

# BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Joaquim António Oliveira de Barros  
Prof. Auxiliar do Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da Escola de Eng<sup>a</sup> da Universidade do Minho  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães  
Tel: 253 510 210, Fax: 253 510 217, Email: barros@eng.uminho.pt

## 1 – INTRODUÇÃO

Por betão reforçado com fibras de aço (BRFA) entende-se todo o material de matriz cimentícia ao qual se adiciona fibras de aço curtas. Este material tem sido utilizado, desde início dos anos setenta (ACI 544.1R-96, 1997), em aplicações onde as fibras revelam ter potencial para substituírem as armaduras convencionais, com vantagens económicas e técnicas. Estas aplicações têm sido essencialmente os pavimentos de edifícios industriais e as estruturas de suporte em túneis. As vantagens económicas advêm, fundamentalmente, da supressão da mão de obra necessária no corte e colocação das armaduras convencionais e no menor tempo de execução da estrutura. As vantagens técnicas estão relacionadas com o reforço homogéneo que as fibras garantem, com a ductilidade que introduzem no betão e com o melhor comportamento à fendilhação do betão. Por exemplo, num pavimento industrial as fibras proporcionam um reforço praticamente igual para os momentos positivos e negativos. Para assegurar este reforço com armaduras convencionais é necessário aplicar uma malha na face inferior e outra na face superior da laje, o que requer mão-de-obra considerável e exige mais tempo na execução do pavimento. Além disto, durante o processo de betonagem de um pavimento industrial armado com malhas electrossoldadas, a malha superior acaba geralmente por não ficar na posição definida pelo projectista, sendo o reforço para os momentos negativos bastante inferior ao pré-estabelecido no projecto. A maior ductilidade do betão reforçado com fibras está directamente relacionada com os mecanismos de reforço proporcionados pelas fibras, esquematicamente representados na Figura 1. O número e tipo de mecanismos dependem, essencialmente, da configuração geométrica das fibras. Assim, os benefícios proporcionados pelas fibras lisas resultam da aderência e atrito entre as fibras e a matriz envolvente, e da deformação elástica das fibras. No caso das fibras com superfícies irregulares, além dos anteriores mecanismos existe ainda o efeito das engrenagens entre a fibra e matriz envolvente, resultantes das irregularidades na superfície da fibra. Nas fibras com extremidades dobradas, além do atrito, aderência e deformação elástica das fibras existe ainda o mecanismo resultante da ancoragem das extremidades das fibras no betão. Estudos comparativos com diferentes tipos de fibras têm revelado que as fibras com as extremidades dobradas proporcionam ao betão maiores níveis de desempenho (Banthia *et al.*, 1994; Clements, 1996; Balaguru e Shah, 1992).

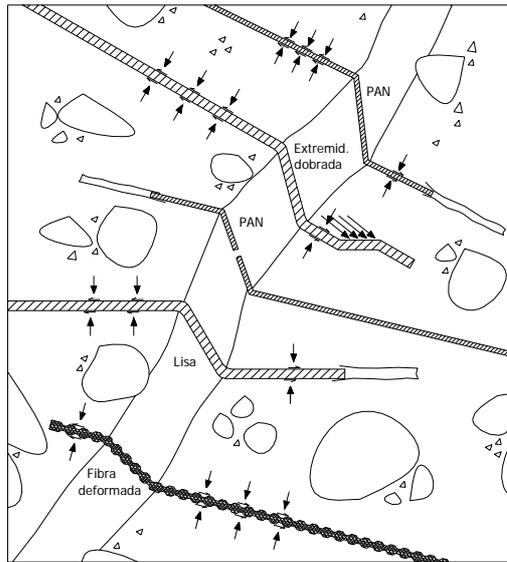


Figura 1 – Mecanismos de reforço de diversos tipos de fibras.

