

Caracterização Mecânica de Betões Estruturais de Agregados Leves



Hugo Costa¹



Eduardo Júlio²



Jorge Lourenço³

RESUMO

A produção de agregados leves, essencialmente de argila expandida, com elevada resistência mecânica e reduzida densidade, juntamente com o desenvolvimento de ligantes e adjuvantes mais eficientes, tornou possível o fabrico de betões estruturais de agregados leves (BEAL) de elevado desempenho.

Neste artigo, apresenta-se um estudo de caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos BEAL, realizado para várias misturas, definidas através de uma metodologia desenvolvida para o efeito, com valores de densidade entre 1.4 e 2.0 e com valores da resistência à compressão entre 20 e 80 MPa. Foram avaliadas propriedades no estado fresco, massa volúmica e consistência, e no estado endurecido, massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos, incluindo o confronto com os valores previstos de acordo com o Eurocódigo 2 (EC2). Apresentam-se as conclusões mais relevantes e propõe-se uma correcção à expressão preconizada pelo Eurocódigo de previsão do módulo de elasticidade dos BEAL.

PALAVRAS-CHAVE

BEAL, propriedades, mecânicas, EC2

¹ ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, hcosta@isec.pt

² ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, ejulio@dec.uc.pt

³ Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, jl@isec.pt

1. INTRODUÇÃO

As primeiras aplicações dos BEAL foram realizadas pelos Romanos em imponentes construções, usando agregados leves naturais de origem vulcânica. No início do século XX, a produção de agregados leves mais resistentes, a partir de partículas de argila e xisto expandidas em forno rotativo, permitiu obter BEAL de reduzida densidade e resistência elevada, tendo sido usado inicialmente na construção de navios de guerra [1]. O desenvolvimento tecnológico da produção de BEAL ao longo do século XX permitiu a melhoria do seu desempenho, criando espaço, essencialmente nas últimas décadas, a novos tipos de aplicação estrutural em edifícios e pontes, plataformas petrolíferas *offshore*, estruturas pré-fabricadas e reabilitação de estruturas existentes [1, 2].

Como principais vantagens dos BEAL referem-se: o reduzido peso próprio dos elementos estruturais associado a um elevado desempenho de resistência; a cura interna melhorada proporcionada pela hidratação interna da matriz ligante com a água libertada do interior dos agregados leves; a retracção reduzida e as elevadas durabilidade e resistência aos ciclos gelo-degelo. Além disso, o BEAL é, comparativamente ao betão de densidade normal (BDN), globalmente mais económico em várias aplicações. Apresenta ainda um bom comportamento térmico, tanto pela reduzida condutibilidade e reduzida expansão térmica, como pela elevada resistência ao fogo [1, 2, 3].

A produção de agregados leves de argila expandida com elevada resistência mecânica e reduzida densidade proporcionou, juntamente com o uso de ligantes mais eficientes (cimentos com elevada classe de resistência e adições de sílica de fumo) e com os adjuvantes superplastificantes redutores de água de alta gama, o desenvolvimento de BEAL de elevado desempenho [4, 5]. A metodologia de composição do BEAL e o controlo da qualidade na sua produção e aplicação são fundamentais ao cumprimento das suas especificações. A caracterização das suas propriedades é essencial à fiabilidade dos estudos científicos e dos modelos de dimensionamento preconizados pelos códigos que traduzem o comportamento de elementos estruturais com este material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A produção de BEAL consiste em misturar o ligante com um conjunto de agregados finos, leves ou de densidade normal, e agregados grossos, leves ou incluindo alguns de densidade normal, numa proporção optimizada de acordo com uma curva granulométrica de referência, adicionando a dosagem de água necessária à hidratação do ligante, garantindo simultaneamente a trabalhabilidade desejada, tendo em conta o adjuvante adoptado. A selecção dos materiais constituintes e as respectivas proporções, resultantes da metodologia de composição adoptada, visam o cumprimento das especificações para o betão.

2.1. Constituintes

No presente estudo, adoptou-se um ligante constituído por um cimento CEM II-A/L 42,5R e uma adição pozolânica de sílica de fumo, Sikacrete[®] HD, de modo a garantir maior estabilidade da mistura, maior resistência e maior durabilidade ao betão, devida à redução da permeabilidade da pasta, a qual assegura maior resistência à corrosão [2, 4]. O adjuvante utilizado nas misturas produzidas foi o Viscocrete[®] 20HE, um superplastificante redutor de água de alta gama, o qual acumula ainda a propriedade de agente de viscosidade, como forma de garantir homogeneidade ao BEAL e de evitar a segregação.

Os agregados adoptados nas diferentes composições de BEAL consideradas são maioritariamente leves, embora se tenham utilizado igualmente areias de densidade normal ou a mistura destas com areia leve. Utilizaram-se dois tipos de areia de densidade normal, areia fina 0/2 mm (AF0/2) e areia média 0/4 mm (AM0/4), e uma areia leve de argila expandida Leca[®] areia 0.5/3mm (LA0/3), Fig. 1.



