

# AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO COM CINZAS VOLANTES

Aires Camões<sup>1</sup>; J.A.O. Barros<sup>2</sup>; Barroso Aguiar<sup>3</sup>; M. Magalhães<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assistente, <sup>2</sup> Professor Auxiliar, <sup>3</sup> Professor Associado, <sup>4</sup> Aluno Finalista da Licenciatura em Eng<sup>a</sup> Civil  
Departamento de Engenharia Civil  
Universidade do Minho



## RESUMO

*Os betões de elevado desempenho (BED) geralmente recorrem a materiais e a processos de fabrico de custo mais elevado que o dos betões correntes. Este facto tem condicionado a aplicação destes betões a obras especiais, apesar dos benefícios mecânicos e físicos que resultam a longo prazo poderem superar o maior investimento inicial. Nos últimos anos tem-se desenvolvido BED de custo controlado, substituindo-se parte de cimento por cinzas volantes e adoptando-se materiais e procedimentos de fabrico correntes. Neste trabalho, o módulo de elasticidade dos BED desenvolvidos é determinado experimentalmente e comparado com o obtido com formulações regulamentares e aplicando modelos baseados na teoria dos materiais compósitos.*

## 1- INTRODUÇÃO

O conceito de betão de elevado desempenho (BED) está geralmente conotado com um betão que apresenta melhores propriedades mecânicas e características de durabilidade melhoradas. Este tipo de betão é alcançado por intermédio da redução da relação água/ligante, A/L, (com recurso à aplicação de superplastificantes), pela utilização de materiais de elevada qualidade e custo (ex: sílica de fumo) e maior controlo nos processos de fabricação e cura. Toda a envôlvia associada à fabricação deste tipo de betões conduz a um acréscimo significativo do seu custo inicial, quando comparado com o de betões correntes, sendo um factor que contribui para a sua reduzida aplicação em obra.

Nos últimos anos tem-se realizado investigação com o objectivo de desenvolver betões pertencentes ao limite inferior do domínio considerado de elevada resistência, recorrendo-se, todavia, a materiais e processos de fabrico correntes, de forma a diminuir o seu custo inicial, sem descurar o objectivo de alcançar níveis de desempenho elevado [Camões *et al.* (1998 e 2000)], [Rocha (1999)].

Para uma correcta avaliação do comportamento estrutural de elementos de betão utilizando modelos de simulação numérica é essencial o conhecimento do módulo de elasticidade dos materiais constituintes. Só assim é possível determinar a rigidez dos elementos estruturais e, conseqüentemente, aferir o estado de tensão a que se encontram

sujeitos. Mesmo recorrendo a modelos de cálculo menos sofisticados, correntemente utilizados em situações de projecto de estruturas, como é o caso de modelos de cálculo elásticos lineares, o resultado da simulação numérica é dependente da qualidade da avaliação do módulo de elasticidade dos materiais.

Neste contexto, assume particular relevância a determinação do módulo de elasticidade dos BED produzidos, de forma a avaliar a qualidade dos modelos de previsão correntemente utilizados para estimar o módulo de elasticidade, preconizados na regulamentação existente. Os resultados obtidos na campanha experimental também serão utilizados para aferir a formulação subjacente aos modelos baseados na teoria dos materiais compósitos.

Com o intuito de cumprir os objectivos acima descritos, foram realizadas amassaduras de betão, procurando-se avaliar o efeito de vários parâmetros no módulo de elasticidade deste tipo de material. Em trabalhos anteriores verificou-se que a inclusão de CV em percentagens de substituição de cimento até 40% parece favorecer as características mecânicas e a durabilidade dos betões. Tendo também em conta o factor económico, constatou-se que misturas com 40% de CV apresentaram maior potencial [Camões *et al.* (2000)]. Assim, foram fabricadas composições com inclusão de 0% e 40% de CV e procurou-se avaliar a incidência da variação do tipo e dimensão dos agregados: utilização de areia fina rolada ou britada; emprego de uma brita de dimensão reduzida (máxima dimensão de 9.53 mm) ou corrente (máxima dimensão de 25.4 mm). A influência da idade dos betões no módulo de elasticidade foi também analisada.

## **2- COMPOSIÇÕES, FABRICO E CONSERVAÇÃO**

O cimento (C) utilizado foi do tipo I, classe 42.5R. A composição química, bem

como as propriedades físicas e mecânicas do cimento, estão apresentadas em [Camões *et al.* (1998)], [Rocha (1999)].

As CV usadas são provenientes da central termoeléctrica do Pego, com teores de carbono que variam entre 6% e 9%. Segundo a regulamentação Europeia [NP EN450 (1995)] o valor máximo do teor de carbono deve ser de 5%, somente podendo alcançar o valor de 7% caso existam regulamentos ou normativas nacionais que o permitam. No entanto, estudos realizados [Camões *et al.* (1998)], [Rocha (1999)] revelaram que a aplicação deste tipo de cinzas permitiu alcançar níveis de desempenho similares aos obtidos com cinzas satisfazendo os requisitos da referida norma Europeia.