Após a carga de fendilhação do betão, que não é significativamente alterada para percentagens correntes de fibras, estas passam a sustentar a maior parte das tensões libertadas pelo betão. Se o comprimento da fibra, sua forma geométrica e tensão de rotura do seu aço impedirem que a fibra rompa na secção da fenda (onde a tensão na fibra é mais elevada), ocorrerá um deslizamento relativo entre a fibra e o betão envolvente. Este efeito, alargado a todas as fibras que atravessam a fenda, proporciona uma elevada dissipação de energia, causando um aumento significativo na ductilidade do material (Barros e Sena, 2001). De uma forma simples, este conceito pode ser interpretado pela maior retenção de tensões de tracção do BRFA fendilhado, conforme se representa na Figura 2. Assim, para uma determinada extensão,  $\bar{\varepsilon}$ , o BRFA garante uma tensão  $\sigma^{BRFA}(\bar{\varepsilon})$  significativamente superior à do betão simples (BS),  $\sigma^{BS}(\bar{\varepsilon})$ .

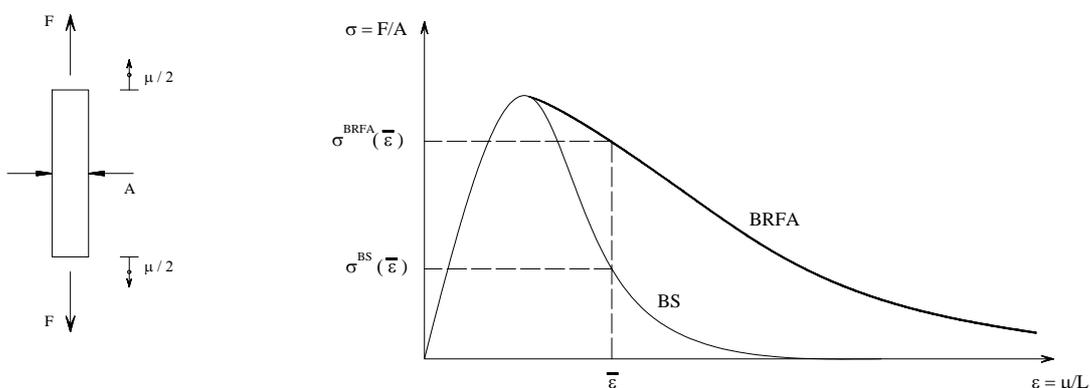


Figura 2 – O betão reforçado com fibras de aço (BRFA) fendilhado tem uma resistência à tracção maior que o correspondente betão simples (BS).

As fibras que atravessam determinada fenda do betão, desde que em número suficiente (Barros, 1995), podem evitar a abertura dessa fenda, proporcionando uma fendilhação distribuída, caracterizada por diversas fendas de pequena abertura, resultando num melhor comportamento do betão em termos de durabilidade. Assim, a participação das fibras podem converter uma rotura frágil em dúctil. A Figura 3 é exemplo do que se acaba de descrever (Barros e Figueiras, 1997, 1999). Trata-se de um conjunto de ensaios de flexão com faixas de laje reforçadas com a armadura convencional mínima regulamentar (CEB-FIP 1993) e com quatro quantidades de fibras de aço (0, 30, 45 e 60 Kg/m<sup>3</sup>). Constatou-se que, além do aumento significativo na capacidade de carga última das lajes, as fibras proporcionaram uma diminuição da distância média entre fendas de 100 mm para 30 Kg/m<sup>3</sup> de fibras para 40 mm para 60 Kg/m<sup>3</sup> de fibras.

