

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM BETÃO LEVE DE ELEVADA RESISTÊNCIA



ISABEL VALENTE
Assistente
Universidade do Minho
Guimarães



PAULO J. S. CRUZ
Prof. Associado
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

Descrevem-se, neste artigo, os ensaios experimentais de caracterização do comportamento instantâneo e diferido de um betão leve de elevada resistência, realizados no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST-UM). O objectivo é produzir e caracterizar um betão leve para ser utilizado em elementos estruturais.

1. INTRODUÇÃO

O betão é um material heterogéneo cujas propriedades dependem das propriedades individuais dos seus constituintes bem como da sua compatibilidade. As propriedades dos agregados leves podem diferir significativamente umas das outras, dependendo sobretudo do material no seu estado natural e do processo de produção. A principal influência das propriedades dos agregados leves no betão leve deve-se ao facto de estes corresponderem a valores superiores a 50% do volume do betão. Podem ser apontadas a trabalhabilidade, resistência, módulo de elasticidade, densidade e durabilidade, como algumas das principais propriedades que são influenciadas, [1]. O betão leve é, em geral, produzido para ser utilizado quer como betão estrutural, quer como isolamento. Quando utilizado como betão estrutural são propriedades decisivas a capacidade resistente e o módulo de elasticidade. Quando utilizado como isolamento é de maior interesse a condutividade térmica, que aumenta com a diminuição da densidade. 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.

O estudo refere-se à caracterização mecânica de uma composição de betão leve de elevada resistência que se julgou adequada e para a qual foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de resistência à compressão sobre cilindros;
- Ensaio de módulo de elasticidade;
- Ensaio de flexão e determinação da energia de fractura;
- Ensaio de retracção e ensaio de fluência.

Com este conjunto de ensaios é possível fazer uma caracterização do comportamento deste tipo de betão. 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 nestes ensaios são de grande importância para o estudo do comportamento de elementos estruturais em que este betão é utilizado, sendo os resultados deste estudo englobados em outros trabalhos actualmente em decurso no LEST-UM.

2. COMPOSIÇÃO E FABRICO DO BETÃO LEVE

Os componentes utilizados na mistura estudada foram: agregado leve – argila expandida, areia natural – granulometria 0 ao N°4, cimento CEM I 52.5 R, água e superplastificante.

A composição do betão leve de elevada resistência estudada é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: 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

O primeiro passo para o fabrico de betão leve consiste na adição da areia e do agregado leve, que 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. Esta adição 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 propriedades resistentes deste material. O passo seguinte consiste na adição do cimento. Juntamente, é adicionada a maior parte da água, 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. Este betão requer uma forte vibração para alcançar uma compactação conveniente, especialmente se a consistência for seca.

3. ENSAIOS REALIZADOS

3.1 Ensaio de resistência à compressão

A caracterização mecânica realizada incluiu a determinação da resistência à compressão em provetes cilíndricos de $\phi 150 \times 300 \text{ mm}^3$. Para os ensaios de caracterização da resistência à compressão do betão foram tomadas como referência uma velocidade de aplicação da tensão com valor de $0.6 \pm 0.4 \text{ MPa/s}$, tal como recomendado em [2]. O ensaio foi repetido para várias idades do betão: 3, 7, 28 e 90 dias, sendo testados 3 provetes para cada idade, dos quais se calcula o valor médio.

3.2 Ensaio de módulo de elasticidade

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade foram realizados de acordo com [3]. O ensaio realizou-se em provetes cilíndricos, que foram sujeitos a uma carga axial de compressão aplicada incrementalmente. 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 $\sigma-\epsilon$. O módulo de elasticidade pode ser determinado para cada ciclo de carga-descarga, pela inclinação da recta de ajuste ao diagrama $\sigma-\epsilon$ na fase de carga do provete.

