

---

Pereira, E.N.B.; Barros, J.A.O.; Camões, A.F.F.L.

---

## **BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO** *Método Racional de Concepção*

### **SELF-COMPACTING STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE** *A rational conception method*

**Pereira, E.N.; Barros, J.A.O.; Camões, A.F.F.L.**

Universidade do Minho

**Resumo:** *O conceito de betão auto-compactável é complexo, e fundamenta-se sobretudo num conjunto de propriedades que este material tem que demonstrar ser capaz de satisfazer, quando no estado fresco. É uma nova dimensão que se acrescenta ao conceito clássico de betão, e que se concentra sobretudo ao nível das suas propriedades reológicas.*

*O incremento de complexidade que esta dimensão introduz na formulação e compreensão deste novo conceito de betão é evidente, e deve-se fundamentalmente à necessidade de compreender os fenómenos que orientam o comportamento de um material que, apesar de resultar da mistura dos mais diversos componentes e com granulometrias muito distintas, se comporta como um fluido estável. Desta forma, é difícil e nem sempre totalmente claro o percurso que conduz à afinação de uma mistura ótima, tanto mais que o número de componentes é mais elevado que o normal (adjuvantes e adições em grande número), e a sensibilidade de uns à presença dos outros é elevada. Torna-se, portanto, imperativa a formulação de um método racional que, de uma forma simples, seja sensível a toda esta problemática, e que seja eficaz na concepção de misturas com bom desempenho tanto mecânico como reológico, não esquecendo a sua sustentabilidade económica e ambiental.*

*O método que aqui é proposto dá fortes sinais neste sentido, mostrando que é possível conceber misturas de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, capazes de satisfazer todas as exigências acima referidas.*

**Palavras-chave:** Betão auto-compactável, fibras de aço, cinzas volantes, filler calcário.

**Abstract:** *The concept of self-compacting concrete is complex, and stains above all in a number of properties that, while in the fresh state, it has to prove to be able to accomplish. It's a new dimension that enriches classic concept of concrete, focused mainly on its rheological properties.*

*The raise of complexity that this new dimension brings to the formulation and understanding*

*of this new concept of concrete is clear, and is mainly the result of the need to justify the phenomena sustaining the behavior of a material that, despite resulting of the mixture of the most different components with different grain sizes, behaves like a stable fluid. In this way, the path that leads to the optimization of a mixture is hard and not always totally clear, being the number of components higher than in conventional cases ( higher number of admixtures and additives), and the sensibility of ones to the presence of the others is higher. This idea results in the strong need of a formulation of a new rational method that, in a simple manner, has to be sensible to all this aspects, and to be efficient in the conception of mixtures with good mechanical and rheological behavior, not forgetting his economical and environmental sustainability..*

*The method here proposed gives strong signs in this way, showing that is possible to conceive self-compacting concrete mixtures, reinforced with steel fibers, able to satisfy every demanding yet referred.*

**Keywords:** Self-compacting concrete, steel fibers, fly ash, limestone filler.

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de betão auto-compactável vem abrir novos horizontes nas possibilidades de aplicação de um material que, na sua vertente clássica, se tem revelado versátil e eficaz, ao longo de várias décadas. Desde sempre que a preocupação do desenvolvimento tecnológico do betão como material estrutural, se concentra no aperfeiçoamento das suas aptidões em termos de comportamento mecânico e de durabilidade. No entanto, as mais recentes evoluções na tecnologia dos adjuvantes, sobretudo dos agentes superplastificantes, veio abrir novos horizontes no trajecto evolutivo do betão e permitiu acrescentar-lhe uma nova dimensão, que é a do seu comportamento como material fluido, enquanto no estado fresco. A par desta evolução, a indústria da construção revela-se cada vez mais exigente no que toca a versatilidade, qualidade e desempenho do betão. Os processos construtivos evoluem no sentido de uma optimização constante de recursos, e a complexidade das estruturas realizadas cresce continuamente. Desta forma, é exactamente no comportamento reológico do betão que reside a resposta a todos estes desafios, e revela-se fundamental o domínio de todos os factores que influenciam o seu desempenho neste campo.

Contudo, tratando-se o betão de uma mistura de um número elevado de materiais com propriedades físicas e mecânicas distintas (vários tipos de agregados, adjuvantes e adições), nem sempre se revela imediato o modo de interacção entre eles, pelo que no seio de uma trama complexa de interacções que se estabelece entre os vários constituintes de um betão fluido, torna-se difícil discernir qual o papel que cada componente assume, e qual o seu efeito no comportamento do conjunto final. Assim sendo, a variedade e quantidade de ensaios que seriam necessários para fazer uma avaliação da natureza de todas estas interacções seria imenso, e conseqüentemente insustentável, pelo que se torna imperativa a necessidade de

racionalizar todo o processo e desenvolver um método que seja prático e eficaz na prossecução do objectivo essencial, que reside na concepção de misturas de betão que por um lado demonstrem cumprir as exigências de auto-compactabilidade, e que por outro se revelem económica e ambientalmente sustentáveis.

