

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE BETÕES LEVES

Isabel Valente¹; Paulo J. S. Cruz²

¹Assistente, ²Professor Associado

Dept. de Eng^a Civil, Universidade do Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães

RESUMO

Ao longo da história, os betões leves têm desempenhado um papel de relevo na construção de importantes estruturas. Os recentes desenvolvimentos tecnológicos permitiram tornar os betões leves em opções competitivas para a construção de estruturas de betão armado e mistas. Os betões leves apresentam características que tornam a sua utilização particularmente interessante, entre as quais: a redução de peso, a melhoria de algumas propriedades físicas e a maior durabilidade, [Daly, 00], [Magalhães et al, 02]. O Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST-UM) tem já uma importante experiência na caracterização e utilização de betões leves, nomeadamente em betões leves de elevada resistência. Este artigo resume alguma da investigação realizada até à presente data e engloba: o estudo de composições de betão leve estrutural para resistências próximas de um LC16/20 ou LC20/25 e a caracterização mecânica mais alargada de um betão leve de elevada resistência, tipo LC50/60, realizado a partir de uma composição estudada e utilizada no LEST-UM.

1 INTRODUÇÃO

Durante a realização deste trabalho, procurou-se estudar diferentes composições de betão leve utilizando agregados leves de argila expandida disponíveis no nosso país. Como componentes das misturas estudadas foram utilizados: duas argilas expandidas, a Leca[®] 2/4 e a Arlita[®] F7, uma areia natural com granulometria do 0 ao N^o4, cimentos das classes CEM I 42.5 e CEM I 52.5 R, água e dois superplastificantes, um líquido e outro em pó.

O trabalho foi dividido em duas partes. A primeira diz respeito ao estudo de betões leves estruturais de resistências médias, em que se pretendeu estudar composições standard destes betões. O objectivo é estudar betões com resistências à compressão que possam ser classificados

como betões LC16/20 ou LC20/25. Sendo os agregados pré-definidos, foi necessário estudar a influência da quantidade de cimento, da relação A/C e da presença de superplastificante. Neste estudo, foi determinada a resistência à compressão a partir de cubos de 100 mm de lado, para diversas idades de betões resultantes de várias composições.

A segunda parte do estudo refere-se à caracterização mecânica de uma composição de betão leve de elevada resistência, para a qual foram realizados ensaios de compressão sobre cubos de 100 mm de lado e cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, ensaios de módulo de elasticidade e ensaios de compressão diametral. Com este conjunto de ensaios é possível fazer uma primeira

caracterização do comportamento deste tipo de betão. Todos os ensaios relativos a esta fase do estudo foram realizados para várias idades do betão, podendo-se estabelecer curvas de evolução com a idade dos respectivos parâmetros.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica são importantes para o estudo do comportamento de elementos estruturais em que este betão leve é utilizado.

2 FABRICO DO BETÃO

Numa primeira fase do fabrico do betão leve, adiciona-se a areia e o agregado leve. Estes elementos devem ser bem misturados até ser obtido um aspecto homogéneo. Para tal contribui a adição de uma parte da água de amassadura, já que se os agregados estiverem completamente secos, a argila expandida terá tendência a sobrepor-se aos grãos de areia. A adição desta quantidade de água tem ainda a vantagem de permitir à

argila expandida absorver alguma água, pois trata-se de um agregado com elevada porosidade.

A energia utilizada na realização da amassadura depende do equipamento utilizado. Algumas máquinas possuem uma energia excessiva para o tipo de agregado em causa, podendo provocar o seu esmagamento, o que deve ser evitado, sob pena de se alterarem as características resistentes do agregado e a quantidade de água por ele absorvida.

O passo seguinte consiste na adição do cimento. É também adicionada a maior parte da água, a pouco e pouco, devendo resultar na completa hidratação do cimento. Junta-se o superplastificante, cuja utilização tem dois objectivos: a redução da água utilizada na amassadura e o aumento da trabalhabilidade. Cerca de 20% da quantidade total de água é adicionada à mistura com o superplastificante nesta fase final.



Fig 1 – Fabrico do betão

Após a realização da amassadura é necessário preencher todos os moldes dos respectivos provetes. Este betão requer alguma vibração para alcançar uma compactação conveniente, especialmente se a consistência for seca. No entanto, uma vibração excessiva pode ocasionar alguma segregação da argila expandida, [Vieira, 99].

3 BETÃO LEVE ESTRUTURAL DE RESISTÊNCIAS MÉDIAS

O objectivo desta primeira fase do trabalho foi definir composições de betões leves com resistência à compressão

próxima dos 20 MPa, que possam ter aplicações estruturais. O agregado leve utilizado é fabricado em Portugal, pelo que está facilmente acessível no mercado nacional. As composições estudadas estão definidas na Tabela 1.