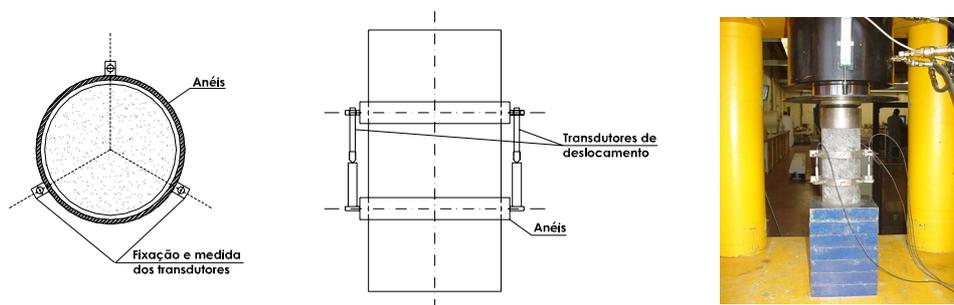


Figura 1: Montagem para o ensaio de módulo de elasticidade

3.3 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi realizado segundo a recomendação da RILEM, [4]. Este ensaio permite quantificar parâmetros como a resistência à tracção e a energia de fractura. Para tal, fabrica-se uma viga de secção quadrada que será sujeita à flexão, mediante a aplicação de uma carga pontual a meio vão. Espera-se que o plano de rotura se situe a meio vão, para o que se realiza um pequeno entalhe após o endurecimento do betão, conforme indicado na Figura 2. Os provetes utilizados apresentam dimensões de $b=100 \text{ mm}$, $d=100 \text{ mm}$ e $L=850 \text{ mm}$. O actuador utilizado tem uma capacidade carga de 25 kN e os apoios permitem a rotação dos pontos de apoio da viga. O ensaio é realizado com controlo da deformação e a medida de controlo corresponde à flecha máxima sofrida pela viga a meio vão.

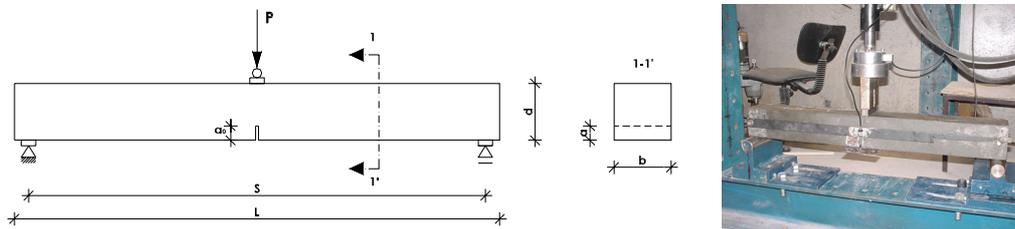


Figura 2: Geometria e montagem do ensaio de energia de flexão

O primeiro parâmetro que resulta da realização destes ensaios é a tensão de tracção máxima a que o betão pode estar sujeito, calculada a partir da expressão (1). A expressão da tensão de tracção máxima é calculada tendo em conta as dimensões da viga. A energia de fractura é calculada a partir da expressão (2),

$$f_t = \frac{3PS}{2b(d-a_0)^2} \quad (1)$$

$$G_F = \frac{(W_0 + mg\delta_0)}{A_{lig}} \quad (2)$$

sendo,

P – carga máxima aplicada; f_t – tensão resistente à tracção; E_c – módulo de elasticidade;
 C_i – declive inicial da curva Carga vs. Deslocamento; W_0 – trabalho de deformação total;
 m_1 – massa da viga entre apoios (kg); m_2 – massa da viga (kg); $m = m_1 + 2m_2$;
 g – aceleração gravítica (9.81 m/s^2); δ_0 – deformação da viga na rotura. (m);
 A_{lig} – área do alinhamento (m^2);

4. RESULTADOS DO ENSAIOS

4.1 Resistência à compressão

A avaliação da resistência à compressão foi realizada em cilindros com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para duas amassaduras de referência, BL15 e BL16. Como se pode observar na Figura 3 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 e a reduzida evolução da resistência ao longo do tempo é uma característica destes betões, [1]. Na Tabela 2 apresentam-se ainda valores de resistência à compressão para mais duas amassaduras resultantes da mesma composição. Estes valores apresentam grande similaridade entre si a cada idade e servem de referência para outros ensaios apresentados nesta comunicação. Apesar da composição ser sempre a mesma, encontram-se algumas diferenças nos valores de massa volúmica, o que reflecte alguma dificuldade em produzir este betão, utilizando inertes com o mesmo teor de humidade em diferentes amassaduras.

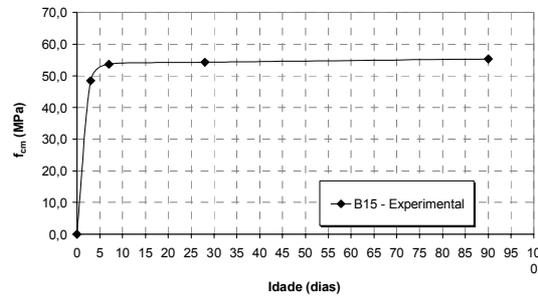


Figura 3: Variação da resistência à compressão com a idade do betão

Tabela 2: Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão leve

	Idade (dias)	Massa vol. (kg/m ³)	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	$E_{c, BLER}$ (GPa) – EC2, [1]
BL15	3	1850	48.45	-	24.97
BL15	7		53.63	-	25.75
BL15	28		54.29	-	25.84
BL15	90		55.31	-	25.99
BL16	3	1850	48.30	20.27	24.95
BL16	7		-	22.10	-
BL16	28		52.10	23.07	25.52
BL16	90		56.23	23.32	26.12
BL42	7	1827	56.43	21.63	25.50
BL42	28		59.54	23.17	25.91
BL43	28	1795	59.07	22.34	24.95

4.2 Módulo de elasticidade

O ensaio foi repetido para várias idades do betão: 3, 7, 28 e 90 dias, sendo testados 3 provetes para cada idade. O módulo de elasticidade medido em cada idade corresponde à média desses 3 valores, apresentados na Tabela 2. O EC2, [5], propõe a expressão (3) que permite relacionar o valor da resistência à compressão com o valor do módulo de elasticidade, no caso de betões de densidade normal. 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),

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

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

sendo, $\eta_E = (\rho/2200)^2$. Para esta amassadura, a massa volúmica é de 1850 kg/m³.

