

# CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BETÃO EM COMPRESSÃO UNIAXIAL

Neves, Rui D.

Assistente de Investigação

Núcleo de Aglomerantes e Betões - Departamento de Materiais de Construção  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal



## RESUMO

*No presente artigo descreve-se um trabalho de investigação efectuado no LNEC, em que se obtiveram curvas tensão-deformação completas para diferentes betões, abordando-se algumas particularidades deste tipo de ensaios, nomeadamente a medição de deformações, para a qual se desenvolveu um sistema original. No final, apresentam-se os resultados obtidos e efectua-se a sua comparação com um modelo analítico.*

## 1- INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento do betão em compressão assume um papel fundamental no dimensionamento de estruturas. Embora os parâmetros mais utilizados em dimensionamento sejam a resistência máxima e o módulo de elasticidade, existem algumas situações em que é necessário conhecer outras propriedades deste material. De facto, em estruturas que se pretendam dúcteis ou em situações que se utilizem betões de ductilidade melhorada, como os betões reforçados com fibras, é importante o conhecimento do comportamento do betão após este ter atingido a resistência máxima.

Tipicamente o betão em compressão exhibe dois comportamentos distintos, o endurecimento e o amolecimento. O endurecimento caracteriza-se pelo aumento da carga com a deformação e ocorre entre o início do carregamento e a resistência máxima, enquanto o amolecimento ocorre após ter sido atingida a resistência máxima e caracteriza-se pela redução da

capacidade resistente com o aumento da deformação.

A caracterização do comportamento do betão através de um diagrama tensão-deformação completo implica a utilização de uma metodologia e de equipamento mais complexos que os utilizados no ensaio para determinação da resistência máxima à compressão. A resposta do betão neste tipo de ensaios depende de vários factores, nomeadamente da variável através da qual se controla o ensaio e do modo como esse controlo é efectuado, da relação entre a rigidez do sistema de carga e a rigidez do provete, da geometria do provete, do tipo de contacto entre o provete e os pratos da prensa, entre outros.

Seguidamente abordam-se alguns factores que condicionam a resposta do betão em compressão, descreve-se a metodologia adoptada nos ensaios (tipo de provetes, equipamento, sistemas de controlo e de medição de deformações, ...) e apresentam-se os resultados obtidos.

## 2 – FACTORES QUE CONDICIONAM A RESPOSTA

### 2.1 – Variável de controlo

Para que o ensaio prossiga após se ter atingido a carga máxima, a variável de controlo não pode ser a força, usualmente utilizada nos ensaios de compressão para determinação da resistência máxima, uma vez que o sistema tentará aplicar um incremento de carga que o provete já não consegue suportar, o que causará o descontrolo do ensaio. Quando se pretende obter a resposta para além do pico de carga é usual efectuar-se o controlo através da deformação total do provete ou do deslocamento do prato móvel da prensa, utilizando um circuito de controlo fechado, isto é, o controlador utiliza o sinal de saída para determinar o sinal de comando.

Refira-se que, apesar de o deslocamento do prato móvel para além da deformação do provete englobar ainda a deformação da prensa, é frequentemente utilizado como variável de controlo deste tipo de ensaios, dada a estabilidade do ponto de medida. Os transdutores que medem a deformação total do provete são, geralmente, mais vulneráveis a acções exteriores ao ensaio, pelo que o controlo através do sinal destes transdutores pode comprometer o ensaio e inclusivamente causar danos no equipamento. Assim, caso se pretenda utilizar como variável de controlo do ensaio a deformação total do provete, deve-se garantir que os transdutores se encontram protegidos de acções que possam originar deslocamentos que não os devidos à deformação dos provetes.

### 2.2 – Rigidez da prensa

A rigidez do provete implica uma reacção deste à acção imposta pela prensa. Devido a essa reacção a prensa vai sofrer uma deformação, que será tanto maior quanto menor for a sua rigidez e maior for a rigidez do provete. Próximo do pico de carga e sobretudo no pico de carga, a rigidez do provete diminui, alterando a relação entre a rigidez do provete e da prensa, possibilitando a recuperação da

deformação elástica desta última. Essa recuperação constitui uma acção não controlada sobre o provete que, se for significativa, pode perturbar ou impedir a caracterização do ramo de amolecimento. Para evitar estas situações a prensa deve ter uma rigidez de uma ordem de grandeza superior ou, no mínimo, idêntica à dos provetes a ensaiar (Zangelmi 1999).