### ***1.1- Comportamento do betão auto-compactável no estado fresco:***

Quando no estado fresco, o betão pode ser encarado como sendo constituído por duas fases distintas: a fase sólida, que inclui todas as partículas de agregados cujo diâmetro equivalente seja superior a 150µm e que constitui o esqueleto sólido, e a fase fluida, que é constituída pelas partículas sólidas de diâmetro inferior a 150µm ( ligantes e adições), pela água e pelos adjuvantes (superplastificantes, controladores de viscosidade e introdutores de ar), que preenchem os espaços entre partículas do esqueleto sólido. É no estudo destas duas fases que reside o sucesso de qualquer método que pretenda ser eficaz na compreensão e concepção das misturas.

No que toca à fase sólida, o objectivo principal é o de conseguir um esqueleto sólido com a maior compacidade possível, sendo para isso necessário dispor de um número de agregados suficiente para assegurar uma gradação contínua da curva granulométrica do esqueleto sólido. Para o efeito, pode-se determinar a percentagem de cada tipo de agregado na mistura final procedendo ao ajuste por curvas de referência ( Faury, Bolomey, etc.). No entanto, factores como a forma dos agregados e a sua superfície só poderão ser tidos em conta em métodos mais experimentais, tal como o que mais adiante se propõe, e que consiste na determinação directa da compacidade de várias misturas medindo o seu peso para um volume constante, e seleccionando no final a que tiver maior peso. Este método aparenta ser mais adequado ao caso do betão reforçado com fibras de aço, já que no momento em que se afina a composição do esqueleto sólido é fundamental ter em conta a influência da presença das fibras de aço. Desta forma, o ajuste recorrendo a curvas granulométricas de referência obriga a admitir um diâmetro equivalente para as fibras de aço, que por serem elementos extremamente esbeltos tornam a simplificação demasiadamente grosseira.

A fase fluida, por seu turno, terá a função de servir como “veículo de transporte” das partículas que constituem o esqueleto sólido, da forma mais estável e coesa possível, e pelo que o seu papel no resultado final da mistura final é fundamental. A maior parte da complexidade que representa a definição de uma mistura auto-compactável reside na fase fluida, ou seja, na definição da composição da pasta. Por um lado, a pasta é constituída por um elevado número de componentes (ligantes, adjuvantes, adições e água), que torna complexa a definição da sua composição. Mas mais importante ainda é o facto de a natureza dos seus componentes ser tão diversa, que acaba por se tornar menos evidente a relação que se estabelece entre cada um deles no seio da mistura fluida. Na verdade, a água servirá como meio de suspensão à diversidade de partículas que constituem o material fino (MF), e como a sua concentração é elevada, as partículas encontram-se muito próximas umas das outras, logo a interacção entre elas é evidente, e assume pelo menos quatro formas distintas: as forças de

Van der Waals, as forças de dupla camada eléctrica ou dipolo, as forças de lubrificação hidrodinâmica e as forças estéricas. O ideal seria entender de que forma cada um destes tipos de interacção influencia o comportamento reológico da pasta. No entanto, esse conhecimento pode não ser suficiente, pois qualquer um dos quatro tipos de força depende não só das características físicas e químicas de cada partícula isoladamente, mas também das características das partículas que se encontram na sua vizinhança e das características da suspensão como um todo. A necessidade da utilização dos superplastificantes surge na sequência da tendência que as partículas em suspensão têm para formar flocos. Estes flocos, com diâmetros equivalentes bastante superiores aos das partículas que os compõem, acabam por criar espaços maiores entre partículas, implicando tanto uma redução da fluidez da pasta como um aumento da quantidade de água necessária para preencher o espaço entre partículas. É ao superplastificante que cabe a tarefa de dispersar as partículas e evitar a formação destes flocos. Desta forma, aumenta a proximidade entre as partículas sólidas que constituem a pasta e, assim, favorece-se a interacção entre elas, o que resulta em maior estabilidade e melhor qualidade em termos reológicos. A este nível, desempenha também um papel fundamental o grau de arrumação que se consegue atingir para o conjunto das partículas sólidas que constituem a pasta, pelo que um empacotamento superior destas partículas será vantajoso tanto em termos de comportamento mecânico (a uma maior compacidade corresponde uma maior resistência mecânica, por aumentar o número de pontos de contacto entre as partículas), como em termos reológicos (diminuem os espaços entre as partículas sólidas, ficando assim mais água livre disponível para lubrificar a superfície de contacto entre as partículas).