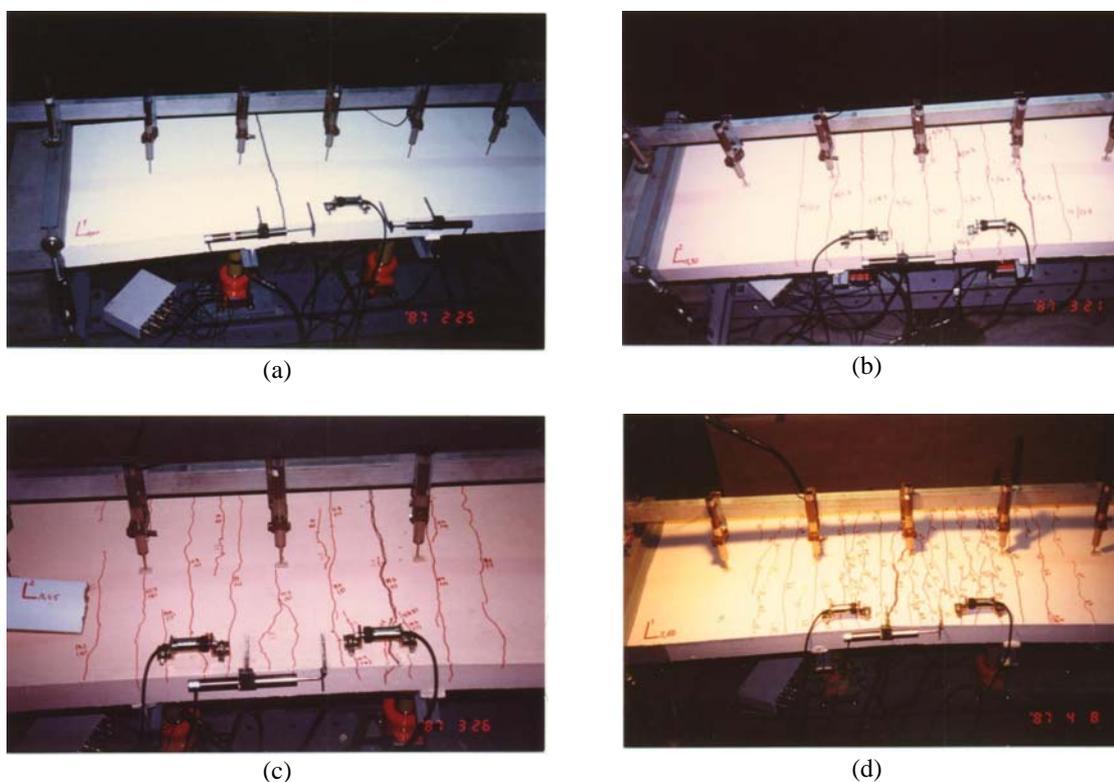


Figura 3 – Ensaios em faixas de laje com 0 (a), 30 (b), 45 (c) e 60 (d) Kg/m<sup>3</sup> de fibras Dramix 80/60.

Os benefícios que as fibras introduzem no betão dependem fundamentalmente das propriedades geométricas e materiais das fibras e da qualidade do betão. O tipo de fibras deve ser seleccionado em função da qualidade do betão a utilizar. Por exemplo, com um betão de elevada resistência deve-se evitar fibras longas, de forma a impedir a rotura das fibras na secção da fenda. Num betão de resistência baixa e com inertes de maior dimensão deve-se utilizar fibras longas com o intuito de haver maior probabilidade de existirem fibras a “cozerem” os vazios e microfendas que ocorrem em maior número neste betão (ver Figura 4).

Em termos gerais e de uma forma simplificada pode-se dizer que, se a rotura das fibras na secção da fenda for evitada, deve-se optar por um tipo de fibra que conduza ao maior número de fibras por unidade de volume de betão.

