



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Elsa Maria Bixirão Neto Oliveira

**Betão Auto-Compactável Metodologia de
Composição**

Outubro de 2009



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Elsa Maria Bixirão Neto Oliveira

Betão Auto-Compactável Metodologia de Composição

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização Gestão Física e Tecnologia da
Construção

Trabalho efectuado sob a orientação do

Professor Doutor Said Jalali

Professor Doutor Paulo Cachim

Dezembro de 2009

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos

Resumo

Índice

Terminologia

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Said Jalali e ao Professor Paulo Cachim agradeço a oportunidade do desenvolvimento deste trabalho, a orientação, a disponibilidade, o permanente incentivo e as palavras amigas.

À empresa PAVICENTRO, ao Engenheiro Carlos Ferreira, o elevado interesse em proporcionar as melhores condições que permitiram a ligação à Indústria.

Ao LABEST a inteira disponibilidade na cedência do equipamento para a realização dos ensaios.

Ao Técnico do Laboratório, Senhor Raul Barros, a enorme ajuda na concretização do trabalho no Laboratório.

À minha Família, em especial ao Elias, todo o apoio e compreensão.

À Ana Helena, a quem dedico este trabalho.

RESUMO

O betão auto-compactável tem como principal vantagem a garantia da durabilidade das estruturas de betão independentemente da qualidade do trabalho na construção. Contudo, apesar desta actual e forte motivação, continua a não ser aplicado de forma generalizada. Este estudo pretende contribuir para a definição de um método racional de composição em volume do betão auto-compactável, tornando mais acessível a sua produção.

Analisaram-se as características e as proporções dos materiais em diferentes composições de betão auto-compactável, existentes na bibliografia, contemplando estudos nacionais e internacionais, tendo-se traduzido os materiais constituintes, as suas proporções em volume nas diversas composições, e as suas propriedades, em termos estatísticos.

Compararam-se os valores obtidos para as fracções em volume dos materiais constituintes, e das fracções pó, pasta, agregados grossos e finos, e água e ligante, e definiu-se uma metodologia para a composição em volume de betão auto-compactável. O processo foi desenvolvido e aferido em laboratório, e a composição obtida executada numa unidade industrial de pré-fabricação.

Os materiais constituintes foram seleccionados de forma criteriosa, nomeadamente quanto às características dos agregados, e foi dada relevância ao volume e à composição da pasta, conforme recomendações divulgadas em diversos trabalhos de investigação.

A auto-compactibilidade foi avaliada através das propriedades do betão fresco, fluidez e resistência à segregação, aferidas por inspeção visual e com os testes Slump-flow, T_{500} e L-box, e determinada a sua resistência à compressão aos 3, 7, 14 e 28 dias comparando valores para diferentes condições de cura do betão.

Este estudo poderá contribuir para uma maior aplicação do betão auto-compactável na construção, quer em construções novas quer na reabilitação e reparação de construções existentes, melhorar a qualidade da construção e os processos associados, com benefícios económicos e ambientais.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJECTIVOS

1.2. METODOLOGIA

2. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.1. PROPRIEDADES DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.2. A INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS NA AUTO-COMPACTAÇÃO DO BETÃO

2.2.1. MATERIAL PULVERULENTO

2.2.2. SUPERPLASTIFICANTE

2.2.3. AGREGADOS FINOS

2.2.4. AGREGADOS GROSSOS

2.3. ENSAIOS COM O BETÃO FRESCO

2.3.1. OBSERVAÇÃO VISUAL

2.3.2. SLUMP FLOW E T_{500}

2.3.3. ENSAIO L BOX

2.4. MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.4.1. MÉTODO PROPOSTO POR OKAMURA

2.4.2. MÉTODO PROPOSTO PELA SOCIEDADE JAPONESA DE ENGENHEIROS CIVIS

3. ANÁLISE DE DIVERSAS COMPOSIÇÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES ESTUDADOS

3.2. COMPOSIÇÃO EM VOLUME DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

3.2.1. VOLUME DE AGREGADOS

3.2.2. VOLUME DA ÁGUA

3.2.3. VOLUME DO PÓ

3.2.4. VOLUME DA PASTA

3.2.5. RELAÇÃO ÁGUA/PÓ, EM VOLUME

3.2.6. RELAÇÃO VOLUME DE AGREGADOS FINOS/ VOLUME DE AGREGADOS GROSSOS

3.3. COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES EM MASSA

3.3.1. QUANTIDADE DE CIMENTO

3.3.2. QUANTIDADE DE AGREGADOS

3.3.3. QUANTIDADE DE PÓ

3.3.4. RAZÃO ÁGUA/CIMENTO

3.3.5. RAZÃO ÁGUA/PÓ

3.3.6. OUTRAS RELAÇÕES ESTUDADAS

3.4. PROPRIEDADES DO BAC

3.4.1. PROPRIEDADES DO BETÃO FRESCO

3.4.1.1. SLUMP FLOW

3.4.1.2. LBox

3.4.2. PROPRIEDADES DO BETÃO ENDURECIDO

3.4.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4. MÉTODO DE COMPOSIÇÃO EM VOLUME

4.1. INTRODUÇÃO

4.2. CONCEPÇÃO DA COMPOSIÇÃO COM OS MATERIAIS CONSTITUINTES EM VOLUME

4.3. SEGREGAÇÃO E ESTABILIDADE DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

4.4. ENSAIOS COM O BETÃO FRESCO

4.4.1. OBSERVAÇÃO VISUAL

4.4.2. ENSAIO SLUMP FLOW E T_{500}

4.4.3. Ensaio *L Box*

4.5. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

– RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

5. FASE EXPERIMENTAL

5.1. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS EM LABORATÓRIO

5.1.1. MATERIAIS CONSTITUINTES

5.1.1.1. CIMENTO E ADIÇÕES

5.1.1.2. AGREGADOS GROSSOS E AGREGADOS FINOS

5.1.1.3. SUPERPLASTIFICANTE

5.1.1.4. ÁGUA

5.1. 2. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS

5.1.3. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

5.1.3. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS EM LABORATÓRIO

5.1.3.1. INSPECÇÃO VISUAL

5.1.3.2. SLUMP-FLOW

5.1.3.3. L- BOX

5.1.3.4. HOMOGENEIDADE E ACABAMENTO DAS SUPERFÍCIES

5.1.4. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS EM LABORATÓRIO LAB 2

5.1.4.1. INSPECÇÃO VISUAL E SLUMP-FLOW

5.1.4.2. L- BOX

5.1.4.3. HOMOGENEIDADE E ACABAMENTO DAS SUPERFÍCIES

**5.1.4.4. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO - RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO**

5.2. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS NA INDÚSTRIA

5.2.1. OBJECTIVO

5.2. 2. MATERIAIS CONSTITUINTES

5.2. 3. CARACTERIZAÇÃO DO BAC NO ESTADO FRESCO

5.2.3.1.OBSERVAÇÃO VISUAL

5.2.3.2.SLUMP FLOW

5.2.3.3. L-BOX

5.2. 4. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

5.2.4.1.RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

5.2.4.2.INTERFACE PASTA/MATERIAL GRANULAR

5.2.4.3.HOMOGENEIDADE E ACABAMENTO DAS SUPERFÍCIES

6.CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

TERMINOLOGIA

BAC

Abreviatura de **Betão Auto-Compactável**

Propriedades reológicas

Parâmetros que caracterizam a fluidez do BAC, relaciona a tensão de corte e a viscosidade plástica

Tensão de corte

A tensão de corte indica até onde o betão vai fluir, i.e., está directamente relacionada com o Slump-Flow. Uma elevada tensão de corte origina um baixo Slump Flow e vice-versa.

Viscosidade plástica

Uma elevada viscosidade proporciona um BAC que flui muito lentamente.

Propriedades de fluência

Outro termo para designar propriedades reológicas

Segregação

Separação dos agregados da mistura e da pasta

Slump flow

Mede a consistência do BAC através do diâmetro da área do betão fresco

T₅₀₀

Medida do tempo, em segundos, para a viscosidade do BAC

W/C

Razão entre as quantidades, em massa, de água e cimento na mistura

C

CIMENTO

C_i massa de cimento i na mistura em kg/m³

ADIÇÕES

A F_c massa de cinzas volantes existente na mistura em kg/m^3

B F_g massa de metacaulino existente na mistura em kg/m^3

C M_s massa de microsíllica existente na mistura em kg/m^3

D Massa de GGBS existente na mistura em kg/m^3

AGREGADOS

Agregados finos

S_i massa do agregado fino na mistura em kg/m^3

Agregados grossos

S_g massa do agregado fino na mistura em kg/m^3

D _{máx.} DIÂMETRO MÁXIMO

Máxima dimensão do agregado grosso na composição, em mm

PÓ

Massa total do material fino em kg/m^3

W ÁGUA

Volume de água na mistura em l/m^3

SP SUPERPLASTIFICANTE

Volume do superplastificante na composição em l/m^3

P_a Pasta

Termo usado para o volume da mistura do cimento, adições e água na composição

V_v

Volume de vazios na mistura em l/m^3

COMPOSIÇÃO EM VOLUME

V agregados finos

V_s Volume absoluto do total de agregados finos m^3/m^3

V agregados grossos

V_g Volume absoluto do total de agregados grossos m^3/m^3

V agregados

$V_s + V_g$

V pó

V_p Volume absoluto do total de material fino na mistura em m^3/m^3

V pasta

V_{pasta} Volume absoluto de argamassa na mistura em m^3/m^3

1. INTRODUÇÃO

O betão auto-compactável, inicialmente designado por betão não vibrado, foi desenvolvido na década de 1990 no Japão. O conceito básico de betão auto-compactável foi proposto pelo Professor Okamura, da Universidade de Tóquio, no “Concrete Journal”, num artigo denominado “Way to reliable concrete” [Okamura,1988]. Apesar de anteriormente existirem casos de aplicação de betão que obteve a necessária compactação sem haver consolidação externa, e que poderia ser considerado como um betão auto-compactável, ainda não estava definido como tal [O. Wallewick and Nielsson, 2003].

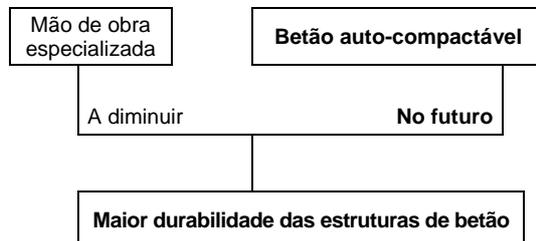


Figura 1.1 - Necessidade de aplicação de betão auto-compactável
Adaptado de [Hajime Okamura et al.,2003]

Na década de 1980, no Japão, a durabilidade das estruturas de betão constituiu um problema de enorme interesse para a indústria da construção, em consequência da diminuição da qualidade da construção motivada pela diminuição de mão de obra especializada (Figura 1.1). O facto de ser necessário assegurar a durabilidade das estruturas, tem motivado o desenvolvimento da tecnologia do betão auto-

1.Introdução

compactável e da sua aplicação, pois proporciona uma solução que permite garantir a durabilidade das construções independentemente da qualidade da mão de obra, conforme esquematizado.

A tecnologia do betão auto-compactável, adiante também designado por BAC, estendeu-se à Ásia e à Europa e o seu estudo suscitou, desde logo, grande interesse. Existem grupos de investigação activamente envolvidos na investigação e desenvolvimento deste tema, e pode verificar-se, através do elevado número de documentos científicos e técnicos publicados em revistas e em simpósios internacionais, que na última década a investigação nesta nova tecnologia teve um enorme incremento e se desenvolveu a nível mundial, nomeadamente na América do Norte e do Sul.

O RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, System and Structures), organismo internacional que reúne Laboratórios e Investigadores de Materiais e de Sistemas de Construção e Obras com o objectivo de promover a cooperação científica no domínio dos materiais de construção e das obras, tem sido um dos grandes impulsionadores da investigação sobre o betão auto-compactável.

Com esse objectivo tem promovido diversos simpósios sobre este tema, em Kochi (1998), Tóquio (2001), Chicago (2002), Estocolmo (1999) , ReyKjavic (2003), América do Norte (2002), China (2005) e, recentemente, na Bélgica, em Ghant (2007). E durante o primeiro Simpósio Internacional, realizado em Agosto de 1998 em Kochi, no Japão, foi criada uma plataforma de trabalho para intercâmbio de

informação sobre betão auto-compactável utilizando a internet “*International Network for Self-Compacting Concrete (SCC-Net)*”.

A Dinamarca também formou no ano 2003 uma plataforma de trabalho que pretende desenvolver tecnologia dirigida para a produtividade e o ambiente de trabalho na indústria da construção, designada *SCC Consortium*, nome abreviado de *The Innovation Consortium for Self-Compacting Concrete*, com o objectivo de promover a sua utilização, de forma a que o betão auto-compactável seja o material mais utilizado nos próximos anos e, em simultâneo, contribuir para incrementar a evolução tecnológica da indústria da construção.

A Suíça [Jurg Schlumpf. *Self compacting concrete structures in Switzerland*,2004], que introduziu a sua utilização no ano1998, considera relevante a aplicação de betão auto-compactável na área da reabilitação e em situações de difícil passagem do betão, e está a promover o seu consumo em estruturas correntes, de forma a potenciar a sua aplicação com viabilidade económica.

Conforme anteriormente referido, o RILEM tem-se mantido muito activo na promoção do desenvolvimento da investigação sobre este tema, através da realização de simpósios, e no âmbito das comissões técnicas entretanto criadas para contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos sobre as especificidades do betão, designadas por “*RILEM Technical Committees*”, e que são as seguintes:

“*TC-SCC on Self-Compacting Concrete*”

“*TC-CSC on Casting of Self-Compacting Concrete*”

“*TC-RFC on Rheology of Fresh Cementitious Systems*”

“*TC 205-DSC on Durability on Self-Compacting Concrete*”

“TS-SCF on simulation on fresh concrete flow”

Em consequência do trabalho desenvolvido por estas comissões, e durante o 5º Simpósio International sobre Betão Auto-compactável que decorreu na Bélgica, em Ghent, foi criado um novo *“RILEM Technical Committee on Mechanical properties of Self-Compacting Concrete”*, que iniciou funções ainda em 2007 e estuda aspectos específicos relativos ao comportamento mecânico do BAC.