### ***1.2- Comportamento reológico da pasta - O modelo de Bingham.***

Na sequência do que acima foi dito, à luz dos princípios da reologia, que é a ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria, pode-se considerar que a fase fluida do betão (a pasta) consiste numa suspensão, em meio aquoso, de um determinado conjunto de partículas sólidas, de natureza diferente e de pequena dimensão. Desta forma, de entre os modelos de comportamento reológico mais simples, o que mais se adequa ao comportamento das pastas cimentícias é o modelo de Bingham (figura 1), que admite uma relação linear entre a velocidade de escoamento ( $v$ ) em regime laminar e a tensão tangencial aplicada ao fluido ( $\tau$ ). Este modelo admite ainda que existe uma tensão inicial em regime estacionário a ser vencida para que se inicie o escoamento (tensão de cedência  $\tau_0$ ). Ao valor de  $\mu$  dá-se o nome de viscosidade.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot v \quad (1)$$

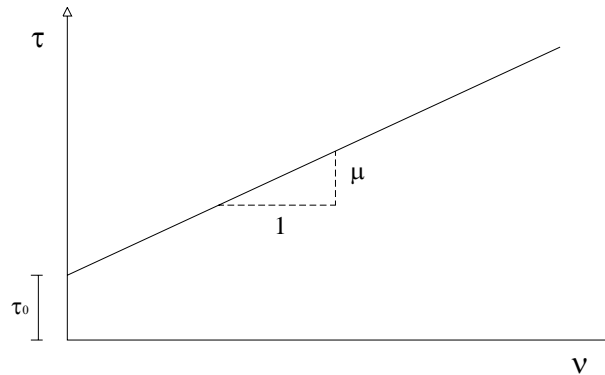


Figura 1. Diagrama esquemático do modelo de Bingham

O problema de afinação da composição da pasta pode-se então resumir à determinação dos valores da (viscosidade) e da (tensão de corte) que mais se adequam ao betão que se pretende projectar. De facto, de uma forma simples pode-se afirmar que é a viscosidade e a tensão de corte da pasta que governam o comportamento do betão como um todo. A ideia de que fenómenos como a segregação, exsudação, estabilidade da mistura, capacidade auto-nivelante e trabalhabilidade poderão ser controladas afinando estes dois parâmetros do comportamento reológico da pasta é sedutor, mas nem sempre claro e simples. Não é fácil avaliar isoladamente a viscosidade e a tensão de cedência, tanto pelo facto de ser difícil eliminar o efeito de escala, como pelo reconhecimento de ser difícil reproduzir o estado de deformação por corte puro de fluidos em regime laminar, mesmo recorrendo aos reómetros mais recentes e mais evoluídos tecnologicamente. Deste modo, o método que se propõe para afinação da composição da pasta tenta inferir indirectamente as consequências do que acima foi dito, mas de uma forma mais simples e mais intuitiva, ou seja, recorrendo ao ensaio de espalhamento em pastas com o mini-cone, e ao ensaio de escoamento no cone de Marsh.

## 2. TRABALHO EXPERIMENTAL

O objectivo principal do trabalho que a seguir se descreve é fundamentalmente o de se conseguir uma composição de betão reforçado com fibras de aço (BRFA), com características de auto-compactabilidade. Para o efeito, utilizou-se o cimento (C) tipo I da classe 42.5R da Secil, cinzas volantes (CV) provenientes da central térmica do Pego, superplastificante (SP) de terceira geração com base em policarboxilatos (Glenium 77 SCC), água, e três tipos de agregados (areia fina, meia areia e brita 5-12).

O método que neste trabalho se propõe é constituído por três fases distintas: na primeira, procede-se à afinação da composição da pasta; na segunda, afina-se a composição do esqueleto sólido; na terceira, faz-se a mistura da pasta com o esqueleto sólido afinado,

variando-se a percentagem em volume de pasta no volume total de betão até se obter uma mistura que apresente características de auto-compactabilidade, ou seja, apresente espalhamento suficientemente elevado, velocidade de escoamento correcta, adequada capacidade de se adaptar e ultrapassar obstáculos, e resistência ao fenómeno de segregação e exsudação.