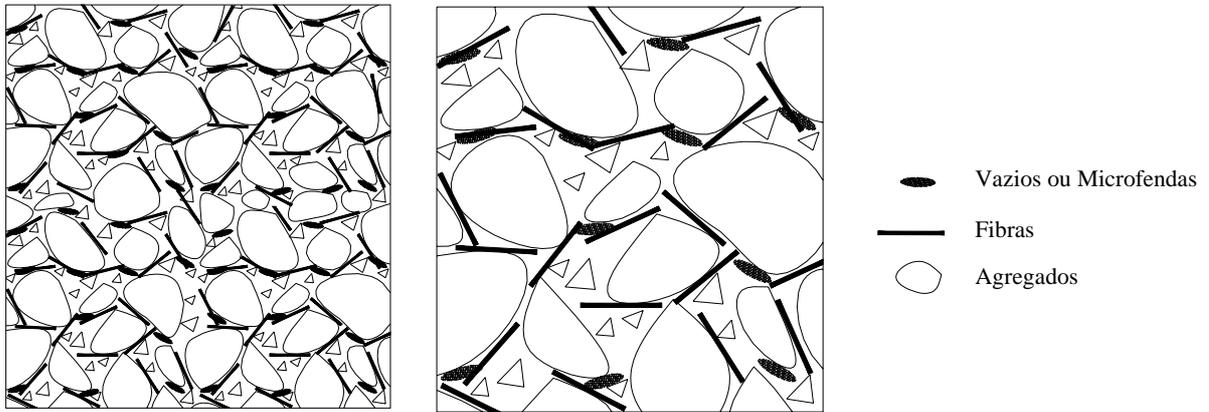


Figura 4 – Fibras curtas nos betões de elevada resistência (a) e longas no betão de baixa resistência e de inertes com maior dimensão.

## 2 - FIBRAS DE AÇO

Existem diversos tipos de fibras de aço, com diferentes formas geométricas e aços de diferente resistência. Algumas das fibras de aço mais utilizadas na indústria da construção civil estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Algumas fibras de aço.

Fibra lisa lamelar com secção rectangular ou em arame com secção circular	Fibra deformada com secção rectangular	Fibra deformada com secção circular	Fibra deformada em arame de secção circular ou meia lua	Fibra lisa de secção circular com extremidades dobradas, coladas ou soltas	Fibra lamelar com extremidades alargadas com secção rectangular ou circular	Fibra resultante da maquinação de elementos de aço	Fibra amorfa

O comprimento das fibras correntes varia entre 30 mm e 60 mm, enquanto o diâmetro enquadra-se no intervalo de 0.15 mm a 1 mm. Existem fibras mais curtas e de menor diâmetro, vocacionadas para betões ultra resistentes (Rossi et al. 1995). A relação entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro define o que se designa por factor de forma da fibra, variando,

geralmente entre 30 e 100. Se a homogeneidade na distribuição das fibras for assegurada, quanto maior for este factor maior serão os benefícios que as fibras proporcionam. Contudo, a trabalhabilidade da mistura e a homogeneidade na distribuição das fibras diminuem com o aumento do factor de forma das fibras. Na tentativa de assegurar elevados desempenhos em termos de reforço, sem prejuízo da trabalhabilidade da mistura e da adequada distribuição das fibras. Fibras de factor de forma elevado, coladas entre si, constituindo plaquetas de 30 a 50 fibras (ver Figura 5) foram lançadas no mercado. Desta forma, o pente é encarado como uma fibra fictícia de factor de forma bastante mais baixo que o de cada fibra individual. Durante a amassadura, a cola que une estas fibras dissolve-se na água da amassadura, sendo recuperado o factor de forma das fibras individuais e, por conseguinte, é assegurada a total capacidade de reforço que as fibras individuais concedem.