Em trabalho prévio realizado [Camões *et al.* (1998)] constatou-se que a quantidade óptima de superplastificante enquadra-se no intervalo de 0.5% a 1% da massa do ligante. Por razões económicas o valor de superplastificante adoptado neste trabalho foi de 0.5%.

Todas as amassaduras foram realizadas recorrendo à mistura de três agregados: areia fina; areia grossa; brita. Foram realizadas amassaduras com areias finas distintas (rolada ou britada), empregando sempre a mesma areia grossa (britada) e alterando a dimensão do agregado mais grosso (brita). Os agregados britados utilizados na amassadura dos betões estudados foram, todos eles, resultado da fractura de rocha granítica, provenientes da mesma pedreira. A areia fina rolada (AFR) utilizada, de origem fluvial, apresentava uma de máxima dimensão,  $D_{máx}$ , de 2.38 mm e um módulo de finura,  $\eta$ , de 2.96. A areia fina britada (AFB) apresentava uma máxima dimensão igual à da AFR, com um  $\eta=2.47$ .

A areia grossa (AG) era caracterizada por  $D_{máx}=4.76$  mm e  $\eta=4.76$ . As duas britas empregues eram dotadas de  $D_{máx}=9.53$  mm e  $\eta=5.93$  (B10), e  $D_{máx}=25.4$  mm e  $\eta=7.03$  (B25). Todos os agregados foram introduzidos na mistura

conforme fornecidos, i.e., sem se proceder a qualquer lavagem ou qualquer outro tipo de tratamento prévio.

Foram realizadas seis amassaduras correspondentes a uma dosagem fixa de ligante ( $L = C + CV$ ) de  $500 \text{ kg/m}^3$  e a respectiva relação água/ligante (A/L) foi mantida constante e igual a 0.3. As dosagens dos agregados foram estimadas por intermédio da aplicação do método de Faury. As composições dos betões estudados estão apresentadas no Quadro 1. Na mnemónica utilizada para referenciar os betões produzidos, o primeiro número traduz a percentagem de substituição de C por CV, o número a seguir a CV representa a máxima dimensão do agregado grosso (arredondada às unidades) e a letra subsequente o tipo de areia fina (R se rolada ou B se britada).

Por amassadura foram moldados 6 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de forma a avaliar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade em duas idades diferentes (7 e 77 dias).

Após a realização das amassaduras, os provetes foram conservados em câmara húmida a uma temperatura de  $21^\circ\text{C}$  e humidade relativa de 80%, já com a face livre (sem contacto com o molde) convenientemente regularizada através de capeamento com argamassa. Um dia após a betonagem procedeu-se à desmoldagem dos provetes e sua imersão em água. Excepto nas composições 0CV10R e 40CV10R, a cura processou-se mantendo os provetes imersos em água até à data da

realização dos ensaios (dois dias antes no caso dos provetes com extensómetros).

Três provetes das composições 0CV10R e 40CV10R foram retirados da câmara húmida aos 7 dias e permaneceram nas condições naturais do laboratório até à data dos ensaios. Os restantes provetes destas composições foram sujeitos a um processo de cura semelhante ao descrito previamente.

Considerando os betões como materiais compostos por uma fase dispersa (agregado) embebidos numa matriz ligante e, com o intuito de relacionar o módulo de elasticidade dos betões com o dos seus constituintes, procedeu-se à realização de provetes de argamassa, representativos da referida matriz e à extracção de carotes de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura do granito utilizado na fabricação dos agregados britados. As argamassas foram fabricadas recorrendo à análise da constituição das composições de betão, tendo-se considerado como material constituinte da argamassa todo aquele que apresentava uma dimensão inferior a 2 mm. Assim, foram moldados 6 provetes prismáticos de argamassa com  $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ , representativos das composições 0CV10B e 40CV10B, incluindo a totalidade do material ligante e da água e a quantidade respectiva de areia fina britada com dimensão inferior a 2.0 mm.

Quadro 1 – Composição dos betões ( $\text{kg/m}^3$ )

Betão	A/L	Ligante		Agregados				
		C	CV	AFB	AFR	AG	B10	B25
0CV10B	0.3	500	–	552	–	148	985	–
40CV10B	0.3	300	200	455	–	201	972	–
0CV10R	0.3	500	–	–	485	156	1025	–
40CV10R	0.3	300	200	–	404	185	1018	–
0CV25R	0.3	500	–	–	485	156	–	1025
40CV25R	0.3	300	200	–	404	185	–	1018

### 3- EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

A avaliação do módulo de elasticidade dos provetes de betão, de argamassa e de granito, foi realizada através de ensaios cíclicos, realizados sob controlo de força, para níveis de carga compreendidos entre 5% e 1/3 da força de rotura estimada, tendo por base resultados obtidos em campanhas anteriores.