Entre a composição C1 e C2 procurou-se variar a quantidade de cimento, para a mesma relação A/C. Verificou-se que a quantidade de água utilizada é a necessária para a obtenção de um betão com suficiente trabalhabilidade. Com o objectivo de obter uma trabalhabilidade maior e reduzir a quantidade de água, foi utilizado um aditivo superplastificante nas composições C5 e C6. Optou-se pela adição de Glenium 52[®],

tendo-se reduzido a quantidade de água para uma relação A/C igual a 0.40. Nestas últimas composições varia também a quantidade de cimento utilizada, mantendo-se todos os outros parâmetros.

Posteriormente estudou-se uma outra composição em que foi utilizado um superplastificante em pó, Sikament[®]HS1. Esta última mistura foi realizada em seco, sendo a água adicionada no final.

Tabela 1 – Composição do betão leve de resistência média

		C1	C2	C5	C6	B3.1f
Areia natural	(kg/m ³)	518.1	385.1	754.2	634.1	808
Leca [®] 2/4	(kg/m ³)	329.4	338.6	296.1	306	271
Cimento CEM I 42.5	(kg/m ³)	350	400	350	400	350
Água	(l/m ³)	175	200	140	160	140
Aditivo – Glenium 52 [®]	(l/m ³)	-	-	6.13	6.13	-
Aditivo – Sikament [®] HS1	(kg/m ³)	-	-	-	-	0.5
Volume de vazios	(l/m ³)	30	30	30	30	30
Relação A/C		0.5	0.5	0.4	0.4	0.4
Massa volúmica	(kg/m ³)	1450	1460	1575	1580	1650

Na Figura 2 apresenta-se a evolução da resistência à compressão em provetes cúbicos de 100 mm de lado. Foram ensaiados cubos às idades de 7 e 28 dias. O valor da resistência à compressão aumenta com a quantidade de cimento utilizada, mas a sua evolução no tempo é reduzida. Os valores de resistência à compressão atingidos por estes betões indicam que estes podem ser utilizados como betões estruturais, apesar de serem ainda necessários mais ensaios experimentais que permitam a quantificação de outras propriedades.

Verificou-se também que a redução da quantidade de água utilizada proporcionou um aumento da resistência à compressão. No entanto, é preciso ter em conta que a redução de água, mantendo uma adequada

trabalhabilidade, só foi possível mediante a utilização de um superplastificante. A utilização de um superplastificante em pó, resultou num aumento de resistência inicial, tal como aconteceu para as composições em que foi utilizado superplastificante líquido, mas depois a evolução da resistência no tempo aproxima-se mais à que se verifica nos betões sem superplastificante.

Comparando os resultados obtidos para cubos de 100 mm de lado e cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura da composição B3.1f, verifica-se uma evolução da resistência à compressão em valor absoluto similar, entre os 7 e os 28 dias, sendo os valores obtidos para cubos cerca de 6 a 7 % superiores aos obtidos para cilindros.

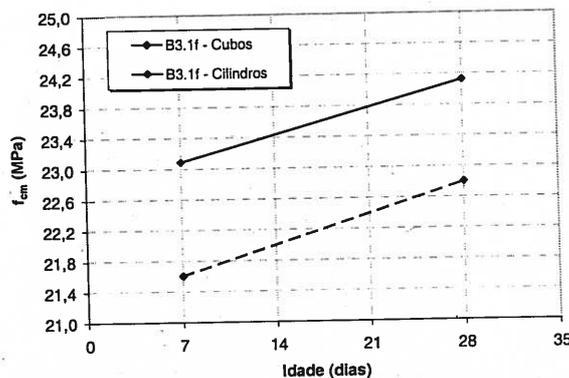
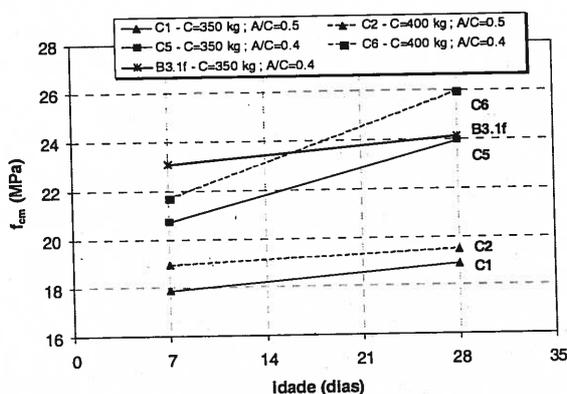


Fig 2 – Ensaio de resistência à compressão em cubos e cilindros

4 BETÃO LEVE DE ELEVADA RESISTÊNCIA

4.1 Composição

O objectivo desta segunda fase do trabalho consistiu em produzir e determinar as características mecânicas de um betão leve de elevada resistência (BLER). O método de Faury foi utilizado na determinação da sua composição e as quantidades de água e superplastificante foram definidas em função de uma adequada trabalhabilidade do betão.