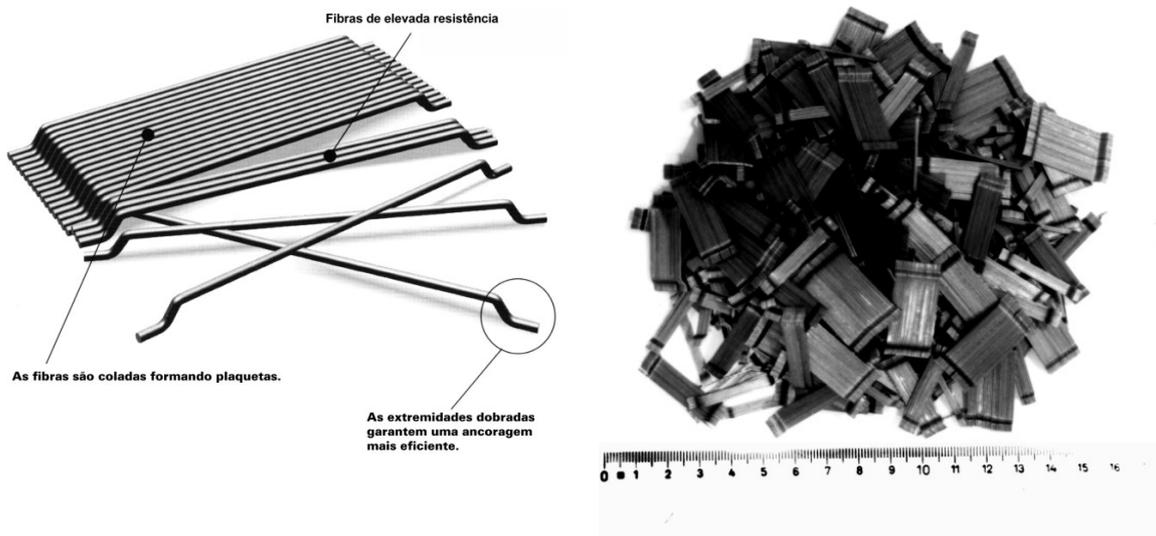


Figura 5 – Plaquetas de fibras.

No que respeita à tensão de cedência do aço, existem fibras com tensão de cedência desde os 700 MPa até aos 2500 MPa. Nos betões de baixa e moderada resistência utilizam-se fibras de resistência até aos 1200 MPa. Fibras com tensão de cedência acima deste valor são utilizadas em betões de resistência elevada.

### 3 – COMPOSIÇÕES E TRABALHABILIDADE

Em ACI 544.1R-96 são dadas indicações para composições de BRFA. No entanto, a composição deve-se adequar ao tipo e quantidade de fibras a aplicar. A composição mais apropriada é a que conduz à maior compacidade da mistura (Rossi, 1998). Seguindo esta metodologia para os BRFA a aplicar em pavimentos foram desenvolvidos, recentemente, BRFA de custo competitivo para pavimentos de edifícios industriais, que apresentam

resistências entre 25 a 35 MPa aos 28 dias, com uma quantidade de ligante que não ultrapassa os 300 Kg/m<sup>3</sup> e com um slump superior a 15 cm (Amorim *et al.*, 2000).

Apesar de ser o ensaio mais utilizado para avaliar a trabalhabilidade do betão, o ensaio do cone de Abrams não é o mais adequado para o BRFA. Contudo, pode ainda ser efectuado, em complemento com outros ensaios mais apropriados, de forma a fornecer indicadores acerca do tipo de betão entre diferentes amassaduras. Os ensaios mais adequados são o VB test (Coutinho, 1997) e o cone invertido (ACI 544.2R-78, 1978).

Na amassadura em estaleiro, as fibras devem ser o último elemento a ser introduzido na betoneira. A introdução das fibras deve ser lenta e gradual de forma a assegurar-se uma distribuição das fibras o mais homogénea possível. Quando se recorre ao betão fabricado numa central de betonagem, as fibras são introduzidas na autobetoneira uns minutos antes da aplicação do betão. Como as centrais de betonagem fornecem, geralmente, apenas os betões indicados na regulamentação em vigor, a adição de fibras a estes tipos de betões torna-os mais difíceis de aplicar, dado o maior atrito interno do material. Para superar esta dificuldade é corrente adicionar a esse tipo de betão uma quantidade significativa de água suplementar, pelo que este passa a ser de classe inferior ao estabelecido pelo projectista. Por este facto é urgente que os aplicadores de BRFA passem a utilizar superplastificantes em vez de água para aumentar a trabalhabilidade da mistura, de forma a não prejudicarem as propriedades do betão resultante. A outra alternativa passará pela concepção de misturas de forma a respeitar, quer os requisitos de resistência, quer as necessidade de trabalhabilidade da mistura. Por isso, as centrais de betonagem deveriam estar receptivas à fabricação de composições apropriadas para o BRFA.

A aplicação do BRFA é semelhante à do betão convencional. Contudo, deve-se evitar vibrações fortes com vibradores de agulha, de forma a assegurar-se uma distribuição homogénea das fibras.