Para efectuar os ensaios em provetes de betão e em amostras de granito utilizou-se um sistema controlado em malha fechada. A força aplicada foi avaliada através de uma célula de carga de 250 kN de capacidade máxima de carga (CMC) com uma precisão de 0.015% de CMC, disposta entre o actuador e o provete.

O actuador foi montado numa estrutura de reacção constituída por perfis metálicos HEB 200, com rigidez adequada para os níveis de carga aplicados no decurso dos ensaios. O procedimento de ensaio adoptado constou na realização de 10 ciclos de carga e descarga com uma velocidade de aplicação de força de 4.3 kN/s.

Os deslocamentos foram registados por meio de 2 transdutores espaçados de 120° montados em anéis fixos ao provete por intermédio de três ligações pontuais (parafusos de aperto de ponta cónica). Os deslocamentos foram determinados relativamente a uma base de medida de 60 mm para os provetes de betão e 50 mm para os de granito. Complementarmente aos transdutores, nos provetes de granito e nos provetes de betão ensaiados aos 77 dias, foram colocados extensómetros eléctricos colados aos provetes. Os extensómetros usados em betões apresentavam um comprimento de 60 mm e os empregues nos provetes de granito, 30 mm. A sua disposição foi escolhida de modo a permitir o registo de deslocamentos em três geratrizes equidistantes de 120°. Em três dos provetes das composições 0CV10R e 40CV10R, ensaiados aos 77 dias de idade, para além dos dois transdutores, foram dispostos três

extensómetros de 60 mm espaçados de 120°.

Na Figura 1 apresenta-se uma foto do ensaio em provetes de betão e na Figura 2 uma foto do ensaio em provetes de granito.



Figura 1 – Ensaio de provetes de betão



Figura 2 – Ensaio de provetes de granito

Posteriormente à realização dos ensaios cíclicos, procedeu-se à determinação da resposta total em compressão dos provetes, utilizando-se para esse efeito uma prensa.

Os ensaios que permitiram caracterizar o módulo de elasticidade das argamassas foram efectuados numa prensa servo controlada com 22.24 kN de capacidade máxima de carga e  $\pm 0.04\%$  de precisão, tendo-se para tal efectuado seis ciclos de carga/descarga. Os deslocamentos foram registados por três transdutores com 1.0 mm de campo linear e 0.25% de precisão, relativamente a uma base de

medida de 50 mm. A montagem e disposição dos transdutores foi feita de modo semelhante ao descrito anteriormente. A Figura 3 inclui uma foto de um ensaio.



Figura 3 – Ensaio de provetes de argamassa

#### 4- MODELOS DE PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE BETÕES

##### 4.1- Modelos empíricos baseados na resistência à compressão

Tendo como objectivo estimar o módulo de elasticidade do betão em função da sua resistência à compressão, um número considerável de relações empíricas foram já propostas. O CEB/FIP (1999) propõe a seguinte relação:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot E_{c0} \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \quad (1)$$

em que  $E_{ci}$  é o módulo de elasticidade tangente para  $\sigma_c = 0$  (MPa),  $f_{cm}$  é o valor médio da resistência à compressão determinada em cilindros  $\phi 150 \times 300 \text{ mm}^3$  (MPa),  $E_{c0}$  e  $f_{cm0}$  tomam o valor de  $2.15 \times 10^4$  MPa e 10 MPa, respectivamente, e  $\alpha_E$  é um coeficiente, função do agregado, que toma os valores expressos no Quadro 2.

Quadro 2 – Efeito do tipo de agregado no módulo de elasticidade do betão [CEB/FIP (1999)]

Tipo de agregado	$\alpha_E$
Basalto, calcário denso	1.2
Quartzítico	1.0
Calcário	0.9
Arenito	0.7

Várias relações empíricas podem ser encontradas na literatura para descrever a variação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão. O REBAP (1986), o ACI 318 (1995), o código norueguês NS 3473, a regulamentação australiana AS 3600 e a canadiana CAN A23.3-M90 [Aïtcin (1998)] propõem as seguintes relações:

$$\text{REBAP: } E_c = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$\text{ACI 318: } E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

$$\text{NS 3473: } E_c = 9500 \cdot f_{cm}^{0.3} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

$$\text{AS 3600: } E_c = 0.043 \cdot \rho^{1.5} \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

$$\text{CAN A23.3: } E_c = 5000 \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica do betão em  $\text{kg/m}^3$ .

