-se que em média a massa volúmica dos provetes secos em ambiente exterior fosse cerca de 50 kg/m^3 abaixo daquela obtida em provetes saturados. Na Figura 4, para além dos valores médios aos 28 dias apresentados na Tabela 5, incluem-se os valores individuais de cada provete, que não foi possível incluir nessa tabela.

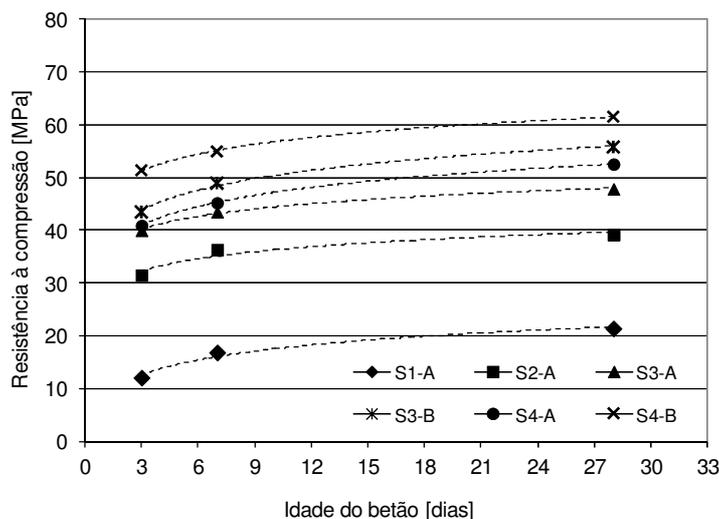


Figura 2. Evolução da resistência à compressão com a idade.

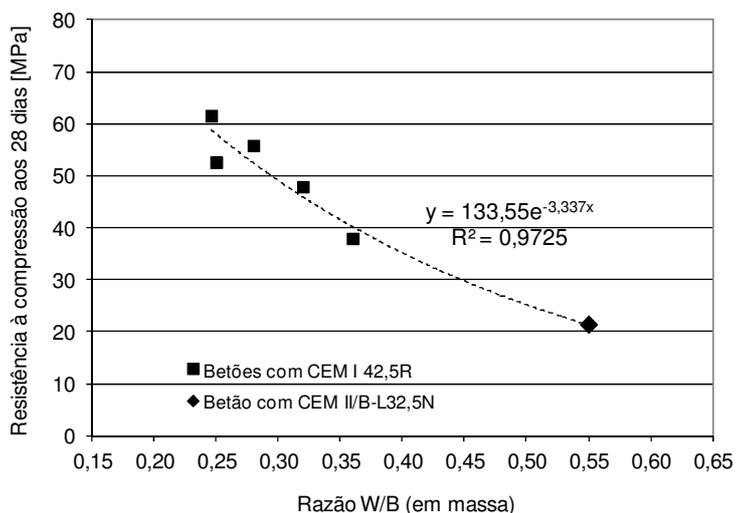


Figura 3. Relação entre a razão W/B e a resistência à compressão.

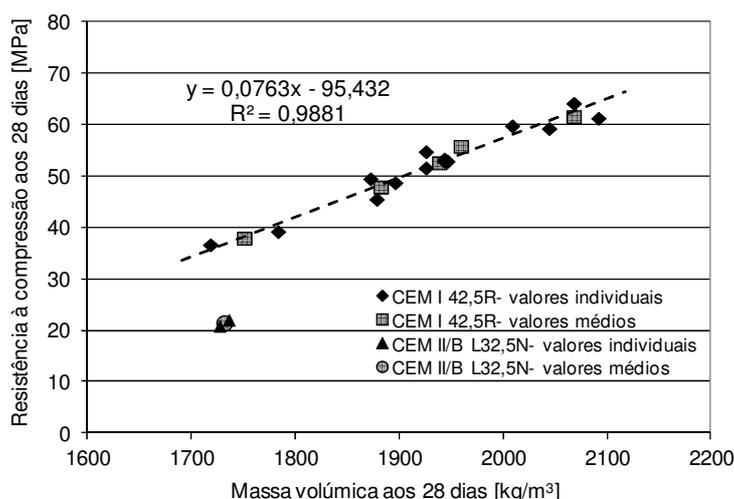


Figura 4. Relação entre a massa volúmica e a resistência à compressão.