Na cura do BRFA deve-se seguir os procedimentos recomendados para os betões correntes.

#### **4 – PROPRIEDADES MAIS SIGNIFICATIVAS DO BRFA**

A ductilidade é a propriedade mais beneficiada pelo reforço das fibras. Esta propriedade permite que, em estruturas com hiperestaticidade elevada, como são os casos dos pavimentos e das estruturas de suporte em túneis, a carga de colapso seja significativamente superior à carga de fendilhação do betão, aumentando a segurança deste tipo de estruturas. A Figura 6 representa a relação força-flecha em lajes de BS e de betão reforçado com 30 Kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço de extremidades dobradas (80/60) com 1800×1800×75 mm<sup>3</sup>, apoiadas em solo e carregadas no seu centro (Barros e Figueiras, 1995, 1998). Verifica-se que a carga de rotura é significativamente superior na laje de BRFA. A laje de BS sofreu rotura frágil por punção, enquanto a laje de BRFA rompeu por flexão (ver Figura 7).

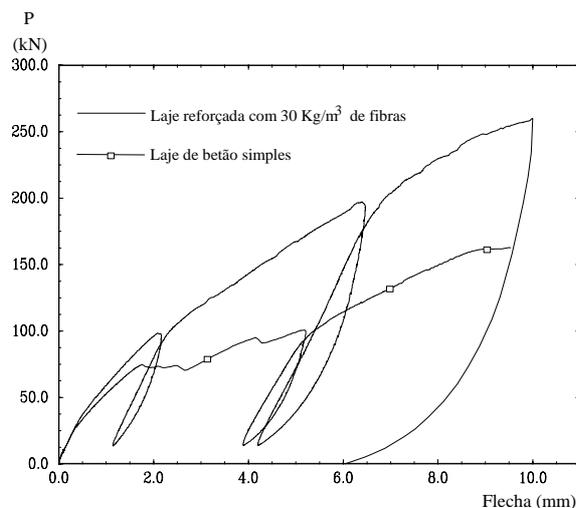


Figura 6 – Relação força-flecha em lajes de BS e BRFA.



(a)



(b)

Figura 7 – Padrão de fendilhação na laje de BS e de BRFA.

A maior resistência à tracção do BRFA fendilhado, em comparação com o seu correspondente BS, faz com que aquele material tenha um melhor comportamento sob acções cíclicas (Barros *et al.*, 2000), de fadiga e de impacto (Balaguru e Shah, 1992), revelando que o BRFA é bastante adequado aos pavimentos de edifícios industriais. As fibras podem ainda suprimir parcialmente cintas e estribos (Barros, 1995; Barros *et al.*, 1998), pelo que a sua utilização em zonas de elevada congestionação de armaduras de resistência ao corte, tais como os nós de pórtico, pode assegurar uma melhor qualidade de betão nessas zonas. A indústria da pré-fabricação é também um campo com potencial aplicação de BRFA, nomeadamente, na melhoria do comportamento à fendilhação, no maior aproveitamento das elevadas tensões resistentes das armaduras de pré-esforço sem ocorrer esmagamento do BRFA comprimido, na

substituição das armaduras de resistência ao corte em estruturas laminares e de geometria complexa.

O BRFA auto-compactável é muito apropriado para estruturas de elevada complexidade geométrica, em que não há tensões de tracção muito elevadas. Nestes casos, as fibras podem ser o único reforço na estrutura, evitando-se os custos elevados associados ao corte e montagem das armaduras convencionais, neste tipo de estruturas.

## 5 – MODELOS DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO

Só muito recentemente foram propostas formulações para, à luz dos Eurocódigos mais recentes, se ter em conta o efeito das fibras (RILEM TC 162 – TDF, 2000). No próximo artigo são descritos os ensaios que permitem avaliar os parâmetros que simulam esses efeitos.