A expressão recomendada pelo REBAP é aplicável a betões cuja resistência característica à compressão, determinada em cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, não exceda os 50 MPa. A relação proposta pelo ACI, para betões de massa volúmica corrente, foi deduzida através dos resultados obtidos em ensaios realizados com betões de resistência inferior a 40 MPa, verificando-se que a sua aplicação sobrestima o valor de  $E_c$  para resistências superiores. Comparando a expressão (3) com as restantes é possível concluir que as preconizadas pela regulamentação australiana e canadiana, sobrestimam, também, o valor do módulo de elasticidade. O ACI Committee 363 (1992) apresenta uma relação aplicável a betões de resistência à compressão compreendidas entre 21 MPa e 83 MPa:

$$E_c = 3320 \cdot \sqrt{f_{cm}} + 6900 \text{ (MPa)} \quad (7)$$

Gutiérrez e Cánovas (1995), face aos resultados disponíveis na bibliografia, propõem uma relação que permite estimar o valor de  $\alpha_E$  interveniente na equação (1), em função do módulo de elasticidade do agregado,  $E_a$ :

$$\alpha_E = 0.1485 \cdot \sqrt{E_a} \text{ (GPa)} \quad (8)$$

Baseado nos resultados obtidos em BED fabricados com diferentes tipos de agregados (calcário, granito e arenito), Baalbaki (1997) preconiza a adopção de uma relação simplificada:

$$E_c = -52 + 41.6 \cdot \log(E_a) + 0.2 \cdot f_{cm} \text{ (GPa)} \quad (9)$$

com  $E_a$  expresso em GPa e  $f_{cm}$  em MPa.

#### 4.2- Modelos baseados na teoria dos materiais compósitos

Apoiando-se nas teorias gerais dos materiais compósitos, diferentes modelos matemáticos foram desenvolvidos com o objectivo de prever as propriedades mecânicas do betão. Considerando o betão como um sistema bifásico, onde a fase dispersa é representada pelos agregados e a fase contínua pela pasta de ligante ou argamassa, é possível deduzir expressões que permitem determinar o módulo de elasticidade do betão partindo dos valores dos módulos de elasticidade dos seus componentes e suas proporções volumétricas. As características requeridas pela maior parte dos modelos são as seguintes:

- módulo de elasticidade da pasta,  $E_p$ ;
- módulo de elasticidade da fracção grossa dos agregados,  $E_a$ ;
- quantidade de pasta ou argamassa,  $g_p$ , fracção do volume total do compósito;
- quantidade de fase dispersa,  $g_a$ , fracção do volume total do compósito;

sendo válida a relação  $g_p + g_a = 1$ .

Os principais modelos bifásicos apresentam-se na Figura 4 [Neto e

Djanikian (1996)], [Baalbaki (1997)] e [Aïtcin (1998)].

Baalbaki (1997) desenvolveu dois outros modelos, representados na Figura 5. No modelo 1 a zona de transição entre o esqueleto granular e a matriz é tida em consideração através da variável  $a$ , função da compacidade da matriz e, conseqüentemente, da ligação agregados-pasta. No modelo 2 a extensão da concentração dos agregados na matriz e a noção de volume real de pasta necessária ao preenchimento intergranular são considerados. A aplicação do modelo 2 exige o conhecimento dos seguintes dados:

- distribuição granulométrica (dimensão máxima e mínima) de modo a permitir avaliar a concentração máxima  $g^*$  dos agregados com base na lei de Caquot;
- concentração real,  $g$ , dos agregados (agregados grossos + agregados finos);
- módulo de elasticidade da fracção grossa dos agregados,  $E_a$ ;
- o módulo de elasticidade da pasta,  $E_p$ .

#### 5- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 6 apresentam-se os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos vários materiais ensaiados. Cada valor representa a média obtida em três provetes de argamassa, três provetes de betão e oito provetes de granito.

Os deslocamentos considerados no cálculo do módulo de elasticidade foram obtidos determinando o valor médio registado nos vários equipamentos de medida (transdutores e extensómetros) que, por sua vez, foram calculados recorrendo aos valor médio dos vários ciclos de carga efectuados, tendo sido desprezados os valores distantes da referida média em mais de 10%.