Deverá ser dada particular atenção ao facto de que a composição do betão pode ter significativas diferenças em diferentes regiões e, simultaneamente, dar uma contribuição relevante para a definição de composições standard, que proporcionem uma maior utilização do betão auto-compactável .

O betão auto-compactável constitui uma inovação na construção e no sector do betão, cujas vantagens da aplicação comparativamente ao betão tradicional, também designado por betão normalmente vibrado, podem considerar-se as seguintes :

- Elimina a necessidade de vibração;
- Incrementa a qualidade e a durabilidade das construções;
- Reduz o impacto no ambiente (ausência de vibração, diminuição do ruído, maior segurança) ;
- Aumenta as possibilidades de projecto, quer arquitectónicas quer quanto à forma das estruturas;
- Incrementa a produtividade na indústria da construção, diminuindo o tempo de execução e, conseqüentemente, os encargos com a mão de obra;

- Melhora decisivamente as condições de trabalho a saúde dos trabalhadores da indústria da construção.

O maior impacto da introdução do BAC está associado ao processo de produção, e estudos já efectuados sobre diversas aplicações [P.L.Domone.Self-compacting concrete. An analysis of 11 years of case studies, 2005], identificaram como principais razões da sua aplicação as seguintes :

- 67% vantagens técnicas, p. ex., em situações de vibração difícil ou impossível, quando a armadura é muito densa e/ou de acesso difícil;
- 14% benefícios económicos, p. ex., na redução do tempo de execução, redução do custo da mão de obra;
- 10 % envolve a aplicação deste betão em novos processos de construção, p. ex. , em compósitos de aço/betão, elementos pré-esforçados de secção reduzida;
- sobre os outros 5% a razão não era evidente, mas em muitos casos os benefícios sobre o ambiente, p. ex., diminuição do ruído e vibração, e a melhoria das condições de trabalho.

O betão auto-compactável é, de facto, um material que pelas suas características pode proporcionar grandes vantagens à indústria da construção e à sociedade. E sendo a indústria da construção de primordial importância para o desenvolvimento da economia, deve haver um grande investimento na sua eficiência e no desenvolvimento da tecnologia e dos seus processos.

1.Introdução

No entanto, tem-se conhecimento de que o sucesso da sua utilização tem sido mais significativo ao nível da indústria da pré-fabricação, e na construção em grande escala, pois trata-se da inovação de um produto que proporciona a optimização do processo de produção do ponto de vista económico, reduz o prazo de construção e melhora o impacto no ambiente.

A sua aplicação generalizada em betonagens “in situ” está ainda limitada a situações de especial complexidade no que se refere às condições de betonagem, em que as propriedades do BAC justificam o eventual acréscimo de custo envolvido.

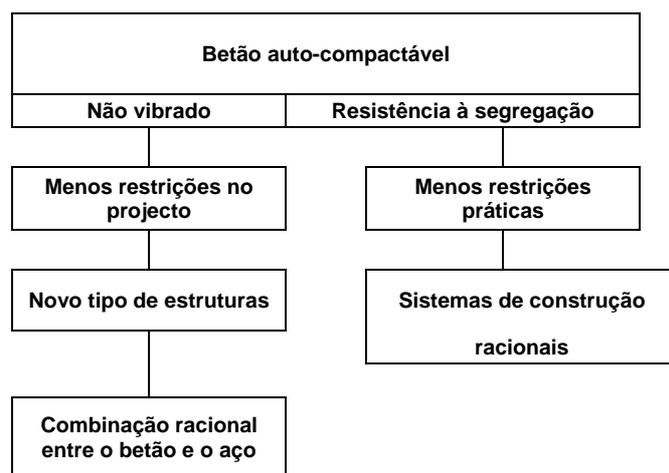


Figura 1.2 - A aplicação de betão auto-compactável proporciona novos sistemas de construção

Adaptado de [Ozawa, K. et al.,1989]

Considerando que se trata de uma inovação na indústria da construção, em que o projecto e a produção estão geralmente separados, deverá ser divulgada informação básica, necessária aos diversos intervenientes no processo construtivo, entidade contratante, projectista, construtor e fornecedor do betão pronto, para facilitar a

mudança/ inovação e promover a sua aplicação. A natureza das actividades de construção, muito fragmentada, dificulta a comunicação e a organização da aprendizagem, pelo que divulgar informação sobre as possibilidades e limitações do BAC é fundamental para haver um patamar mínimo de confiança entre os intervenientes, no que se refere a riscos e responsabilidades.

Os sistemas de construção terão de ser racionalizados considerando a possibilidade de aplicação do betão auto-compactável. Eliminada a necessidade de compactação do betão, por vibração, podem ser desenvolvidos novos sistemas relativos ao projecto, ao seu fabrico e à construção (Figura 1.2).

A utilização do betão auto-compactável incrementa a produtividade, a protecção do ambiente, a qualidade e, simultaneamente, dá possibilidade de executar projectos com desenho mais sofisticado.

É importante que se incremente a aplicação de betão auto-compactável, de forma a ser considerado não como um betão especial mas como um betão corrente, reduzindo a percepção de risco associada, e assim contribuir para a melhoria da qualidade da construção e dos processos associados, nomeadamente para o desenvolvimento da durabilidade das estruturas de betão e, conseqüentemente, diminuir as exigências de manutenção.

Outra aplicação relevante será na reabilitação de estruturas de betão armado, em que frequentemente há necessidade de colocar o material de reparação em áreas confinadas com armadura, sendo o aço existente ou colocado de novo, e a sua elevada fluidez garante o completo preenchimento da área de intervenção sem haver necessidade de vibração.

1.1 - OBJECTIVOS

Neste contexto desenvolveu-se este trabalho, tendo como objectivo o desenvolvimento de uma metodologia de composição volumétrica para o betão auto-compactável, baseada no estudo dos valores referentes a diversas composições de BAC existentes.

Procurou-se também obter semelhanças entre essas composições, de forma a diminuir os ensaios necessários para verificar a sua composição no laboratório e/ou em obra.

Desenvolvida a metodologia de composição volumétrica do ponto de vista teórico, foi testada através de amassaduras experimentais realizadas em Laboratório e numa Unidade Industrial.

1.2- METODOLOGIA

A definição desta metodologia baseou-se no estudo e avaliação das composições obtidas de diversa bibliografia, que resultaram em betão auto-compactável, e na verificação dos pontos comuns e no intervalo da validade de certos parâmetros que caracterizam a composição do BAC e as suas propriedades.

2. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.1. PROPRIEDADES DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

O betão é um material compósito constituído por ligante, água, agregados e adjuvante, sendo a sua composição dividida em duas fases, a fase pasta e a fase agregados. A fase pasta é constituída pela mistura das partículas do ligante com a água e o adjuvante, e as partículas mais finas dos agregados, com dimensão inferior a $90 \mu m$. Os agregados são partículas sólidas de maiores dimensões, separadas, ligadas pela fase pasta. Com esta constituição e com a mesma denominação de betão, estes materiais podem ter propriedades muito distintas, quer no estado fresco quer no estado endurecido.

Estudos desenvolvidos sobre a reologia do betão auto-compactável confirmam que as suas propriedades dependem essencialmente do comportamento das fases pasta e agregados e, portanto, dos constituintes e da composição do betão. Estes parâmetros podem originar comportamentos diferenciados em misturas que, em princípio, deveriam ter a mesma reologia se apenas se considerasse a constituição e a composição do betão.

A avaliação do desempenho de um betão auto-compactável, para uma determinada aplicação específica, exige que a mistura, no estado fresco, deva ter valores adequados em relação a às seguintes propriedades:

- Capacidade de enchimento
- Capacidade de ultrapassar obstáculos

- Resistência à segregação

O fenómeno da segregação, que pode ocorrer quer na aplicação, quer durante o processo de cura, deve ser particularmente estudado no betão-autocompactável, no estado fresco. Como referem Hoffmann e Leeman [P.L.Domone, 2005] , as misturas devem ter adequada capacidade de enchimento e de ultrapassar obstáculos, mas qualquer tendência para a segregação pode ter efeitos prejudiciais significativos. Por outro lado, salienta-se também o facto das propriedades do betão fresco influenciarem o fabrico, o transporte e a colocação em obra, daí a importância de aferir uma composição e analisar as suas propriedades no estado fresco.

Okamura e Ozawa [Okamura e al., 1995] empregaram o seguinte método para o betão adquirir a auto-compactibilidade (Figura 2.1).

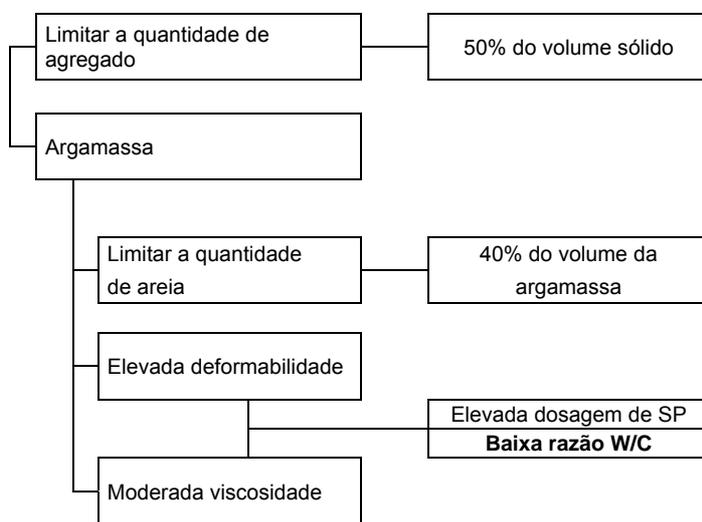


Figura 2.1 - Método para adquirir a auto-compactibilidade
Adaptado de [Hajime Okamura et al.,2003]

A auto-compactibilidade é adquirida através da elevada deformabilidade da pasta, mas advém também da resistência à segregação entre as partículas do agregado e a pasta quando o betão flui através das zonas confinadas das armaduras.

O betão auto-compactável, no estado fresco, deforma-se sob a acção de forças muito baixas e apresenta características de fluido. O seu comportamento reológico segue, de forma simplificada, o modelo de Bingham [David, 1999] :

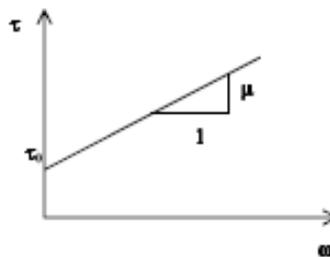


Figura 2.2 - Modelo de Bingham

em que

$$\tau = \tau_0 + \mu\omega$$

sendo τ a tensão de corte; τ_0 uma tensão que traduz a resistência inicial ao movimento, coesão; μ a viscosidade e ω a velocidade interna de corte.

A frequência da colisão e o contacto entre as partículas do agregado aumenta quando a distância relativa entre as partículas diminui, e então as tensões internas aumentam quando se dá a deformação do betão, particularmente junto a obstáculos.

A energia necessária para se dar a fluência do betão é consumida pelo aumento das tensões internas, originando a segregação das partículas do agregado. Limitando a

quantidade de partículas do agregado, sobre as quais a energia consumida é particularmente intensa, verifica-se que diminui este tipo de segregação.

A elevada viscosidade da pasta é também uma condição necessária para impedir a segregação das partículas do agregado quando se dá a fluência do betão através de obstáculos.

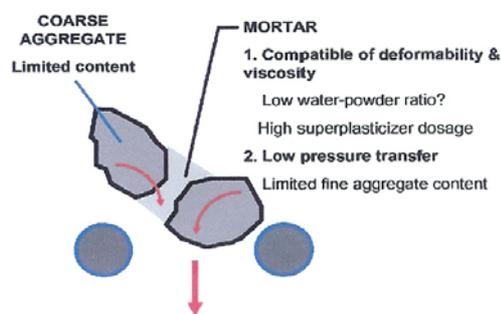


Figura 2.3 - Mecanismo para adquirir auto-compactibilidade
Adaptado de [Hajime Okamura et al.,2003]

Quando o betão se deforma, a pasta com elevada viscosidade previne o aumento localizado de tensões internas devido à aproximação das partículas do agregado. A elevada deformabilidade pode ser adquirida utilizando apenas um superplastificante, mantendo a razão água /material pulverulento num valor baixo (Figura 2.3).

A proporção dos constituintes do betão auto-compactável comparativamente ao betão normalmente vibrado e ao RCD está representado na figura 2.4. Verifica-se que a percentagem de agregado é inferior à do betão que exige vibração para ser compactado. A razão do volume de agregados grossos no volume sólido do betão e

a razão entre o volume de agregados finos no volume da pasta, para cada tipo de betão, pode ser observada na figura 2.4. Por outro lado, o grau de compactação dos agregados finos da pasta é cerca de 60%, o que contribui para que a tensão de deformação quando o betão se deforma possa ser limitada.

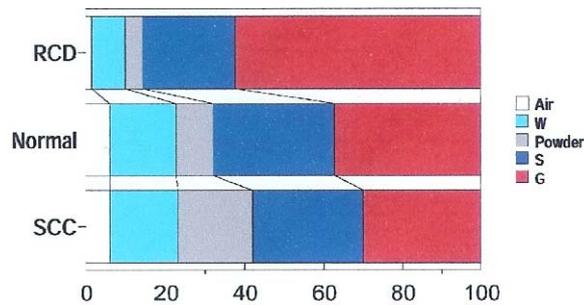


Figura 2.4 – Comparação da composição do betão auto-compactável com outros tipos de betão.