Com o intuito de produzir um betão leve de elevada resistência do tipo LC50/60, procurou-se estudar uma composição, com os agregados de argila expandida disponíveis em Portugal. Um BLER pode incorporar areia natural ou areia leve, sendo neste caso utilizada a primeira.

Para a composição escolhida foram realizadas duas misturas de referência, B15 e B16, para as quais se procurou avaliar a evolução da resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tracção por compressão diametral. Para o BLER utilizado neste trabalho mediu-se em várias amostras uma massa volúmica variável entre 1800 e 1850 kg/m³. A com-

posição do betão leve de elevada resistência estudado é apresentada na Tabela 2.

4.2 Resistência à compressão

O valor da resistência à compressão foi obtido em provetes cúbicos de 100 mm de lado e em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3).

No âmbito do trabalho actualmente em curso no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nomeadamente em ensaios de estruturas mistas aço-betão, [Valente et al, 03], têm sido realizadas numerosas amassaduras que têm por base a composição apresentada na Tabela 2. Em dezoito dessas amassaduras foram betonados provetes cúbicos com 100 mm de lado para caracterização da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias, realizada de acordo com a especificação E-226 do LNEC, [LNEC, 68].

Procura-se caracterizar a evolução da resistência destes betões nas primeiras idades e a variabilidade de resultados. Nas amassaduras realizadas procurou-se manter a composição dos betões e respectiva trabalhabilidade. O abaixamento medido através do *Slump test* foi o parâmetro de

Tabela 2 – Composição do betão leve de elevada resistência

		Quantidade
Arlita® F7 (argila expandida)	(kg/m ³)	525
Areia natural	(kg/m ³)	482
Cimento CEM I 52.5 R	(kg/m ³)	475
Água	(l/m ³)	155
Aditivo – Glenium 52®	(l/m ³)	8.0
Volume de vazios	(l/m ³)	40
Relação A/C		0.325

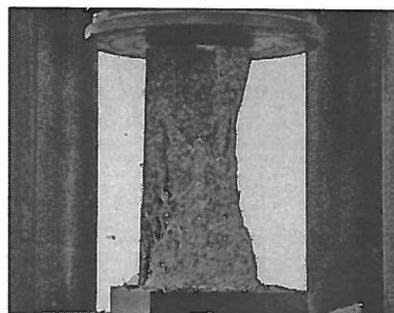


Fig 3 – Ensaio de resistência à compressão em cubos e cilindros

controle utilizado para aferir esta propriedade. O medida do *Slump Test* correspondeu sempre a valores de aproximadamente 20 cm.

Dos valores apresentados na Tabela 3, resulta um valor médio da resistência à compressão aos 7 dias de 61.9 MPa, associado a um desvio padrão de 3.1 MPa e um coeficiente de variação de 5.0%, e um valor médio da resistência à compressão de 65.0 MPa aos 28 dias, associado a um desvio padrão de 3.6 MPa e a um coeficiente de variação de 5.5 %. Da análise destes resultados, pode-se salientar a reduzida evolução da resistência à compressão no tempo, verificando-se em valores médios um aumento de cerca de 3 MPa. Outro aspecto a ter em conta são os reduzidos valores do coeficiente de

variação, verificando-se uma boa homogeneidade nos valores de resistência à compressão obtidos.

A avaliação da resistência à compressão foi também realizada em cilindros para as duas amassaduras de referência, B15 e B16. Como se pode observar na Figura 4 e na Tabela 4, este betão atingiu aos 3 dias uma resistência relativamente elevada, de 48.4 MPa. Desta idade, até aos 28 dias, o aumento de resistência foi modesto, atingindo o valor de 54.3 MPa.

A elevada resistência inicial do BLER é justificada pela utilização do cimento tipo CEM I 52.5R. A reduzida evolução da resistência ao longo do tempo é também uma característica destes betões, [EuroLightCon, 99].

Tabela 3 – Resistência à compressão em cubos de 100 mm de lado (idades de 7 e 28 dias)