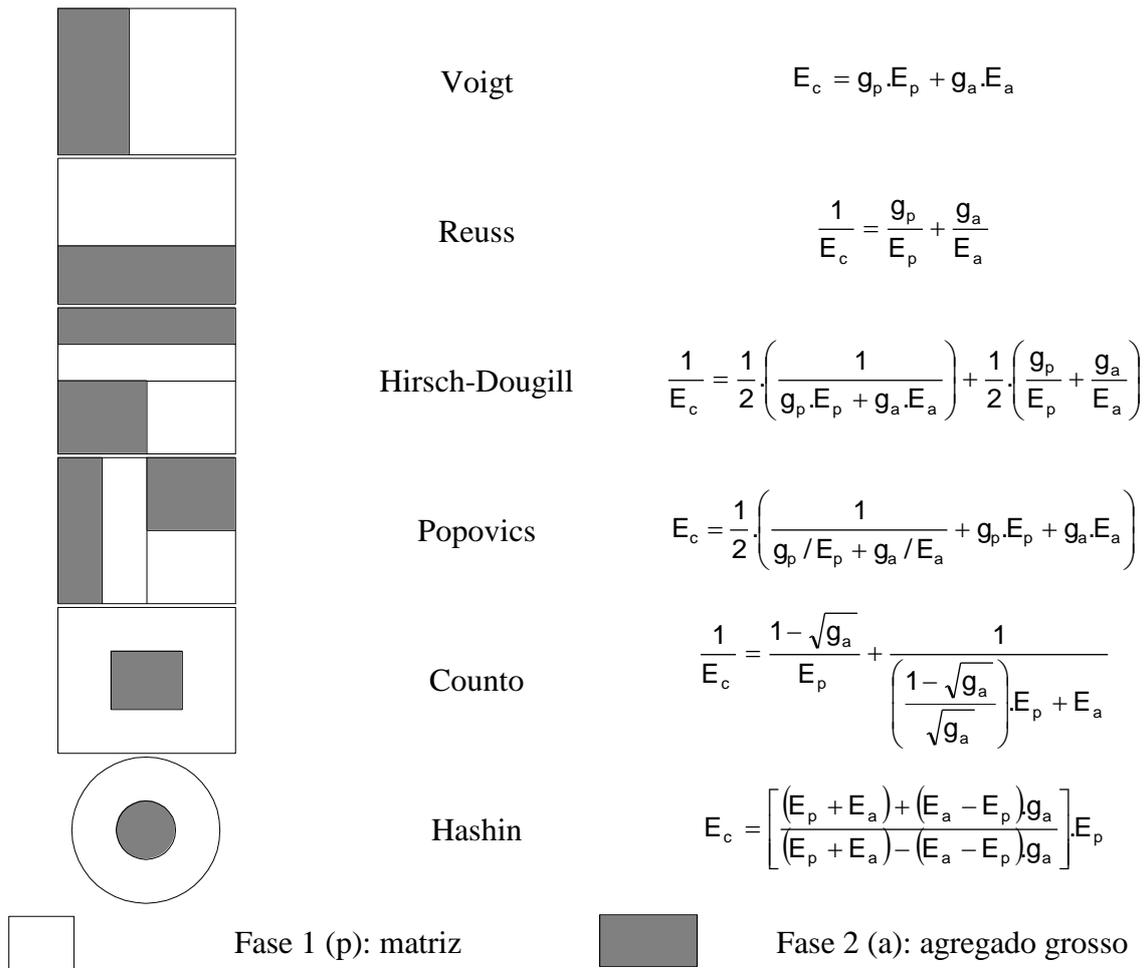


Figura 4 – Modelos de materiais bifásicos [Neto e Djanikian (1996)], [Baalbaki (1997)] e [Aitcin (1998)]

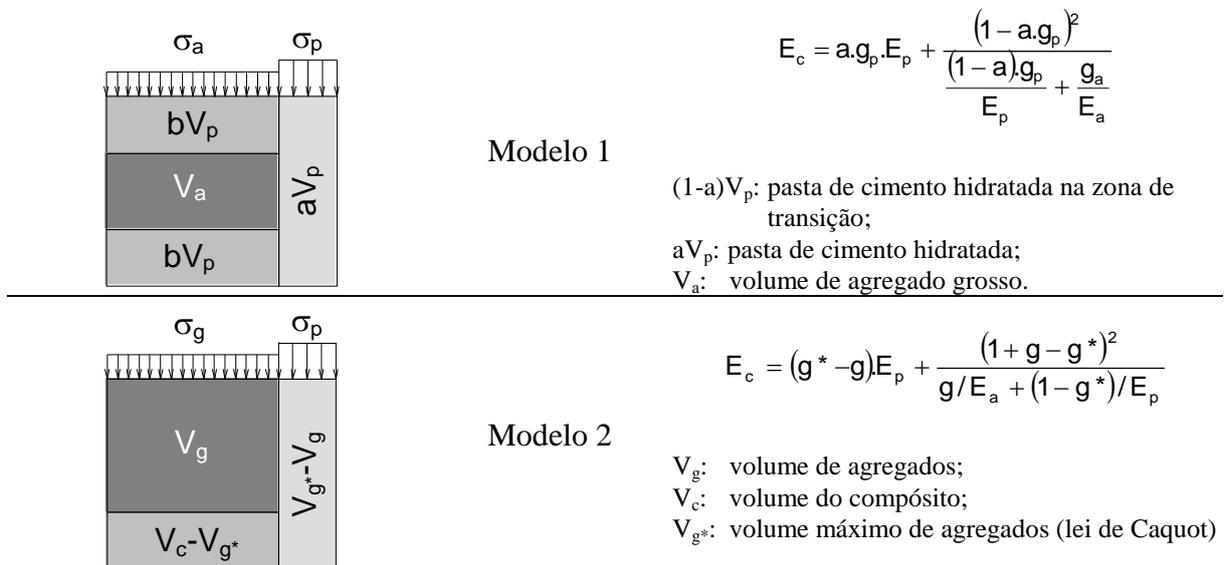


Figura 5 – Modelos propostos por Baalbaki (1997)