Figura 1. Agregados finos, leves e de densidade normal.

Como agregados grossos, usaram-se, maioritariamente, os agregados leves estruturais de argila expandida com duas classes de resistência e granulométricas diferentes, Leca® estrutural 2/4 mm (LE2/4) e Leca® estrutural 4/12 mm (LE4/12), Fig. 2. Foram ainda usados, em amassaduras preliminares, dois tipos de agregado leve de menor massa volúmica e menor resistência, Leca® godo 2/4 mm (LG2/4) e Leca® enchimento bombagem 3/8F (LEB3/8F).

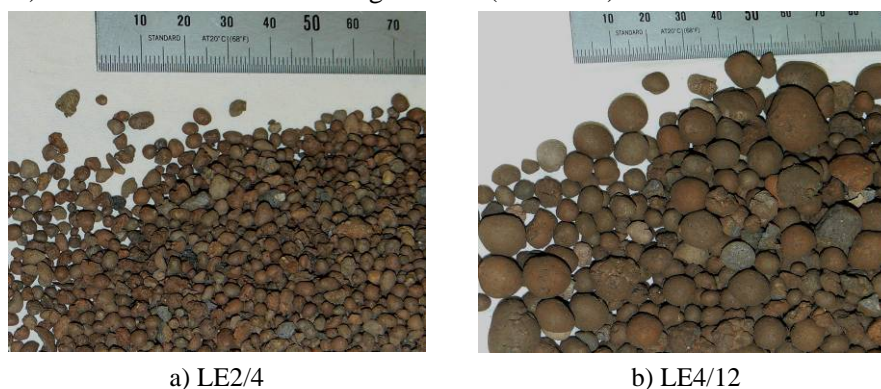


Figura 2. Agregados grossos leves.

A forma dos agregados leves de argila expandida é predominantemente esférica, com uma estrutura interna alveolar ou porosa, fechada numa camada superficial rugosa mais densa e rígida, Fig. 3.



Figura 3. Forma e estrutura de um grão de agregado leve (material sobre papel milimétrico).

Efectuou-se a caracterização dos seguintes parâmetros das partículas, essenciais à composição do BEAL: granulometria; massa volúmica; baridade; teor de humidade interior; absorção de água; absorção total. A resistência dos agregados leves, medida através do ensaio de esmagamento, foi igualmente determinada e pode-se traduzir em força ou em tensão. Apresentam-se, no Quadro 1, as propriedades físicas mais relevantes dos agregados leves Leca®.

Quadro 1. Propriedades dos agregados Leca®. Legenda: ρ_{p0} - massa volúmica das partículas; ρ - baridade; H_p - teor de humidade interior das partículas; A_s - absorção total; A_N - absorção de água; F_E - resistência dos agregados leves.

Agregado	ρ_{p0} [kg/dm ³]	ρ [kg/dm ³]	H_p [%]	A_s [%]	A_N [%]	F_E [kN]
LE2/4	1.33	0.74	9.6	11.5	1.6	110
LE4/12	1.09	0.60	19.3	19.7	0.2	68
LA0/3	0.99	0.57	4.1	10.9	6.0	52
LG2/4	0.65	0.36	3.4	12.8	9.1	18
LEB3/8F	0.61	0.35	2.3	15.1	12.6	12

2.2. Metodologia de composição

A metodologia desenvolvida e utilizada na composição dos BEAL, baseia-se no ajuste otimizado da mistura de agregados à curva granulométrica de referência de Faury, com uma versatilidade que permite ajustar a mistura à densidade e resistência pretendidas, fornecendo uma previsão fiável destas propriedades, assim como da rigidez [4, 6]. Esta metodologia consiste nos seguintes passos [5]: a) especificação do comportamento do betão; b) selecção e caracterização dos constituintes; c) previsão da compacidade; d) quantificação da pasta ligante, definindo as relações ponderais da água com o ligante e a compacidade da pasta ligante, γ ; e) quantificação dos agregados através do método das curvas granulométricas de referência, permitindo o ajuste da relação volumétrica grossos/finos e o acerto da massa volúmica e da consistência; f) previsão das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade; g) definição da composição do BEAL, com as proporções volumétricas absolutas dos constituintes e as proporções ponderais (de massa), onde os valores do teor de humidade e da absorção de água dos agregados leves são essenciais, uma vez que estes parâmetros afectam as dosagens dos agregados leves e da água de absorção e condicionam as propriedades do betão leve.

A previsão da resistência da matriz ligante, $f_{c,j}$, é obtida pela expressão de Feret, sendo o coeficiente $k_{f,j}$ à idade j função do tipo de cimento e do tipo e dosagem da adição:

$$f_{c,j} = k_{f,j} \times \gamma^2 \quad (1)$$

A previsão da resistência mecânica do BEAL é obtida em função de $f_{c,j}$, afectando esse valor por um coeficiente percentual de redução de resistência, c_f , referente à perda provocada pelos agregados leves na mistura, Fig. 4, comparativamente a um BDN com igual matriz ligante e granulometria equivalente. O declive da recta, m_f (%/l), corresponde à redução de resistência por unidade de volume de agregado. A previsão do módulo de elasticidade do BEAL é efectuada a partir do valor indicado no EC2 para o BDN de resistência equivalente, multiplicando-a por um coeficiente percentual de redução de rigidez, c_E , referente aos agregados leves, Fig. 4, e por um coeficiente em função da consistência do betão. O declive da recta, m_E (%/l), corresponde à redução de resistência por unidade de volume de agregado.

