

Betão autocompactável - Influência dos superplastificantes (carboxilatos modificados) na fluidez e deformabilidade das pastas ligantes

Rui M. S. Ferreira¹

*Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil
Quinta da Nora, 3031-601 Coimbra, Portugal*

Said Jalali²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

O objectivo deste estudo é clarificar o comportamento das pastas no betão autocompactável, estudando o efeito de superplastificantes da família dos carboxilatos modificados em pastas feitas com cimento CEM I 42,5 R e com misturas de cimento CEM I 42,5 R e cinzas volantes, fazendo variar o tipo (composição química) e as dosagens do superplastificante.

1. INTRODUÇÃO

O betão autocompactável responde à necessidade de se desenvolver um betão que não seja afectado pela qualificação da mão de obra durante a sua colocação em obra e que não requiera qualquer tipo de vibração ou compactação mecânica. O betão autocompactável é compactado somente devido ao seu peso próprio, em qualquer tipo ou forma de cofragem e sem segregação ou agregação [Okamura, 1997].

Assim sendo, a utilização do betão autocompactável traduz-se em mais valias, nomeadamente, no melhor envolvimento das armaduras, mesmo quando estas são muito densas, na possibilidade de novos sistemas construtivos, na diminuição dos recursos humanos e equipamentos, na redução do ruído associado ao equipamento de consolidação e como consequência na melhoria da saúde ocupacional dos operários [Ferreira, 2001].

2. O BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

2.1 O conceito de betão autocompactável

Os betões de consistência diferente da terra húmida e seca têm um comportamento

¹ Equiparado a assistente

² Professor Associado

reológico, que, de forma simplificada, se pode descrever recorrendo ao modelo de Bingham [David, 1999]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \omega \quad (1)$$

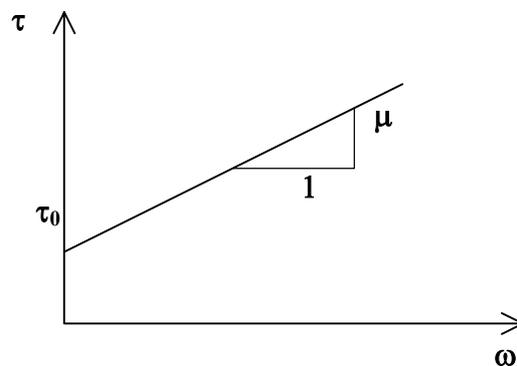


Figura 1 – Modelo de Bingham

onde:

τ é a tensão de corte em MPa; τ_0 é a coesão em MPa, que traduz a resistência inicial ao movimento; μ é a viscosidade em MPa.s e ω é a velocidade de corte, em s^{-1}

Se for possível manter a viscosidade relativamente baixa, sem que com isso se diminua drasticamente a resistência inicial ao movimento, então, é possível obter um material que flui facilmente, mas ao mesmo tempo suficientemente coeso.

Na obtenção de um betão autocompactável existem duas premissas que deverão ser observadas, a elevada deformabilidade da pasta ou argamassa e a viscosidade necessária para garantir a uniforme suspensão das partículas sólidas, ou seja, a resistência à segregação entre os agregados grossos e a argamassa.

Na deformação do betão, designadamente quando este flui entre as armaduras ou numa zona confinada pela cofragem, a posição relativa dos agregados é alterada, provocando a colisão entre as partículas destes, que é tanto maior quanto menor for a distância relativa entre elas. Este movimento relativo provoca o incremento de tensões internas no material, que consome a energia necessária para que o betão flua normalmente, provocando a obstrução do fluxo. Este fenómeno é tanto mais importante quanto mais restrito for o espaço por onde se dá o fluxo, nomeadamente em elementos de pequena secção e em zonas de grande densidade de armaduras.

A redução da viscosidade diminui a capacidade da mistura para manter a dispersão homogénea dos constituintes, isto pode causar anisotropia na direcção da betonagem e fragilizar a interface entre os material granular e a pasta ligante bem como a interface entre as armaduras e a pasta ligante. Por outro lado, o aumento da viscosidade da pasta previne o incremento das tensões internas resultantes da colisão entre as partículas dos agregados, diminuindo a tendência para a obstrução do fluxo pelos agregados quando o betão flui através de obstáculos.

Com o aumento da razão água/pó é possível o incremento da fluidez, no entanto este incremento da fluidez é conseguido à custa de uma grande diminuição da viscosidade e coesão, que pode provocar segregação dos agregados e consequente bloqueio do fluxo. A redução da quantidade de água livre (água da amassadura menos a água utilizada no processo de hidratação e água absorvida pelos agregados) e o aumento da quantidade de pó pode aumentar a viscosidade e a coesão do betão autocompactável.

A utilização de um superplastificante permite então a redução da água livre e consequente aumento da fluidez com uma pequena diminuição da viscosidade. Uma elevada dosagem de superplastificante pode provocar segregação e bloqueio do fluxo. A combinação de um superplastificante com uma baixa razão água/pó permite reduzir a quantidade de água

livre, condição necessária para a obtenção da viscosidade capaz de garantir a uniforme suspensão das partículas sólidas e a redução das tensões internas devidas à colisão entre partículas dos agregados [Khayat, 1999]. O que foi dito pode ser resumido na figura 2.

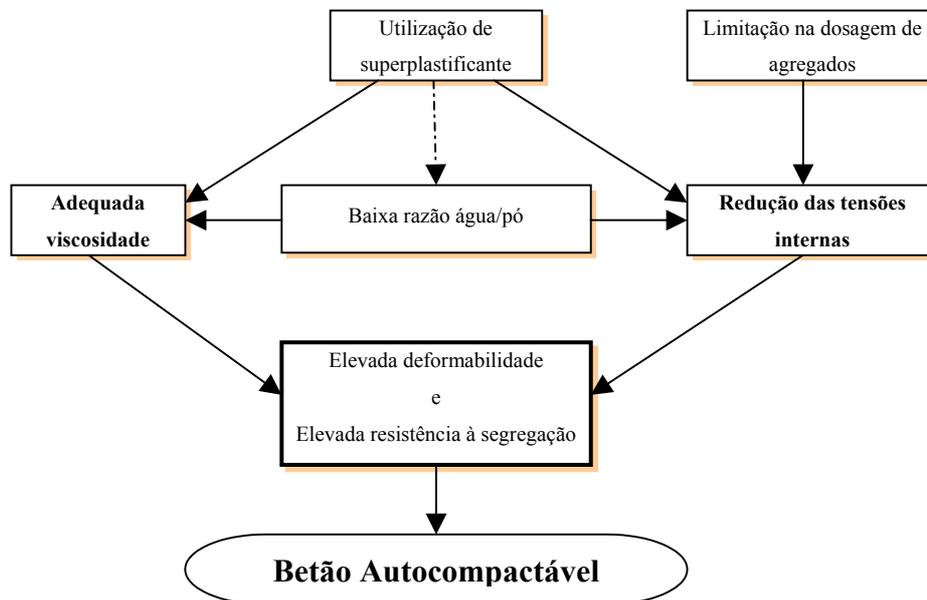


Figura 2 - Processo de obtenção de um BAC

A elevada trabalhabilidade do betão é cada vez mais obtida com recurso à utilização de adjuvantes que actuam sobretudo sobre as partículas de cimento e eventualmente sobre as partículas das adições minerais. A dispersão das partículas de cimento, a que a utilização de adjuvantes conduz, é influenciada pela composição química do cimento ou eventualmente das adições.