## 2.1 - 1ª Campanha de ensaios

Nesta primeira campanha de ensaios, deu-se início à primeira fase do procedimento, ou seja, a definição da composição da pasta. Para o efeito, procedeu-se à realização de várias misturas de água, cimento e cinzas volantes, fazendo-se variar a percentagem de água e de cinzas volantes. Cada uma destas percentagens é definida em termos de volume, tendo por base o volume de cimento utilizado. A todas as misturas também se acrescentou uma quantidade constante de superplastificante, de forma a promover a dispersão das partículas finas em suspensão. Os resultados obtidos no ensaio com o cone de espalhamento resumem-se no gráfico da figura 2:

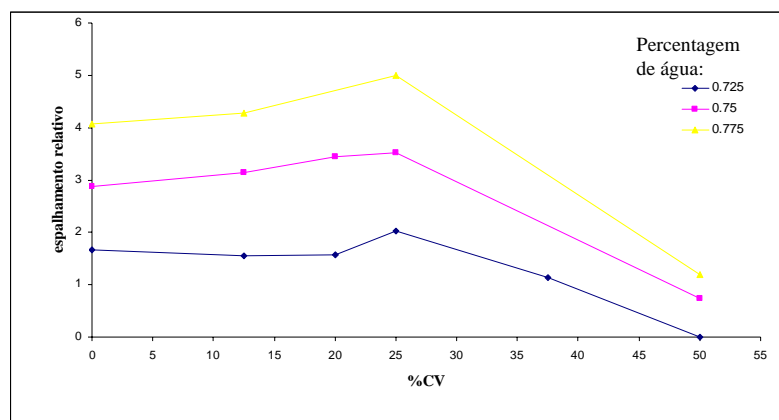


Figura 2 – Variação do espalhamento relativo com a variação da percentagem de cinzas volantes.

Deste gráfico pode-se inferir que a percentagem de cinzas volantes que otimiza o comportamento da pasta é 25%, pois para uma mesma quantidade de água a pasta que atinge maior diâmetro de espalhamento é a que contém esta percentagem de CV.

Sabendo agora as percentagens relativas de cimento e de cinzas volantes, passa-se à determinação da quantidade óptima de superplastificante, recorrendo ao ensaio de escoamento com o cone de Marsh. Para tal, realizaram-se várias composições com quantidades fixas de cimento, cinzas volantes e água, fazendo-se variar a quantidade de superplastificante, que é definida relativamente ao volume total de materiais finos (cimento e cinzas volantes). Para cada composição elaborada determinou-se a resistência à compressão em cubos de 5cm de aresta aos 7 dias, bem como o tempo de escoamento no cone de Marsh. Os resultados obtidos

estão apresentados nas figuras 3 e 4.

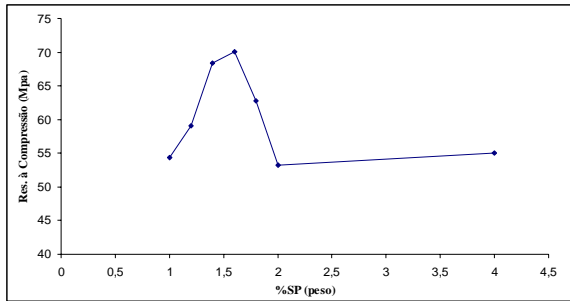


Figura 3. Resistência à compressão de pastas com diferentes percentagens de superplastificante.

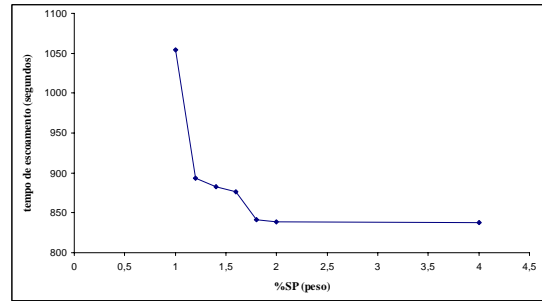


Figura 4. Tempo de escoamento no cone de Marsh de pastas com várias percentagens de superplastificante.

Dos gráficos expostos, conclui-se que o efeito do aumento da quantidade de superplastificante começa a ser pouco significativo a partir dos  $0,12 \text{ dm}^3/\text{Kg}$ . Por outro lado, a resistência à compressão atinge um máximo para uma quantidade de superplastificante de  $0,14 \text{ dm}^3/\text{Kg}$ , o que permite concluir que a quantidade de superplastificante é ótima para este valor, conduzindo ao máximo empacotamento das partículas sólidas da pasta.

Termina então a fase de definição da composição da pasta, concluindo-se que para cada unidade de volume de cimento acrescentar-se-á 25% desse valor em volume de cinzas volantes, uma quantidade de  $0,14 \text{ dm}^3/\text{Kg}$  de superplastificante, e uma quantidade de água nunca inferior a 75% do volume de material fino.