Adaptado de [Hajime Okamura et al.,2003]

Na figura 2.5 pode observar-se a razão entre o volume de agregados grossos no volume sólido do betão para betões com diferentes características.

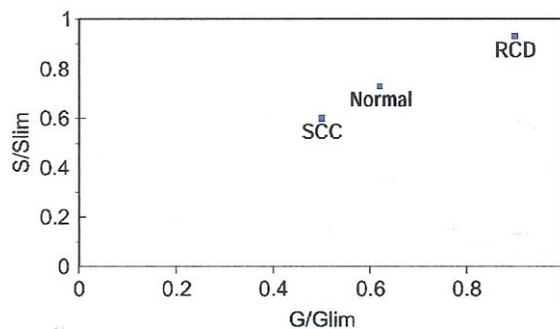


Figura 2.5 – Grau de compactação dos agregados – Agregados grossos e agregados finos no volume sólido do betão . Adaptado de H. Okamura and M. Ouchi

2. Betão auto-compactável

Verifica-se também que a viscosidade da pasta no BAC é elevada relativamente aos outros tipos de betão devido à baixa razão água/pó (Figura 2.6). Esta característica inibe efectivamente a segregação.

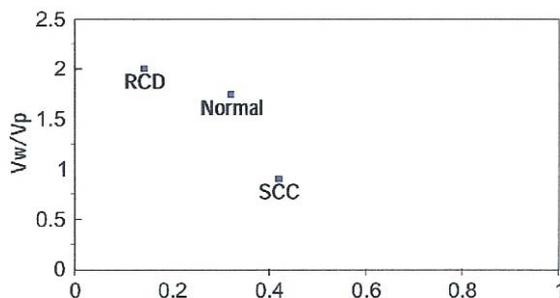


Figura 2.6 – Relação entre o volume da pasta e a razão água/pó.
Adaptado de H. Okamura and M. Ouchi

A obtenção de um betão auto-compactável exige que se verifique no betão enquanto fresco, uma óptima combinação entre a deformabilidade e a viscosidade da pasta, necessária para garantir a uniforme suspensão das partículas sólidas, ou seja a resistência à segregação entre os agregados grossos e a pasta. Se for possível manter a viscosidade relativamente baixa, sem que com isso se diminua a resistência inicial ao movimento, então, é possível obter um material que flui facilmente, mas suficientemente coeso.

O betão ao deformar-se, quando ocorre a sua fluência através das armaduras ou numa zona confinada pela cofragem, altera a posição relativa dos agregados, provocando a colisão entre estas partículas, que é tanto maior quanto menor for a

distância relativa entre elas. Este movimento origina tensões internas no material, que consome a energia necessária para que se dê a fluência do betão normalmente, provocando a obstrução do fluxo. Quanto mais restrito for o espaço por onde se dá o fluxo, mais importante é este fenómeno, nomeadamente em elementos de pequena secção e em zonas de grande densidade da armadura.

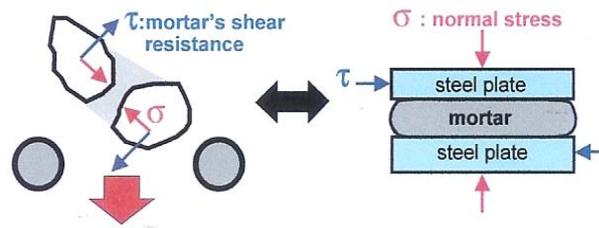


Figura 2.6 - Tensão devida à aproximação das partículas dos agregados
Adaptado de [Hajime Okamura et al.,2003]

O comportamento da fase pasta depende também das características das partículas sólidas. Quando as partículas sólidas se aproximam umas das outras, verifica-se transferência de tensões, e a pasta entre as partículas do agregado fica submetida a tensões de corte (Figura 2.6). A diminuição da capacidade de deformação da argamassa depende das características físicas das suas partículas sólidas [Najemoto,1997].

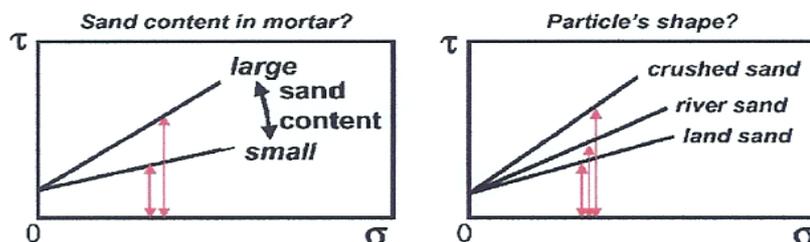


Figura 2.7 - A resistência à deformação depende das características físicas das partículas sólidas.
Adaptado de [Hajime Okamura et al.,2003].

A redução da viscosidade diminui a capacidade da mistura manter a dispersão homogênea dos seus constituintes, o que pode originar anisotropia na direção da betonagem e fragilizar a interface entre o 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.

2.2. A INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS NA AUTO-COMPACTAÇÃO DO BETÃO

2.2.1. MATERIAL PULVERULENTO

A auto-compactação do betão exige a sua elevada fluidez mas também adequada resistência à segregação. Existem ensaios que dão indicações sobre o comportamento do betão relativamente à sua auto-compactibilidade.

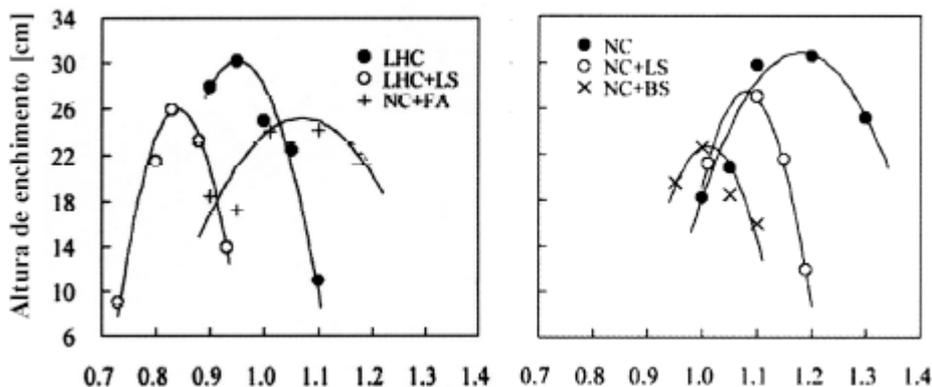


Figura 2.8 - Relação entre V_w/V_p e a altura de enchimento. Adaptado de [Edamatsu et al., 1997]

A figura 2.8 mostra a relação entre a razão volumétrica água/pó (V_w/V_p) e a altura de enchimento determinada na U box, considerando que a deformabilidade do betão fresco é constante e com um valor de 600 ± 50 mm, determinado através do ensaio Slump Flow.

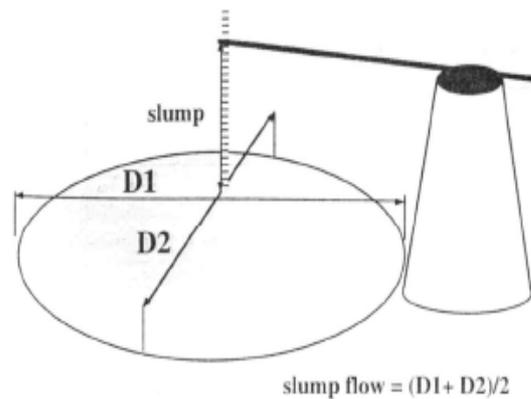


Figura 2.9 - Ensaio de Slump Flow [Beaupré e tal., 1999]

Pode verificar-se que, para todos os materiais, existe um valor máximo da altura de enchimento perfeitamente definido, ao qual corresponde uma razão óptima V_w/V_p , e também que, para razões de V_w/V_p superiores à razão óptima, a altura de enchimento diminui.

Esta situação pode ser explicada pelo facto de a viscosidade ficar bastante reduzida, o que origina colisões mais frequentes entre os agregados grossos, diminuindo a energia disponível para que se dê a fluência do betão, ou seja, para fazer face à segregação e obstrução entre obstáculos.

Para razões V_w/V_p inferiores à razão óptima, a viscosidade é demasiado alta e a fluidez insuficiente para que o fluxo se dê apenas devido ao seu peso próprio.

2.2.2. SUPERPLASTIFICANTE

Os superplastificantes são moléculas longas e pesadas que se envolvem nas partículas de cimento e lhes conferem uma elevada carga eléctrica negativa. Devido a esta carga as partículas de cimento repelem-se umas às outras, resultando na desfloculação e dispersão das mesmas. A utilização de um superplastificante permite a redução de água livre e conseqüente aumento da fluidez com uma pequena diminuição da coesão, mas se a dosagem for elevada pode provocar segregação e bloqueio de fluxo.

A combinação de um superplastificante com um agente modificador de viscosidade, ou a de um superplastificante com uma baixa relação água/material pulverulento, permite reduzir a quantidade de água livre, condição necessária para a obtenção de uma adequada viscosidade, capaz de garantir a uniforme suspensão das partículas sólidas e a redução das tensões internas devidas à colisão entre partículas dos agregados, responsáveis pela obstrução do fluxo [Khayat e al., 1999].

Os superplastificantes ou redutores de água de alta gama, permitem aumentar a plasticidade da pasta, aumentando assim a trabalhabilidade do betão ou ainda reduzir a quantidade de água mantendo a trabalhabilidade.

Os mecanismos de dispersão das partículas de cimento devido à utilização de um superplastificante podem definir-se como sendo baseados na repulsão electrostática ou na repulsão estérica.

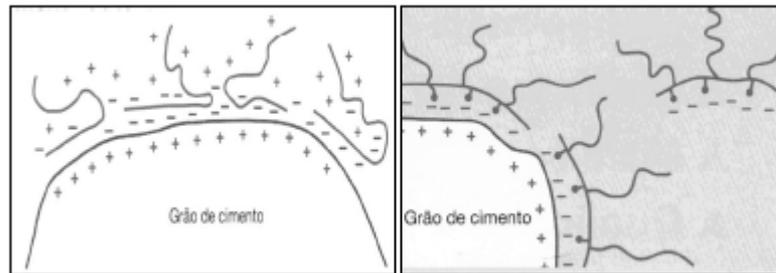


Figura 2.10 - Mecanismo de dispersão das partículas de cimento devido à utilização de superplastificantes, baseado na repulsão electrostática e baseado na repulsão estérica

Na ausência de adjuvantes as pequenas partículas de cimento tendem a flocular, devido às forças atractivas do tipo Van der Waals, que se geram entre elas. Esta floculação tende a reter a 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].

As características dos materiais pulverulentos e dos superplastificantes afectam de forma muito evidente as propriedades das argamassas que constituem o betão. O método proposto por Masahiro Ouchi para avaliação do efeito dos superplastificantes no betão auto-compactável é baseado em ensaios sobre argamassas e não em betões [Ouchi et al., 1998] e [Okamura et al., 2000].

É necessário proceder à realização de ensaios sobre as argamassas para avaliar as características dos materiais que constituem o betão. Os ensaios mais divulgados são o ensaio de espalhamento e o ensaio do funil em V para argamassas ou pastas [Ouchi,1998].

O ensaio de espalhamento consiste na colocação do molde tronco-cónico sobre uma placa de vidro, cheio de argamassa, retirando-o de seguida. Procede-se à medição dos diâmetros finais em duas direcções perpendiculares.

O ensaio do funil em V, consiste no enchimento do funil com 1,1 litro de argamassa e é cronometrado o tempo, desde a abertura do orifício até que apareça a primeira luz, quando se olha na vertical para baixo através do funil [Domone et al., 1999].

O ensaio de espalhamento e o ensaio do funil em V permitem determinar os índices Γ_m e R_m para a avaliação da deformabilidade e viscosidade, respectivamente :

$$\Gamma_m = \frac{d1 \times d2}{d0} - 1$$

Com $d1$ e $d2$ os diâmetros medidos após ensaio e $d0$ o diâmetro inferior do molde tronco-cónico, e

$$R_m = \frac{10}{t}$$

Sendo t o tempo de escoamento da argamassa através do funil, em segundos.

Valores elevados de Γ_m indicam elevada deformabilidade da argamassa e pequenos valores de R_m indicam elevada viscosidade. Os valores de Γ_m e R_m que conduzem a betões auto-compactáveis estão, respectivamente, entre 5 e 7, e 1 e 1,3 [Okamura et al., 1995].

O método desenvolvido por Okamura e Ozawa [Okamura e al., 1995] para a obtenção de betão auto-compactável baseia-se nos seguintes princípios:

- Limitar a dimensão do agregado
- Diminuir a razão água/material pulverulento
- Utilizar um superplastificante

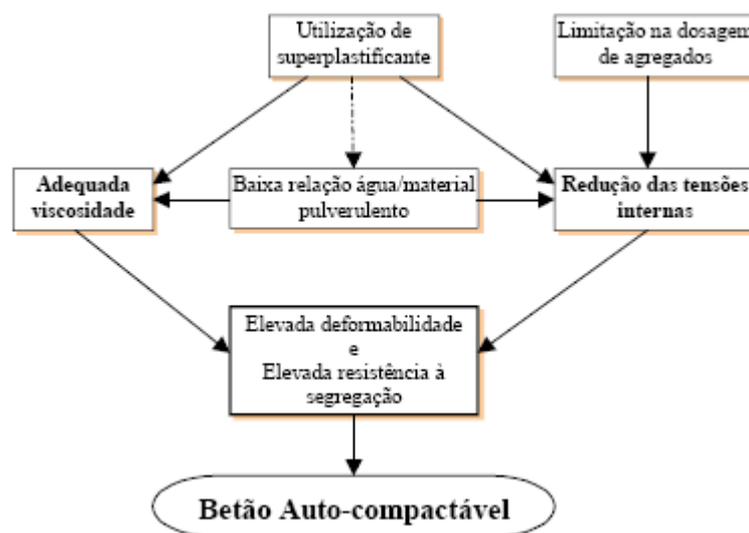


Figura 2.11 - Processo da obtenção de um betão auto-compactável [Okamura et. al,1995]

A quantidade de agregados grossos deve ser inferior à que se verifica num betão normal. Nestas condições, a distância entre as partículas dos agregados grossos é maior, a frequência de colisão entre estas partículas é menor, logo há uma

diminuição da energia consumida devido às tensões internas, o que melhora o fluxo do betão através de espaços limitados.