Idade (dias)	$f_{c, Cubo1}$ MPa	$f_{c, Cubo2}$ MPa	Média (C1,C2) (MPa)	Idade (dias)	$f_{c, Cubo1}$ MPa	$f_{c, Cubo2}$ MPa	Média (C1,C2) (MPa)		
B3.1	7	61.13	59.51	60.32	B3.1	28	61.13	60.93	61.03
B3.2	7	58.86	57.83	58.35	B3.2	28	63.33	-	63.33
B4.1	7	59.16	58.81	58.99	B4.1	28	58.06	59.11	58.59
B4.2	7	63.37	-	63.37	B4.2	28	69.70	56.31	63.01
B5.1	7	64.39	60.97	62.68	B5.1	28	68.86	71.71	70.29
B5.2	7	64.22	63.75	63.99	B5.2	28	67.86	-	67.86
B8.1	7	65.79	63.98	64.88	B8.1	28	66.21	65.49	65.85
B8.2	7	64.73	63.62	64.17	B8.2	28	65.46	-	65.46
B9.1	7	64.97	-	64.97	B9.1	28	65.09	63.91	64.50
B9.2	7	65.19	65.81	65.50	B9.2	28	63.96	68.53	66.24
B10.1	7	61.39	60.70	61.05	B10.1	28	62.74	65.59	64.16
B10.2	7	52.52	59.10	55.81	B10.2	28	64.83	64.07	64.07
B11.1	7	65.79	63.72	64.75	B11.1	33	61.58	66.76	64.17
B11.2	7	65.68	59.29	62.48	B11.2	33	64.61	60.60	62.60
B12.1	7	61.19	60.77	60.98	B12.1	28	68.68	-	68.68
B12.2	7	62.40	66.08	64.24	B12.2	28	67.81	68.71	68.26
B13.1	7	59.72	-	59.72	B13.1	28	68.37	68.60	68.49
B13.2	7	58.37	59.04	58.71	B13.2	28	66.12	-	66.12

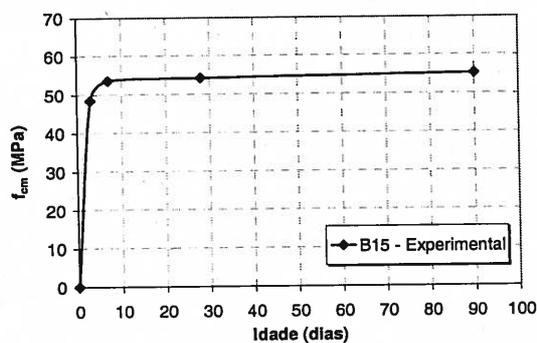


Fig 4 – Variação da resistência à compressão com a idade do betão

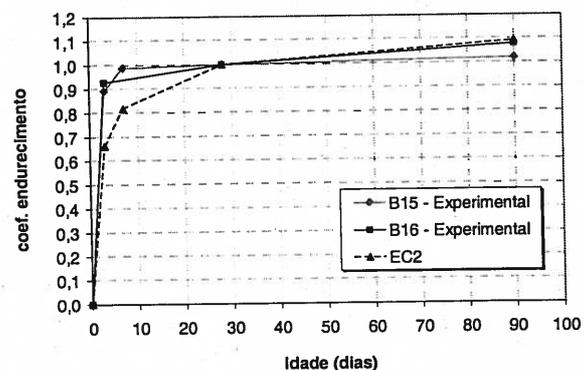


Fig 5 – Evolução do coeficiente de endurecimento com a idade

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados sobre provetes cilíndricos aos 3, 7, 28 e 90 dias, apresentando-se os resultados na Tabela 4. Os resultados de resistência à compressão obtidos para as duas amassaduras são muito similares, apesar de o betão B16 apresentar um aumento de resistência mais acentuado ao longo do tempo.

O EC 2, [CEN, 92], propõe uma expressão para estimar o valor da resistência à compressão em várias idades, a partir do valor da resistência à compressão determinado aos 28 dias,

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2)$$

sendo, $t_1 = 1$ dia, t - idade do betão considerada, s - coeficiente relacionado com o tipo de cimento.

Segundo o EC2, coeficiente de endurecimento aos 7 dias, $\beta_{cc}(t)$, tem o valor de 0.82, bastante inferior ao determinado experimentalmente a partir dos ensaios realizados em cubos de 100 mm de lado (Tabela 3). Neste caso, obteve-se um valor médio de 0.95 para as várias amassaduras que nessa tabela se apresentam. No caso da utilização de cilindros, correspondentes à amassadura B15, o coeficiente de endurecimento tem valor igual a 0.98, próximo do que foi determinado para cubos.

Na Figura 5 apresentam-se os valores do coeficiente de endurecimento obtidos experimentalmente a partir dos ensaios sobre cilindros e os valores do coeficiente de endurecimento obtidos a partir das equações (1) e (2), com o intuito de avaliar as diferenças na evolução da resistência à compressão deste betão leve e de um betão de densidade normal e igual resistência à compressão. Mesmo tendo em conta a utilização de um cimento de endurecimento rápido, verifica-se que o betão leve utilizado apresenta uma evolução de

resistência à compressão mais rápida do que a que seria expectável para um betão densidade normal, com valores elevados do coeficiente de endurecimento, logo aos 3 dias. A partir da idade de 28 dias, os valores de resistência mantêm-se praticamente constantes.