Uma quantidade substancial do adjuvante é imediatamente absorvida pelos aluminatos tricálcico (C_3A) e pelos aluminoferratos tetracálcico (C_4AF), e pouco tempo depois do contacto com a água iniciam-se as suas reacções de hidratação. Só depois é que o adjuvante restante é absorvido pelos silicatos tricálcico (C_3S) e pelos silicatos bicálcico (C_2S), que são os componentes majoritários do cimento. Referencie-se que a quantidade de adjuvante disponível para os C_3S e C_2S é condicionada pela quantidade absorvida pelos C_3A e C_4AF , e será tanto menor quanto maior for a quantidade de C_3A e C_4AF . Isto conduz a que cimentos com elevada quantidade de C_3A e C_4AF tenham uma absorção de adjuvante não uniforme e uma má acção dispersante do adjuvante. O produto de hidratação dos C_3A e C_4AF bloqueia as partículas de cimento reduzindo assim a trabalhabilidade [Nawa et al., 1998].

Os C_3A , C_4AF e C_3S , todos hidratam rapidamente, no entanto os C_3S são os responsáveis pelo desenvolvimento da maior parte da resistência inicial. Os C_2S hidratam mais lentamente, e é isto que conduz ao incremento de resistência ao longo do tempo. Além disso os C_3S e C_3A são os responsáveis pela maior parte do calor de hidratação nas primeiras 48h. A substituição parcial dos C_3A e dos C_3S por C_4AF e C_2S respectivamente, conduz a uma diminuição do calor de hidratação e a uma redução da resistência inicial, sem no entanto afectar a resistência final do betão [Nawa et al., 1998].

O tamanho e a forma das partículas de cimento são também parâmetros que influenciam o comportamento do betão [Fugiwara et al., 1997]. Na figura 3 apresenta-se a relação entre a superfície específica de Blaine, a dispersão granulométrica das partículas e a viscosidade.

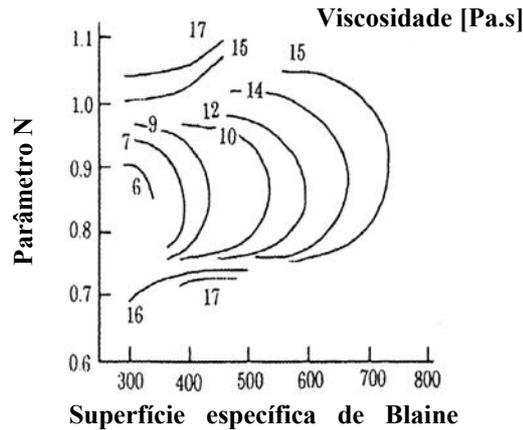


Figura 3 – Relação viscosidade – Parâmetro N – S. específica de Blaine [Nawa et al., 1998]

A dispersão das partículas está representada pelo parâmetro N da equação de Rosin-Rammler

$$R = 100 \exp(-bx^N) \quad (2)$$

onde R é a percentagem de material retido na malha de dimensão x. N será tanto maior quanto maior for a dispersão granulométrica das partículas [Allen, 1999].

Verifica-se que a viscosidade é tanto maior quanto maior for a superfície específica. Um cimento com grande superfície específica conduz a um grande número de partículas de cimento na pasta e a área em contacto com a água é elevada. No entanto a distância entre partículas de cimento diminui e a frequência da colisão entre estas aumenta [Nawa et al., 1998].

Na figura 4 apresenta-se a relação entre a superfície específica de Blaine, o parâmetro N da equação de Rosin-Rammler e a coesão. Referencia-se que quanto menor for o parâmetro N menor é a coesão e que a um elevado valor de N corresponde uma elevada compacidade. Da análise das figuras 3 e 4 conclui-se que a uma elevada compacidade do cimento corresponde uma elevada coesão da pasta [Nawa et al., 1998].

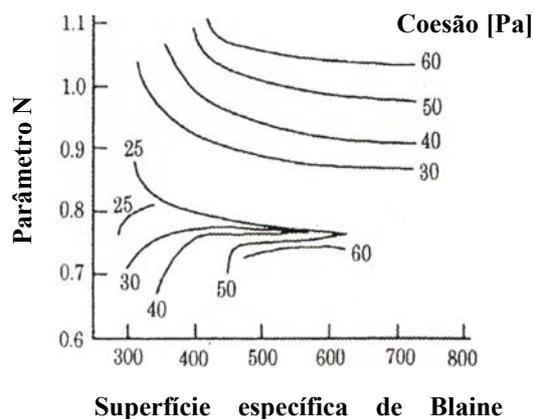


Figura 4 – Relação Coesão – Parâmetro N – Superfície específica de Blaine [Nawa et al., 1998]

2.2 Cinzas volantes e superplastificantes

As cinzas volantes são um subproduto industrial provenientes da queima de carvão pulverizado ou moído em centrais termoelétricas. No processo de produção de energia

eléctrica com recurso à queima de carvão resultam resíduos que são arrastados com os gases de combustão e recolhidos através de captação mecânica ou por precipitação electrostática, daí o nome de cinzas volantes.

As características físicas e a composição química das cinzas volantes apresentam uma grande dispersão resultante de diversos factores, nomeadamente, do tipo de carvão utilizado na queima, do processo de queima e da presença de combustível nas câmaras de combustão.

A forma esférica e a elevada finura das cinzas volantes influenciam claramente o comportamento reológico do betão. Conduzem a baixos coeficientes de atrito entre as suas partículas e também entre estas e as partículas dos outros componentes, minorando a energia despendida para a realização do fluxo e por consequência aumentando a trabalhabilidade, obtendo-se assim uma determinada trabalhabilidade num betão com cinzas volantes utilizando menor quantidade de água do que num betão sem cinzas. Da composição química depende o efeito pozolânico, que vai conferir ao betão endurecido, a longo tempo, resistências superiores.