### 2.3 – Atrito entre o provete e os pratos da prensa

Um provete quando comprimido, devido ao coeficiente de Poisson, tem tendência para dilatar transversalmente, o que originará a separação do betão em fendas longitudinais (Markeset e Hillerborg 1995). Se existir atrito entre os pratos da prensa e o provete, este terá restrições à sua deformação na zona junto aos pratos, o que causa um estado multiaxial de tensão, surgindo um efeito de confinamento que aumenta a resistência do betão nessa zona.

O atrito com os pratos vai originar que o provete apresente uma figura de rotura do tipo pirâmide ou tronco de pirâmide, figura 1 (Coutinho e Gonçalves 1994), enquanto que se não existisse qualquer atrito entre os pratos e o provete este romperia por arranque ou descoesão, isto é, as fendas seriam contínuas em toda a altura do provete.

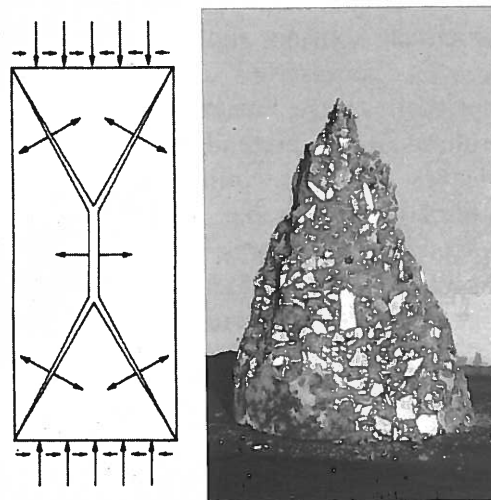


Fig 1 – Tensões de tracção devidas ao atrito num provete ensaiado à compressão

Na bibliografia são sugeridas diversas formas de reduzir o atrito entre os

pratos e os provetes, como por exemplo utilizar pratos de dimensões próximas das dos provetes (Sangha e Dhir 1972) ou aplicar uma camada de grafite ou parafina às superfícies em contacto (Coutinho e Gonçalves 1994).

## 2.4 – Dimensões dos provetes

As dimensões dos provetes também condicionam a resposta obtida. De facto, a rigidez do provete aumenta com a secção transversal, enquanto que o aumento da altura promove a influência de esforços parasitas. Para minimizar estes efeitos, o comité TC 148-SCC da RILEM (1997) preconiza que a razão entre a altura e a dimensão transversal dos provetes deve ser próxima de 2. Refira-se que em situações em que o atrito entre os pratos e o provete não seja desprezável, a deformação axial de provetes com razões entre altura e secção transversal inferiores a 2 será condicionada pelo efeito de confinamento em quase toda a altura dos mesmos.

A influência da altura dos provetes na medição das deformações será abordada adiante, quando se apresentar o sistema de medição utilizado.

## 3 – METODOLOGIA ADOPTADA

### 3.1 – Equipamento

Os ensaios foram efectuados numa prensa servocontrolada SEIDNER SWP 5000 VE, com uma capacidade de carga de 5000 kN, pratos de dimensões aproximadas 50×40 cm<sup>2</sup> e com uma rigidez da ordem de 2300 kN/mm (Neves 2000). Como acessórios principais esta prensa possui um transdutor interno de deslocamento NOVOTECHNIK TS-100 com capacidade para medir deslocamentos até 100 mm, uma unidade de controlo PK-CSRG 5500/2 com interface RS 232 e uma célula de carga HBM P3MB da classe 1.

As deformações dos provetes foram medidas com recurso a extensómetros de garras HBM DD1 da classe 0.1, com deslocamento nominal de ±2.5 mm (figura 2).

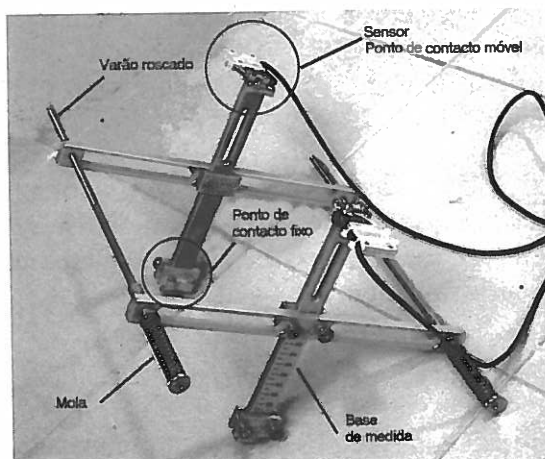


Fig 2 – Extensómetro de garras HBM DD1

A aquisição dos dados foi efectuada com um *data-logger* HP 75000B, com 16 canais, dotado de *software* adequado.