2.2.3. AGREGADOS FINOS

As características dos agregados finos, nomeadamente, a distribuição granulométrica, a forma das partículas e a quantidade existente na composição do betão auto-compactável interfere no seu comportamento no estado fresco.

A maior ou menor quantidade de areia interfere na porosidade e na superfície total de agregados. Se a quantidade de areia for muito elevada, implica que a quantidade de pasta entre as partículas de agregados é insuficiente e a fluidez do betão é reduzida; se a quantidade de areia for demasiado baixa, a estrutura granular pode ser insuficiente para a quantidade de pasta, originando a segregação ou exsudação, pelo que é muito importante definir correctamente a quantidade de areia necessária para a composição de um betão auto-compactável [Fang. et al., 1999].

Para o estudo da quantidade de agregados finos utiliza-se o parâmetro V_s/V_m que é a razão volumétrica entre o volume de areia com partículas de diâmetro superior a $90 \mu m$ e o volume de argamassa excluindo o ar [Nawa et al., 1998].

A figura 2.12 apresenta relações entre V_s/V_m e a altura de enchimento do betão fresco, determinada na U Box, com vários pós e com várias areias.

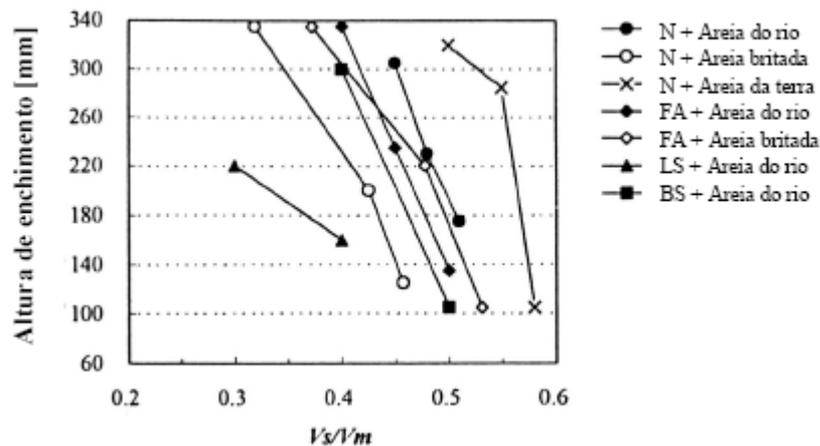


Figura 2.12 - Relação entre V_s/V_m e a altura de enchimento na U Box [Edamatsu et al., 1999]

Quando a relação V_s/V_m é pequena, a altura de enchimento é praticamente constante e independente do tipo de agregado fino. Mas a razão V_s/V_m máxima que conduz a alturas de enchimento capaz de garantir um betão auto-compactável é muito diferente de agregado para agregado. A razão V_s/V_m óptima é afectada pela finura para agregados com a mesma compactidade, como no caso da areia do rio e da areia da terra.

2.2.4. AGREGADOS GROSSOS

A máxima dimensão, a quantidade, a natureza e o tipo de agregados grossos condiciona a capacidade de auto-compactação do betão. Na figura 2.13 pode observar-se a relação entre a quantidade de agregados grossos, em volume, e a capacidade do betão fluir através de obstáculos constituídos por armaduras. Verifica-

se que o aumento da quantidade de grossos e da máxima dimensão do agregado o betão perde capacidade de fluir através de obstáculos [JSCE, 1998].

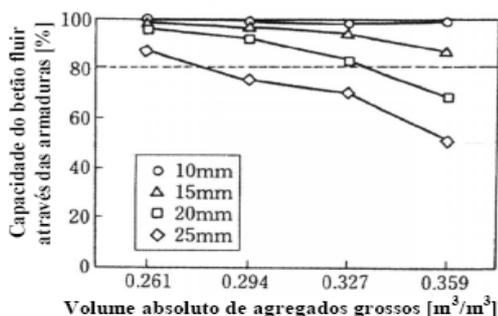


Figura 2.13 - Volume de agregados grossos vs. capacidade do betão fluir através das armaduras [JSCE, 1998].

2.3. ENSAIOS COM O BETÃO FRESCO

As principais características do BAC são as suas propriedades no estado fresco. A composição do BAC é baseada na sua capacidade de fluir devido apenas ao seu peso próprio, sem vibração, mesmo através de zonas densamente armadas, e a capacidade de obter homogeneidade sem haver segregação de agregados.

As propriedades do betão fresco têm influência nas condições de fabrico, transporte, colocação e compactação do betão, sendo por isso muito importante conhecer as propriedades que caracterizam a reologia do betão fresco e os factores que a influenciam. Para este efeito podem ser utilizados equipamentos que determinam as propriedades do material, designados por reómetros, ou equipamentos que medem o desempenho do betão relativamente a uma determinada acção. Os reómetros

usualmente utilizam-se em laboratório, para estudos científicos, e possibilitam o relacionamento das variáveis em estudo com grandezas físicas fundamentais. Em aplicações práticas do BAC, contudo, é importante poder avaliar a capacidade da utilização do betão para um determinado fim, não sendo em geral necessário conhecer as propriedades intrínsecas do material.

As propriedades exigíveis a um BAC são caracterizadas pelos seguintes parâmetros chave

- A fluidez e a capacidade de enchimento
- A viscosidade
- A capacidade de ultrapassar obstáculos
- A resistência à segregação

A relevância de cada destas propriedades está relacionada com a respectiva aplicação. Por exemplo, é importante avaliar a capacidade de ultrapassar obstáculos de um BAC quando a sua aplicação é numa zona muito congestionada de armaduras, quando se pretende betonar uma laje a aferir a sua capacidade de enchimento, ou quando a peça a betonar for de grande altura a aferir a resistência à segregação.

VISCOSIDADE

A fluência de um BAC com baixa viscosidade é inicialmente muito rápida, deixam depois de fluir. O BAC com elevada viscosidade pode continuar a fluir por um tempo

extenso. A viscosidade pode ser aferida durante o Teste do Slump-flow pelo T500 ou medindo o tempo do V-funnel, desde que a dimensão dos agregados seja superior a 22,4 mm. A viscosidade pode ser especificada apenas em casos especiais, mas pode ser útil medir o T_{500} quando se efectua o Slump-flow teste como forma de confirmar a uniformidade de composição.

A CAPACIDADE DE ULTRAPASSAR OBSTÁCULOS

Esta propriedade do BAC traduz a capacidade da composição no estado fresco fluir sem perda de uniformidade ou causar blocagens em espaços confinados e/ou através da passagem na armadura.

Para aferir esta capacidade do BAC é importante conhecer a geometria da armadura do elemento a betonar.

ESTABILIDADE E SEGREGAÇÃO

O BAC pode sofrer segregação dinâmica durante a aplicação e segregação estática depois de aplicado. Quanto maior for a viscosidade, menor probabilidade de ocorrer a segregação. A dimensão do agregado tem grande influência no risco de segregação.

2.3.1. OBSERVAÇÃO VISUAL

A observação visual durante a betonagem, comparada com o aspecto exigível e corrente de um betão auto-compactável, constitui um importante controle para registar qualquer segregação do BAC. Muitas vezes é a única oportunidade para

detectar a segregação e proceder a alguma correcção que recupere o BAC e/ou da técnica de betonagem no início da aplicação.

2.3.2.SLUMP FLOW E T_{500}

O Slump-flow traduz a fluidez e a capacidade do BAC fluir em condições não confinadas, não sendo aplicável em situações em que a dimensão máxima do agregado ultrapassa 40mm.

A EN 206-9:2007 define as classes do Slump-flow em função da gama de valores que apresenta recomendável para aplicações específicas.

Valores de Slump-flow superiores a 800 mm podem ser especificados para situações especiais, mas há que ter particular atenção com a segregação, devendo a dimensão dos agregados ser inferior a 12 mm.

Este teste é muito utilizado pela sua facilidade de execução, e permite aferir a fluidez e a capacidade de fluência do BAC na ausência de obstruções. O equipamento é simples e facilmente transportável. A execução deste teste consiste na colocação do cone de Abrams numa base metálica colocada na horizontal, centrado nos 210 mm de diâmetro, sem qualquer influência de vibração ou choque, e o cone tem de ficar seguro de forma a não haver saída de betão. Enche-se com o BAC, sem qualquer agitação ou compactação mecânica, e mantém-se por um período não superior a 30 segundos. Levanta-se o cone na vertical, mede-se o tempo que o primeiro betão demorou a atingir o círculo de 500 mm na base metálica, sendo este valor designado

2. Betão auto-compactável

por T_{500} . Em seguida mede-se o maior diâmetro de espalhamento do BAC (d_m) e o diâmetro de espalhamento na direcção a 90° desta, portanto, na direcção diametralmente oposta (d_r). Os valores obtidos não devem diferir em mais de 50 mm em dois testes consecutivos, verificando-se haverem neste caso condições para se aferir o valor do slump-flow.

O valor do Slump - Flow é obtido por

$$S_F = (d_m + d_r) / 2$$

sendo

S_F Slump-Flow, em mm, d_m maior diâmetro que o betão fluiu, em mm, d_r distância a que flui na direcção a 90° de d_m , em mm, o T_{500} tem um valor próximo de 5 segundos.

Quando se verifica que a pasta segrega os agregados e se forma um anel de pasta/argamassa, vendo-se a segregação dos agregados na parte central, então existe segregação do betão e o teste não é satisfatório. Este ensaio está de acordo com a norma EN 12350-1 e EN 12350-2, e não é aplicável se a dimensão dos agregados for superior a 40mm, e com a preEN12350-8: Betão auto-compactável - Slump-Flow teste.

2.3.3. ENSAIO L BOX

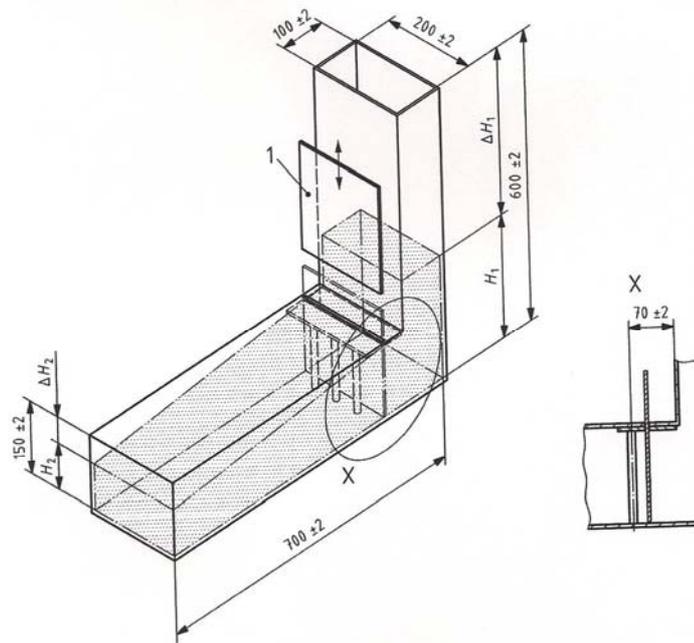


Figura 2.14 – Equipamento L-box

O teste L-box é utilizado para aferir a capacidade de ultrapassar obstáculos do BAC quando flui através de pequenas aberturas incluindo os espaços entre armaduras e outras obstruções, sem segregar ou bloquear.

A designação do ensaio provem da forma do equipamento, que consiste numa caixa com a forma de L, cujo ramo vertical se enche de betão. Entre os ramos vertical e horizontal existe uma portinhola que inicialmente está fechada. Ao abrir esta portinhola, lentamente, o betão escoar do ramo vertical para o horizontal, passando por três ou dois varões que dificultam essa passagem, e simulam a armadura.



1- $12 \pm 0,2$ mm

Figura 2.15 - Posição das barras na L-box

Coloca-se a caixa numa superfície horizontal, fecha-se a porta entre os ramos vertical e horizontal, enche-se de betão sem qualquer agitação ou compactação mecânica, e aguarda-se cerca de 60 ± 10 s. Verifica-se se há qualquer segregação, e abre-se esta portinhola, lentamente, para o betão escoar do ramo vertical para o horizontal.

Quando o movimento termina mede-se a altura do betão no ramo vertical ΔH_1 , em três posições igualmente espaçadas em relação à medida da caixa, e a medida de H_1 é igual à diferença entre a altura da caixa 600mm e o valor médio dos três valores de ΔH_1 . O mesmo processo é usado para medir o valor de H_2 , calcula-se a diferença entre medida da altura da secção horizontal 150mm e o valor médio de três leituras de ΔH_2 .

A capacidade de fluir do BAC, **PA**, é calculada

$$PA = H_2/H_1$$

em que

PA é a capacidade de fluir do BAC, **H₁** é o valor da altura do BAC no ramo vertical da caixa, em mm, e **H₂** é o valor da altura do BAC no ramo horizontal da caixa, em mm

A realização deste ensaio permite retirar outras informações, como por exemplo:

- Observação da facilidade de passagem do betão através das armaduras;
- Observação da acumulação de agregados atrás dos varões;
- Observação do aspecto da superfície de betão no ramo horizontal;
- Diferença entre o nível de betão no ramo vertical e no ramo horizontal, este último medido na zona extrema da caixa em L, ou seja na zona em que o nível de betão é mais baixo.

Uma determinada quantidade de volume de betão fresco flui através das grades na horizontal outra fica na vertical.