Na Figura 4 apresentam-se os resultados dos valores do módulo de elasticidade medidos experimentalmente e estimados a partir das equações (3) e (4). Os valores esperados para o módulo de elasticidade são superiores aos que foram experimentalmente medidos quando se utilizam as expressões do EC2. As diferenças são significativas, verificando-se valores da ordem dos 4 GPa. Presume-se que as diferenças observadas resultem principalmente do tipo de agregados leves utilizados, cujas características dependem da sua proveniência. É de salientar que a tendência observada na evolução do módulo de elasticidade a partir dos 7 dias é similar nos vários casos.

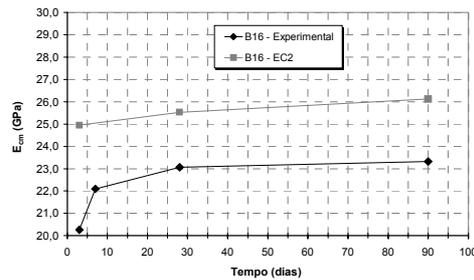


Figura 4: Variação do módulo de elasticidade com a idade do betão

4.3 Flexão

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados do ensaio de flexão. A força máxima e a resistência à tracção por flexão mantêm-se praticamente constantes entre os 7 e os 28 dias de idade, nos ensaios referentes à amassadura BL42. Entre as duas amassaduras BL42 e BL43, verificam-se valores similares de capacidade de absorção de energia e resistência à tracção por flexão. Verifica-se ainda uma capacidade de deformação superior no caso de BL43, como se pode ver nos valores de δ_0 , resultando num incremento da energia de fractura. Em termos absolutos, verifica-se que para o betão leve, os valores da energia de fractura são bastante inferiores aos obtidos para betões de densidade normal com valores de dosagem de cimento e resistência à compressão similares, [6].

Tabela 3: Valores de energia de fractura para o betão leve de elevada resistência

Ref. betão	Ref. provete	Idade de ensaio (dias)	P (kN)	f_t (MPa)	a_0 (mm)	C_i (N/m)	δ_0 (mm)	A_{lig} (m ²)	W_0 (Nm)	G_F [N/m(J/m ²)]
BL42	V1	7	1.81	3.89	25.9	12.66	0.747	7540	0.389	70.88
BL42	V2	7	1.91	4.10	25.6	13.47	0.641	7510	0.384	67.37
BL42	V3	7	1.85	3.98	25.9	12.69	0.701	7520	0.389	69.34
BL42	V5	28	1.81	3.91	25.9	12.66	*	7490	*	*
BL42	V6	28	1.81	3.94	26.0	12.69	*	7440	*	*
BL43	V7	28	1.73	3.59	24.3	11.29	0.834	7640	0.444	80.57
BL43	V8	28	1.74	3.77	25.9	12.14	0.858	7490	0.423	80.37
BL43	V9	28	1.72	3.56	24.5	12.43	0.803	7670	0.419	74.56

* - não se consideram os valores medidos, por deficiência no controlo do ensaio

4.4 Retracção

Os provetes para os ensaios de retracção e de fluência resultaram da amassadura BL36. Para o ensaio de retracção foram preparados cilindros com e sem protecção em relação ao meio ambiente, de forma a medir retracção básica e retracção por secagem. A medição de retracção foi realizada de acordo com [7] e iniciou-se às 24 horas de idade do betão. Os valores de retracção apresentados na Figura 5 foram medidos até cerca dos 180 dias de idade do betão. Numa fase inicial, verifica-se uma expansão do betão leve, que pode ser explicada pela transferência de água das partículas de agregado leve para a matriz, [8]. A partir dos 80 dias, essa evolução altera-se, passando a existir uma retracção básica com evolução mais ou menos constante. A retracção por secagem apresenta também uma evolução mais ou menos constante, cuja progressão aponta para que os valores continuem a crescer nos próximos tempos. Aos 180 dias, o valor da retracção por secagem é de aproximadamente 450 $\mu\text{m/m}$, ultrapassando as previsões do EC2, [5].