3.2. Betões produzidos em estaleiro

3.2.1. Amostragem por séries de amassaduras

A Tabela 6 ilustra os resultados obtidos na avaliação do processo de produção, nomeadamente na resistência à compressão e massa volúmica dos provetes saturados com a superfície seca, realizada aos 28 dias de idade em provetes sujeitos a cura normalizada. Cada linha apresentada na Tabela 6 inclui um número significativo de provetes provenientes de várias amassaduras da mesma série realizadas no mesmo dia. Nesta medida, seriam previsíveis valores superiores do desvio padrão, o que efetivamente se veio a constatar, como se verá mais adiante.

Tabela 6. Resistência à compressão e massa volúmica das séries de misturas em estaleiro.

Id.	Razão W/C	Razão W/B	Idade do betão [dias]	Resistência à compressão			Massa volúmica		
				Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. de variação [%]	Valor médio [kg/m³]	Desvio padrão [kg/m³]	Coef. de variação [%]
S1-B	0,520	0,520	28	21,78	1,11	5,1	1719	42	2,4
S1-B	0,520	0,520	28	23,94	0,33	1,4	1778	27	1,5
S2-B	0,330	0,330	28	41,85	0,81	1,9	1846	14	0,7
S2-B	0,330	0,330	28	42,40	1,36	3,2	1831	28	1,5
S3-C	0,310	0,285	28	51,21	3,88	7,6	1917	10	0,5
S3-C	0,310	0,285	28	53,76	4,83	9,0	1933	52	2,7
S4-B	0,276	0,246	28	60,68	4,88	8,0	2058	35	1,7

Pela extensão dos valores obtidos, entendeu-se conveniente que neste item fosse apresentada uma análise conjunta dos resultados obtidos laboratorialmente e em estaleiro no que diz respeito à resistência à compressão e massa volúmica dos provetes saturados e com a superfície seca, medidos aos 28 dias de idade, após cura normalizada. Nesta medida, na Figura 5 apresenta-se a correlação entre a razão W/B e a resistência à compressão aos 28 dias de todas as misturas sujeitas a cura normalizada, produzidas em laboratório e em estaleiro. Como se observa, os resultados mostram grande coerência e indicam que as correções efetuadas nas misturas em estaleiro foram adequadas, tendo-se obtido as gamas de resistência previstas. Na Figura 6 apresentam-se as correlações entre a resistência e massa volúmica dos provetes saturados com a superfície seca, separados em função do tipo de cimento. Para além dos valores médios aos 28

dias de idade do betão, são apresentados os valores individuais de cada provete, que foi inviável incluir no âmbito deste artigo nas Tabelas 5 e 6.

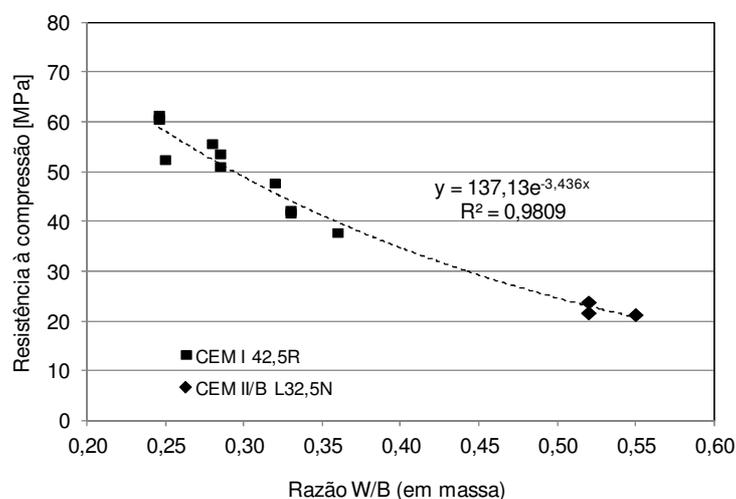


Figura 5. Relação entre a razão W/B e a resistência à compressão.