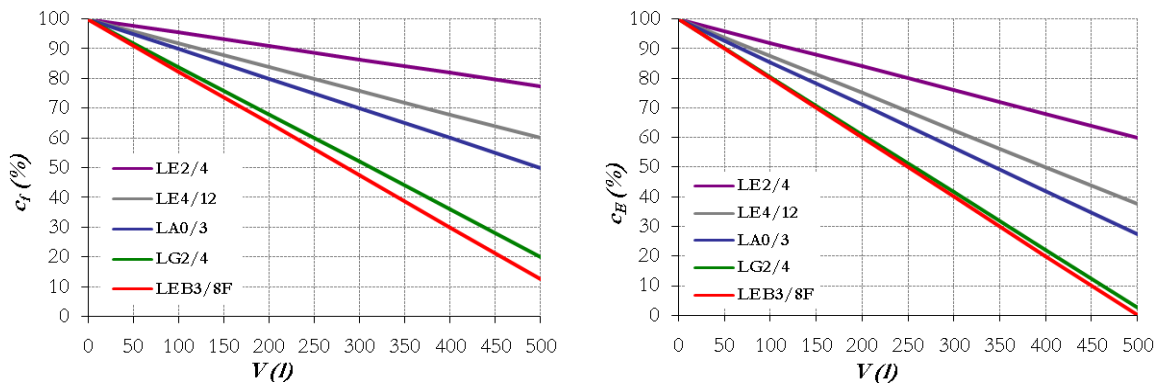
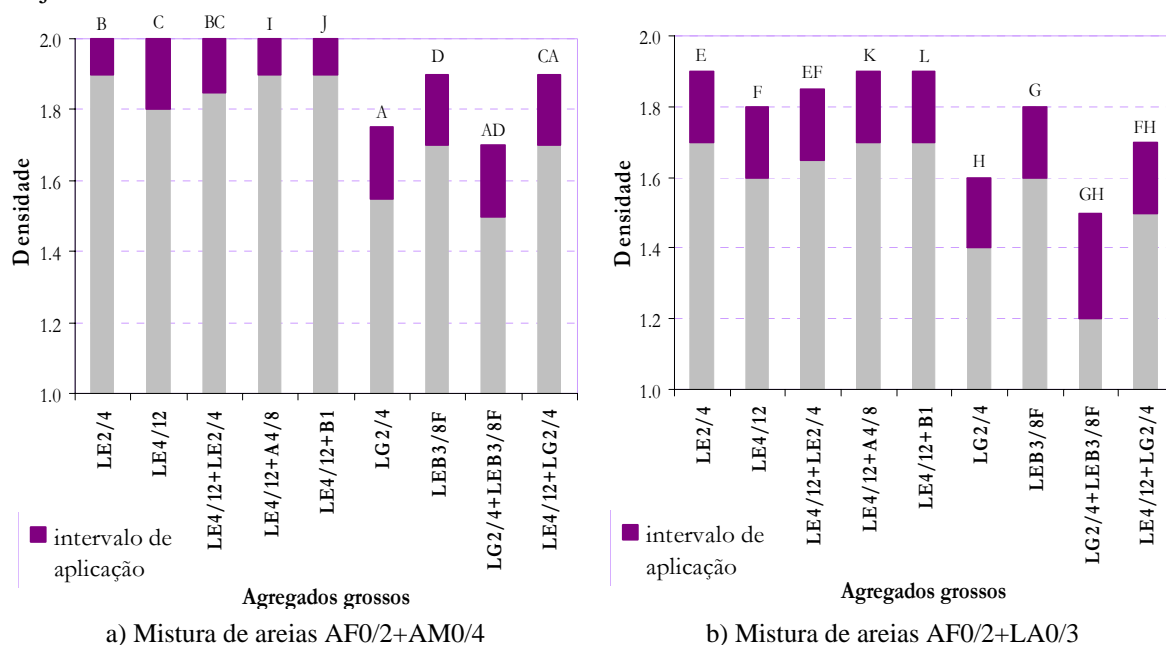


Figura 4. Coeficientes de redução de resistência e de rigidez, c_f e c_E , respectivamente.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Amassaduras de BEAL estudadas