Na segunda fase do procedimento, afinou-se a composição do esqueleto sólido. Para o efeito, realizaram-se várias misturas de meia areia e brita em percentagens relativas diferentes. Mais uma vez, estas percentagens foram definidas em termos de volume. Para cada mistura mediu-se o seu peso para um volume de  $5 \text{ dm}^3$  e, ao representar graficamente os resultados obtidos, concluiu-se que existe um ponto ótimo na curva, que coincide com a mistura que atinge maior peso e, conseqüentemente, apresenta um grau de empacotamento superior, pelo que de compacidade mais elevada (ver figura 5).

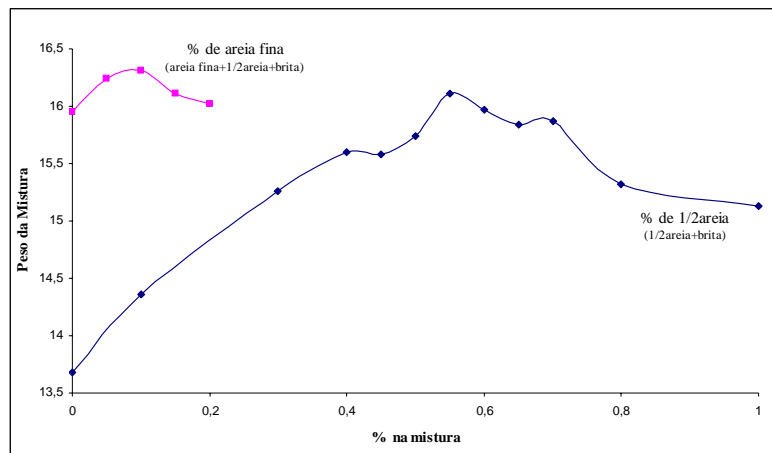


Figura 5. Peso das misturas dos vários agregados.

Ao ponto óptimo correspondem as percentagens relativas de meia areia e brita na composição final de, respectivamente, 55% e 45%. Posteriormente, introduziu-se na mistura a areia fina. Desta feita, fez-se variar a percentagem relativa, em volume, de areia fina no volume total de agregados, mantendo constante as percentagens relativas de meia areia e brita, resultantes do passo anterior. Da representação gráfica dos pontos que se obtêm medindo o peso de um volume fixo de  $5 \text{ dm}^3$  de cada uma desta última série de misturas, resulta um ponto óptimo que conduz à composição final do esqueleto sólido. Ao ponto óptimo desta última composição corresponde uma percentagem, em volume, de areia fina de 10%, sendo o volume restante composto pelos 55% de meia areia e 45% de brita anteriormente determinados.

Convém salientar que em todas as misturas acima referidas se acrescentou o volume correspondente a 30 Kg de fibras de aço por  $\text{m}^3$  do betão. Desta forma, a composição do esqueleto sólido é afinada tendo em conta a perturbação que a presença das fibras introduz no empacotamento das partículas que constituem o esqueleto sólido.

Na terceira fase do método, misturaram-se a pasta e o esqueleto sólido afinados nas duas fases anteriores, fazendo-se agora variar a percentagem, em volume, de pasta relativamente ao volume total de betão. Para cada mistura realizou-se o ensaio com o cone de Abrams invertido, medindo-se o espalhamento final obtido. No entanto, mesmo depois de se ter aumentado a percentagem de água na pasta e de ter adicionado um controlador de viscosidade, as misturas obtidas não revelaram um desempenho suficientemente bom, apresentando sinais evidentes de segregação e diâmetros de espalhamento insuficientes. Desta forma, acrescentou-se introdutor de ar, o que eliminou os sinais de segregação e aumentou os valores do espalhamento para níveis razoáveis (670 mm). No entanto, a mistura óptima obtida, apresentava dois grandes defeitos: a quantidade de cimento era muito elevada (aproximadamente  $500 \text{ Kg/m}^3$  de betão), e a resistência à compressão da mistura aos 14 dias ficava-se pelos 30 MPa. Deste modo, restava concluir que a pasta que tinha sido otimizada



na 1ª fase não se revelou capaz de culminar num betão satisfatório para os objectivos delineados inicialmente. Optou-se então por iniciar uma 2ª campanha de ensaios, cujo objectivo seria o de repetir a primeira fase do método introduzindo na pasta um novo material fino, de granulometria inferior às granulometrias do cimento e das cinzas volantes, aumentando-se assim ainda mais o grau de empacotamento das partículas sólidas e a proximidade das partículas em suspensão, promovendo-se o incremento da estabilidade da pasta e conseguindo-se em simultâneo a redução da quantidade de cimento. O material introduzido é o filler calcário Micro 100 AB da Comital (LF), que apresenta como vantagens principais o preço competitivo, quando comparado com o do cimento, e a adequada granulometria das suas partículas.