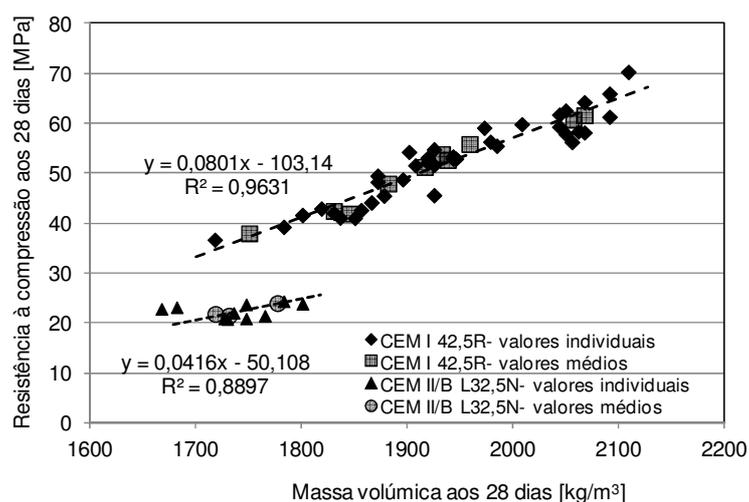


Figura 6. Relação entre a massa volúmica e a resistência à compressão.

3.2.2. Amostragem por vigas produzidas

A Tabela 7 apresenta a avaliação do betão por viga produzida, nomeadamente na resistência à compressão e na massa volúmica dos provetes secos, curados juntamente com as vigas em ambiente exterior. Cada linha da Tabela 7 representa os resultados obtidos em três provetes da mesma viga. Importa salientar que neste caso os betões foram ensaiados em idades diferentes, compreendidas entre os 27 e os 48 dias, à exceção da Série 4 em que os betões foram ensaiados decorrido cerca de 1 ano. Nesta medida, comparativamente com os betões sujeitos a cura normalizada que foram todos ensaiados aos 28 dias, esperava-se obter uma maior variação das resistências entre amassaduras idênticas, pelo facto de terem sido testadas em idades diferentes, conforme evidenciam os resultados apresentados na Figura 7.

Tabela 7. Resistência à compressão e massa volúmica dos betões curados com as vigas.

Id.	Razão W/C	Razão W/B	Idade do betão [dias]	Resistência à compressão			Massa volúmica		
				Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. de variação [%]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. de variação [%]
S1-B	0,520	0,520	39	23,47	0,60	2,5	1659	6	0,4
			27	22,76	0,59	2,6	1685	35	2,1
			31	22,04	1,30	5,9	1667	3	0,2
			31	22,37	0,76	3,4	1651	7	0,4
			45	28,50	0,72	2,5	1659	24	1,4
S2-B	0,330	0,330	48	45,07	1,54	3,4	1802	8	0,4
			48	42,07	2,40	5,7	1807	16	0,9
			41	47,07	1,63	3,5	1809	3	0,2
			48	49,19	1,34	2,7	1827	16	0,9
			41	43,92	3,38	7,7	1788	13	0,7
			41	46,98	2,19	4,7	1791	30	1,6
			41	43,02	2,02	4,7	1790	18	1,0
S3-C	0,310	0,285	29	52,05	3,02	5,8	1867	37	2,0
			30	51,20	2,37	4,8	1879	32	1,7
			35	52,38	2,14	4,1	1869	15	0,8
			40	55,26	4,16	7,5	1910	47	2,4
			34	53,42	2,96	5,5	1877	35	1,9
			39	60,43	4,24	7,0	1953	46	2,3
			30	51,60	2,19	4,5	1867	31	1,7
S4-B	0,276	0,246	374	65,16	3,09	4,7	2040	9	0,4