No entanto as cinzas volantes têm também um efeito de fíler, sobretudo se forem utilizadas em grandes quantidades. Dada a elevada finura das cinzas, elas ocupam os vazios deixados pelos outros componentes conduzindo a misturas com maior compacidade.

Os superplastificantes ou redutores de água de alta gama, como o próprio nome indica permitem aumentar a plasticidade da pasta, aumentando assim a trabalhabilidade do betão ou ainda reduzir a quantidade de água mantendo a trabalhabilidade. O avanço científico e tecnológico na química dos adjuvantes permitiu a produção de superplastificantes cada vez com maior potencial.

Os superplastificantes que actualmente se usam, são: os de polímeros de naftaleno sulfonado, os de melamina sulfonada, os copolímeros vinílicos e finalmente os carboxilatos modificados. Estes últimos são os superplastificantes de última geração, permitindo reduções de água até aos 40%.

Os mecanismos de dispersão das partículas de cimento devido à utilização de um superplastificante podem definir-se como sendo de 2 tipos: a) baseado na repulsão electrostática ; b) baseado na repulsão estérica.

Os polímeros de naftaleno sulfonado e os de melamina sulfonada tem uma acção baseada na repulsão electrostática. A facilidade dissociativa iónica do grupo sulfónico é maior quando comparada ao grupo carboxilo, assim consegue-se uma carga negativa nas partículas de cimento, que têm uma concentração iónica elevada e estabiliza a dispersão.

O mecanismo de dispersão das partículas de cimento baseado na repulsão estérica é o que está presente no carboxilatos modificados. Todos estes superplastificantes são polímeros de ligação com cadeias de óxido etileno com elevada resistência a sais e moléculas com cadeia lateral. As cadeias de óxido etileno têm uma grande facilidade em reter água, formando uma camada de absorção volumosa e espessa na superfície das partículas de cimento. Esta camada provoca a elevada repulsão estérica.

Na ausência de superplastificantes, as pequenas partículas de cimento tendem a flocular devido às forças atractivas, de tipo Van der Waals, que se geram entre elas. Esta floculação tende a reter água, e quanto maior for esse efeito maior será a tixotropia da pasta de cimento, ou seja, menor será a sua capacidade de fluir quando sujeita somente à acção da gravidade [David, 1999].

Assim é de esperar que as características dos materiais pulverulentos e dos superplastificantes afectem de forma clara as propriedades das pastas que compõem o betão.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL, APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

3.1 Plano de estudo e materiais

Sendo os superplastificantes determinantes no comportamento do betão autocompactável, vai estudar-se o comportamento de pastas e caldas de ligante do ponto de vista da quantidade de água para a determinação da pasta de consistência normal, do espalhamento desta pasta e da fluidez de caldas, utilizando métodos de ensaios clássicos, com ligeiras alterações.

Nos ensaios realizados foram utilizados cimento CEM I 42,5 R de Souselas, cinzas volantes da central de carbo-pego, correntemente usadas nas centrais de betão pronto nacionais, dois tipos de superplastificantes da família dos carboxilatos modificados e água da rede de distribuição pública de Coimbra.

Nos quadros 1 e 2 apresentam-se as características físicas e a composição potencial do cimento, respectivamente. No quadro 3 apresentam-se as características das cinzas volantes utilizadas.

Quadro 1 - Características físicas do cimento

| Características | Valor |
|--|-------|
| Massa volúmica absoluta [g/cm ³] | 3,15 |
| Superfície específica [cm ² /g] | 3680 |
| Resíduo a 45 µm [%] | 18,0 |
| Resíduo a 90 µm [%] | 1,8 |
| Água da pasta normal [%] | 27,0 |
| Expansibilidade [mm] | 1,0 |
| Início de presa [min.] | 170 |
| Fim de presa [min.] | 225 |

Quadro 2 - Composição potencial do cimento

| Compostos | Simbologia | Valor |
|---------------------------------|-------------------|-------|
| Silicato tricálcico [%] | C ₃ S | 54,4 |
| Silicato bicálcico [%] | C ₂ S | 16,0 |
| Aluminato tricálcico [%] | C ₃ A | 8,1 |
| Aluminoferrato tetracálcico [%] | C ₄ AF | 9,7 |

Quadro 3 - Características das cinzas volantes

| Características | Valor |
|--|-------|
| Massa volúmica absoluta [g/cm ³] | 2,20 |
| Superfície específica [cm ² /g] | 4750 |
| Água da pasta normal [%] | 18,0 |
| Perda ao fogo [%] | 3,9 |

3.2 Pasta de consistência normal

Este ensaio visa a determinação da quantidade de água (A) necessária para a obtenção de uma pasta de consistência normal. Para isso, provetes de pasta de cimento, com diferentes quantidades de água foram sujeitos à acção de uma sonda de consistência com características especificadas.

Para o provete em que a penetração da sonda se dá até um ponto que diste 6 ± 1 mm da base do molde, calcula-se a quantidade de água de amassadura correspondente, expressa em percentagem da massa de cimento, ou seja, calcula-se a quantidade de água para a obtenção da pasta de consistência normal. [E 328, 1979].

Os procedimentos e o equipamento utilizados na realização deste ensaio foram os especificados na E 328-1979 – “Cimentos, preparação da pasta normal”, com as seguintes adaptações: a) à massa de água adicionou-se a massa de adjuvante; b) para os ensaios realizados com misturas de cimento e cinzas volantes consideramos a massa de ligante (C+CV) e não a massa de cimento.

Neste ensaio fez-se variar o tipo e a quantidade de adjuvante (Ad) utilizando-se os superplastificantes S1 e o S2 nas dosagens (D.S.) de 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% da massa de ligante, para dois tipos de ligante: cimento CEM I 42,5 R (C) e uma mistura de cimento CEM I 42,5 R com cinzas volantes (CV) na proporção de 70 e 30% respectivamente.