### 3.2 – Provetes

No estudo efectuado utilizaram-se provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de 2 betões distintos: um de resistência corrente (N) e outro de resistência elevada (H), cujos estudos de composição se encontram na tabela 1. Cada betão foi representado por duas amostras de 3 provetes cada.

Tabela 1 – Composições de betão (m<sup>3</sup>)

Material	N	H
Brita 5/15	706 kg	744 kg
Brita 0/5	250 kg	292 kg
Areia	876 kg	682 kg
Cim. I 42.5 R	249 kg	452 kg
Cinzas volantes	70 kg	-
Água	168 l	174 l
Pozzolith 390N	2.19 l	-
Glenium 27	-	5.71 l

O betão foi fabricado em laboratório, tendo os provetes sido compactados em

mesa vibratória, desmoldados 24 horas após a betonagem e conservados em câmara saturada até à idade de ensaio (42 dias).

Antes do ensaio os provetes foram rectificados por desgaste, de modo a se obterem faces planas e perpendiculares à geratriz do cilindro.

### 3.3 – Procedimento de ensaio

O controlo dos ensaios foi efectuado por circuito fechado utilizando o sinal do transdutor de deslocamento da prensa, tendo-se pré-estabelecido uma taxa de deslocamento de 0.01 mm/s, que equivale a uma variação de extensão axial do provete da ordem do valor de referência indicado no Model Code 1990 (CEB-FIP 1991) –  $30 \times 10^{-6}$ /s. Não foram utilizados dispositivos para reduzir o atrito entre os pratos e os provetes.

Antes de se efectuar o ensaio de compressão, determinaram-se os módulos de elasticidade dos provetes, segundo a especificação LNEC E397. Nesta determinação os extensómetros HBM DD1 foram colocados na superfície lateral dos provetes (figura 3).

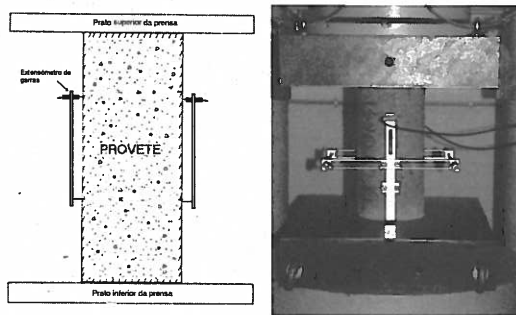


Fig 3 – Montagem para determinação do módulo de elasticidade

Esta montagem não foi utilizada no ensaio de compressão, uma vez que após os provetes atingirem a carga máxima apresentam uma degradação da superfície que pode afectar o contacto com o extensómetro e que, devido à localização dos danos, podem ocorrer fenómenos de descarga (figura 4).

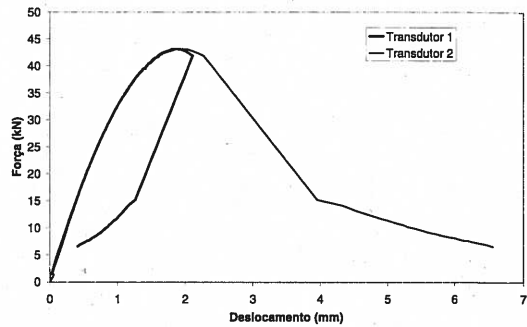


Fig 4 – Exemplo de curva força-deformação para extensómetros em contacto com o provete

Então, os extensómetros existentes foram utilizados como transdutores de deslocamento, conforme esquematizado na figura 5. A montagem concebida destina-se a isolar os extensómetros dos provetes e consiste na colocação de duas caixas que acompanham o deslocamento dos pratos da prensa, às quais se acoplam os extensómetros que medem o deslocamento relativo entre pratos, ou seja, a deformação total do provete.