## 2.2 - 2ª Campanha de ensaios:

Nesta segunda campanha de ensaios repetiu-se a primeira fase do procedimento, mantendo a percentagem de cinzas volantes resultante da campanha anterior, e variando a percentagem em volume de filler calcário nas várias misturas realizadas. Esta percentagem é definida do mesmo modo que para as cinzas volantes. Também se acrescentou em todas as misturas uma quantidade constante de superplastificante mas, desta feita, definido relativamente ao volume de materiais finos, e não relativamente ao peso, que foi o efectuado na primeira campanha. A quantidade utilizada foi de  $0,035 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$  de material fino.

Para todas as misturas efectuadas, realizou-se o ensaio de espalhamento recorrendo ao mini-cone e o ensaio de escoamento no cone de Marsh. Mediu-se ainda a resistência à compressão aos sete dias em cubos de 5 cm de aresta. Os resultados encontram-se representados nas figuras 6, 7 e 8.

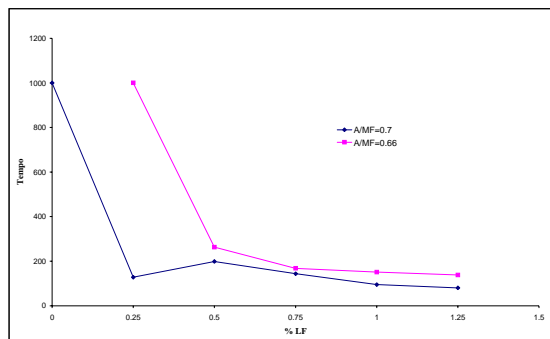


Figura 6. Sensibilidade do tempo de escoamento no cone de Marsh à percentagem de filler calcário (LF).

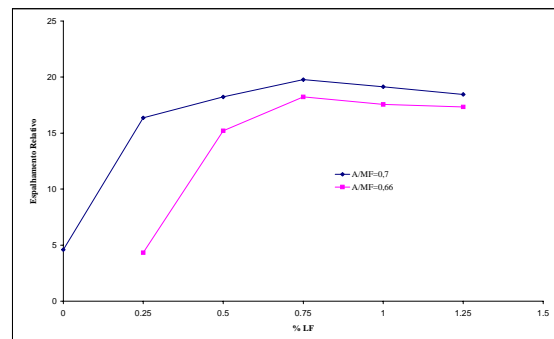


Figura 7. Sensibilidade do espalhamento relativo à percentagem de filler calcário (LF)

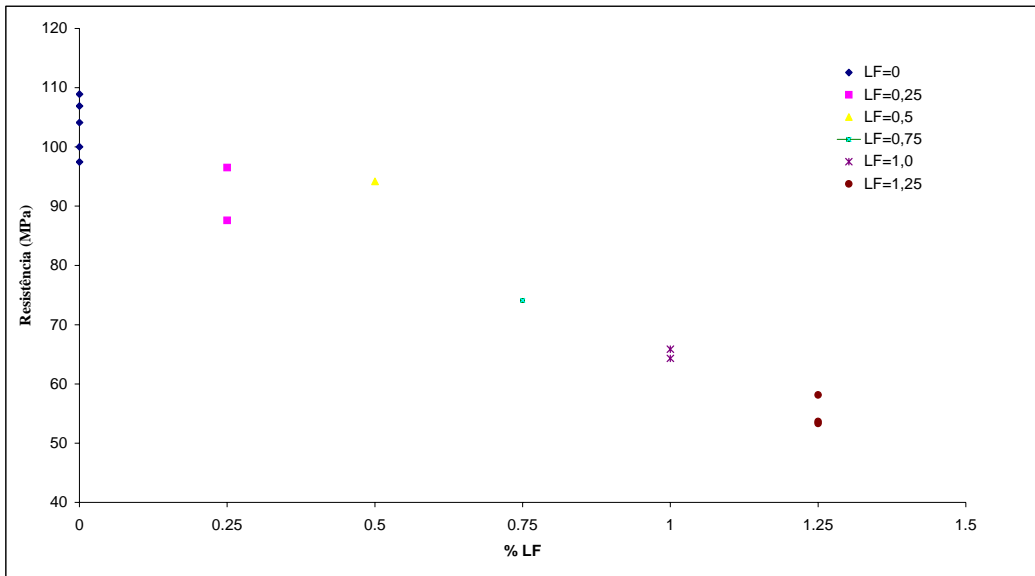


Figura 8. Resistência à compressão dos provetes cúbicos de pastas com várias percentagens de filler calcário.

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que quanto maior é a percentagem de filler calcário presente na mistura, menor é a resistência à compressão obtida aos 7 dias, maior é o diâmetro de espalhamento e menor o tempo de escoamento obtidos. Desta forma, concluiu-se que a mistura que apresentava melhor compromisso entre todos estes factores é a que possui uma percentagem volúmica relativa de filler calcário de 50%.