Figura 5 – Misturadora e sonda de consistência

Os resultados obtidos na realização deste ensaio com superplastificante S2 e S1 são os apresentados nos quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Resultados do ensaio de consistência normal com $CV/(C+CV)=0,0$

| S2 | | (A+Ad)/(C+CV) | S1 | | (A+Ad)/(C+CV) |
|----------|--------|---------------|----------|--------|---------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | % (C+CV) | Ad [g] | |
| 0,0% | 0,00 | 0,27 | 0,0% | 0,00 | 0,27 |
| 0,5% | 2,50 | 0,25 | 0,5% | 2,50 | 0,25 |
| 1,0% | 5,00 | 0,24 | 1,0% | 5,00 | 0,24 |
| 1,5% | 7,50 | 0,24 | 1,5% | 7,50 | 0,24 |
| 2,0% | 10,00 | 0,23 | 2,0% | 10,00 | 0,23 |
| 2,5% | 12,50 | 0,23 | 2,5% | 12,50 | 0,23 |

Quadro 5 - Resultados do ensaio de consistência normal com $CV/(C+CV)=0,3$

| S2 | | (A+Ad)/(C+CV) | S1 | | (A+Ad)/(C+CV) |
|----------|--------|---------------|----------|--------|---------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | % (C+CV) | Ad [g] | |
| 0,0% | 0,00 | 0,24 | 0,0% | 0,00 | 0,24 |
| 0,5% | 2,50 | 0,23 | 0,5% | 2,50 | 0,23 |
| 1,0% | 5,00 | 0,21 | 1,0% | 5,00 | 0,21 |
| 1,5% | 7,50 | 0,21 | 1,5% | 7,50 | 0,21 |
| 2,0% | 10,00 | 0,18 | 2,0% | 10,00 | 0,19 |
| 2,5% | 12,50 | 0,19 | 2,5% | 12,50 | 0,19 |

As figuras 6 e 7 representam a relação entre a dosagem de superplastificante e a razão $(A+Ad)/(C+CV)$ para os dois tipos de misturas ligantes e no quadro 6 apresentam-se os parâmetros das regressões representadas nas figuras indicadas. Da análise destas figuras ressalta de imediato que os superplastificantes S2 e S1 têm comportamentos muito semelhantes, razão pela qual iremos fazer um comentário único para os dois tipos de superplastificante.

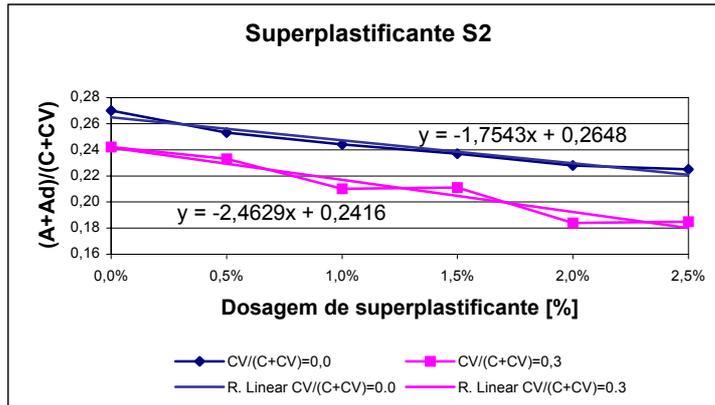


Figura 6 – Ensaio de consistência normal. Dosagem de superplastificante S2 [%] vs. (A+Ad)/(C+CV)

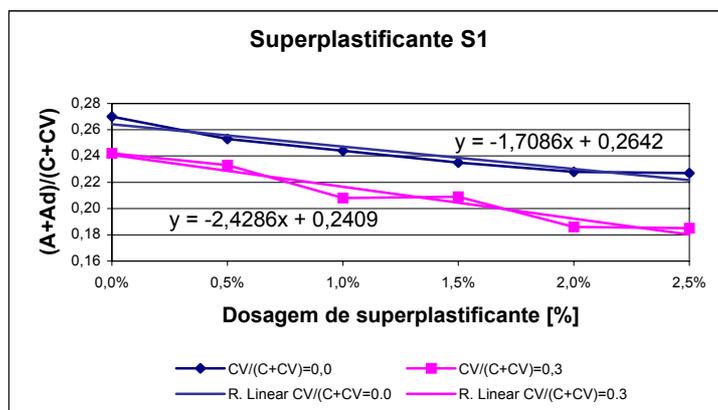


Figura 7 – Ensaio de consistência normal. Dosagem de superplastificante S1 [%] vs. (A+Ad)/(C+CV)

Quadro 6 – Valores dos parâmetros das regressões lineares e respectivos coeficiente de determinação, R²

| Superplastificante | CV/(C+CV) | R. Linear | R ² |
|--------------------|-----------|--|----------------|
| S1 | 0,0 | (A+Ad)/(C+CV) = -1,7086*D.S.[%] + 0,2642 | 0,93 |
| | 0,3 | (A+Ad)/(C+CV) = -2,4286*D.S.[%] + 0,2409 | 0,94 |
| S2 | 0,0 | (A+Ad)/(C+CV) = -1,7543*D.S.[%] + 0,2648 | 0,95 |
| | 0,3 | (A+Ad)/(C+CV) = -2,4629*D.S.[%] + 0,2416 | 0,93 |

A análise dos resultados representados nas figuras 6 e 7 confirma que os superplastificantes tem um efeito na redução da quantidade de água necessária para a realização de pastas de consistência normal, tanto quando estas são feitas só com cimento como quando o são com uma mistura de cimento e cinzas volantes.

Relativamente à acção sobre as pastas feitas só com cimento não se conseguiu concluir qual a dosagem de superplastificante que otimiza o seu efeito. Quando muito referir que até à dosagem de 0,5% temos um efeito mais intenso, o declive do troço 0,0 – 0,5% é o maior, e que dosagens superiores a 2,0% não conduzem a reduções de água significativas.

No que diz respeito às pastas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes aparecem patamares em que o aumento de dosagens de superplastificante não implica reduções na quantidade de água necessária para a realização de pastas de consistência normal. No entanto, parece claro que, dependendo da dosagem de superplastificante, este tem efeito não só sobre o cimento, mas também sobre as cinzas volantes e que este é superior ao observado sobre o cimento. Esta afirmação baseia-se no facto da recta de regressão linear representativa de CV/(C+CV)=0,30 ter um declive, em valor absoluto, superior à recta de regressão linear representativa de CV/(C+CV)=0.

A substituição de cimento por cinzas volantes conduz a reduções de água independentemente da utilização de superplastificantes, a razão $(A+Ad)/(C+CV)$ em pastas sem superplastificante diminui de 0,27 para 0,24, redução essa que somente se pode justificar pela utilização de cinzas volantes. Esta constatação está de acordo com o normalmente preconizado: a obtenção de uma trabalhabilidade de referência num betão com a utilização de cinzas volantes consegue-se com menor quantidade de água do que a necessária para um betão sem cinzas.

Apresentam-se nas figuras 8 e 9 os gráficos de variação da razão $(A+Ad)/(C+CV)$ em função do ligante utilizado, só cimento ou mistura de 70% de cimento com 30% de cinzas volantes. A avaliação destas figuras permite confirmar que, para qualquer dosagem de superplastificante, mesmo pastas sem superplastificante, a adição de cinzas volantes conduz a menor consumo de água para a realização de pastas de consistência normal. Para a mesma dosagem de superplastificante todas as razões $(A+Ad)/(C+CV)$ determinadas em pastas só com cimento são maiores do que as determinadas em mistura de cimento com cinzas na proporção $CV/(C+CV)=0,3$.