A mistura combinada dos agregados leves com os agregados de densidade normal resulta, geralmente, na obtenção de BEAL de argila expandida com densidade compreendida entre 1.4 e 2.0, embora se possa reduzir até cerca de 1.0, caso se utilizem, na mistura com a matriz ligante, apenas agregados leves de argila expandida. Foram estudadas diversas tipologias de BEAL, Fig. 5, resultantes da composição de várias combinações de agregados grossos e finos, leves e de densidade normal. O enquadramento da densidade no intervalo de aplicação, para cada tipologia, depende, além do ajuste à curva granulométrica de referência, do ajuste dos parâmetros da composição que afectam as proporções dos agregados (relação grossos/finos e proporções relativas da pré-mistura de finos e de grossos). Além da densidade, a resistência, a rigidez e a consistência do BEAL são também afectadas. Assim, as previsões da resistência e da rigidez do BEAL são influenciadas, não só pelos parâmetros referidos, mas também pelo tipo e dosagem dos ligantes e do adjuvante, da compacidade e da consistência [4, 5]. Estas escolhas devem ser ponderadas no enquadramento das especificações definidas, efectuando as opções racionais que permitam a obtenção do betão com as propriedades desejadas minimizando o custo.



a) Mistura de areias AF0/2+AM0/4

b) Mistura de areias AF0/2+LA0/3

Figura 5. Intervalo de densidade de cada tipologia de BEAL, para vários tipos de mistura de agregados grossos e finos.

Das tipologias estudadas seleccionaram-se, essencialmente, quatro tipologias a caracterizar (B, E, C, F), com densidades compreendidas entre 1.6 e 2.0, e uma tipologia (GH) de densidade 1.4. Variou-se a resistência do betão para cada tipologia, variando a dosagem de cimento (500, 425 e 350 kg/m^3), mantendo a percentagem de adição, e ajustaram-se os restantes parâmetros. Definiu-se consistência S4, para a generalidade dos betões, e S5, nas composições com maior dosagem de ligante das tipologias C e F.

3.2. Caracterização das propriedades dos BEAL

No estado endurecido, caracterizaram-se propriedades físicas e mecânicas dos BEAL: massa volúmica, resistências à compressão e à tracção, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. A massa volúmica do betão foi caracterizada no estado seco ao ar e os valores foram consistentes com a previsão, com erros inferiores a 1.0 %, comprovando a fiabilidade da metodologia desenvolvida.

3.2.1. Resistências mecânicas

O valor médio da resistência à compressão, f_{lcm} , foi determinado aos 3, 7, 14, 28 e 90 dias de idade, em provetes cúbicos de 150 mm de aresta, e a caracterização do valor médio da resistência à tracção, f_{lctm} , foi efectuada aos 28 dias, por compressão diametral, em provetes cilíndricos com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro, Fig. 6. Os valores obtidos para cada idade resultam da média aritmética dos resultados do ensaio de três provetes.

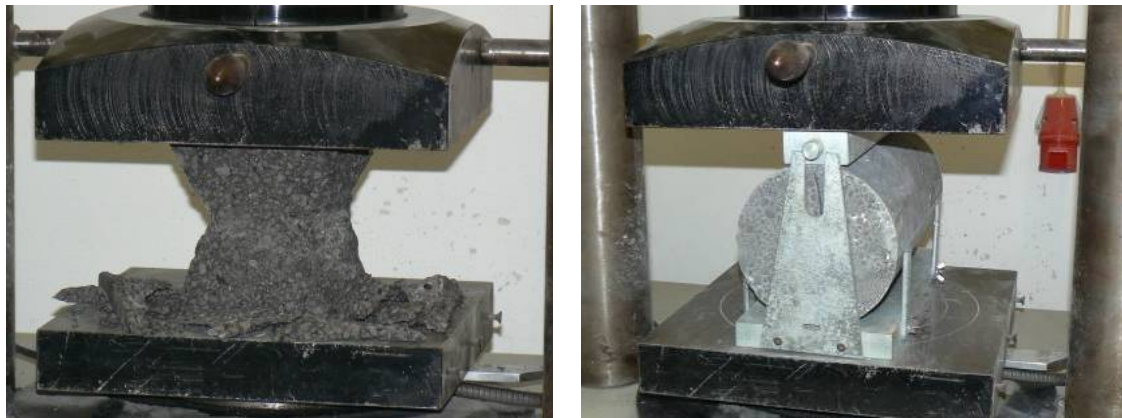


Figura 6. Ensaio de caracterização da resistência à compressão e à tracção (compressão diametral).

Na Fig. 7 apresenta-se a evolução dos valores medidos da resistência à compressão, com a idade, para os BEAL das tipologias B, E, C e F, respectivamente, e as correspondentes curvas de previsão de endurecimento propostas pelo EC2 [7].