Seguidamente, com o intuito de determinar a percentagem óptima de superplastificante na mistura, procedeu-se à elaboração de várias misturas com distintas percentagens de superplastificante, mantendo fixos todos os outros componentes. Para cada mistura, determinou-se o espalhamento relativo com o mini-cone, o tempo de escoamento com o cone de Marsh, e a resistência à compressão aos sete dias em cubos de 5 cm de aresta (figuras 9 e 10).

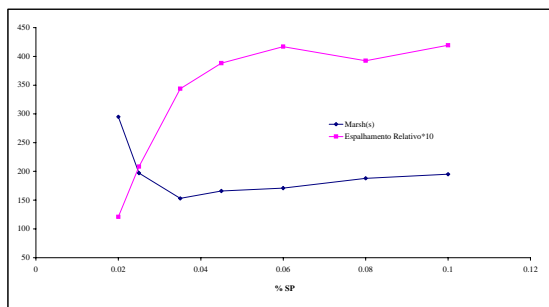


Figura 9. Resultados dos ensaios de espalhamento e escoamento para diferentes percentagens de superplastificante.

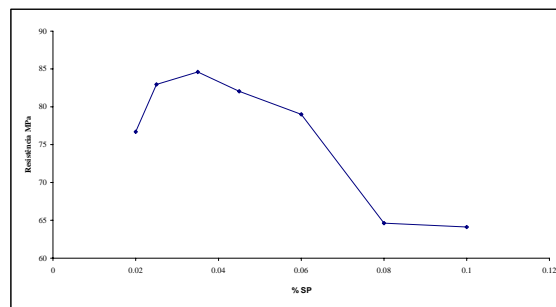


Figura 10. Resultados dos ensaios de resistência à compressão em cubos de 5 cm de aresta, para diferentes percentagens de superplastificante.

Dos gráficos representados, concluiu-se que a quantidade de superplastificante óptima é de  $0,035\text{dm}^3/\text{dm}^3$  de material fino, visto que é para este valor que se atinge a maior resistência à compressão da pasta, e para quantidades de superplastificante acima deste valor, as propriedades da pasta em termos de espalhamento e de escoamento não melhoram significativamente.

Com este último passo concluiu-se a primeira fase do procedimento, sabendo-se então que na mistura final um volume de cinzas volantes igual a 25% do volume de cimento, um volume de filler calcário igual a 50% do volume de cimento, e uma quantidade de superplastificante igual a  $0,035\text{ dm}^3/\text{dm}^3$  de material fino.

Passou-se então à execução da última fase do procedimento. Durante esta fase, testou-se uma primeira mistura de betão que era constituída por uma percentagem de pasta de 38%, em termos do volume total de betão. Na composição da pasta, por sua vez, admitiu-se uma percentagem volúmica de água de 70%. A quantidade de cimento incluída no betão era, para esta composição, de aprox.  $400\text{Kg}/\text{m}^3$  de betão.



Figura 11. Amostra de betão depois de espalhada com o cone de Abrams.



Figura 12. Promenor da froteira do círculo de betão espalhado.

Tal como se pode observar nas fotos apresentadas (figuras 11 e 12), o resultado do ensaio *Slump flow* não foi satisfatório. A segregação dos componentes é evidente, a pasta evidencia fluidez excessiva, e não se mostra capaz de “arrastar” as fibras de aço e os agregados maiores até à fronteira do círculo de betão espalhado. Por outro lado, é evidente o excesso de pasta.

Numa segunda tentativa, reduziu-se a percentagem volúmica de pasta na mistura de 38% para 36%, e diminuiu-se a percentagem volúmica de água na composição da pasta de 70% para 60%. Desta forma, a quantidade de cimento incluído no betão manteve-se aproximadamente nos  $400\text{Kg}/\text{m}^3$  de betão.



Figura 13. Amostra de betão depois de espalhada com o cone de Abrams.

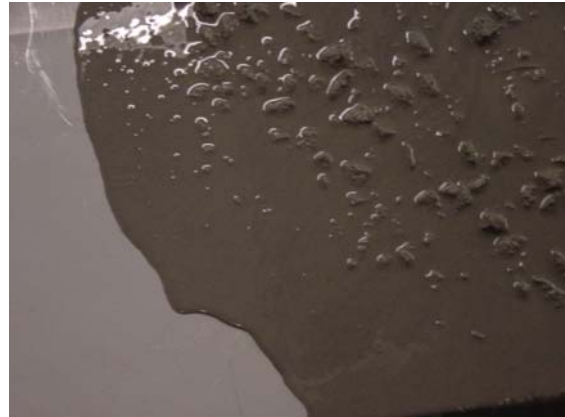


Figura 14. Pormenor da fronteira do círculo de betão espalhado.