2.4. MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.4.1.MÉTODO PROPOSTO POR OKAMURA

Okamura e al. [Okamura et al., 1995] propuseram um método de estudo de composição do betão auto-compactável simples, baseado em manter fixa a quantidade de agregados finos e grossos, e fazer o ajuste da razão água/pó e da dosagem de adjuvante de forma a conseguir obter a auto-compactação do betão (Figura 2.16).

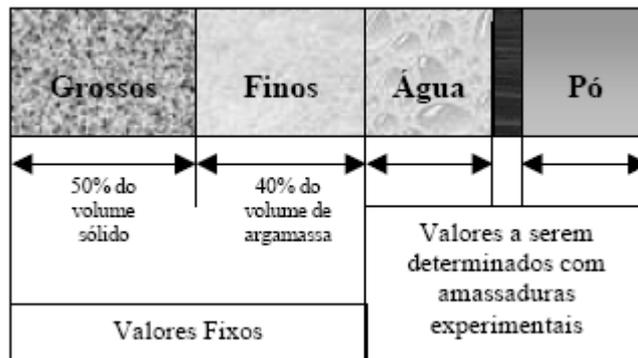


Figura 2.16 - Método de estudo de composição proposto por Okamura.

Adaptado de [Ouchi,1998]

Este método prevê os seguintes parâmetros:

1. A quantidade de agregados grossos é fixa e o seu volume absoluto igual a 50% do volume sólido; para quantidades superiores a 50% a auto-compactação falha frequentemente;
2. A quantidade de agregados finos, com partículas de dimensão superior a 90 μm , é fixa e o seu volume absoluto igual a 40 % do volume de argamassa; este valor é definido pelo lado da segurança, mesmo quando existem variações na qualidade dos materiais;
3. A razão água/pó, em volume, assume o valor de 0,9 a 1,0 dependendo das propriedades do pó;
4. A dosagem de superplastificante e a razão água/pó final são determinadas recorrendo à realização de amassaduras experimentais e aos consequentes ensaios de auto-compactação;

5. O volume de vazios varia entre 4 e 7% dependendo das características do meio ambiente a que o betão está exposto.

2.4.2. MÉTODO PROPOSTO PELA SOCIEDADE JAPONESA DE ENGENHEIROS CIVIS

O método foi baseado num conjunto de trabalhos de investigação, e também da experiência adquirida em algumas obras, e considera existirem dois tipos de betões auto-compactáveis [JSCE, 1998] :

1. Os betões “tipo pó”, em que a auto-compactação é baseada na grande quantidade de pó presente na mistura;
2. Os betões “tipo agente de viscosidade”, em que a auto compactação é conseguida, essencialmente, com recurso à utilização de um agente de viscosidade.

Por esta razão a quantidade de água, a razão água/pó e a quantidade de pó variam consoante o tipo de betão considerado.

Os valores que o método considera são os seguintes:

1. A quantidade de agregados grossos, em volume, deve estar compreendida entre 0,30 e 0,32 m³/m³, sendo a dimensão máxima do agregado 20 ou 25 mm;
2. A quantidade de água, caso se trate de um betão “tipo agente de viscosidade”, deve ser menor ou igual a 80l/m³, deve ser aferida para cada

3. tipo de agente de viscosidade, e estar compreendida entre 155 e 175 l/m³ caso se trate de um betão “tipo pó”;
4. A razão volumétrica água/pó e a quantidade de pó para o betão “tipo agente de viscosidade” deve ser determinada para cada tipo de agente, e deve estar compreendida entre 0,28-0,30. Para o “tipo pó” a quantidade de pó deve estar entre 0,16 e 0,19 m³/m³;
5. O volume de vazios é 4,5%;
6. A quantidade de agregados finos, em volume, é a necessária para perfazer 1 m³;
7. As quantidades de adjuvantes são as recomendadas pelos fabricantes.

3. ANÁLISE DE DIVERSAS COMPOSIÇÕES

O estudo das diversas composições permite a análise comparativa das proporções dos constituintes, a avaliação da influência dos materiais e conhecer quais as suas proporções em volume na composição do BAC e as suas propriedades, no estado fresco e endurecido.

O objectivo é conseguir um processo racional de concepção da composição do BAC, à semelhança da metodologia usada para o betão normal, em que a concepção da composição se desenvolve através de diferentes aproximações com base no volume dos diferentes materiais que a compõem, convertido muitas vezes em massa.

3.1.CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES ESTUDADOS

A amostra estudada é constituída por diversas composições de BAC, desenvolvidas em laboratório, nas Universidade do Minho, Universidade da Beira Interior e Universidade do Porto, e por outras composições desenvolvidas em diferentes Países e mencionadas em estudos apresentados no *5th International Symposium RILEM* [S.Girish et al, 2007].

As composições estão discriminadas nos Quadros em anexo. As primeiras quatro composições (Quadro 3.2) foram desenvolvidas na Escola de Engenharia da Universidade do Minho e as outras composições (Quadro 3.2 a 3.5) em diversos Países. Outras composições foram desenvolvidas na Universidade da Beira Interior (Quadros 3.6 a 3.9), e na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Quadro 3.10).

3.Análise de diversas composições

COMPOSIÇÃO BAC	Nº CASOS
Universidade do Minho (Portugal)	4
Universidade da Beira Interior (Portugal)	56
Universidade do Porto (Portugal)	2
Bangalore (Índia)	19
Diversos Países	15

Quadro 3.1 – Distribuição geográfica das composições estudadas

Analisada a amostra, constituída por noventa e seis composições, e as proporções dos materiais em cada composição e as suas propriedades, verifica-se a enorme variedade de composições de BAC que podem ser desenvolvidas(Quadro 3.2 a Quadro 3.11).

Os resultados obtidos relativamente aos factores estudados, quantidade de materiais constituintes do BAC e as suas proporções em volume na composição, bem como as suas propriedades, no estado fresco e endurecido, estão apresentados em termos estatísticos nos Quadros 3.12. e 3.13.

QUADRO 3.2

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total} m ³
													V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
12,7-0,19-0,30	0,56	0,39	340	146	A	754	833	486	6,87	82	642	189	0,29	0,31	0,60	0,17	0,36	1,11	0,96
19,1-0,19-0,30	0,56	0,39	340	146	A	727	859	486	6,87	75	643	190	0,28	0,32	0,60	0,17	0,36	1,12	0,96
12,7-0,16-0,30	0,67	0,47	285	122	A	830	832	407	5,76	74	675	192	0,32	0,31	0,63	0,15	0,34	1,28	0,97
19,1-0,16-0,30	0,67	0,47	285	122	A	824	848	407	5,76	83	670	190	0,31	0,32	0,63	0,15	0,34	1,27	0,97
Mahesh et. Al	0,61	0,37	360	237	A	714	717	597	2,88/0,09			220	0,28	0,26	0,54	0,23	0,45	0,96	0,99
Praveen Kumar et al.	0,64	0,26	250	369	A+C	935	623	619	12,7			161	0,35	0,24	0,59	0,25	0,41	0,64	1,00
Vinod Rajayogan et al.	0,61	0,40	360	192	A	770	715	552	2,5/1,1			220	0,31	0,26	0,57	0,21	0,43	1,05	1,00
Amit Mittal et al.	0,58	0,33	300	225	A+C	976	664	525	12,6/0,05			175	0,37	0,26	0,63	0,19	0,37	0,92	1,00
S. Subramanian et al.	0,63	0,37	352	238	A	790	696	590	3,12			220	0,29	0,26	0,55	0,22	0,44	1,00	0,99
Philippe et al., France	0,53	0,37	350	150	B	860	790	500	5,4/3,4			187	0,33	0,30	0,63	0,18	0,37	0,96	1,00
Manuel Vieira et. al.,Portugal	0,79	0,29	205	358	A+B	786	786	563	5,6			161	0,31	0,30	0,61	0,22	0,38	0,73	0,99

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica

3. Análise de diversas composições

QUADRO 3.3

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total} m ³
													V agreg. f m ³	V agreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
Gomes et. al., Spain	0,42	0,30	455	183	B+C	765	807	638	14,4			191	0,30	0,30	0,60	0,22	0,40	0,87	1,00
David C et al., France	0,39	0,24	396	256	B	723	760	652	5,3/4,7			155	0,28	0,30	0,58	0,25	0,42	0,62	1,00
Veerle Boel et al., Belgium	0,46	0,28	360	240	B	853	698	600	2,3			165	0,32	0,26	0,58	0,23	0,40	0,72	0,98
Grunewall S. et al., Holanda	0,45	0,34	388	123	A	875	770	511	12,8			174	0,34	0,30	0,64	0,18	0,36	0,97	1,00
Ho et al., Singapura	0,55	0,36	330	170	B	820	820	500	5,7			180	0,32	0,32	0,64	0,17	0,36	1,06	1,00
Wenzhong Zhu et al., UK	0,58	0,36	330	200	D	870	750	530	5,3			192	0,34	0,29	0,63	0,19	0,37	1,01	1,00
Neil Henderson, UK	0,48	0,35	400	150	A	765	795	550	6,0/6			190	0,30	0,31	0,61	0,19	0,39	1,00	1,00
Browsers et al., Netherlands	0,54	0,37	320	153	B	1016	687	473	5,21			174	0,39	0,27	0,66	0,17	0,34	1,02	1,00
A.A. Maghsoudi et al, Iran	0,42	0,34	400	100	B	870	750	500	2,6			168	0,36	0,29	0,65	0,17	0,35	0,99	1,00
Van K Bui et al., América	0,62	0,39	349	209	A	736	805	558	1,65			216	0,28	0,31	0,59	0,19	0,41	1,14	1,00
Waller et al., France	0,59	0,43	335	118	B	829	860	453	7,2			197	0,32	0,33	0,65	0,16	0,36	1,23	1,01

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica D GGBS

QUADRO 3.4

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA lts.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total} m ³
													V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
Collapardi et al., Italy	0,45	0,34	400	135	A	785	845	535	4,5/0,25			180	0,30	0,32	0,62	0,20	0,38	0,90	1,00
N Bouzoubaa et al., Canada	0,75	0,45	247	165	A	845	846	412	1,2			186	0,33	0,32	0,65	0,16	0,35	1,16	1,00
M₁	0,56	0,39	402	169	A	800	676	571	2,0	99	740	225	0,31	0,25	0,56	0,21	0,43	1,07	0,99
M₂	0,56	0,39	402	169	A	800	676	571	2/2,86	100	800	225	0,31	0,25	0,56	0,21	0,43	1,07	0,99
M₃	0,56	0,44	402	113	A	792	643	515	1,41	90	865	225	0,31	0,24	0,55	0,19	0,42	1,18	0,97
M₄	0,56	0,39	384	169	A	800	676	553	2	99	700	215	0,32	0,26	0,58	0,21	0,42	1,02	1,00
M₅	0,65	0,34	300	270	A	800	745	570	1,71/1,28	95	700	195	0,31	0,28	0,59	0,23	0,42	0,85	1,01
M₆	0,50	0,33	450	231	A	728	695	681	2,38	94	745	225	0,28	0,26	0,54	0,25	0,47	0,90	1,01
M₇	0,50	0,33	450	231	A	728	695	681	2,38/3,4	100	795	225	0,28	0,26	0,54	0,25	0,47	0,90	1,01
M₈	0,50	0,33	430	231	A	749	695	661	2,38	80	750	215	0,30	0,26	0,56	0,24	0,45	0,90	1,01
M₉	0,49	0,33	400	200	A	800	745	600	1,8/1,2	86	720	195	0,30	0,28	0,58	0,22	0,42	0,89	1,00
M₁₀	0,56	0,33	350	235	A	800	745	585	1,76/1,17	90	740	195	0,30	0,28	0,58	0,22	0,42	0,89	1,00
M₁₁	0,65	0,38	300	270	A	800	745	515	1,71/1,28	95	700	195	0,30	0,28	0,58	0,22	0,42	0,89	1,00
M₁₂	0,78	0,35	250	305	A	800	745	555	1,66/1,25	83	660	195	0,30	0,28	0,58	0,22	0,42	0,89	1,00

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica D GGBS

3. Análise de diversas composições

QUADRO 3.5

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total} m ³
													V agreg.f m ³	V agreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
M₁₃	0,87	0,36	225	323	A	800	745	548	1,64/1,2	83	650	195	0,30	0,28	0,58	0,22	0,42	0,89	1,00
M₁₄	0,98	0,36	200	340	A	800	745	540	1,62/1,2	85	630	195	0,30	0,28	0,58	0,22	0,42	0,89	1,00
M₁₅	0,50	0,37	450	166	B	789	664	616	4,31/1,2	90	650	225	0,30	0,25	0,55	0,21	0,43	1,07	0,98
M₁₆	0,50	0,37	450	155	A+B	789	664	605	3,93	85	620	225	0,30	0,25	0,55	0,21	0,43	1,07	0,98
M₁₇	0,50	0,37	450	152	A+B	789	664	602	3,65	95	690	225	0,30	0,25	0,55	0,21	0,43	1,07	0,98
M₁₈	0,50	0,38	450	148	A+B	789	664	598	3,00	100	730	225	0,30	0,25	0,55	0,21	0,43	1,07	0,98
M₁₉	0,50	0,38	450	146	A+B	789	664	596	2,38	94	720	225	0,30	0,25	0,55	0,21	0,43	1,07	0,98