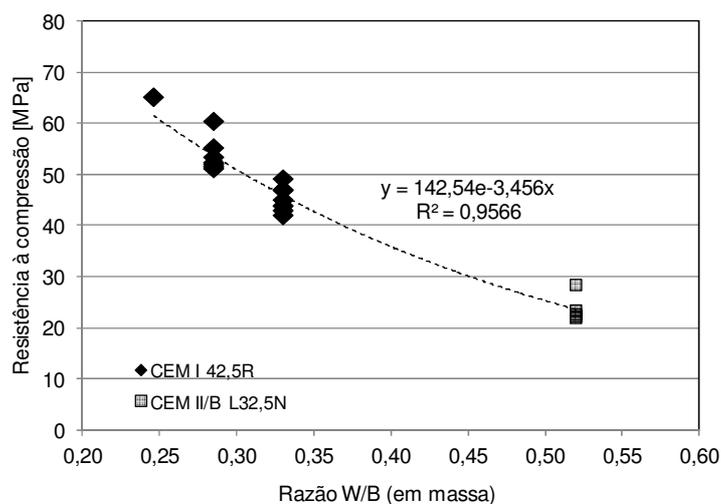


Figura 7. Relação entre a razão W/B e a resistência à compressão.

Na Figura 8 apresentam-se as correlações entre a resistência e massa volúmica dos provetes secos em ambiente exterior, separados em função do tipo de cimento. Conforme previsto, em média, a massa volúmica dos provetes secos foi cerca de 50 kg/m³ abaixo daquela obtida em provetes saturados. Também neste caso, para além dos valores médios indicados na Tabela 7, apresentam-se os valores individuais de cada provete, que foi inviável incluir neste artigo.

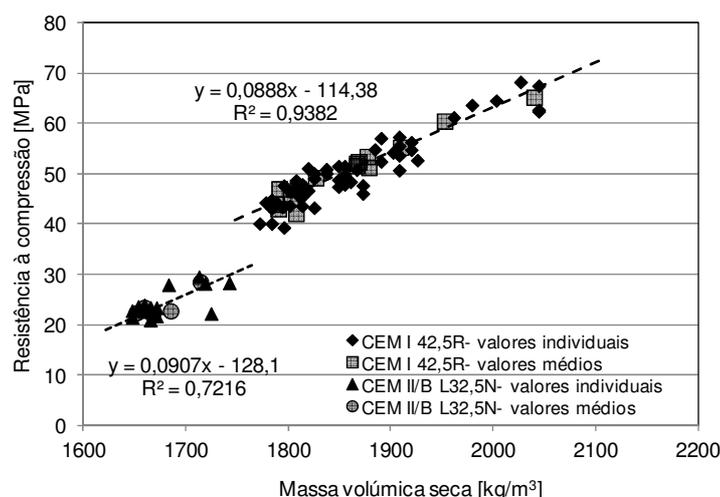


Figura 8. Relação entre a massa volúmica e a resistência à compressão.

Na Figura 9 analisam-se os valores do desvio padrão, comparando os resultados obtidos nas diferentes amostragens, nomeadamente em laboratório, por série de amassaduras em estaleiro e por viga produzida. Em todos os casos verifica-se uma tendência para o aumento do desvio padrão com a resistência. A amostragem por série de amassaduras em estaleiro apresenta maiores valores do desvio padrão comparativamente às restantes, em especial para resistências mais elevadas. Tal facto era previsível, uma vez que cada amostra inclui provetes de diferentes amassaduras da mesma série de betão realizadas no mesmo dia, o que poderá corresponder a uma situação mais comum em obra. Os resultados obtidos na amostragem em laboratório são os mais reduzidos, devido ao controlo mais apertado do processo de produção. Ainda assim, os resultados da amostragem por viga não se afastam muito daqueles obtidos em laboratório, ainda que sejam ligeiramente superiores. A estimativa do desvio padrão depende do processo de produção e da amostragem, pelo que os valores aqui obtidos podem fornecer pistas importantes aquando da estimativa dos valores médios a partir dos valores característicos da resistência.