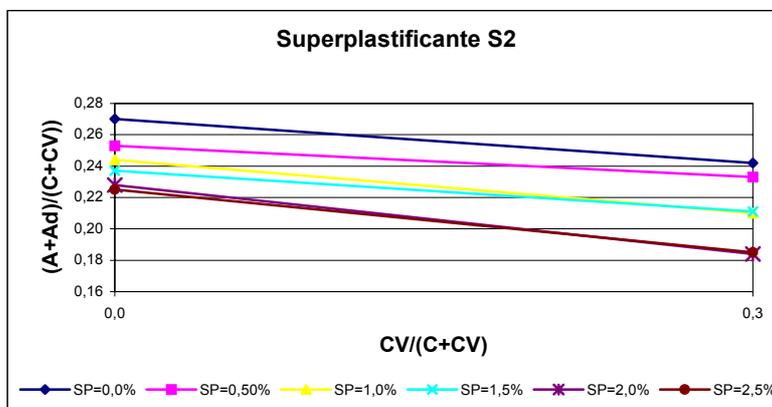


Figura 8 - Ensaio de consistência normal. $CV/(C+CV)$ vs. $(A+AD)/(C+CV)$ com a utilização de superplastificante S2

A redução na razão $(A+Ad)/(C+CV)$ quando a pasta é feita só com cimento é no máximo de 0,045 para a dosagem de 2,5% de superplastificante, enquanto que quando a pasta é constituída por a mistura de 70% de cimento e 30% de cinzas volantes a redução na razão $(A+Ad)/(C+CV)$ é de 0,057 para a mesma dosagem de superplastificante. Isto indica que o efeito do superplastificante, na redução da água necessária para a realização da pasta de consistência normal, é maior nas cinzas volantes do que no cimento.

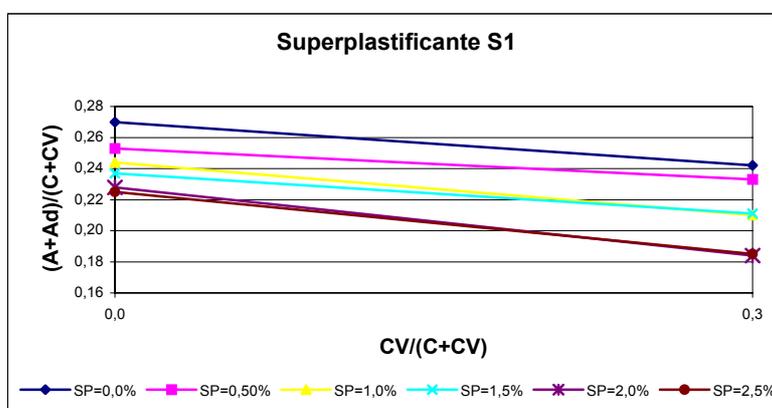


Figura 9 - Ensaio de consistência normal. $CV/(C+CV)$ vs. $(A+AD)/(C+CV)$ com a utilização de superplastificante S1

Quadro 7 – Cálculo dos declives dos troços representados na figura 8

| CV/(C+CV) | S2 % (C+CV) | (A+Ad)/(C+CV) | Declive do troço |
|-----------|----------------|---------------|------------------|
| 0,0 | SP=0,0% | 0,27 | -0,0933 |
| 0,3 | | 0,24 | |
| 0,0 | SP=0,50% | 0,25 | -0,0667 |
| 0,3 | | 0,23 | |
| 0,0 | SP=1,0% | 0,24 | -0,1133 |
| 0,3 | | 0,21 | |
| 0,0 | SP=1,5% | 0,24 | -0,0867 |
| 0,3 | | 0,21 | |
| 0,0 | SP=2,0% | 0,23 | -0,1467 |
| 0,3 | | 0,18 | |
| 0,0 | SP=2,5% | 0,23 | -0,1333 |
| 0,3 | | 0,19 | |

Quadro 8 - Cálculo dos declives dos troços representados na figura 9

| CV/(C+CV) | S1 % (C+CV) | (A+Ad)/(C+CV) | Declive do troço |
|-----------|----------------|---------------|------------------|
| 0,0 | SP=0,0% | 0,27 | -0,0933 |
| 0,3 | | 0,24 | |
| 0,0 | SP=0,50% | 0,25 | -0,0667 |
| 0,3 | | 0,23 | |
| 0,0 | SP=1,0% | 0,24 | -0,1200 |
| 0,3 | | 0,21 | |
| 0,0 | SP=1,5% | 0,24 | -0,0867 |
| 0,3 | | 0,21 | |
| 0,0 | SP=2,0% | 0,23 | -0,1400 |
| 0,3 | | 0,19 | |
| 0,0 | SP=2,5% | 0,23 | -0,1400 |
| 0,3 | | 0,19 | |

Nos quadros 7 e 8 apresentam-se os cálculos dos declives dos diversos troços representados nas figuras 8 e 9, respectivamente. A análise dos declives dos diversos troços demonstra que a dosagem de superplastificante que mais aumenta o efeito de redução de água, nas pastas constituídas por mistura de cimento e cinzas volantes, é de 2%, tanto para o S2 como para o S1. À dosagem de 2% de superplastificante corresponde o máximo valor absoluto do declive. Para a dosagem de 2,5% o declive é menor o que significa que para dosagem superior a 2% não se verifica ganho na redução de água.

3.3 Fluidez de caldas

A determinação da fluidez de caldas usando o cone de Marsh permite avaliar o efeito da dosagem de superplastificante e determinar a compatibilidade do ligante com o superplastificante. Foram realizadas várias caldas com diferentes dosagens de superplastificante e dois tipos de ligante, mantendo a razão $(A+Ad)/(C+CV)$ constante e igual a 0,35.

O processo de realização do ensaio consiste na fabricação da calda seguida da medição do tempo de escoamento no cone de Marsh. Para a fabricação da calda colocou-se a totalidade do ligante na misturadora de argamassas e adicionou-se 5/6 da água e 1/3 do superplastificante, dando início à mistura durante 2 minutos a 60 r.p.m. mais 3 minutos a 120

r.p.m.. Passado esse tempo parou-se a misturadora limpou-se, adicionou-se 1/12 da água e 1/3 do superplastificante, colocando de novo a misturadora em funcionamento durante 2 minutos a 60 r.p.m.. Fimdo esse tempo repetiu-se o último procedimento.