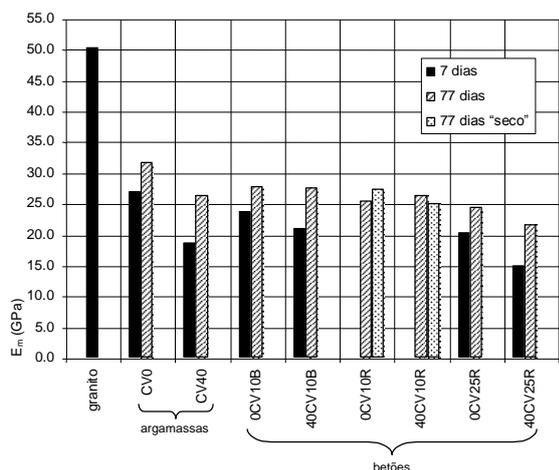


Figura 6 – Módulo de elasticidade

Os resultados expressos na Figura 6 permitem constatar que:

- os valores dos módulos de elasticidade em compressão obtidos para o granito e para as argamassas enquadram-se no esperado [Baalbaki (1997)];
- a generalidade dos betões testados apresentam um módulo de elasticidade em compressão de valor reduzido, atingindo mesmo níveis inferiores ao da respectiva argamassa;
- a acção das CV no módulo de elasticidade manifesta-se de forma semelhante ao verificado relativamente à resistência à compressão, provocando uma diminuição nas idades mais jovens e uma recuperação para idades mais prolongadas, devido ao facto das reacções pozolânicas serem mais lentas que as de hidratação do cimento;
- a presença de areia fina britada ou rolada parece não influenciar significativamente o módulo de elasticidade das composições;
- nos betões produzidos, o aumento da máxima dimensão do agregado mais grosso provoca uma diminuição do módulo de elasticidade em compressão;
- as condições de cura testadas (imersão em água após a desmoldagem até à data de preparação dos provetes ou imersão em água apenas durante os primeiros 7 dias) influenciaram marginalmente o módulo de elasticidade das composições.

## 6- COMPARAÇÃO COM OS MODELOS DE PREVISÃO

### 6.1- Modelos empíricos baseados na resistência à compressão

Na Figura 7 apresentam-se as relações obtidas entre os valores médios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade,  $E_{cm}$ . Na mesma Figura é possível, também, visualizar o desenvolvimento das curvas resultantes da utilização das expressões sugeridas pelo REBAP (1986), CEB/FIP (1999), ACI 363 (1992) e NS 3473 [Aïtcin (1998)], apresentadas em 4.1.

A utilização da expressão (1), sugerida pelo CEB/FIP, pressupõe a adopção de um coeficiente  $\alpha_E$ , função do tipo de agregado, e que, segundo o Quadro 2, toma o valor 1.0. A curva ilustrada na Figura 7 foi determinada considerando  $\alpha_E=1.0$ . Aplicando a expressão (8) e considerando para  $E_a$  o valor de 50.83GPa, registado nos ensaios efectuados, obtém-se  $\alpha_E=1.05$ , suportando a adopção tomada.

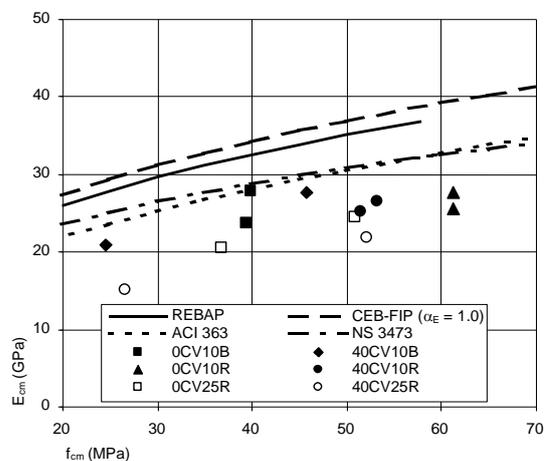


Figura 7 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão média

Observando a Figura 7 é possível verificar que:

- a aplicação das expressões regulamentares propostas sobrestimam o valor de  $E_{cm}$ , sobretudo para as composições constituídas com um agregado grosso de máxima dimensão de 25 mm;

- das expressões consideradas, a que melhor se aproxima aos valores obtidos é a preconizada pelo ACI 363;
- a expressão que mais se afasta dos valores registados experimentalmente é a recomendada pelo CEB-FIP, considerando  $\alpha_E=1.0$ .

Apesar do maior afastamento verificado na previsão de  $E_{cm}$  utilizando a expressão proposta pelo CEB/FIP, esta apresenta uma clara vantagem em relação às restantes, dado que o tipo de agregado é tido em conta na avaliação do  $E_{cm}$ .