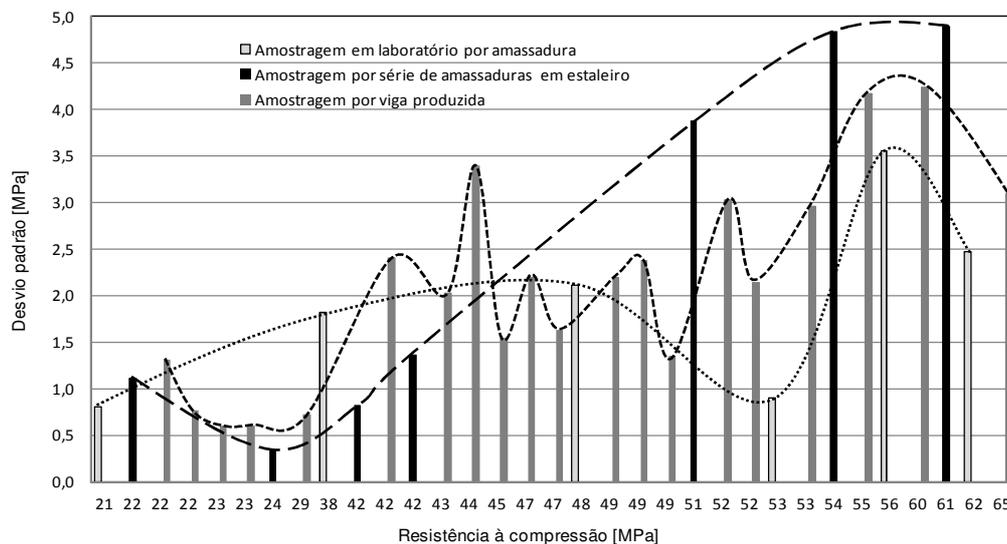


Figura 9. Variação do desvio padrão com a resistência à compressão.

4. CONCLUSÕES

Os estudos realizados permitem formular as seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos revelaram que é possível produzir satisfatoriamente betões de agregados leves de elevada resistência em estaleiro com distribuição homogénea, sem segregação, mesmo para aplicações estruturais em vigas de betão armado;
- Demonstrou-se ser possível obter em estaleiro as gamas de resistência e massas volúmicas secas pretendidas com um grau de segurança satisfatório quando suportadas em amassaduras experimentais e correlações especificamente desenvolvidas para os materiais selecionados e desde que exista um controlo de produção adequado;
- As correlações entre a água/materiais cimentícios (W/B) e a resistência à compressão dos betões aos 28 dias não evidenciaram neste estudo uma dependência marcada em função do tipo de ligante ainda que se admita a escassez de resultados para o CEM II/B-L32,5N que permita confirmar esta tendência de forma mais evidente. Pelo contrário, a correlação entre a massa volúmica e a resistência mostrou ser dependente do tipo de ligante, pelo menos neste caso em que os cimentos usados apresentavam resistências e massas volúmicas diferentes;
- O valor do desvio padrão da resistência à compressão aumentou com a resistência à compressão, independentemente do tipo de amostragem adotado;
- O processo de amostragem definido para o controlo de produção em estaleiro é determinante para a estimativa do valor do desvio padrão da resistência à compressão. Os resultados mostraram que se o controlo de produção for rigoroso e a amostragem for definida por amassadura, os valores do desvio padrão não diferem significativamente daqueles obtidos em laboratório, ainda que apresentem valores ligeiramente superiores. Pelo contrário, se a amostragem for definida por séries de amassaduras diferentes do mesmo betão, os desvios padrão aumentam significativamente face aos anteriores;
- Em geral, os coeficientes de endurecimento dos betões de agregados leves aos 3 e 7 dias mostraram-se superiores àqueles correntemente verificados em betões normais, da mesma gama de resistência e usando o mesmo tipo de ligante.

REFERÊNCIAS

- [1] CEB/FIP, Lightweight aggregate concrete, Working Group on Lightweight Aggregate Concrete, Bulletin 8, FIB, Lausanne, May (2000).
- [2] NP EN 1992-1-1, Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, IPQ, Lisboa (2010)
- [3] NP EN 206-1, Norma Portuguesa para Betão, Parte 1: Especificação, Desempenho, Produção, IPQ, Lisboa (2007).
- [4] Lourenço, Jorge; Júlio, Eduardo; Maranha, Paulo, Betões de agregados leves de argila expandida: Guia para a sua utilização», APEB, Portugal (2004).
- [5] ACI 318-11, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, August (2011).
- [6] Silva, Bruno, Betão leve estrutural com agregados de argila expandida, Dissertação de Mestrado, FEUP, Maio (2007).