Quanto a modelos de análise e dimensionamento, os mais desenvolvidos aplicam-se a pavimentos de edifícios industriais. Os mais simples baseiam-se na teoria das linhas de rotura (Bekaert, 1997; Barros, 2000) e recorrem a parâmetros que têm a haver com a ductilidade do BRFA, de forma a avaliar o momento resistente de uma secção de BRFA. Modelos mais poderosos suportam-se no método dos elementos finitos e permitem traçar a resposta deformacional da estrutura até ao seu colapso, tendo em conta o comportamento não linear dos materiais intervenientes (Barros, 1999; Barros e Figueiras, 2001). Contudo, estes modelos são demasiado complexos e morosos, de forma que a sua utilização está praticamente reservada à investigação e a estudos especiais.

## 6 - BIBLIOGRAFIA

ACI 544.2R-78, *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*, ACI, 1978.

ACI 544.1R-96, *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI, 1997.

Amorim, J.A.S.B.; Barros, J.A.O., Jalali, S., “Concepção de composições de BRFA de custo competitivo”, Relatório Confidencial, Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da UM, 32 pp., Dezembro de 2000.

Balaguru, P.N.; Shah, S.P., “Fiber reinforced cement composites”, *McGraw-Hill International Editions*, Civil Engineering Series, 530 pages, 1992.

Banthia, N.; Trottier, J.F.; Beaufre, D.; Wood, D., “Influence of fiber geometry in steel fiber reinforced wet-mix shotcrete”, *Concrete International*, pp. 27-32, June 1994.

Barros, J.A.O., *Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*, Tese de doutoramento, Faculdade de Eng<sup>a</sup> da Univ. do Porto, 1995.

Barros, J.A.O.; Figueiras, J.A., “Experimental analysis of fiber reinforced concrete slabs”, International Conference New Technologies in Structural Engineering (IABSE, FIP and LNEC), LNEC, Lisbon, 2-5 July 1997.

Barros, J.A.O., Figueiras, J.A., “Experimental behaviour of fiber concrete slabs on soil”, *Journal Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, Vol. 3, 277-290, 1998.

Barros, J.A.O.; Sena Cruz, J.; Delgado R.M.; Costa, A.G., “Análise experimental de elementos de betão armado reforçado com fibras sob acções cíclicas”, JPEE’98 Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, LNEC, pp. 421-430, Novembro, 1998.

Barros, J.A.O., Figueiras, J.A., “Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete: testing and modelling”, *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 11, Nº 4, pp 331-339, 1999.

Barros, J.A.O., “Analysis of concrete slabs supported on soil”, IV Congreso Métodos Numéricos en Ingeniería, SEMNI, Sevilha, Junho 1999.

Barros, J.A.O.; Sena Cruz, J.M.; Delgado, R.M.; Costa, A.G., “Reinforced concrete under cyclic loading”, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland – Nova Zelândia, , pp.0772-1 a 0772-8, 30 de Janeiro a 4 de Fevereiro de 2000.

Barros, J.A.O., Figueiras, J.A., “Nonlinear analysis of steel fibre reinforced concrete slabs on grade”, *Computers & Structures*, Vol.79, No.1, pp. 97-106, Janeiro 2001.

Barros, J.A.O., Sena Cruz, J., “Fracture energy of steel fibre reinforced concrete“ *Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures* (aceite para publicação em Janeiro de 2001).

Bekaert, “Steel Fibre Reinforced Industrial Floor Design in Accordance with the Concrete Society TR34”, N.V. Bekaert S.A., 44 pp., 1997.

CEB-FIP, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General rules and rules for buildings*, 1993

Clements, M.J.K., “Measuring the performance of steel fibre reinforced shotcrete”, *IX Australian Tunnelling Conference*, Sydney, Australia, pp. 261-268, 27-29, August 1996.

Coutinho, A.S., *Fabrico e propriedades do betão – Volumes I e II*, LNEC, Lisboa, 1997.

Rossi, P.; Reuwez, S.; Belloc, A., “Les bétons à ultra-hautes performances fibrés”, *Bulletin de Liaison des LPC*, nº 196, pp. 61-66, 1995.

Rossi, P., *Les bétons de fibres métalliques*, Presses de l’École nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-292-3, 309 pp., 1998.