4.3 Módulo de elasticidade

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade foram realizados de acordo com a especificação E-397 do LNEC, [LNEC, 93]. O ensaio realizou-se em provetes cilíndricos, idênticos aos utilizados no ensaio de resistência à compressão, que foram sujeitos a uma carga axial de compressão aplicada incrementalmente.

Para a realização das medições necessárias, foram colocados dois anéis circulares a cerca de 1/3 da altura dos cilindros. Os anéis são concêntricos com os cilindros e são fixos em 3 pontos com igual espaçamento radial. Os transdutores de deslocamento são colocados em suportes próprios, localizados entre os pontos de fixação (Figura 6).

Em cada ensaio foram realizados ciclos de carga e descarga, tendo-se obtido medições de extensão com diferenças inferiores a 10% entre ciclos. Os valores de carga aplicados foram definidos de modo a obter valores de tensão entre 0.5 MPa e $0.3 \times f_{cm}$ à data de ensaio. Deste modo, espera-se que o betão apresente um comportamento elástico nos intervalos de carga aplicados, pelo que será possível medir o valor do módulo de elasticidade através da inclinação da recta σ - ϵ . O módulo de elasticidade é medido na fase de carga do provete.

O ensaio foi repetido para várias idades do betão: 3, 7, 28 e 90 dias, sendo testados 3 provetes para cada idade, provenientes da amassadura de referência B16. O módulo de elasticidade medido em cada idade corresponde à média desses 3 valores (Tabela 4).

O EC2, [CEN, 92], propõe a expressão (3) que permite relacionar o valor da resis-

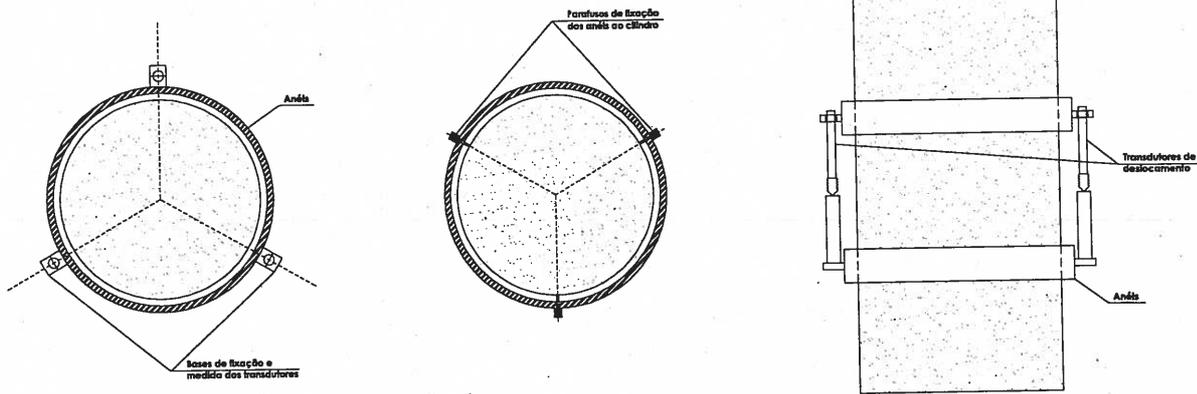


Fig 6 – Montagem para o ensaio de Módulo de elasticidade

Tabela 4 – Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão leve de elevada resistência, ao longo do tempo

	Data de betonagem	Idade à data de ensaio (dias)	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade	Previsão EC2
			f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	$E_{cm, BLER}$ (GPa)
B15	05-02-03	3	48.45	-	24.97
B15	05-02-03	7	53.63	-	25.75
B15	05-02-03	28	54.29	-	25.84
B15	05-02-03	90	55.31	-	25.99
B16	11-02-03	3	48.30	20.27	24.95
B16	11-02-03	7	-	22.10	-
B16	11-02-03	28	52.10	23.07	25.52
B16	11-02-03	90	56.23	23.32	26.12

tência à compressão com o valor do módulo de elasticidade, no caso de betões de densidade normal

$$E_{cm}(t) = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (3)$$

Tratando-se de betões leves, o valor do módulo de elasticidade pode ser calculado afectando o valor do módulo de elasticidade de um betão de densidade normal da mesma classe de resistência com o coeficiente η_E , (4), sendo, $\eta_E = (\rho/2200)^2$.

$$E_{lcm}(t) = \eta_E \cdot E_{cm}(t) \quad (4)$$

Segundo Zhang, [Zhang et al, 90], a relação entre os valores do módulo de elasticidade e da resistência à compressão

de um betão leve é traduzida pela equação (5).

$$E_c = 1.19 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (5)$$

Também a norma norueguesa NS 3473 [NS, 98] propõe a expressão (6) para determinar este parâmetro.