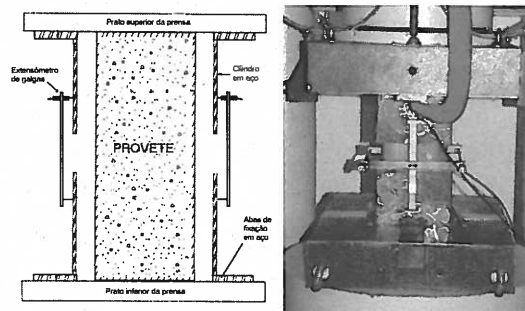


Fig 5 – Montagem para o ensaio de compressão

Refira-se que devido ao facto de o betão ser um material heterogéneo e também ao atrito entre os provetes e os pratos da prensa, as deformações não são uniformes em toda a altura do provete. Assim, a resposta obtida, em termos de deformação, depende da base de medição. No ensaio para a determinação do módulo de elasticidade as deformações foram medidas nos 20 cm centrais dos provetes. No ensaio de compressão a base utilizada foi 30 cm (a altura dos provetes).

Quando se medem deformações totais em regime pós-pico, devido à concentração dos danos, as extensões obtidas dependem da altura do provete (van Mier 1986) – figura 6, verificando-se

respostas mais dúcteis quando a altura dos provetes (dimensão da base) diminui.

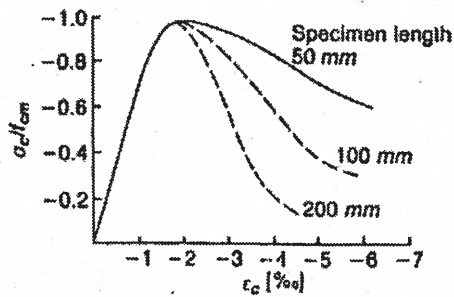


Fig 6 - Influência da altura dos provetes na resposta em regime pós-pico

Em regime pré-pico as deformações devidas ao contacto dos provetes com os pratos e às folgas do sistema de aplicação de carga perturbam a resposta (figura 7) e as deformações medidas são, geralmente superiores às que se verificam na zona central do provete (van Mier 1986). Quando se utiliza este tipo de medição é usual efectuar-se uma correcção, que consiste na linearização da curva até ao zero da força com um declive idêntico ao obtido entre 20% e 30% da carga máxima e tomar a intersecção como a origem da curva (Barros 1995).

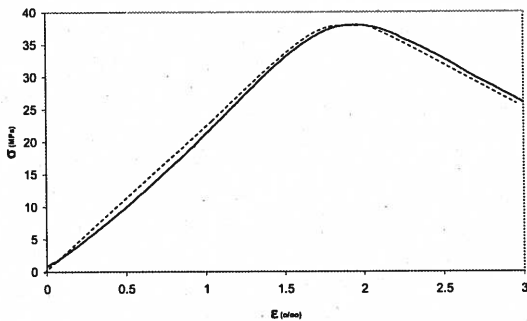


Fig 7 - Curvas tensão-extensão: original e corrigida

As curvas tensão-extensão foram obtidas dividindo os valores da força pela secção dos provetes e dividindo as deformações pela altura inicial dos provetes.

#### 4 - RESULTADOS OBTIDOS

A determinação do módulo de elasticidade em compressão conduziu aos valores indicados na tabela 2, em que cada resultado representa a média de 6 provetes.

Tabela 2 - Módulo de elasticidade

Betão	N	H
E <sub>i</sub> (GPa)	35.8	42.5

Com base nestes resultados calculou-se a rigidez axial dos provetes tendo-se obtido os valores de 2100 kN/mm (1) e 2500 kN/mm (2) para os provetes dos betões N e H, respectivamente.

$$K_N = \frac{EA}{L} = \frac{35.8 \times \pi \cdot 75^2}{300} \approx 2100 \frac{kN}{mm} \quad (1)$$

$$K_H = \frac{EA}{L} = \frac{42.5 \times \pi \cdot 75^2}{300} \approx 2500 \frac{kN}{mm} \quad (2)$$

Assim, a rigidez dos provetes ensaiados foi da ordem de grandeza da rigidez da prensa, possibilitando o desenvolvimento do ramo de amolecimento. As 6 curvas obtidas para cada betão são apresentadas nas figuras 8 e 9.