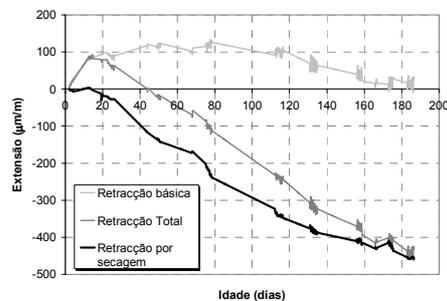


Figura 5: Evolução da retracção

4.5 Fluência

O módulo de elasticidade dos provetes testados nos ensaios de retracção e fluência (BL36) foi determinado aos 28 dias, verificando-se um valor médio de 22.2 GPa. De acordo com [9], o coeficiente de fluência é determinado a partir da expressão (5), sendo a extensão de fluência, $\varepsilon_c(t)$, determinada a partir da expressão (6). Na Figura 6 apresentam-se os resultados de extensões de fluência e de coeficiente de fluência. O valor do coeficiente de fluência é inferior ao previsto pelo EC2, [5], mas a sua tendência aponta para uma evolução ainda significativa.

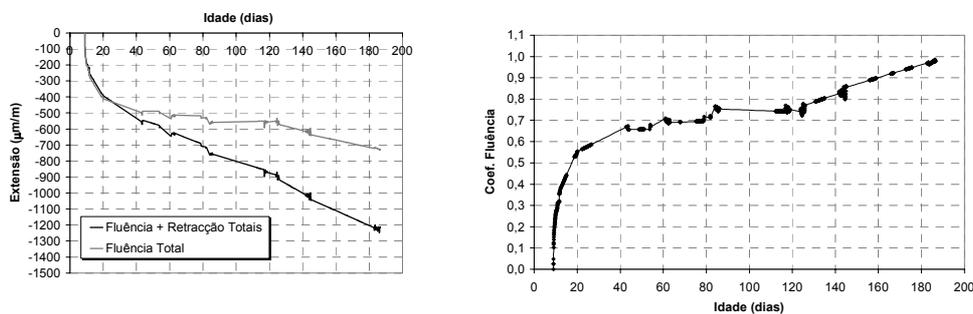


Figura 6: Extensões de fluência e coeficiente de fluência

$$\varphi(t, t_0) = \varepsilon_c(t) \cdot E_{c,28} / \sigma_c \quad (5)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_t(t) - \varepsilon_s(t) - \varepsilon_i \quad (6)$$

$\varepsilon_t(t)$ - extensão total do provete sob tensão num dado tempo t, contada a partir da 1ª leitura;

$\varepsilon_s(t)$ - extensão média medida na mesma idade dos provetes de retracção;

ε_i - extensão instantânea medida logo após a aplicação da carga máxima no ensaio de fluência

5. CONCLUSÕES

Durante este trabalho, foi possível fabricar e caracterizar um betão leve de elevada resistência. Os resultados apresentados são importantes para a caracterização do comportamento instantâneo e de longo prazo de elementos estruturais que utilizem este material. Para a composição estudada, verificaram-se valores de resistência à compressão elevados, podendo-se classificar como um betão leve de elevada resistência. Os módulos de elasticidade determinados são inferiores aos que seriam de esperar para betões de densidade normal de igual resistência, o mesmo acontecendo com a resistência à tracção por flexão e com a energia de fractura. Em termos de comportamento diferido, verificam-se valores de retracção superiores aos esperados, e o coeficiente de fluência apesar de inferior ao esperado, mostra uma tendência de evolução ainda acentuada em tempos próximos.

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. Agradece-se também ao Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde o programa experimental foi realizado.

7. REFERÊNCIAS

- [1] EuroLightCon: *LWAC Material Properties-State-of-the-Art*, Rel. BE96-3942/R2, Abril/99.
- [2] LNEC - Especificação E-226 (1968): *Betão – Ensaio de compressão*.
- [3] LNEC - Especificação E-397 (1993): *Betões – Determinação do módulo de elasticidade*.
- [4] RILEM TC50-FMC (1985): *Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend tests on notched beams*, Materials and Structures, Vol. 18, Nº 106, Jul-Aug, pp 285-290.
- [5] Eurocode 2, ENV 1992: *Design of concrete structures*, CEN, 1992.
- [6] Aires Fernando F. L. Camões de Azevedo: *Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*, Tese de Doutoramento, Univ. do Minho, Julho de 2002.
- [7] LNEC - Especificação E-398 (1993): *Betões – Determinação da retracção e da expansão*.
- [8] EuroLightCon: *Long-term effects in LWAC: Strength under sustained loading Shrinkage of High Strength LWAC*, Rel. BE96-3942/R31, Agosto de 2001.
- [9] LNEC - Especificação E-399 (1993): *Betões – Determinação da fluência em compressão*.
- [10] EuroLightCon: *Creep properties of LWAC*, Rel. BE96-3942/R30, Agosto de 2001.