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica D GGBS

QUADRO 3.6

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total} m ³
													V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
B.2.1	0,312	0,26	542,50	121,35	A	725,52	771,72	663,85	13,28	90	695	169,53	0,279	0,285	0,564	0,223	0,393	0,76	0,96
B.2.2	0,313	0,26	528,37	118,19	A	706,63	819,95	646,56	12,93	84	670	165,12	0,272	0,303	0,575	0,217	0,382	0,76	0,96
B.2.3	0,312	0,26	512,36	114,61	A	685,21	874,62	626,97	12,54	79	625	160,11	0,263	0,323	0,586	0,211	0,371	0,76	0,96
B.2.4	0,333	0,27	504,90	112,94	A	771,71	771,75	617,84	12,36	81	620	168,16	0,297	0,285	0,582	0,208	0,376	0,81	0,96
B.2.5	0,333	0,27	491,75	110,00	A	751,61	819,95	601,75	12,03	78	630	163,78	0,289	0,303	0,592	0,202	0,366	0,81	0,96
B.2.6-A	0,333	0,27	476,85	106,66	A	728,83	874,62	583,51	11,67	64	600	158,82	0,280	0,323	0,603	0,196	0,355	0,81	0,96
B.2.7	0,370	0,30	459,40	102,76	A	819,18	771,72	562,16	10,98	73	645	170,01	0,315	0,285	0,600	0,189	0,359	0,90	0,96
B.2.8	0,370	0,30	447,43	100,08	A	797,85	819,95	547,51	10,69	62	625	165,58	0,307	0,303	0,610	0,184	0,350	0,90	0,96
B.2.9	0,370	0,30	470,03	105,14	A	838,14	728,85	575,17	11,23	74	610	173,94	0,322	0,269	0,591	0,193	0,367	0,90	0,96
B.2.10	0,333	0,27	516,59	115,55	A	789,57	728,85	632,14	12,64	86	645	172,05	0,303	0,269	0,572	0,212	0,384	0,81	0,96
B.3.1	0,337	0,28	531,90	115,92	B	711,36	771,72	647,82	13,26/0,25	85	660	179,34	0,273	0,285	0,558	0,219	0,398	0,82	0,96
B.3.2	0,337	0,28	518,05	112,90	B	692,83	819,95	630,95	12,92	81	635	174,67	0,266	0,303	0,569	0,213	0,388	0,82	0,96
B.3.3	0,337	0,28	502,35	109,48	B	671,83	874,62	611,83	12,53/3,4	77	630	169,38	0,258	0,323	0,581	0,207	0,376	0,82	0,96
B.3.4	0,358	0,29	495,71	108,03	B	757,66	771,72	603,74	12,36	81	630	177,33	0,291	0,285	0,576	0,204	0,381	0,87	0,96

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica D GGBS

3.Análise de diversas composições

QUADRO 3.7

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V Total m ³
													V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
B.3.5	0,358	0,29	482,80	105,22	B	737,93	819,95	588,02	12,04/4,7	81	655	172,71	0,284	0,303	0,587	0,198	0,371	0,87	0,96
B.3.6	0,358	0,29	468,17	102,03	B	715,57	874,62	570,20	11,68	73	635	167,48	0,275	0,323	0,598	0,193	0,360	0,87	0,96
B.3.7	0,391	0,32	453,01	98,72	B	807,78	771,72	551,73	11,03	67	615	176,96	0,310	0,285	0,595	0,186	0,363	0,95	0,96
B.3.9	0,391	0,32	463,49	101,01	B	826,48	728,85	564,50	11,29	73	605	181,05	0,318	0,269	0,587	0,190	0,371	0,95	0,96
B.3.10	0,358	0,29	507,19	110,53	B	775,20	728,85	617,72	12,65	85	640	181,44	0,298	0,269	0,567	0,208	0,389	0,87	0,96
B.4.1	0,313	0,26	542,74	106,23	C	725,85	771,72	648,97	12,98	84	650	169,61	0,279	0,285	0,564	0,223	0,393	0,76	0,96
B.4.3	0,312	0,26	512,59	100,33	C	685,52	874,62	612,92	12,26	77	615	160,18	0,263	0,323	0,586	0,211	0,371	0,76	0,96
B.4.4	0,333	0,28	505,11	98,86	C	772,02	771,72	603,97	12,08	80	625	168,23	0,297	0,285	0,582	0,208	0,376	0,81	0,96
B.4.5	0,333	0,28	491,95	96,29	C	751,92	819,95	588,24	11,76	77	635	163,85	0,289	0,303	0,592	0,202	0,366	0,81	0,96
B.4.7	0,366	0,31	460,84	90,20	C	821,75	771,72	551,04	10,76	70	625	168,64	0,316	0,285	0,601	0,189	0,358	0,89	0,96
B.4.9	0,366	0,31	471,50	92,28	C	840,77	728,85	563,78	11,01	77	630	172,55	0,323	0,269	0,592	0,194	0,367	0,89	0,96
B.4.10	0,333	0,28	516,80	101,15	C	789,89	728,85	617,95	12,36	83	640	172,13	0,303	0,269	0,572	0,250	0,422	0,69	0,99
B.5.1	0,274	0,27	670,36	0,00		694,38	771,72	670,36	20,75	81	620	183,60	0,267	0,285	0,552	0,213	0,397	0,86	0,95
B.5.3	0,274	0,27	633,12	0,00		655,80	874,62	633,12	19,60	79	635	173,40	0,252	0,323	0,575	0,202	0,375	0,86	0,95

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica D GGBS

QUADRO 3.8

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total} m ³
													V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
B.5.4	0,287	0,29	628,41	0,00		743,91	771,72	628,41	18,55	77	615	180,12	0,286	0,285	0,571	0,200	0,380	0,90	0,95
B.5.7	0,312	0,31	575,42	0,00		794,71	771,72	575,42	16,44	75	645	179,59	0,305	0,285	0,590	0,183	0,363	0,98	0,95
B.5.9	0,312	0,31	588,74	0,00		813,10	728,85	588,74	16,82	75	640	183,75	0,312	0,269	0,581	0,187	0,371	0,98	0,95
B.5.10	0,287	0,29	642,96	0,00		761,14	728,85	642,96	18,98	86	630	184,29	0,292	0,269	0,561	0,205	0,389	0,90	0,95
B.6.1	0,350	0,26	487,45	180,96	A	721,31	771,72	668,41	14,96	81	620	170,76	0,277	0,285	0,562	0,222	0,393	0,77	0,95
B.6.2-B	0,350	0,26	474,76	176,25	A	702,52	819,95	651,01	14,57	84	645	166,32	0,270	0,303	0,573	0,215	0,381	0,77	0,95
B.6.3-B	0,350	0,26	460,37	170,91	A	681,24	874,62	631,28	14,13	83	645	161,28	0,262	0,323	0,585	0,209	0,370	0,77	0,96
B.6.4	0,369	0,27	455,42	169,07	A	770,18	771,72	624,49	13,68	80	630	167,83	0,296	0,285	0,581	0,207	0,375	0,81	0,96
B.6.5	0,369	0,27	443,56	164,67	A	750,13	819,95	608,23	13,32	89	685	163,46	0,288	0,303	0,591	0,202	0,365	0,81	0,96
B.6.7	0,405	0,30	415,76	154,35	A	820,30	771,72	570,11	11,95	80	680	168,35	0,315	0,285	0,600	0,189	0,357	0,89	0,96
B.6.9	0,405	0,30	425,39	157,92	A	839,29	728,85	583,31	12,22	83	650	172,24	0,323	0,269	0,592	0,194	0,366	0,89	0,96
B.6.10	0,369	0,27	465,96	172,99	A	788,01	728,85	638,95	14,00	84	640	171,72	0,302	0,269	0,571	0,212	0,384	0,81	0,95
B.7.1	0,387	0,28	474,57	171,65	B	702,24	771,72	646,22	15,39/0,09	82	630	183,52	0,270	0,285	0,555	0,216	0,400	0,85	0,95
B.7.10	0,405	0,30	454,25	164,30	B	768,20	728,85	618,55	14,73	92	670	183,93	0,295	0,269	0,564	0,207	0,391	0,89	0,95

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica D GGBS

3. Análise de diversas composições

QUADRO 3.9

Mistura	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total}
													V agreg.f m ³	V agreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
B.8.1	0,341	0,26	490,33	159,28	C	725,57	771,72	649,61	15,47	84	655	167,31	0,279	0,285	0,564	0,223	0,390	0,75	0,95
B.8.2	0,341	0,26	477,56	155,13	C	706,68	819,95	632,69	15,06/0,05	79	630	162,95	0,272	0,303	0,575	0,217	0,380	0,75	0,95
B.8.3	0,341	0,26	463,09	150,43	C	685,26	874,62	613,52	14,61	80	645	158,01	0,263	0,323	0,586	0,211	0,369	0,75	0,96
B.8.4	0,359	0,27	457,73	148,69	C	774,09	771,72	606,42	14,44	83	640	164,52	0,297	0,285	0,582	0,208	0,373	0,79	0,95
B.8.9	0,391	0,30	428,37	139,15	C	845,17	728,85	567,52	13,24	82	655	167,61	0,325	0,269	0,594	0,195	0,363	0,86	0,96
B.8.10	0,359	0,27	468,33	152,13	C	792,01	728,85	620,46	14,77	83	635	168,33	0,304	0,269	0,573	0,213	0,381	0,79	0,95
B.12.1	0,452	0,24	359,78	311,66	A	745,34	771,72	671,44	6,39	77	620	162,70	0,286	0,285	0,571	0,229	0,392	0,71	0,96
B.12.10	0,478	0,26	343,02	297,13	A	812,12	728,85	640,15	6,10	80	650	163,86	0,312	0,269	0,581	0,218	0,382	0,75	0,96
B.13.1	0,557	0,24	289,36	375,99	A	749,33	771,72	665,35	5,07/2,86	85	660	161,27	0,288	0,285	0,573	0,230	0,391	0,70	0,96
B.13.10	0,589	0,26	275,78	358,34	A	816,17	728,85	634,12	4,83	85	655	162,48	0,314	0,269	0,583	0,219	0,381	0,74	0,96
B.14.1	0,378	0,24	419,65	250,32	A	748,31	771,72	669,97	8,29	86	640	158,75	0,287	0,285	0,572	0,230	0,389	0,69	0,96
B.14.10	0,400	0,25	399,82	238,49	A	814,78	728,85	638,31	8,21/1,28	85	655	160,01	0,313	0,269	0,582	0,219	0,379	0,73	0,96
B.15.1	0,447	0,24	351,42	314,43	A	751,97	771,72	665,85	7,29	88	670	157,22	0,289	0,285	0,574	0,231	0,388	0,68	0,96
B.15.10	0,474	0,25	334,84	299,60	A	818,86	728,85	634,44	6,95/3,4	86	650	158,61	0,315	0,269	0,584	0,220	0,379	0,72	0,96

A Cinzas volantes B Metacaulino C Microsilica D GGBS

QUADRO 3.10					
COMPOSIÇÃO	CIMENTO kg/m ³	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)	COMPOSIÇÃO	CIMENTO kg/m ³	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)
12,7-0,19-0,30	340	49,50	B.3.1	531,90	59,69
19,1-0,19-0,30	340	53,90	B.2.8	447,43	49,90
12,7-0,16-0,30	285	34,50	B.3.2	518,05	59,72
19,1-0,16-0,30	285	37,20	B.3.3	502,35	58,49
M₉	400	56,30	B.3.4	495,71	53,01
M₁₀	350	47,60	B.3.5	482,80	52,86
M₁₁	300	43,80	B.3.6	468,17	53,33
M₁₂	250	37,00	B.3.7	453,01	45,67
M₁₃	225	31,00	B.3.9	463,49	44,63
M₁₄	200	26,50	B.3.10	507,19	54,25
M₁₅	450	73,30	B.4.1	542,74	69,11
M₁₆	450	66,00	B.4.3	512,59	67,45
M₁₇	450	67,30	B.4.4	505,11	63,14
M₁₈	450	71,80	B.4.5	491,95	64,79
M₁₉	450	65,00	B.4.7	460,84	59,61
SN B	487	31,00	B.4.9	471,50	56,83
SN A	498	46,60	B.4.10	516,80	63,63
B.2.1	542,50	63,67	B.5.1	670,36	84,98
B.2.2	528,37	66,34	B.5.3	633,12	86,77
B.2.3	512,36	64,83	B.5.4	628,41	82,86
B.2.4	504,90	60,43	B.5.7	575,42	77,78
B.2.5	491,75	59,97	B.5.9	588,74	76,80
B.2.6-A	476,85	59,90	B.5.10	642,96	81,91
B.2.7	459,40	50,52	B.6.1	487,45	78,43
B.2.8	447,43	49,90	B.6.2-B	474,76	79,20

3.Análise de diversas composições

QUADRO 3.11					
COMPOSIÇÃO	CIMENTO kg/m3	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)	COMPOSIÇÃO	CIMENTO kg/m3	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)
B.6.3-B	460,37	77,94	B.6.4	455,42	74,71
B.2.9	470,03	50,89	B.6.5	443,56	79,32
B.2.10	516,59	60,34	B.8.9	428,37	69,91
B.6.7	415,76	70,65	B.8.10	468,33	75,66
B.6.9	425,39	66,84	B.12.1	359,78	69,13
B.6.10	465,96	72,09	B.12.10	343,02	62,83
B.7.1	474,57	74,09	B.13.1	289,36	54,31
B.7.10	454,25	70,53	B.13.10	275,78	51,32
B.8.1	490,33	80,34	B.14.1	419,65	50,93
B.8.2	477,56	79,16	B.14.10	399,82	46,67
B.8.3	463,09	78,24	B.15.1	351,42	42,47
B.8.4	457,73	74,46	B.15.10	334,84	38,32

3.2. COMPOSIÇÃO EM VOLUME DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

A análise estatística dos valores dos diferentes materiais que constituem as amostras analisadas, em volume, estão representados no Quadro 3.12.

Variável	1º Decil	Mediana	9º Decil
$V_{\text{agregados finos}}$	0,27	0,30	0,32
$V_{\text{agregados grossos}}$	0,26	0,29	0,32
$V_{\text{agregados}}$	0,55	0,58	0,63
$V_{\text{pó}}$	0,18	0,21	0,23
V_{pasta}	0,36	0,38	0,43
$V_{\text{Água}}$	0,16	0,17	0,22
W / V_p	0,73	0,89	1,07
$V_{\text{agregados finos}} / V_{\text{agregados grossos}}$	0,85	1,03	1,18

Quadro 3.12 – Valores resultantes da análise estatística dos constituintes das diversas composições, em volume

Nas amostras analisadas, a composição relativamente aos parâmetros analisados

- Volume de agregados, finos e grossos;
- Volume do pó;
- Volume da pasta;
- Relação água pó, em volume;

- Relação agregados finos agregados grossos, em volume.

apresentam valores compreendidos, em 80% dos casos, nestes intervalos de variação (Quadro 3.12).