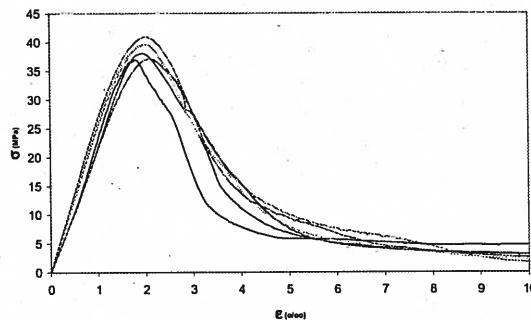


Fig 8 - Curvas tensão-extensão para o betão N

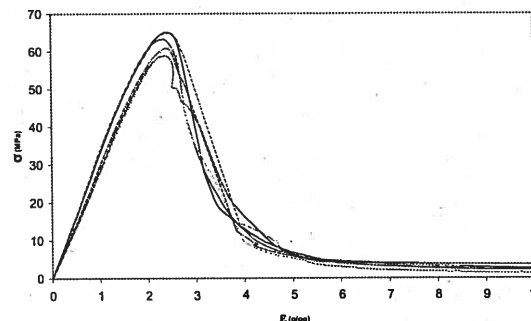


Fig 9 - Curvas tensão-extensão para o betão H

A curva média para cada tipo de betão foi obtida calculando a tensão média para determinadas extensões.

$$\sigma_i(\epsilon_i) = \frac{\sum_{n=1}^6 \sigma_{i,n}(\epsilon_i)}{6} \quad (3)$$

em que as variáveis têm o significado indicado na figura 10.

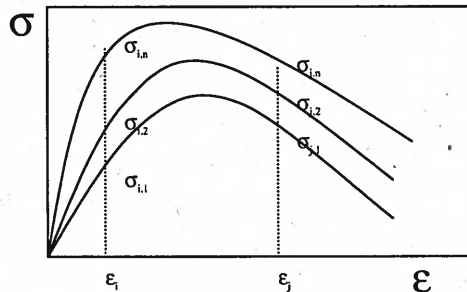


Fig 10 - Cálculo da curva média

Na figura 11 apresentam-se as curvas assim calculadas, indicando-se na tabela 3 a resistência máxima ( $f_c$ ) e a extensão correspondente ( $\epsilon_{co}$ ), para cada tipo de betão ensaiado.

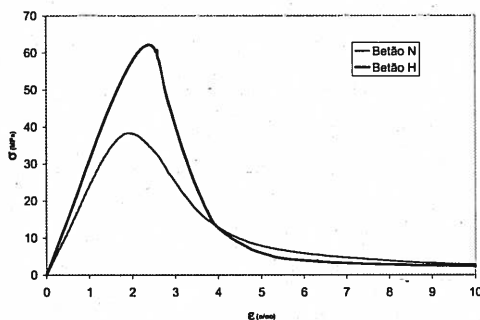


Fig 11 - Curvas médias de cada tipo de betão

Tabela 3 - Resistência máxima e extensão

Betão	N	H
$f_c$ (MPa)	38.3	62.2
$\epsilon_{co}$ (‰)	1.94	2.38

As respostas obtidas evidenciam uma maior resistência do betão com o estudo de composição H, que aliás era esperada dada a maior dosagem de ligante e a menor relação água/ligante. O betão H exibiu ainda um módulo de elasticidade mais elevado que o betão N, o que também é normal atendendo à relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (CEB-FIP 1991), e uma maior extensão quando se atingiu a máxima

capacidade de carga. Este facto também se verificou em outros estudos (Nicolo et al 1994, van Gysel e Taerwe 1996) em que ocorreu o aumento de  $\epsilon_{co}$  com a resistência à compressão.

A continuação do ensaio para além da carga máxima, permitiu verificar que a diminuição da capacidade resistente é mais acentuada no betão H, ou seja, que este tem um comportamento mais frágil que o betão N. No entanto, o betão H consegue manter uma capacidade de carga superior à do betão N até uma extensão de 4 ‰.

## 5-MODELO DO MODEL CODE 1990

O Model Code 1990 (CEB-FIP 1991) apresenta na sua secção 2.1.4.4.1 expressões que pretendem modelar o comportamento do betão em compressão uniaxial. A modelação proposta tem como parâmetros a resistência máxima, a extensão correspondente e o módulo de elasticidade. Na figura 12 efectua-se a comparação dos resultados experimentais com os obtidos através do modelo considerado. Refira-se que para  $\epsilon_{co}$  foram tomados os valores obtidos experimentalmente em detrimento da extensão proposta (0.022).