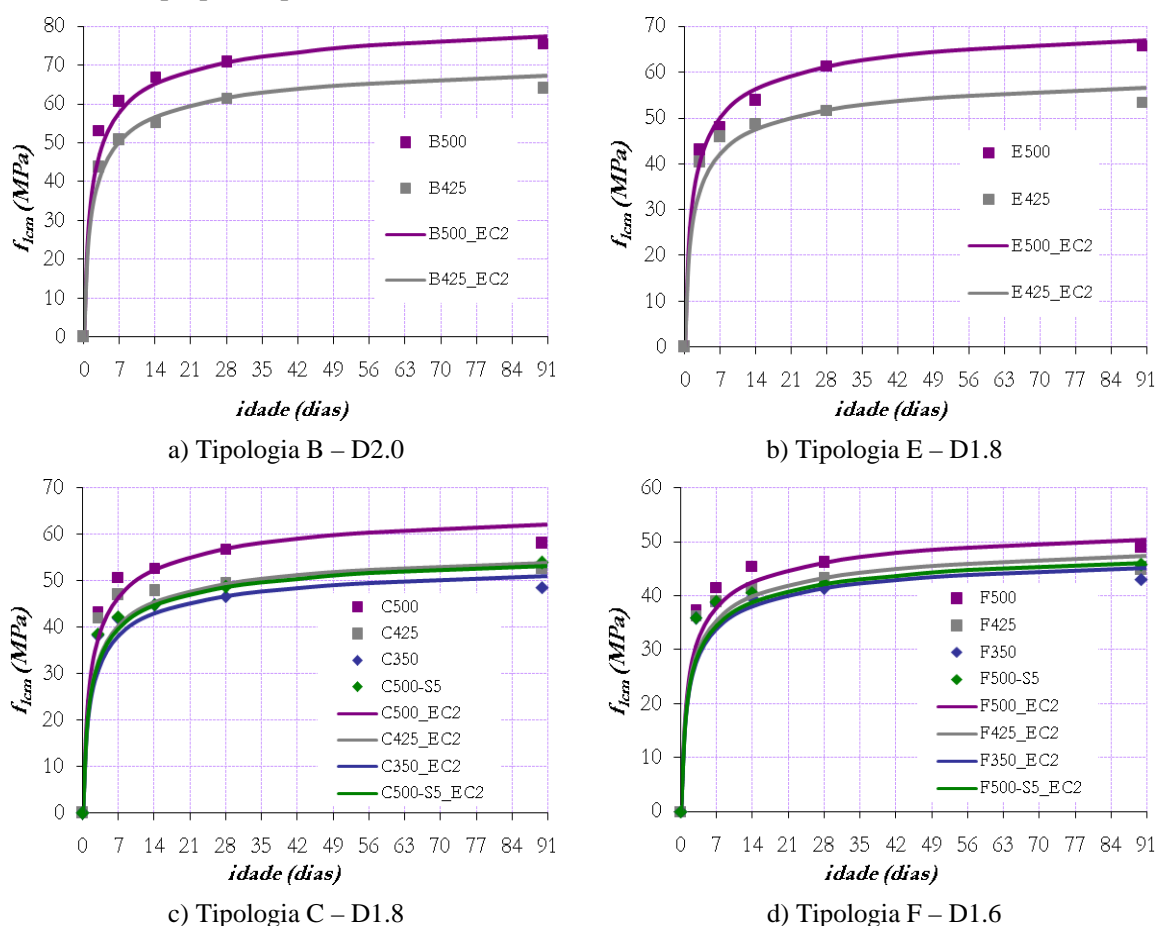


Figura 7. Evolução experimental da resistência à compressão confrontada com a previsão de endurecimento do EC2

A análise da superfície de rotura dos provetes demonstrou que esta ocorreu pela matriz ligante e pelos agregados, sendo possível a identificação, na Fig. 8, da distribuição dos agregados constituintes, assim como da diferente granulometria, de cada tipologia de BEAL.