Neste sentido, a simulação dos resultados obtidos experimentalmente pode ser melhorada adoptando-se para  $\alpha_E$  um valor mais apropriado. Aplicando uma regressão não linear, com base no método dos mínimos quadráticos, obteve-se  $\alpha_E=0.6752$  com  $R^2 = 47.28\%$ . Apesar do reduzido valor do coeficiente de correlação, obtém-se uma significativa melhoria na simulação dos resultados obtidos experimentalmente, conforme se pode constatar na Figura 8. Nesta figura, também se apresenta o resultado da aplicação da equação (9), que permite estimar o valor de  $E_{cm}$  em função do módulo de elasticidade do agregado.

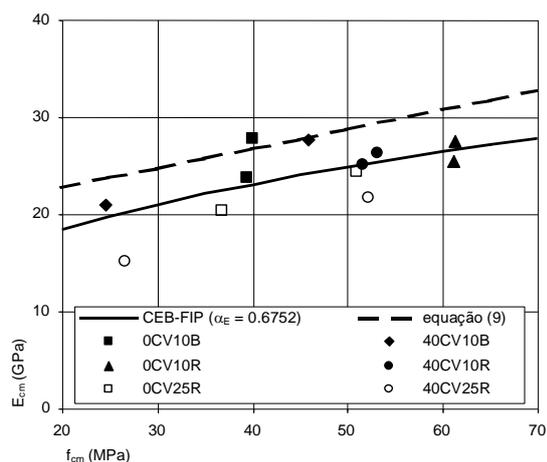


Figura 8 – Relação entre  $E_{cm}$  e  $f_{cm}$  (CEB/FIP:  $\alpha_E=0.6751$ ; equação (9))

Apesar do valor de  $\alpha_E$  obtido se enquadrar no intervalo de valores propostos pelo CEB/FIP, esse valor seria semelhante ao atribuído a betões com agregados areníticos. Daqui pode-se inferir

que a determinação de  $\alpha_E$  recorrendo apenas ao valor do módulo de elasticidade do agregado é insuficiente, devendo incluir outros parâmetros, como sejam, por exemplo, o volume e a rigidez da interface pasta-agregados.

Os resultados obtidos recorrendo à equação (9) mostraram-se superiores mas mais próximos aos determinados experimentalmente do que os associados à aplicação das restantes expressões, função apenas da resistência à compressão dos betões, indiciando que o  $E_{cm}$  não deve ser estimado recorrendo apenas a essa propriedade.

## 6.2- Modelos baseados na teoria dos materiais compósitos

Considerando apenas as composições para as quais foram determinados os módulos de elasticidade das respectivas argamassas, entendidas como representativas da matriz dos correspondentes materiais compósitos, é possível avaliar a adequabilidade das expressões apresentadas nas Figuras 4 e 5. No Quadro 3 os resultados obtidos são apresentados. Conforme se pode constatar os  $E_{cm}$  previstos recorrendo aos modelos bifásicos, baseados na teoria dos materiais compósitos, afastam-se substancialmente dos determinados experimentalmente, sobrestimando os respectivos valores.

Os modelos apresentados na Figura 4 têm como base a divisão do betão em duas fases distintas, sendo o  $E_{cm}$  do compósito dependente do módulo de elasticidade das duas fases. Nos modelos apresentados na Figura 5 a fase correspondente à matriz é decomposta em duas de forma a simular o efeito da interface entre o esqueleto granular e a matriz. Contudo, o autor que desenvolveu estes modelos admitiu para rigidez da interface, um valor igual ao atribuído à matriz.

Dado que nos betões desenvolvidos, os inertes não foram lavados, deve existir um volume apreciável de interface agregados-matriz, com rigidez

significativamente inferior a qualquer destas componentes. Por este facto, o modelo 1 de Baalbaki (1997) foi adaptado de forma a ser possível incluir o módulo de elasticidade da interface,  $E_{zt}$ . A expressão resultante tem a forma seguinte:

$$E_c = a g_1 E_1 + \frac{(g_2 + (1-a)g_1)^2}{\frac{(1-a)g_1}{E_1} + \frac{(1-a)g_1 g_2}{(g_2 + (1-a)g_1)E_{zt}} + \frac{g_2^2}{(g_2 + (1-a)g_1)E_2}} \quad (10)$$

Assumindo que o volume da zona de transição corresponde a 80% do da matriz ( $a = 0.8$ ), valor correntemente adoptado por Baalbaki (1997), é possível calcular o módulo de elasticidade da zona de transição dos betões 0CV10R e 40CV10R, de modo a que o  $E_{cm}$  determinado coincida com o estimado pela equação (10). Os valores de  $E_{zt}$  assim obtidos apresentam-se no Quadro 4.