Mais uma vez os resultados obtidos no ensaio de espalhamento (*slump flow*) não foram satisfatórios, continuando a ser evidentes os sinais de segregação. No entanto, tal como se pode observar nas fotografias apresentadas (figuras 13 e 14), existe uma evolução evidente entre a primeira e a segunda composição. Desta forma, numa terceira tentativa decidiu-se reduzir mais uma vez a percentagem volúmica de pasta dos 36% para os 34%, e reduzir a percentagem volúmica de água na pasta de 60% para 50%, na sequência do que já se tinha feito ao passar da 1ª para a 2ª fase. A quantidade de cimento no betão final continuou nos 400 Kg/m<sup>3</sup>, aproximadamente.



Figura 15. Amostra de betão depois de espalhada com o cone de Abrams.

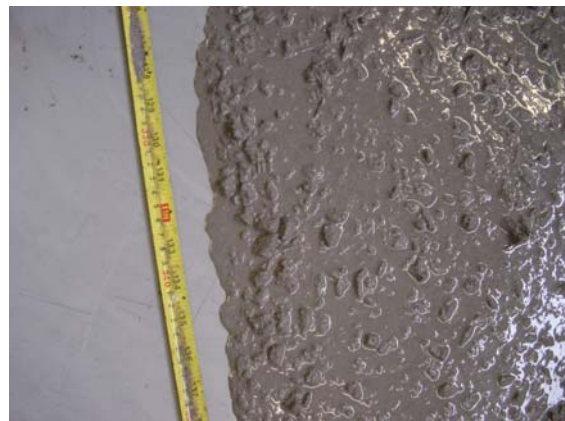


Figura 16. Pormenor da fronteira do círculo de betão espalhado.

Desta feita os resultados obtidos no ensaio de espalhamento (*slump flow*) foram extremamente favoráveis (figuras 15 e 16), tendo-se atingido um diâmetro médio de 770 mm, um tempo de escoamento no *V Funnel* de 25s, e tudo isto sem sinais de segregação.

Por fim, testou-se aos 7 dias a resistência à compressão em quatro provetes cilíndricos de 150mm de diâmetro e 300mm de altura, tendo-se obtido uma resistência média à compressão de 62.7 MPa, com um desvio padrão de 3.2 MPa.



Figura 17. Superfície rectificada do provete.



Figura 18. Superfície rectificada do provete.



Figura 19.



Figura 20.



Figura 21.



Figura 22.

Da observação das fotografias dos provetes ensaiados (figuras 17 a 22) sobressai a forma homogênea e dispersa com que as fendas ocorrem, o que reflecte a forma pouco brusca com que os provetes atingiram a rotura, indicando que o betão obtido terá ductilidade bem superior a um betão convencional com idêntica resistência à compressão. Este indício será avaliado em ensaios futuros. Seguramente, esta característica acaba por ser um reflexo da elevada densidade da matriz cimentícia e da presença das fibras de aço na composição.

### 3. CONCLUSÕES

Do trabalho experimental que foi realizado, pode-se concluir que é possível conceber composições de betão reforçado com fibras que seja auto-compactável, sem que para isso o

custo ambiental ou económico da solução alcançada seja sacrificado. Os resultados obtidos com base na aplicação do método proposto, abrem boas perspectivas para um material que parece conseguir potenciar todas as qualidades dos ingredientes que o compõem, e que desta forma demonstra ser um bom compromisso de qualidade/custo. Também fica demonstrada a poderosa versatilidade de um material que escoia com muita facilidade, e que se adapta rigorosamente às mais exigentes formas e volumes, sem no entanto apresentar sinais de segregação ou degradação das suas propriedades.

Trata-se, sem dúvida, de uma tecnologia muito valiosa, capaz de revolucionar por completo o campo de aplicações estruturais do betão na actualidade.

#### **4 – AGRADECIMENTOS**

Agradece-se o apoio e disponibilidade das empresas Secil, Bettor MBT, Comital e Bekaert que contribuíram com os materiais que foram utilizados na elaboração das composições testadas. O segundo autor agradece a bolsa SFRH/BD/3259/2000 concedida pela FCT e FSE.

#### **REFERENCIAS**

Dewar, J. D., “Computer Modelling of Concrete Mixtures”, E & Spon, pp.21-59, 162-167, 1999.

Gomes, P.C.C., "Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete", PhD thesis, UPC, pp.21, Barcelona, Spain, 2002.

Guazelli, E., Oger, L., “Mobile Particulate Systems”, Vol.287 – NATO ASI Series, Netherlands, 1995.