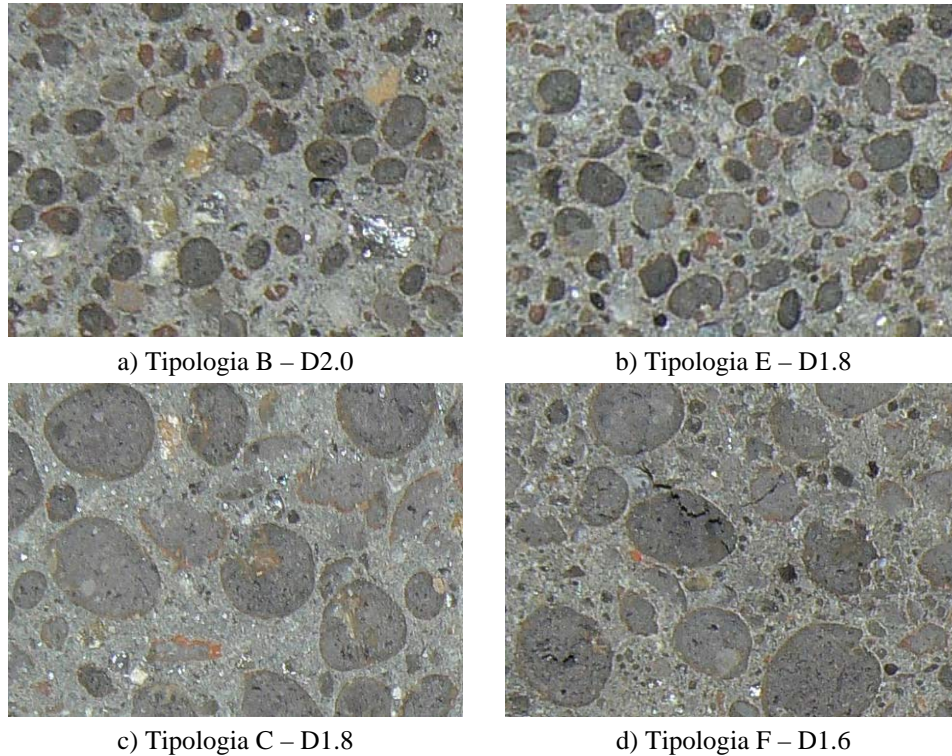


Figura 8. Superfície de rotura das tipologias de BEAL caracterizadas

3.2.2. Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

A caracterização do valor médio do módulo de elasticidade dos BEAL, E_{lcm} , foi efectuada aos 3, 7, 14, 28 e 90 dias de idade, em provetes prismáticos de $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$, através da aplicação de ciclos de carga e descarga, entre dois níveis de tensão, e da medição das deformações longitudinais, conforme se pode observar na Fig. 9. As condições e procedimentos de ensaio cumprem a respectiva especificação LNEC E 397-1993 [8] e os valores médios resultam do ensaio de dois provetes por cada tipo de betão. Mediu-se igualmente a deformação transversal dos provetes, para os mesmos níveis de carga, obtendo-se os correspondentes valores do coeficiente de Poisson, ν .



Os resultados de evolução do módulo de elasticidade, com a idade, dos betões B, E, C e F, apresentam-se na Fig. 10, juntamente com a previsão da sua evolução, proposta pelo EC2 [7].

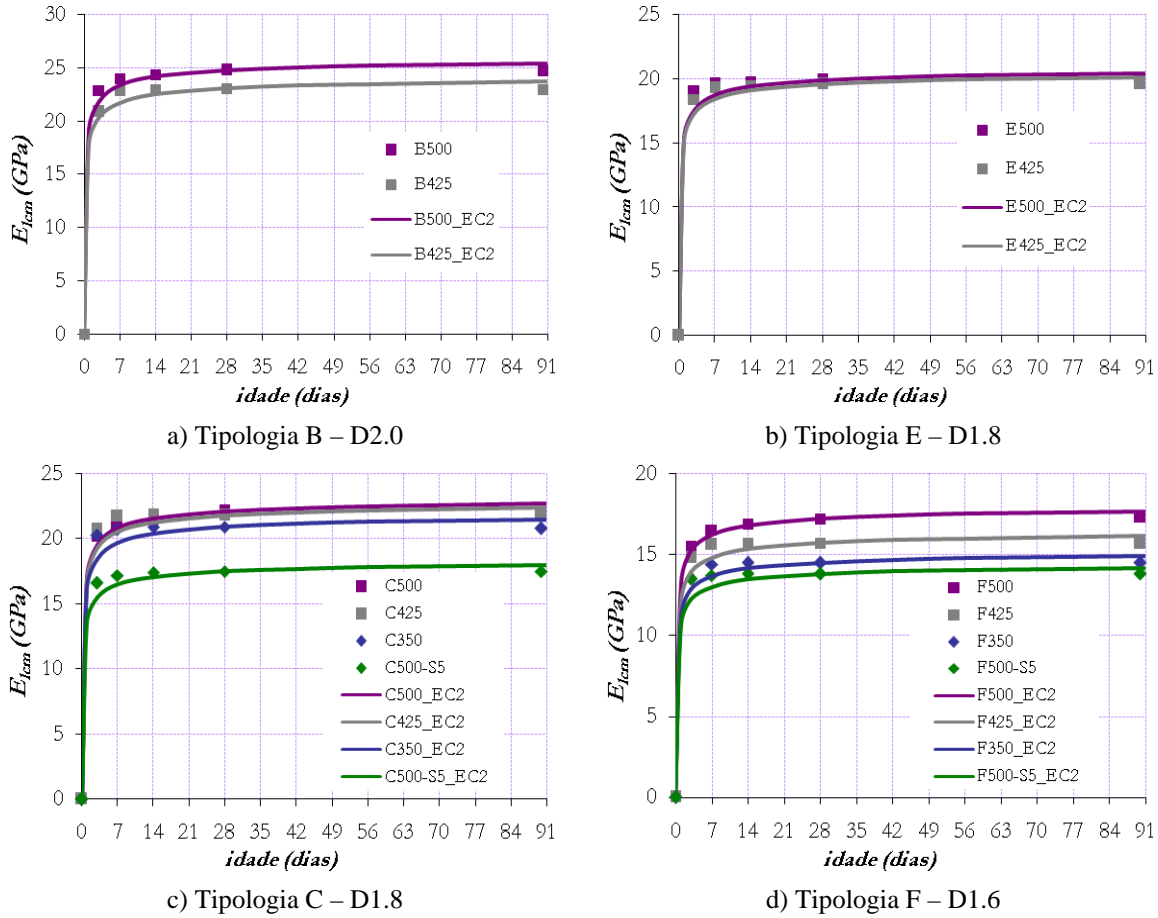


Figura 10. Evolução experimental do módulo de elasticidade confrontada com a previsão de endurecimento do EC2