3.2.1. VOLUME DE AGREGADOS

AGREGADOS FINOS

A quantidade de agregados finos, em volume, varia entre 26% e 39% por volume do betão, com 80% dos casos com valores compreendidos entre 27% e 32%, sendo o valor médio em volume de 30% do volume de betão.

3.2.1. VOLUME DE AGREGADOS

AGREGADOS FINOS

A quantidade de agregados finos, em volume, varia entre 26% e 39% por volume do betão, com 80% dos casos com valores compreendidos entre 27% e 32%, sendo o valor médio em volume de 30% do volume de betão.

AGREGADOS GROSSOS

A quantidade de agregados grossos, em volume, varia entre 24% e 33% por volume do betão, com 80% dos casos com valores compreendidos entre 26% e 32%, sendo o valor médio em volume de 29% do volume de betão.

A dimensão máxima dos agregados grossos varia ente 10-20 mm.

Concluindo, verifica-se que o volume de agregados finos é semelhante ao volume dos agregados grossos, representando o volume de agregados no seu conjunto cerca de 60% do volume total do BAC.

3.2.2.VOLUME DA ÁGUA

A quantidade de água, em volume, varia entre 15,5% a 22,5% do volume do betão, com 80% dos valores compreendidos entre 16,1% a 22,0% , sendo o valor médio de 16,4% do volume do betão.

3.2.3.VOLUME DO PÓ

A quantidade de pó, em volume, varia entre 15% a 25% do volume do betão, com 80% dos valores compreendidos entre 18% a 23% , sendo o valor médio de 21% do volume do betão.

3.2.4.VOLUME DA PASTA

A quantidade de pasta, em volume, varia entre 34% a 48% do volume do betão, com 80% dos valores compreendidos entre 36% a 43% , sendo o valor médio de 38% do volume do betão.

3. Análise de diversas composições

O BAC é constituído por duas fases, pasta e agregados, sendo o valor óptimo do volume da pasta de 0,38 e a razão água/cimento 0,40.

3.2.5. RELAÇÃO ÁGUA/PÓ, EM VOLUME

A relação Água/Pó, varia entre os valores 0,62 a 1,28, com 80% dos valores compreendidos entre 0,73 e 1,07, sendo o valor médio de 0,89.

3.2.6. RELAÇÃO VOLUME DE AGREGADOS FINOS/ VOLUME DE AGREGADOS GROSSOS

A relação Volume de agregados finos/ Volume de agregados grossos, varia entre os valores 0,80 a 1,46, com 80% dos valores compreendidos entre 0,85 e 1,18, sendo o valor médio de 1,03.

3.3. COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES, EM MASSA

A análise estatística dos valores dos diferentes materiais que constituem as amostras analisadas, em massa, estão representados no Quadro 3.13.

Variável	1º Decil	Mediana	9º Decil
Cimento	300	450	518
Agregados finos	703	786	841
Agregados grossos	676	771	859
Pó	511	602	664
Água	161	174	220

Quadro 3.13 – Valores resultantes da análise estatística da quantidade dos constituintes das diversas composições

3.3.1. QUANTIDADE DE CIMENTO

A quantidade de cimento varia entre 200kg/m^3 e 670kg/m^3 , com 80% dos casos a variar entre 300 - 518 kg/m^3 , com o valor médio de 450 kg/m^3 .

3.3.2. QUANTIDADE DE AGREGADOS

QUANTIDADE DE AGREGADOS FINOS

A quantidade de agregados finos varia entre 511kg/m^3 e 664kg/m^3 , com 80% dos casos a variar entre 703 - 841 kg/m^3 , com o valor médio de 786 kg/m^3 .

QUANTIDADE DE AGREGADOS GROSSOS

A quantidade de agregados grossos varia entre 511kg/m^3 e 664kg/m^3 , com 80% dos casos a variar entre 676 - 859 kg/m^3 , com o valor médio de 771 kg/m^3 .

3. Análise de diversas composições

3.3.3. QUANTIDADE DE PÓ

A quantidade de pó varia entre 511kg/m^3 e 664kg/m^3 , com 80% dos casos a variar entre $511 - 664\text{ kg/m}^3$, com o valor médio de 602 kg/m^3 .

Variável	1º Decil	Mediana	9º Decil
W/C	0,31	0,41	0,63
W/Pó	0,26	0,30	0,39

Quadro 3.14 – Relação de valores resultantes da análise estatística das diversas composições

3.3.4. RAZÃO ÁGUA/CIMENTO

A razão Água Cimento, varia entre os valores 0,27 a 0,98, com 80% dos valores compreendidos entre 0,31 e 0,63, sendo o valor médio de 0,41.

3.3.5. RAZÃO ÁGUA/PÓ

A razão Água Pó, varia entre os valores 0,24 a 0,47, com 80% dos valores compreendidos entre 0,26 e 0,39, sendo o valor médio de 0,30.

3.3.6. OUTRAS RELAÇÕES ESTUDADAS

Foram estudadas outras relações (Quadro 3.12) relativas à composição de betão, nomeadamente a razão volumétrica água pó, agregados finos agregados grossos

com a finalidade de obter indicadores que assegurem que determinada composição estudada é auto-compactável antes de se proceder à amassadura.

3.4. PROPRIEDADES DO BAC

Slump flow (mm)	620	645	730
L-box (mm)	740	830	942
Resistência à compressão	42,74	62,83	79,01

Quadro 3.15 – Valores resultantes da análise estatística das propriedades das diversas composições

3.4.1. PROPRIEDADES DO BETÃO FRESCO

3.4.1.1. SLUMP FLOW E LBox

O betão auto-compactável exige uma baixa tensão de corte (elevado Slump Flow) para fluir devido ao seu peso próprio, e uma moderada viscosidade plástica para manter a sua estabilidade.

Os testes do Slump Flow e L-box definem, em conjunto, a capacidade de fluência do betão.

O teste do Slump Flow é o teste mais aceite para medir a consistência do betão no local da obra devido à simplicidade da sua aplicação. Podem ser utilizados outros testes empíricos, tais como a L- box e Orimet, de qualquer forma a sua aplicação é mais complexa.

3. Análise de diversas composições

O valor do Slump Flow nas composições estudadas varia entre 600 e 865 mm, verificando-se em 90% das composições valores entre 620 e 730 mm, sendo o seu valor médio de 645 mm

3.4.1.2. LBox

O valor da altura na L- Box varia entre os valores 62 mm e 100 mm, verificando-se em 90% das composições valores entre 74 mm e 94,2 mm, sendo o seu valor médio de 83 mm.

3.4.2. PROPRIEDADES DO BETÃO ENDURECIDO

3.4.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência á compressão aos 28 dias, para a maior parte das composições, tem o valor médio de 62,83 MPa e apresenta, em 80% dos casos, valores compreendidos entre 42,74 MPa e 79,01 MPa.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Relativamente aos materiais constituintes e às suas proporções na mistura, às suas propriedades no estado fresco, resistência à compressão, sobre as composições de BAC estudadas, permitem tirar algumas conclusões.

Verifica-se que a maior parte das composições apresenta a fracção em volume dos agregados finos com valor quase igual à fracção em volume dos agregados grossos e, em conjunto, constituem cerca de 60-63% do volume total do BAC.

O volume da pasta, isto é, a soma das fracções em volume de cimento, filler e água, têm um valor médio de cerca de 0,38, com uma variação de $\pm 0,05$.

Os referidos valores indicam que as composições de BAC têm, em geral, cerca de 40% de volume de pasta e cerca de 60% de volume de agregados.

Há excepções a estes valores, considerando que a capacidade do BAC fluir é influenciada pela forma dos agregados, granulometria, tipo e quantidade do superplastificante utilizado. Por exemplo, nas composições em que o agregado é mais anguloso é, em geral, necessária mais quantidade de pasta, pois este tipo de agregado exige uma maior quantidade de água para molhar a superfície dos agregados.

Os valores médios da proporção dos materiais de uma composição :

- Quantidade de agregados grossos: 29%, em volume
- Quantidade de pasta : 38%, em volume
- Quantidade de pó: 602 kg/m³
- Razão água/pó : 0,34, em peso
- Agregados finos/ Agregados grossos : 1,03, em volume

3.Análise de diversas composições

Em todo o caso, verifica-se que as composições têm variações consideráveis relativamente aos valores médios obtidos. A dimensão máxima dos agregados nas diferentes amostras é de 20 mm.

O estudo permite confirmar que o BAC é uma enorme família de composições, não havendo uma única composição para uma dada aplicação ou exigência. É assim um desafio a optimização das composições para atingir uma maior eficiência e economia.

Considerando a enorme proximidade que se verifica entre os valores das fracções em volume dos agregados grossos, agregados finos e da pasta, seguindo uma proporção sistemática na composição à semelhança da metodologia utilizada nas composições do betão normal, poderá desenvolver-se de forma semelhante um método de composição de BAC. É de notar que todas as composições analisadas satisfazem as exigências básicas do BAC, nomeadamente a elevada fluidez e resistência à segregação e capacidade de ultrapassar obstáculos.

4. MÉTODO DE COMPOSIÇÃO EM VOLUME

4.1.INTRODUÇÃO

Conforme referido no estudo das diferentes composições, verifica-se que emergem significativas semelhanças entre as fracções em volume dos constituintes do BAC, que poderão contribuir para o desenvolvimento de um processo racional de concepção da composição do betão auto-compactável. Alguns trabalhos de investigação têm apontado neste sentido, e interessa aferir se noutras composições, com materiais normalmente usados em Portugal, é possível desenvolver e aplicar esta metodologia.

A concepção da composição de um betão normal é realizada através de diferentes aproximações em que ao volume dos diferentes materiais é dada uma importância significativa, e a concepção da composição desenvolve-se a partir das fracções em volume dos diferentes materiais convertidas, muitas vezes, em massa.

O BAC é caracterizado como uma mistura fluida com excelente deformabilidade e resistência à segregação, que pode fluir e auto-compactar devido apenas ao seu peso próprio. Para adquirir estas propriedades há alguns pressupostos já estabelecidos e comprovados. Limita-se a percentagem de agregados grossos na sua composição, a percentagem de pó deve ser elevada, na ordem dos 450-600 kg/m³, e tem de se usar um superplastificante. Como material em pó, para além do cimento, podem usar-se outros materiais, tais como, as cinzas volantes, o metacaulino, GGBS “ground granulated blast furnace slag” e a sílica de fumo.

4.Método de composição

Num betão fresco, a energia exigida para a fluência é principalmente consumida, ou absorvida, por tensões internas originadas pelas colisões e bloqueio das partículas dos agregados grossos. Limitando a percentagem de agregados grossos, cujo consumo de energia é particularmente intenso durante a betonagem, para um valor inferior ao utilizado num betão normal, é possível reduzir esta perda de energia. É também exigida uma levada viscosidade da pasta para atenuar a bloqueio das partículas dos agregados quando o betão flui através dos obstáculos. A elevada deformabilidade do betão fresco é adquirida utilizando um superplastificante compatível, diminuindo a razão água/pó, em volume.

Estudos desenvolvidos em todo o mundo evidenciam que as composições de BAC foram obtidas por diferentes aproximações. Na definição das proporções dos constituintes é dada elevada importância à fracção pó, aliás, é deste modo que o BAC é desenvolvido no Japão, em que a composição parte da fracção pó. Por exemplo, no método recomendado por Okamura e Ozawa, que é um método empírico, o agregado grosso e o agregado fino têm quantidades previamente fixadas. O agregado grosso no betão é fixado em 50% do volume sólido do betão e o agregado fino em 40% do volume da pasta, e a auto-compatibilidade é adquirida ajustando água a percentagem de pó e de superplastificante. A razão água/pó é usualmente assumida como 0,9 a 1,0, dependendo das propriedades do pó.

O método de concepção da composição do BAC proposto pela “Japanese Ready Mixed Concrete Association (JRMCA)” é uma versão simplificada do Método de Okamura, em que parte do princípio de que pode ser utilizada uma grande variedade de materiais em pó, sendo o valor da razão água/pó, em massa, não inferior a 0,30.

Um processo experimental apresentado por [CCGomes et al., 2001] assume que o betão é constituído por duas fases, pasta e agregados, e utiliza metacaulino e sílica de fumo para obter um volume de pasta óptimo no valor de 0,38, com a razão água cimento igual a 0,4.

O LCPC - Laboratoires des Ponts et Chaussées, [T.Sedran et al.,1999], no 1º Simpósio de Betão Auto-compactável promovido pelo RILEM, baseia o desenvolvimento de um método obtendo indicações da tensão de corte a partir de medições utilizando um reómetro, e não o Slump Flow do betão, e baseia-se na determinação do valor óptimo de compactação do esqueleto granular na selecção do agregado, o que resulta na utilização de menor quantidade de água para a mesma trabalhabilidade do BAC, ou no aumento da trabalhabilidade mantendo a água constante.

Outro método [Nan Su et al, 2001], baseia-se no maior ou menor factor de compactação dos agregados, o que afecta a quantidade de agregados no BAC. Um elevado factor de compactação implica uma maior quantidade de agregados grossos e finos utilizados, diminuindo a quantidade de ligante no BAC. Consequentemente, a fluidez, a auto-compatibilidade e a resistência à compressão serão inferiores. Por outro lado, um baixo factor de compactação significa maior quantidade de ligante, o que pode aumentar o custo do betão se o ligante for cimento, ou cimento e outros materiais que também envolvem custos.