Quadro 3 – Previsão de  $E_{cm}$  recorrendo às expressões baseadas na teoria dos materiais compósitos

$E_{cm}$ (GPa)	Composição			
	0CV10B		40CV10B	
	7 dias	77 dias	7 dias	77 dias
Experimental	<b>23.68</b>	<b>27.79</b>	<b>20.88</b>	<b>27.58</b>
Voigt	39.11	41.42	35.50	39.08
Reuss	35.49	39.27	28.01	35.22
Hirsch-Dougill	37.21	40.31	31.32	37.05
Popovics	37.30	40.34	37.54	40.54
Counto	37.28	40.38	37.51	40.58
Hashin	36.98	40.21	37.23	40.41
Baalbaki – modelo 1	35.49	39.27	28.01	35.22
Baalbaki – modelo 2	40.15	42.81	33.59	39.23

Quadro 4 – Previsão de  $E_{zt}$  considerando  $a = 0.8$

$E_{zt}$ (GPa)	Composição			
	0CV10B		40CV10B	
	7 dias	77 dias	7 dias	77 dias
Baalbaki – modelo 1 modificado	5.02	6.45	5.64	8.39

Observando os valores constantes do Quadro 4 é possível verificar que, a consideração de uma zona de transição ocupando 20% do volume total de material com dimensão inferior a 2.0 mm, implica a obtenção de  $E_{zt}$  reduzidos, cerca de 25% dos determinados para os betões correspondentes. A presença de CV nas misturas parece beneficiar a rigidez da zona de transição, principalmente para betões com maior idade. Enquanto que os  $E_{zt}$  determinados para a idade de 7 dias são aproximados (aumento de cerca de 12% da composição 40CV10B, relativamente à composição sem inclusão de CV), aos 77 dias a composição com 40% de CV exhibe um  $E_{zt}$  consideravelmente superior (acrécimo de cerca de 30%). Este aspecto deve estar associado à reacção pozolânica

das CV, que se manifesta mais pronunciadamente para idades superiores.

## 7- CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, foi possível constatar que o módulo de elasticidade do betão não deve ser estimado somente em função da respectiva resistência à compressão, sendo também necessário considerar a influência do agregado utilizado.

O módulo de elasticidade do betão não se mostrou sensível à variação do tipo de agregado fino utilizado (areia britada ou rolada) e sofreu um decréscimo com o aumento da máxima dimensão do agregado grosso.

A determinação do módulo de elasticidade do betão parece estar intimamente relacionada com as condições de limpeza da fracção grossa dos agregados, sendo os modelos de simulação, baseados na teoria dos materiais compósitos, capazes de estimar o módulo de elasticidade do betão com precisão adequada, desde que se contabilize a presença de uma fase representativa da interface agregado-matriz. Nas condições de fabrico empregues nesta campanha experimental, não se tendo procedido à lavagem dos agregados, foi identificado um módulo de elasticidade da fase correspondente à zona de interface assumindo valores substancialmente reduzidos, da ordem de 25% dos obtidos nos betões correspondentes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente à Cimpor, Indústria de Cimentos, S.A, ao Departamento de Carvão e Cinzas da PEGOP, Energia Eléctrica, S.A, e à Bettor MBT Portugal, Produtos Químicos para Construção, S.A.

## REFERÊNCIAS

ACI 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, 1995;

ACI Committee 363, *State-of-the-art Report on High Strength Concrete*, ACI committee report 363R-92, ACI, September, 1992, pp. 55;

Aïtcin, P.-C., *High-Performance Concrete*, Modern concrete technology 5, E & FN SPON, London and New York, 1998, pp. 591;

Baalbaki, W. H., *Analyse Expérimentale et Prévisionnelle du Module d'Elasticité des Bétons*, Thèse de Doctorat es Sciences Appliquées (Ph.D.) de la Faculté des

Sciences Appliquées de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 1997, pp.143;

Camões, A. *et al.*, "Low cost high performance concrete using low quality fly ash", *ERMCO98, 12<sup>th</sup> European Ready Mixed Concrete Congress*, Lisboa, June 1998, p.478-486;

Camões, A. *et al.*, "Influência das cinzas volantes no desempenho de betões", *Encontro Nacional Betão Estrutural 2000*, Porto, Novembro 2000, p.105-114;

Camões, A. *et al.*, "Comportamento à tracção em flexão de betões de desempenho melhorado", *Encontro Nacional Betão Estrutural 2000*, Porto, Novembro 2000, p.151-160;

CEB/FIP, *Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance; Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990*, Comité Euro-International du Béton, Volume 1, July 1999, 224 p.;

Gutiérrez, P. A. and Cánovas, M. F., *The Modulus of Elasticity of High Performance Concrete*, Materials and Structures, Volume 28, Number 184, December 1995, pp. 559-568;

Neto, P. M. P. e Djanikian, J. G., *Concretos de Alta Resistência – Algumas Características do Módulo de Elasticidade de Concretos de Alta Resistência*, Revista IBRACON, Instituto Brasileiro do Concreto, Ano IV, Número 12, Abril 1996, pp. 28-35;

NP EN450 1995, *Cinzas volantes para betão, definições, exigências e controlo da qualidade*, Instituto Português da Qualidade, Fevereiro 1996;

REBAP, *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, 1986, pp. 214;

Rocha, P., *Betões de elevado desempenho com recurso a materiais e processos correntes*, Tese de Mestrado, UM, Outubro de 1999.