Depois de estar pronta a calda, verte-se 1000cm³ desta no cone com a abertura inferior fechada. Deixa-se repousar alguns segundos, destapa-se a abertura e cronometra-se o tempo até que tenham fluído 500cm³, este tempo designa-se por tempo de escoamento (T_{escoamento}), com as unidades em segundos.

A fim de facilitar a leitura e compreensão dos resultados, sugere-se que se determine o quociente entre o volume escoado (500cm³) e o T_{escoamento} determinado, ou seja o caudal médio de escoamento da calda (Q_m).

$$Q_m = \frac{500}{T_{\text{escoamento}}} \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (3)$$

Este caudal médio de escoamento é uma grandeza que se relaciona directamente com a fluidez das caldas, ou seja, quanto maior for o caudal médio de escoamento maior será a fluidez.



Figura 10 – Cone de Marsh.

Neste ensaio fez-se variar o tipo e a quantidade de adjuvante utilizando-se os superplastificantes S1 e o S2 nas dosagens de 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% da massa de ligante, para dois tipos de ligante; cimento CEM I 42,5 R e uma mistura de cimento CEM I 42,5 R com cinzas volantes na proporção de 70 e 30% respectivamente.

Os resultados obtidos neste ensaio com superplastificante S2 e S1 são os apresentados nos quadros 9 e 10.

Nas figuras 11 e 12 estão representadas as relações entre a dosagem de superplastificante e o caudal médio de escoamento para os dois tipos de misturas ligantes. Verifica-se que os superplastificantes S2 e S1 têm comportamentos muito semelhantes, razão pela qual se fará um comentário único para os dois tipos de superplastificante.

Quadro 9 – Resultados do ensaio de cone de Marsh com CV/(C+CV)=0,0

| S2 | | T _{escoamento} [s] | Q _m [cm ³ /s] | S1 | | T _{escoamento} [s] | Q _m [cm ³ /s] |
|----------|--------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|--------|-----------------------------|-------------------------------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | | % (C+CV) | Ad [g] | | |
| 0,0% | 0,0 | -- | 0,0 | 0,0% | 0,0 | -- | 0,0 |
| 0,5% | 8,5 | 20,0 | 25,0 | 0,5% | 8,5 | 15,4 | 32,5 |
| 1,0% | 17,0 | 9,0 | 55,5 | 1,0% | 17,0 | 8,6 | 58,1 |
| 1,5% | 25,5 | 8,2 | 61,0 | 1,5% | 25,5 | 8,8 | 56,8 |
| 2,0% | 34,0 | 8,2 | 61,0 | 2,0% | 34,0 | 8,0 | 62,5 |
| 2,5% | 42,5 | 8,2 | 61,0 | 2,5% | 42,5 | 8,6 | 58,1 |

Quadro 10 – Resultados do ensaio de cone de Marsh com $CV/(C+CV)=0,3$

| S2 | | T _{escoamento} [s] | Q _m [cm ³ /s] | S1 | | T _{escoamento} [s] | Q _m [cm ³ /s] |
|----------|--------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|--------|-----------------------------|-------------------------------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | | % (C+CV) | Ad [g] | | |
| 0,0% | 0,0 | 99,0 | 5,1 | 0,0% | 0,0 | 99,0 | 5,1 |
| 0,5% | 7,9 | 6,6 | 75,8 | 0,5% | 7,9 | 6,6 | 75,8 |
| 1,0% | 15,7 | 6,0 | 83,3 | 1,0% | 15,7 | 6,0 | 83,3 |
| 1,5% | 23,6 | 6,2 | 80,6 | 1,5% | 23,6 | 6,2 | 80,6 |
| 2,0% | 31,4 | 6,6 | 75,8 | 2,0% | 31,4 | 6,4 | 78,1 |
| 2,5% | 39,3 | 6,6 | 75,8 | 2,5% | 39,3 | 6,0 | 83,3 |

Os resultados representados nas figuras 11 e 12 demonstram que as cinzas volantes melhoram a fluidez das caldas, uma vez que o caudal médio de escoamento das caldas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes é sempre superior ao caudal médio das caldas feitas só com cimento.

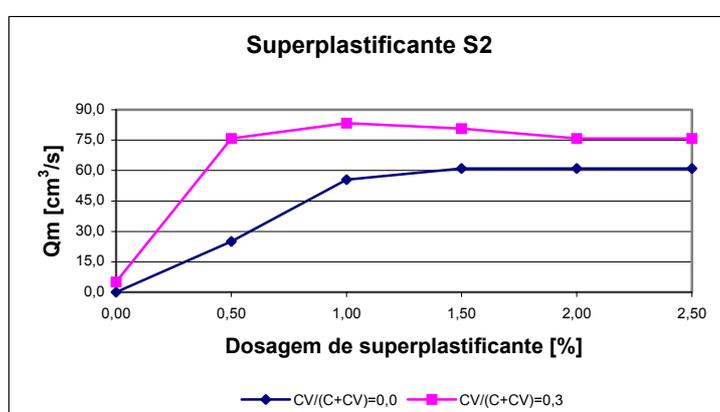


Figura 11 - Ensaio de cone de Marsh. Dosagem de superplastificante S2 [%] vs. Q_m [cm³/s]

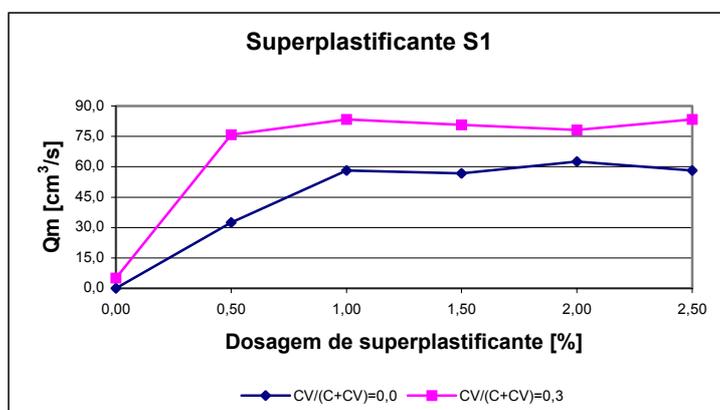


Figura 12 - Ensaio de cone de Marsh. Dosagem de superplastificante S1 [%] vs. Q_m [cm³/s]

Além disso, o superplastificante atua sobre as cinzas volantes, pois o acréscimo do caudal médio de escoamento das caldas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes, quando se adjuva superplastificante, é superior ao acréscimo do caudal médio das caldas feitas só com cimento, independentemente da dosagem de superplastificante.

Nas caldas feitas só com cimento, a dosagem de superplastificante igual a 1,0%, conduz à fluidez máxima, pois para dosagens de superplastificante superiores o caudal médio de escoamento mantém-se constante.