$$E_c = 9500 f_{ck}^{0.3} \cdot (\rho/2200)^2 \quad (6)$$

Na Figura 7 apresentam-se os resultados dos valores do módulo de elasticidade medidos experimentalmente e estimados a partir das equações (3), (4), (5) e (6). Os valores esperados para o módulo de elasticidade são superiores aos que foram experimentalmente medidos, quando se utilizam as expressões do EC2, (3) e (4). As diferenças são significativas, verificando-se valores da ordem dos 4 GPa. Pelo contrário,

a utilização da expressão proposta por Zhang, (5), resulta em valores do módulo de elasticidade inferiores aos obtidos experimentalmente. Presume-se que as diferenças observadas resultem principalmente do tipo de agregados leves utilizados, cujas características dependem da sua proveniência. No caso da expressão (6), proposta na norma norueguesa NS 3473, os valores obtidos são próximos dos verificados experimentalmente. É de salientar que a tendência observada na evolução do módulo de elasticidade a partir dos 7 dias é similar nos vários casos.

Na Tabela 5 apresentam-se os valores de resistência à compressão em cilindros e módulo de elasticidade do betão utilizado para as várias amassaduras realizadas. Os respectivos ensaios foram executados a diferentes idades do betão, sempre superiores a 120 dias. Considerou-se que a longo prazo, a evolução da resistência à compressão do betão é reduzida, pelo que se optou por comparar directamente os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade reunidos na Tabela 5.

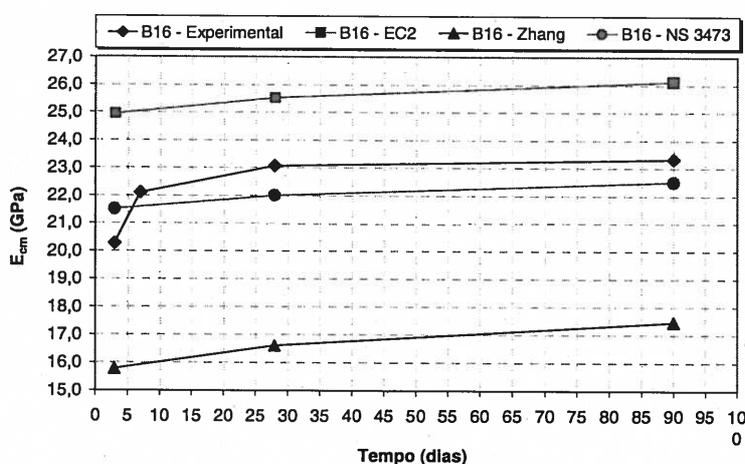


Fig 7 – Variação do módulo de elasticidade com a idade do betão

Tabela 5 - Propriedades do betão

Idade (dias)	Massa volúmica (kg/m ³)	f_{cm}	f_{cm}	E_{cm}	E_{cm}	
		(Amassadura BX.1) (MPa)	(Amassadura BX.2) (MPa)	(Amassadura BX.1) (GPa)	(Amassadura BX.2) (GPa)	
B8	332	1976.8	62.57	64.19	27.72	28.14
B9	330	1987.1	65.79	64.14	29.30	27.78
B10	324	1966.5	56.20	56.96	25.47	26.50
B11	316	1925.8	58.36	57.38	26.31	25.80
B12	307	1835.4	57.36	55.93	26.98	28.90
B13	297	1854.2	52.43	55.07	26.39	26.36
B14	272	1853.7	61.98	57.08	28.05	26.95
B17	195	1887.2	52.73	54.71	24.44	25.01
B18	187	1916.7	52.01	59.96	24.06	24.91
B19	181	1925.8	53.61	57.25	24.27	25.08
B20	142	1886.2	62.40	55.03	25.27	24.51
B21	139	1851.1	55.58	54.76	26.45	25.01
B22	152	1924.6	53.29	54.84	22.48	22.28
B23	179	1906.5	55.17	54.10	21.73	22.80
B24	179	1892.4	65.83	56.64	28.13	27.91
B25	171	1905.4	59.38	56.78	26.33	25.62
B26	135	1868.0	55.61	55.05	24.07	24.39
B27	133	1873.7	56.64	52.62	24.43	24.51
B28	126	1914.7	54.09	52.69	22.45	22.46
B29	130	1913.0	57.18	56.77	24.37	24.58

Da análise dos valores apresentados na Tabela 5, resulta um valor médio da resistência à compressão de 56.9 MPa, associado a um desvio padrão de 3.75 MPa e um coeficiente de variação de 6.6%. Este último valor é reduzido, o que confirma os resultados anteriormente apresentados na Tabela 3 e traduz a homogeneidade das características resistentes deste betão, tal como se tinha observado nos ensaios com cubos. Comparando o valor de resistência à compressão obtido para cubos de 100 mm de lado (resultados obtidos aos 28 dias) e cilindros de 150 mm de diâmetro, verifica-se uma diferença média de 8 MPa.