3.3. Análise e discussão dos resultados

Comparando os valores da resistência à compressão dos BEAL, f_{lcm} , obtidos aos 28 dias, com os respectivos valores previstos, f_{lcp} , registou-se uma boa aproximação, Fig. 11, sendo o erro médio de 5 % com o máximo de 10 %. A partir da análise da variação das propriedades dos BEAL em função da variação dos agregados leves, definiu-se uma correlação na Fig. 12 entre a massa volumica das partículas dos agregados, ρ_{p0} , e o coeficiente de redução de resistência por unidade de volume, m_f .

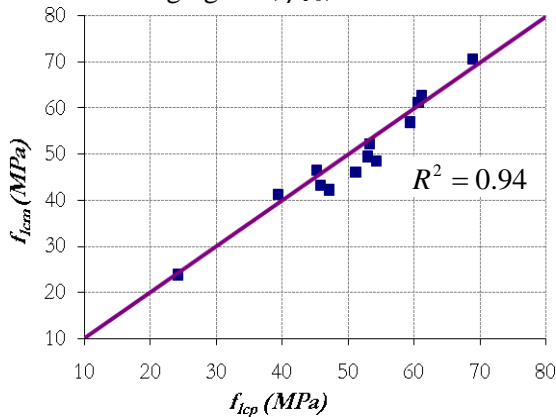


Figura 11: Correlação entre f_{lcp} e f_{lcm}

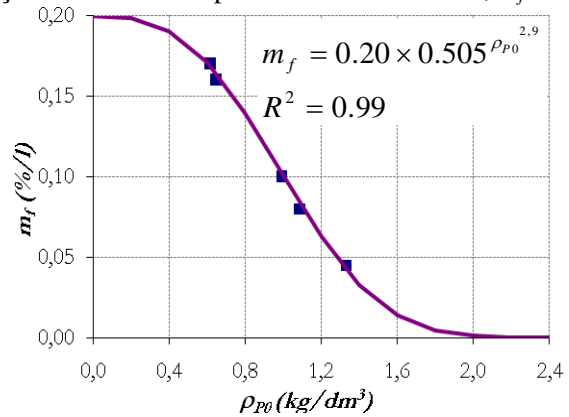


Figura 12: Correlação entre ρ_{p0} e m_f

Efectuando uma análise semelhante para o módulo de elasticidade, a previsão efectuada, E_{lcp} , revelou igualmente, na Fig. 13, uma elevada aproximação aos resultados experimentais, E_{lcm} , sendo o erro médio de 3 % com o máximo de 5 %. De igual modo, definiu-se uma correlação, na Fig. 14, entre ρ_{p0} e o coeficiente de redução de rigidez dos agregados por unidade de volume, m_E .

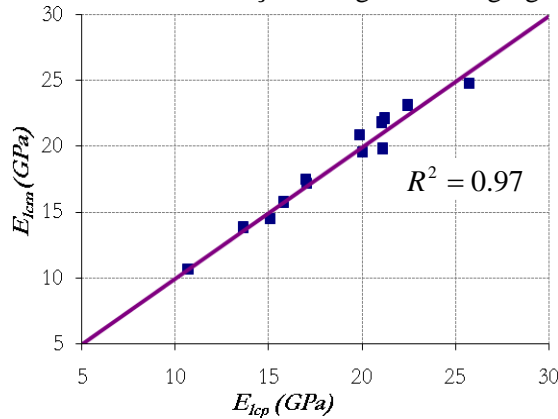


Figura 13: Correlação entre E_{lcp} e E_{lcm}

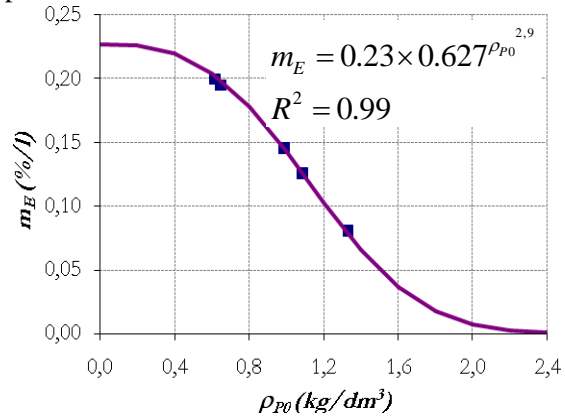


Figura 14: Correlação entre ρ_{p0} e m_E

Ao comparar os resultados experimentais obtidos para o módulo de elasticidade dos BEAL, E_{lcm} , com a previsão do EC2 [7], $E_{lcm,EC2}$, observam-se, na Fig. 15.a, desvios significativos, sendo alguns valores experimentais inferiores à previsão, com o erro médio de 11 % e o máximo de 20 %. Verifica-se que os maiores desvios estão associados a uma consistência mais fluida do betão, tendo-se efectuada uma correcção da referida previsão, através do termo, η_E , em função da consistência:

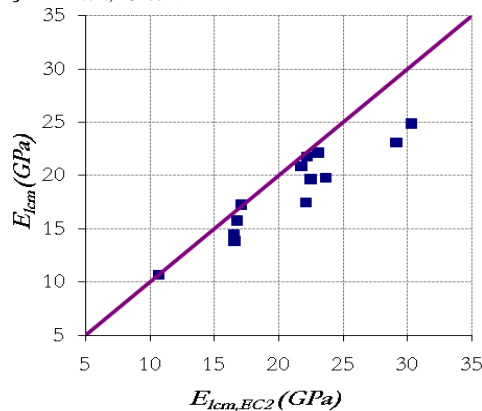
$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{\rho_R} \right)^2 \quad (2)$$

onde: ρ é a massa volúmica do betão e ρ_R representa a massa volúmica de referência. O seu valor apresenta-se no Quadro 2, em função do abaixamento do betão obtido no *Slump Test*.

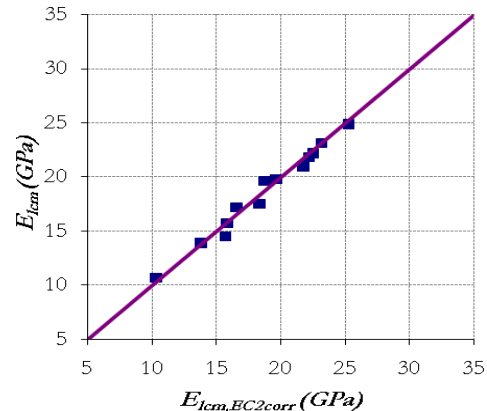
Quadro 2. Valores definidos para ρ_R em função do abaixamento do betão

Abaixamento [cm]	16	19	22	25
ρ_R [kg/m ³]	2200	2300	2400	2500

Apresenta-se na Fig. 15.b, a correlação entre os resultados obtidos e os previstos, afectados da referida correcção, $E_{lcm,EC2corr}$, com um erro médio de 3 % e o máximo de 6 %.



a) Sem correcção



b) Após a correcção da Eq. (2)

Figura 15: Correlação entre o módulo de elasticidade, E_{lcm} , e o valor definido no EC2, $E_{lcm,EC2}$

Os resultados obtidos para a resistência à tracção nos BEAL revelaram que o seu valor médio varia entre 7 a 8 % do correspondente valor da resistência à compressão.

O coeficiente de Poisson, obtido experimentalmente para os BEAL, variou entre 0.24 e 0.25, independentemente das suas resistência e massa volúmica. O valor preconizado pelo EC2 é de 0.2 [7], sendo este um valor mais conservador.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir do estudo apresentado são as seguintes:

- A metodologia de composição adoptada forneceu boa previsão da densidade, da resistência mecânica e do módulo de elasticidade, comparativamente aos resultados experimentais, sendo os erros médios verificados de 1 %, 5 % e 3 %, respectivamente;
- A consistência S4 foi a que proporcionou melhor trabalhabilidade e homogeneidade do betão no estado fresco, garantindo simultaneamente um bom desempenho no estado endurecido, em termos de resistência e rigidez;
- As correlações estabelecidas entre as propriedades dos agregados leves e os coeficientes de redução da resistência e rigidez, usados nas previsões da resistência e do módulo de elasticidade dos BEAL, revelaram-se essenciais à elevada precisão do método;
- Verificou-se que a previsão do módulo de elasticidade, de acordo com o EC2, fornece bons resultados apenas para betões com consistência entre S3 e S4. Com a correcção proposta, a qual consiste em considerar um parâmetro que depende da consistência do betão, além da resistência e da densidade consideradas inicialmente, conseguem-se estimativas precisas para qualquer classe de consistência.

REFERÊNCIAS

- [1] HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. - State-of-the-Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments. Washington: U.S. Army Corps of Engineers® - ERDC/SL, 2000, 104 p.
- [2] EuroLightCon - LWAC Material Properties State-of-the-Art. BE96-3942/R2, 1998, 109 p.
- [3] ARNOULD, M.; VIRLOGEUX, M. - Granulats et Bétons Légers: Paris: Presses de L'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1986, 513 p.
- [4] LOURENÇO, J. [et al.] - Betões de Agregados Leves de Argila Expandida. Lisboa: APEB, 2004, 196 p.
- [5] COSTA, H. - Composição e Caracterização Mecânica de Betões Estruturais de Agregados Leves. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2008, 174 p. Tese de Mestrado.
- [6] VIDELA, C.; LOPEZ, M. - Efecto de la resistencia intrínseca del árido ligero en la resistencia a compression y rigidez del hormigón ligero. Materiales de Construcción. CSIC, Vol. 52, Nº 265, 2002, p 23-37.
- [7] EN 1992-1-1 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings. CEN, 2004, 225 p.
- [8] E 397-1993 - Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC, 1993, 2 p.