No que diz respeito às caldas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes a fluidez máxima também se obtém com dosagem de superplastificante de 1%, contudo o aumento do

valor do caudal médio é reduzido quando se aumenta a dosagem de superplastificante de 0,5% para 1,0%. O facto de para estas caldas a dosagem de superplastificante que conduz à fluidez máxima ser menor do que para as caldas feitas só com cimento, indica que o superplastificante é mais eficaz nas cinzas volantes do que no cimento.

É de notar que estes resultados contradizem os obtidos por Camões et al., que constataram uma eficiência menor sobre as cinzas volantes [Camões et al., 1998], no entanto os autores nesse estudo não utilizaram superplastificantes da família dos carboxilatos modificados, o que pode justificar a diferença de resultados obtidos.

3.4 Espalhamento em pastas

Com este ensaio pretende-se aferir a capacidade de deformação das pastas em função da dosagem de superplastificante e do tipo de material ligante. Para atingir este objectivo foram realizadas várias pastas com diferentes dosagens de superplastificante e dois tipos de ligante. A razão $(A+Ad)/(C+CV)$ manteve-se sempre constante e igual a 0,30.

Para a realização deste ensaio primeiro preparou-se a pasta, seguindo para isso o mesmo procedimento que se usou no fabrico da pasta de consistência normal, excepção feita à quantidade de água utilizada.

Neste trabalho sugere-se a adaptação do ensaio de espalhamento às pastas. O procedimento adoptado para a realização do ensaio de espalhamento em pastas foi o seguinte: o molde tronco cónico semelhante ao apresentado na figura 13 é colocado sobre uma placa de vidro onde é cheio de pasta e retirado. Deixa-se a pasta espalhar durante 60s e os diâmetros finais da argamassa são medidos em duas direcções perpendiculares. Os 60s são o tempo necessário para que a deformação da pasta estabilize, ou seja, não haja aumento do diâmetro.

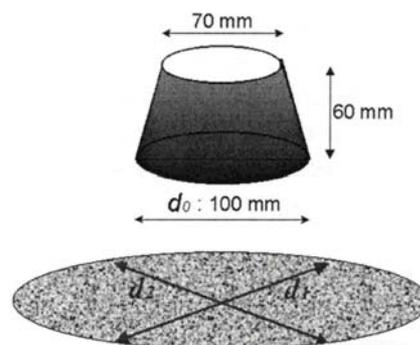


Figura 13 – Molde tronco cónico do ensaio de espalhamento.

O ensaio de espalhamento permite determinar o índice Γ_m para a avaliação da deformabilidade. O índice Γ_m é utilizado como grandeza indicadora da capacidade de deformação da pasta, e quanto maior for maior será a deformabilidade da pasta. O parâmetro Γ_m é definido da seguinte forma:

$$\Gamma_m = \frac{d_1 \times d_2}{d_0^2} - 1 \quad (4)$$

Sendo: d_1 e d_2 os diâmetros medidos após ensaio e d_0 o diâmetro inferior do molde tronco cónico.

Neste ensaio fez-se variar o tipo e a quantidade de adjuvante utilizando-se os superplastificantes S1 e o S2 nas dosagens de 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% da massa de ligante, para dois tipos de ligante; cimento CEM I 42,5 R e uma mistura de cimento CEM I

42,5 R com cinzas volantes na proporção de 70 e 30% respectivamente. A razão $(A+Ad)/(C+CV)$ manteve-se sempre constante e igual a 0,30.

Os resultados obtidos na realização deste ensaio com superplastificante S2 e S1 são os apresentados nos quadros 11 a 14.

Quadro 11 - Resultados do ensaio de espalhamento, com a utilização do Superplastificante S2 e $CV/(C+CV)=0,0$

| S2 | | D1 [mm] | D2 [mm] | Γm |
|----------|--------|---------|---------|------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | | |
| 0,0% | 0,0 | 100 | 100 | 0,00 |
| 0,5% | 3,5 | 103 | 105 | 0,08 |
| 1,0% | 7,0 | 105 | 105 | 0,10 |
| 1,5% | 10,5 | 105 | 105 | 0,10 |
| 2,0% | 14,0 | 130 | 135 | 0,76 |
| 2,5% | 17,5 | 162 | 164 | 1,66 |

Quadro 12 - Resultados do ensaio de espalhamento, com a utilização do Superplastificante S2 e $CV/(C+CV)=0,3$

| S2 | | D1 [mm] | D2 [mm] | Γm |
|----------|--------|---------|---------|------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | | |
| 0,0% | 0,0 | 108 | 106 | 0,14 |
| 0,5% | 3,5 | 158 | 157 | 1,48 |
| 1,0% | 7,0 | 290 | 280 | 7,12 |
| 1,5% | 10,5 | 374 | 370 | 12,84 |
| 2,0% | 14,0 | 385 | 377 | 13,51 |
| 2,5% | 17,5 | 392 | 391 | 14,33 |

Quadro 13 - Resultados do ensaio de espalhamento, com a utilização do Superplastificante S1 e $CV/(C+CV)=0,0$

| S1 | | D1 [mm] | D2 [mm] | Γm |
|----------|--------|---------|---------|------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | | |
| 0,0% | 0,0 | 100 | 100 | 0,00 |
| 0,5% | 3,5 | 104 | 102 | 0,06 |
| 1,0% | 7,0 | 109 | 108 | 0,18 |
| 1,5% | 10,5 | 124 | 126 | 0,56 |
| 2,0% | 14,0 | 134 | 136 | 0,82 |
| 2,5% | 17,5 | 150 | 150 | 1,25 |

Quadro 14 - Resultados do ensaio de espalhamento, com a utilização do Superplastificante S1 e $CV/(C+CV)=0,3$

| S1 | | D1 [mm] | D2 [mm] | Γm |
|----------|--------|---------|---------|------------|
| % (C+CV) | Ad [g] | | | |
| 0,0% | 0,0 | 108 | 106 | 0,14 |
| 0,5% | 3,5 | 152 | 151 | 1,30 |
| 1,0% | 7,0 | 222 | 216 | 3,80 |
| 1,5% | 10,5 | 281 | 276 | 6,76 |
| 2,0% | 14,0 | 333 | 331 | 10,02 |
| 2,5% | 17,5 | 333 | 334 | 10,12 |

Nas figuras 14 e 15 estão representadas as relações entre a dosagem de superplastificante e o índice de espalhamento (Γm) para os dois tipos de misturas ligantes.

Neste ensaio pode verificar-se que os dois superplastificantes utilizados conduzem a resultados algo diferentes.