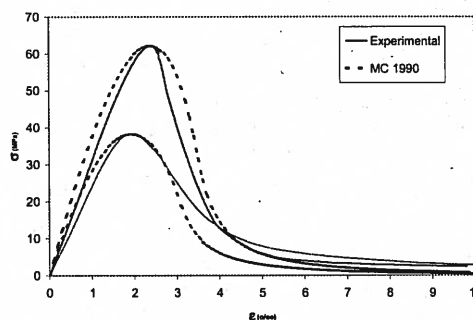


Fig 12 - Comparação entre resultados analíticos e experimentais

O modelo analítico ajusta-se razoavelmente aos resultados experimentais. As diferenças entre o andamento das curvas no regime pré-pico, advêm do facto de as extensões experimentais serem determinadas a partir da deformação total dos provetes. Em regime pós-pico a resposta analítica é mais frágil para o betão N e mais dúctil para o betão H, em relação aos resultados experimentais.

Apesar da razoável adequação do modelo para simular o comportamento de betões correntes em compressão uniaxial, este não é válido para betões de ductilidade melhorada como os betões reforçados com fibras (Barros 1995). Para modelar o comportamento deste tipo de betões devem ser utilizadas outras leis constitutivas (Neves e Almeida 2000).

## 6-CONSIDERAÇÕES FINAIS

O equipamento utilizado e o método de ensaio desenvolvido permitiram a caracterização do comportamento pós-pico de betões com resistências à compressão até 65 MPa. Embora seja reconhecido que a resposta obtida depende de alguns factores relacionados com o ensaio e que esta, após a carga máxima, seja considerada um comportamento de carácter estrutural e não material (van Mier 1986), a normalização do ensaio, a aplicação de modelos constitutivos e a sua calibração através da análise do comportamento de protótipos de elementos estruturais, poderá constituir uma mais-valia no dimensionamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado, nomeadamente naquelas que se pretendam dúcteis ou em que se utilizem betões de ductilidade melhorada.

## REFERÊNCIAS

Zangelmi Jr., E. (1999), "Caracterización del comportamiento de hormigones de altas prestaciones con y sin fibras metálicas a compresión uniaxial", Tesis Doctoral, Barcelona, 164p.

Markeset, G. e Hillerborg, A. (1995), "Softening of Concrete in Compression - Localization and Size Effects", Cement and

Concrete Research, Vol. 25, n. 4, Elsevier, pp. 702-708

Coutinho, A. S. e Gonçalves, A. (1994), "Fabrico e Propriedades do Betão", Vol. III, LNEC, 368 p.

Sangha, C. e Dhir, R. (1972), "Strength and Complete Stress-strain Relationships for Concrete Tested in Uniaxial Compression under Different Test Conditions", *Materiaux et Constructions*, Vol. 5, No. 30, RILEM, pp. 361-370

RILEM TC 148-SCC (1997), "Strain-softening of concrete in uniaxial compression", *Materials and Structures*, V. 30, May, pp. 195-209

Neves, R. (2000), "Medição de Deformações em Ensaio de Compressão em Provete de Betão", Relatório 13/00-NAB, LNEC, 22 p.

CEB-FIP (1991), "Model Code 1990", Thomas Telford, 437 p.

Van Mier, J. (1986), "Multiaxial Strain-Softening of Concrete. Part I: Fracture", *Materiaux et Constructions*, Vol. 19, No. 111, RILEM, pp. 179-200

Barros, J. (1995), "Comportamento do Betão Reforçado com Fibras. Análise Experimental e Simulação Numérica", Tese de Doutoramento, FEUP, Porto

Nicolo, B. De; Pani, L. e Pozzo, E. (1994), "Strain of Concrete at Peak Compressive Stress for a Wide Range of Compressive Strengths", *Materials and Structures*, Vol. 27, RILEM, pp. 206-210

Van Gisel, A. e Taerwe, L. (1996), "Analytical Formulation of the Complete Stress-Strain Curve for High-Strength Concrete", *Materials and Structures*, Vol. 29, RILEM, pp. 529-533

Neves, R. e Almeida, J. (2000), "Betões Reforçados com Fibras de Aço. Modelos constitutivos em compressão uniaxial", *Betão Estrutural 2000*, FEUP Edições, pp.143-150