Do mesmo modo, resulta um valor médio do módulo de elasticidade de 25.5 GPa, associado a um desvio padrão de 1.91 GPa e um coeficiente de variação de 7.5%. O valor médio determinado para o módulo de elasticidade corresponde a cerca de 70% do valor de módulo de elasticidade que seria de esperar para um betão de densidade normal com a mesma resistência à compressão.

De acordo com a Figura 8, verifica-se que existe uma relação de dependência entre os valores módulo de elasticidade e os valores da massa volúmica aparente dos provetes, o que poderá ser uma razão para alguma da variação nos valores do módulo de elasticidade.

4.4 Compressão diametral

O ensaio de compressão diametral, representado na Figura 9 permite determinar a resistência à tracção do betão por via indirecta.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga distribuída ao longo de duas geratrizes do provete cilíndrico. De forma a garantir a aplicação da carga segundo duas geratrizes diametralmente opostas, o provete é centrado na prensa de ensaio, segundo a montagem apresentada na Figura 9.

São utilizados provetes com 15 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento de geratriz, de modo a que estes se encontrem totalmente dentro dos pratos da prensa utilizada durante a execução do ensaio. No decorrer de todos os ensaios verificam-se roturas do tipo apresentado na Figura 9.

A tensão de tracção máxima aplicada ao provete é calculada a partir da equação (7), em que, P – carga aplicada (kN); L – espessura do provete (m); D – diâmetro do provete (m).

$$\sigma_c = \frac{2P}{\pi DL} \quad (7)$$

Segundo Zhang, [Zhang, 90], é possível estabelecer uma relação entre os valores da resistência à compressão de um betão leve e os valores da resistência à tracção, traduzida pela equação (8), em que f_c corresponde à resistência à compressão do betão e f_{ct} corresponde à resistência à tracção obtida com o ensaio de compressão diametral.

$$f_{ct} = 0.23 \cdot \sqrt[3]{f_c^2} \quad (8)$$

Dos ensaios realizados apresentam-se resultados na Tabela 6 e na Figura 10.

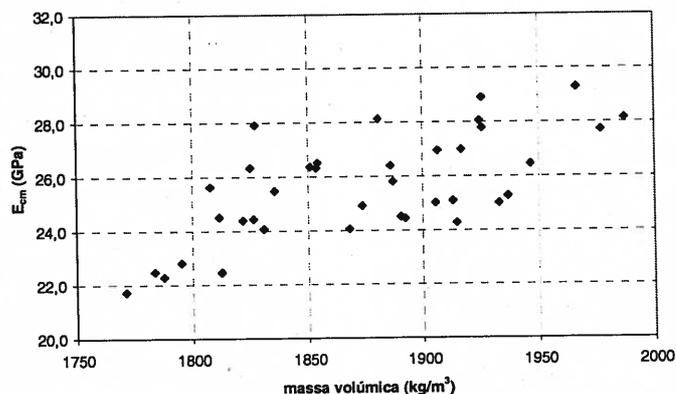


Fig 8 – Relação entre módulo de elasticidade e massa volúmica aparente

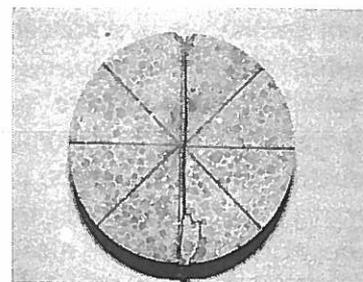
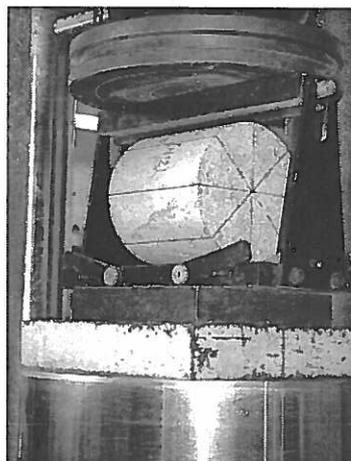
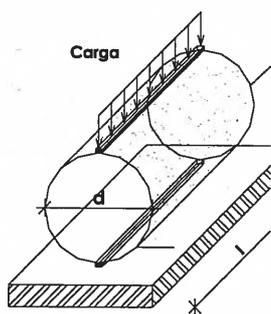


Fig 9 – Ensaio de compressão diametral

Tabela 6 – Resistência à tracção por compressão diametral

Idade (dias)	f_{ctm} (EXP) (MPa)	f_{ctm} (Zhang) (MPa)
3	2.77	3.06
7	3.12	3.27
28	3.25	3.30
90	3.47	3.34

f_{ctm} (EXP) - tensão de tracção experimental (MPa);

f_{ctm} (Zhang) - tensão de tracção determinada segundo Zhang.