Está claramente patente nos resultados apresentados nas figuras 14 e 15, que as pastas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes têm maior capacidade de deformabilidade do que as pastas feitas só com cimento. Para pastas sem superplastificante o índice Γm apresenta valores semelhantes independentemente do tipo de ligante. Então a maior capacidade de

deformabilidade das pastas feitas com mistura de cimento e cinzas pode justificar-se pelo facto do superplastificante ser mais eficaz sobre as cinzas do que sobre o cimento.

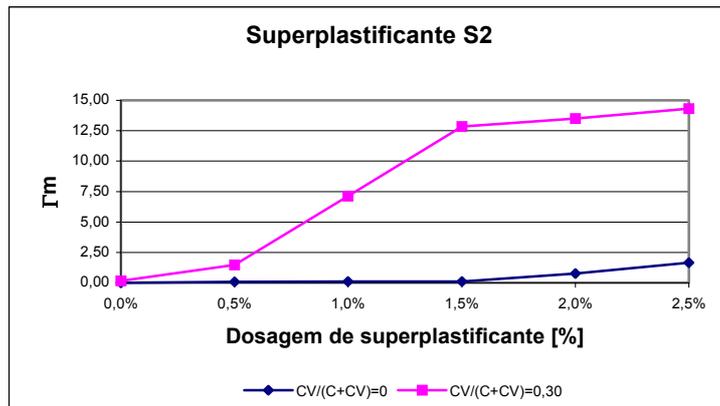


Figura 14 - Ensaio de espalhamento em pastas. Dosagem de superplastificante S2 [%] vs. Γ_m

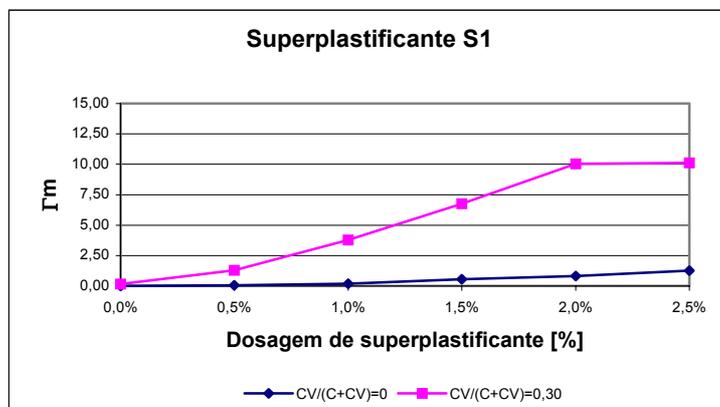


Figura 15 - Ensaio de espalhamento em pastas. Dosagem de superplastificante S1 [%] vs. Γ_m

Nas pastas feitas só com cimento, para os dois tipos de superplastificantes utilizados, o índice Γ_m é quase directamente proporcional à dosagem de superplastificante. Já nas pastas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes essa relação já não se apresenta linear em todo o seu domínio, no entanto, conduz a valores de Γ_m sempre superiores ao das pastas feitas só com cimento.

Para as pastas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes a utilização de 0,5% de superplastificante não produz grande efeito na deformabilidade da pasta, tanto com o uso do S2 como com o uso do S1. Contudo a deformabilidade atingida em pastas com cinzas e 0,5% de superplastificante é semelhante à das pastas sem cinzas para valores de superplastificante de 2,5%. Com a utilização de dosagens de superplastificante superiores o S2 tem um efeito superior ao S1.

Nas pastas feitas com mistura de cimento e cinzas volantes, a dosagem de superplastificante que leva à máxima deformabilidade é aproximadamente igual a 1,5%, no caso do S2, e 2,0% no caso do S1, pois para dosagens de superplastificante superiores a deformabilidade é praticamente constante. É de referir que embora o S2 conduzir a maior deformabilidade, as pastas produzidas com o S1 apresentavam um aspecto macroscópico mais homogéneo.

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- As cinzas volantes em substituição de 30% da massa do cimento melhoram a fluidez e a deformabilidade das pastas, independentemente da dosagem de superplastificante;
- Os superplastificantes da família dos carboxilatos modificados actuam sobre o cimento e sobre as cinzas volantes, sendo o efeito sobre as cinzas volantes superior ao efeito sobre o cimento;
- A utilização de cinzas volantes reduz a dosagem de superplastificante necessária para obter uma dada fluidez;
- O uso de cinzas volantes e dosagens de superplastificante entre 0,5% e 2,0%, parecem ser adequados para a obtenção de betões auto compactáveis, uma vez que a estes valores correspondem a fluidez máxima e a deformabilidade máxima, respectivamente;
- Os resultados do cone de Marsh podem ser representados pelo caudal médio de escoamento. Deste modo os resultados terão um significado físico relevante;
- O ensaio de espalhamento adaptado pode ser utilizado para a avaliação da capacidade de deformação das pastas.

REFERÊNCIAS

Allen, T., "Particle Size Measurement", Vol. 1, Powder Technology Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1999.

Camões, A. et al., "Low Cost High Performance Concrete Using Low Quality Fly Ash", ERMO98, 12th European Ready Mixed Concrete Congress, pp. 478-486, Lisboa, Junho 1998.

David, J., "Betão autocompactável: Um material novo para a pré-fabricação", 3^{as} Jornadas de Estruturas de Betão, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 97-110, Porto, Novembro 1999.

E 328, "Cimentos – Preparação da pasta normal", LNEC, 1979.

Ferreira, R. M. S., "Betão autocompactável – Metodologia de composição", Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Julho 2001.

Fugiwara, H., Nagataki, S. and Dozono, A. "Effect of Size Distribution of Powders on Yield Value and Viscosity of Mortar", Proceedings of 10th International Congress of Cement Chemistry, Vol.2, pp ii001, 1997 in Nawa, T. et al. "State-of-art Report on Materials and Design of Self-compacting Concrete", Proceedings of the International Workshop on Self-compacting Concrete, pp. 160-190, Kochi, Japan, 1998.

Khayat, K. H., Ghezal, A., Hadriche, M. S. "Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete", RILEM Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, Vol. 32, pp. 679-686, November 1999

Nawa T., Izumi T. and Edamatsu Y., "State-of-art Report on Materials and Design of Self-compacting Concrete", Proceedings of the International Workshop on Self-compacting Concrete, pp. 160-190, Kochi, Japan, 1998.

Okamura, H "Ferguson Lecture for 1996: Self-compacting high-performance Concrete", Concrete International, Vol. 19, n° 7, pp. 50-54, ACI, July 1997.

Okamura, H. and Ouchi, M. "Self-compacting concrete. Development, present use and future", Proceedings, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ed. Petersson, Ö. and Skarendahl, Å., Stockholm, pp. 3-14, September 1999.