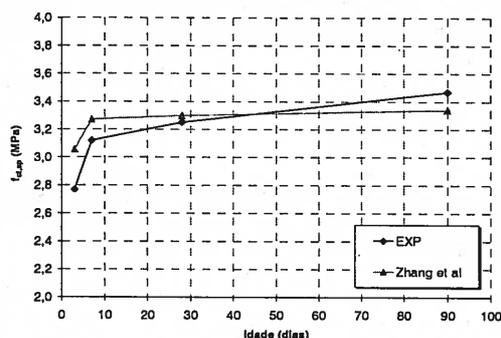


Fig 10 – Evolução da resistência à tracção por compressão diametral

Verifica-se que os valores determinados experimentalmente e os valores calculados com a expressão (9) são bastante próximos, embora se observe um crescimento mais acentuado da resistência à tracção por compressão diametral nos betões testados.

De acordo com Curcio, [Curcio et al, 98], o valor da resistência à tracção por

compressão diametral corresponde a cerca de 6 a 6.5% do valor da resistência à compressão em cilindros. Nos ensaios realizados verificaram-se sempre valores próximos dos 6%.

5 CONCLUSÕES

Os estudos que têm sido desenvolvidos no LEST-UM visam caracterizar experimentalmente as propriedades mecânicas betões leves. Neste trabalho, realizaram-se ensaios experimentais de resistência à compressão, módulo de elasticidade e compressão diametral.

Numa primeira fase, verificou-se que é possível fabricar betões leves adequados à utilização em obra, com características de resistência e trabalhabilidade similares às dos betões de densidade normal. A obtenção de betões leves com maior resistência à compressão resulta essencialmente da utilização de agregados mais densos. Na sequência da obtenção de composições adequadas, o estudo prosseguiu para a caracterização mecânica dos betões de elevada resistência, tendo-se verificado que para a mesma classe de resistência à compressão, se obtêm valores de módulo de elasticidade e resistência à tracção inferiores aos que seriam de esperar num betão de densidade normal, o que resulta do tipo de agregado utilizado. As características mecânicas do betão de elevada resistência testado mostraram

reduzida variabilidade e em face dos resultados obtidos, considera-se promissora a sua utilização.

6 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado pelo Projecto de investigação *Sapiens* ECM/33067/99 - "Steel-concrete composite bridges: Use of lightweight high performance concrete", do Programa PRAXIS XXI, financiado pelo FEDER no âmbito do POCTI. Agradece-se também ao LEST-UM, onde o programa experimental foi realizado.

7 REFERÊNCIAS

- [CEN, 92] Eurocode 2, ENV 1992: *Design of concrete structures*. European Committee for Standardisation (CEN), 1992.
- [Curcio et al, 98] Curcio, L.; Galeota D.; Gallo, A.; Giammatteo, "High Performance Lightweight Concrete for the Precast Prestressed Industry", Proceedings 4th International CANMET/ACI/JCI Symposium, Tokushima, Japão, pp. 389-406.
- [Daly, 00] Daly, A. F. G., "Use of LWAC in Bridges", 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, Norway, 18-22 June 2000, pp. 345-354.
- [EuroLightCon, 99] EuroLightCon, Report BE96-3942/R2 "LWAC Material properties - state of the art", Norway, April 1999.
- [LNEC, 68] Especificação E-226 do LNEC (1968): Betão - Ensaio de compressão.
- [LNEC, 93] Especificação E-397 do LNEC (1993): Betão - Ensaio de módulo de elasticidade.
- [Magalhães et al, 02] Magalhães, A. F.; Jalali, S. e Cruz, P.J.S., "Durability of High Performance Lightweight Aggregate Concrete", XXX IAHS World Congress on Housing, Coimbra, Portugal, 9-13 September 2002, Vol. 3, pp 1753-1760.
- [NS, 98] NS 3473 E, *Design of concrete structures*, Norwegian standard, English vers., 1998.
- [Valente et al, 03] Valente, I.; Cruz, P. J. S.; A. F. Magalhães (2003), "The use of high strength LWC on composite structures and bridges", Lightweight Bridge Decks - European Bridge Engineering Conference, 27-28 March 2003, paper no. 7, Roterdão, Holanda.
- [Vieira, 99] Manuel Vieira, "Betões de elevado desempenho com agregados leves. Durabilidade e microestrutura", Tese de Mestrado, IST e LNEC, Maio de 1999.
- [Zhang, 90] Zhang, M. H.; Gjvorv, O. E., "Mechanical properties of HSLWC", ACI Materials Journal, 1990, vol. 88, n°3, pp.240-247.