Outro método [Alexandre Pineand et al., 2005] baseia-se no desenvolvimento da composição do BAC mantendo o volume da pasta e a razão água/ligante constantes, em que o volume da pasta varia entre 0,36 e 0,45, e a razão água/ligante de 0,26 a

4.Método de composição

0,34, por massa. Há estudos que revelam que a razão água ligante é um dos factores que mais influenciam a resistência à compressão, e o volume da pasta tem um efeito marginal na resistência à compressão.

[Mahesh e Manu Santhanam, 2004] indicam que a razão água pó varia entre 0,9 e 1,1, com a quantidade de cimento fixada em 360 kg/m³ e o volume da água de 220 lts/m³, com cinzas volantes como filler.

Um outro estudo, [Praveen Kumar et al., 2004], revela que a razão água pó tem um valor na ordem dos 0,70, e que uma elevada quantidade de pasta torna a composição coesa com uma maior contribuição de cinzas volantes, cerca de 52 a 56% do material cimentício.

As metodologias apresentadas, e outras desenvolvidas e apresentadas em diversa literatura, p.ex. [Eric P. Koeler and David W. Fowler, 2007], em que define a composição do BAC para uma dada aplicação, em três fases, selecção dos agregados, selecção do volume da pasta e selecção da composição da pasta, permitem reflectir sobre as diversas abordagens para a definição da composição do BAC.

Interessa desenvolver estudos no sentido de convergir para uma metodologia que torne acessível e simplifique o processo da composição do betão auto-compactável, e assim se promova a sua aplicação.

4.2. CONCEPÇÃO DA COMPOSIÇÃO COM OS MATERIAIS CONSTITUINTES EM VOLUME

A concepção da composição de um BAC teve como base a análise das composições estudadas, e o estudo de diversas metodologias desenvolvidas e as recomendações técnicas necessárias para garantir as propriedades que caracterizam um betão auto-compactável. A composição foi inicialmente aferida em Laboratório, através da concretização das composições LAB 1 e LAB 2, e executadas também as composições PAV 1 e PAV 2 numa unidade industrial de pré-fabricação, a Empresa PAVICENTRO.

Definiram-se alguns valores base para a proporção dos materiais constituintes, em volume, e que são os seguintes:

Agregados

1. $V_{\text{agregados}} 0,60$

$V_{\text{agregados grossos}} 0,30$, constituídos por 0,10 (Brita 4/8mm) e 0,20 (Brita 8/16mm)

$V_{\text{agregados finos}} 0,30$ areia 0/4 mm

Pasta (cimento+metacaulino+água)

2. $V_{\text{Pasta}} 0,40$

3. $V_{\text{Pó}} 0,20$

4. $V_{\text{Água}} 0,20$

Considerou-se também o seguinte:

1. Relação Água/Pó, em volume, 0,9 a 1,1

2. Relação Cimento/Pó, em massa, 3:1

4.Método de composição

QUADRO 4.1

Composição	Cimento	Filler	W	Agreg. Finos	Agreg. Grossos		Total Pó	SP/VMA	V Total	L Box	SLUMP FLOW	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{pasta} /V _{agregados}	V _{agreg finos} /V _{psta}					
					Its.							Its.	Its.	Its.	H ₂ / H ₁	D _{Final}				V agreg.f	Vagreg. g	V agreg.	V pó	V _{pasta}
					4/8	8/16																		
LAB 1	7,00	3,00	8,00	15,00	5,00	10,00	10,00	0,036	48,04			0,31	0,31	0,62	0,21	0,37	0,80	0,60	0,83					
LAB 1 _(corrigida)	7,75	3,25	8,00	17,00	5,60	11,40	11,00	0,036	53,04	64	480	0,32	0,32	0,64	0,21	0,36	0,73	0,56	0,89					
LAB 2	5,00	3,00	6,80	18	5	9	8	0,138	46,94	72	580	0,38	0,30	0,68	0,17	0,32	0,85	0,46	1,22					
PAV 1	121	53	190	320	116	193	174	5	998			0,32	0,31	0,63	0,17	0,36	1,09	0,58	0,88					
PAV 2	102	45	193	438	89	130	147	4	1001	82	680	0,44	0,22	0,66	0,15	0,34	1,31	0,52	1,29					

QUADRO 4.2

Composição	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	L Box H ₂ / H ₁ %	SLUMP FLOW D _{Final} mm	W Lt./m ³	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{Total} m ³
													V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³		
LAB 1	0,32	0,24	469	142	B	848	851	610	0,69	—	—	149	0,32	0,32	0,64	0,21	0,36	0,71	1,00
LAB 1 (corrigida)	0,29	0,22	469	139	B	869	872	608	0,69	64	520	135	0,33	0,33	0,66	0,21	0,35	0,64	1,01
LAB 2	0,43	0,30	336	142	B	1020	796	477	2,83	72	590	145	0,38	0,30	0,68	0,17	0,32	0,85	1,00
PAV 1	0,38	0,28	380	140	A	850	825	520	1,00	—	—	145	0,38	0,30	0,68	0,17	0,32	0,85	1,00
PAV 2	0,60	0,44	380	140	A	980	690	520	4,00	82	680	228	0,44	0,22	0,66	0,15	0,34	0,85	1,00

4.Método de composição

Considerando que o volume de betão a executar seria de aproximadamente 50 litros, definiram-se os valores em volume dos diferentes materiais constituintes para a composição **LAB 1** (Quadro 4.3).

COMPOSIÇÃO	Cimento lts.	Filler lts.	W lts.	Agreg. Finos lts.	Agreg. Grossos (lts)		SP/ VMA lts.	V Total lts.
					4/8	8/16		
LAB 1	7,00	3,00	8,00	15,00	5,00	10,00	0,036	48,00
LAB 1 _(corrigida)	7,75	3,25	8,00	17,00	5,60	11,40	0,036	53,00
LAB 2	5,00	3,00	6,80	18,00	5,00	9,00	0,138	46,94

Quadro 4.3 – Volume dos materiais nas composições executadas em Laboratório

O betão foi executado em Laboratório, e verificando-se haver excesso de água, procedeu-se à correcção das quantidades dos materiais mantendo a sua proporção em volume, e resultando na composição **LAB 1 corrigida** (Quadro 4.4)

COMPOSIÇÃO	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	$\frac{V_{pasta}}{V_{agregados}}$	$\frac{V_{agregfinos}}{V_{pasta}}$
	V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³			
LAB 1	0,31	0,31	0,63	0,21	0,38	0,80	0,60	0,83
LAB 1 _(corrigida)	0,32	0,32	0,64	0,21	0,36	0,73	0,56	0,89
LAB 2	0,38	0,30	0,68	0,17	0,32	0,85	0,46	1,22

Quadro 4.4 – Proporção dos materiais nas composições executadas em Laboratório, em volume

A composição foi executada, e realizados os testes Slump Flow e L-box. O teste Slump Flow indicou a probabilidade de ocorrência de segregação, o que veio a verificar-se. Foram ensaiados provetes aos 3 dias e verificou-se uma resistência à compressão de 8 MPa.

Procedeu-se então à reformulação da composição de forma a evitar a ocorrência de segregação, optando por aumentar a fracção de agregados finos, e diminuindo a quantidade de cimento. Iniciou-se por colocar os materiais em seco, acrescentando parte da água com o superplastificante diluído, sendo o restante volume de água aferido por inspeção visual. A composição resultante, designada por **LAB 2** (Figura 4.2) apresenta as características de um betão auto-compactável, e todo o processo de execução está descrito no capítulo 5.

Composição	W/C	W/Pó	Cimento	Filler	Tipo Filler	Agreg. Finos	Agreg. Grossos	Total Pó	SP/VMA	W
			Kg/m ³	Kg/m ³		Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Its.	Lt./m ³
LAB 1	0,32	0,24	469	142	B	848	851	610	0,69	149
LAB 1 (corrigida)	0,29	0,22	469	139	B	869	872	608	0,69	135
LAB 2	0,43	0,30	336	142	B	1020	796	477	2,83	145

Quadro 4.5 – Quantidade dos materiais nas composições executadas em Laboratório (kg/m³)

4.Método de composição

O volume do superplastificante teve de ser corrigido para um valor superior, de acordo com as recomendações técnicas do fabricante, o que implicou uma diminuição da tensão de corte e da viscosidade plástica.

A concepção inicial da composição prevê idêntico volume de agregado fino e de agregado grosso, mas as características do agregado (angularidade) exigiram a aferição da composição, e a quantidade de agregados finos é superior à quantidade de agregados grossos em ambas as composições LAB 2, sendo de 1,22 a relação agregados finos pasta, em volume.

Verificou-se um aumento do volume de agregados, e simultaneamente o aumento da a relação agregados finos agregados grossos, e embora houvesse diminuição do volume do pó por diminuição da quantidade de cimento, a resistência à compressão do betão LAB 2, aos 3 dias, duplicou relativamente ao LAB 1C.

Assim, a proporção dos materiais constituintes da composição LAB 2, em volume, tem os seguintes valores:

Agregados

1. $V_{\text{agregados}} 0,68$

$V_{\text{agregados grossos}} 0,30$, constituídos por 0,10 (Brita 4/8mm) e 0,20 (Brita 8/16mm)

$V_{\text{agregados finos}} 0,38$ areia 0/4 mm

Pasta (cimento+metacaulino+água)

2. $V_{\text{Pasta}} 0,32$

3. $V_{\text{Pó}} 0,17$

4. $V_{\text{Água}} 0,20$

Considerou-se também que:

- a. Relação Água/Pó, em volume, 0,85
- b. Relação Cimento/Pó, em massa, 2,4 : 1

A concepção inicial da composição prevê idêntico volume de agregado fino e agregado grosso, mas as características do agregado exigiram a aferição da composição, e a quantidade de agregados finos é superior à quantidade de agregados grossos em ambas as composições LAB 2 e PAV 2.

Composição	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	V _{pasta} /V _{agregados}	V _{agreg. finos} /V _{psta}
	V agreg.f m ³	V _{agreg. g} m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³			
PAV 1	0,38	0,30	0,68	0,17	0,32	0,85	1,00	1,27
PAV 2	0,44	0,22	0,66	0,15	0,34	1,31	0,52	1,29

Quadro 4.6 – Proporção dos materiais nas composições executadas na empresa PAVICENTRO, em volume

Composição	W/C	W/Pó	Cimento Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Tipo Filler	Agreg. Finos Kg/m ³	Agreg. Grossos Kg/m ³	Total Pó Kg/m ³	SP/ VMA Its.	W Lt./m ³
PAV 2	0,60	0,44	380	140	A	980	690	520	4,00	228

Quadro 4.7 – Quantidade dos materiais nas composições executadas na Empresa PAVICENTRO (kg/m³)

4. Método de composição

4.3. SEGREGAÇÃO E ESTABILIDADE DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

O valor da estabilidade descreve a resistência à segregação e é fundamental para a homogeneidade e qualidade do betão in situ. Ocorre no betão quando se verifica a penetração dos agregados na argamassa, sendo o Slump Flow indicador da possibilidade desta ocorrência. Quanto maior for a viscosidade, existe menor probabilidade de ocorrer a segregação.

O BAC pode sofrer segregação dinâmica durante a aplicação e segregação estática depois de aplicado. Quanto maior for a viscosidade, existe menor probabilidade de ocorrer a segregação.

A segregação dinâmica ocorre quando o betão está a fluir, sendo indicadores da possibilidade da sua ocorrência a viscosidade plástica e o Slump Flow.

INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO	Tensão de corte	Viscosidade Plástica
Mais pasta (menos agregado)	↓	↓
Aumentar superplastificante	↓	↓
Mais cinzas volantes	mantém-se constante	↑
Mais sílica de fumo	mantém-se constante	↓
Mais VMA	↑	mantém-se constante
Aumentar a razão água/cimento	mantém-se constante	↓
Mais agregados de forma arredondada	↓	↓
Aumento da finura dos agregados finos	↑	↑

Quadro 4.8 - Efeito dos ajustamentos nos parâmetros reológicos do BAC

Adaptado de Mix Design of SCC

Não há processo de prever a segregação dinâmica e, mesmo que o BAC seja estável relativamente à segregação estática, não significa que a segregação dinâmica não ocorra.

Nas alterações efectuadas na composição foi ponderada a influência na reologia do betão auto-compactável, conforme representado esquematicamente na figura 4.6.

Garantindo uma elevada viscosidade reduz-se o risco de segregação dinâmica.

O tamanho dos agregados tem uma grande influência no risco de segregação, sendo o risco de segregação maior quanto maior for a dimensão do agregado.

É muito importante o controle visual durante a betonagem para observar qualquer segregação, e, em muitos casos, constitui a única oportunidade para detectar a segregação e corrigir a técnica de betonagem aplicada.

Quando se realiza o teste do Slump Flow, e se observa betão em forma de anel, há nestes casos probabilidade da ocorrência de segregação durante a betonagem.

Quando a segregação se verifica significa que a estrutura de vazios está instável, e muitas vezes é visível à superfície uma espuma na superfície do betão.

4.4. ENSAIOS COM O BETÃO FRESCO

As principais características do BAC são as suas propriedades no estado fresco. A composição do BAC é baseada na sua capacidade de fluir devido apenas ao seu peso próprio, sem vibração, mesmo através de zonas densamente armadas, e a capacidade de obter homogeneidade sem haver segregação de agregados.

As propriedades do betão fresco têm influência nas condições de fabrico, transporte, colocação e compactação do betão, sendo por isso muito importante conhecer as propriedades que caracterizam a reologia do betão fresco e os factores que a influenciam. Para este efeito podem ser utilizados equipamentos que determinam as propriedades do material, designados por reómetros, ou equipamentos que medem o desempenho do betão relativamente a uma determinada acção.

4.4.1.OBSERVAÇÃO VISUAL

A observação visual da composição do BAC é muito importante, principalmente quando da sua aplicação, pois por vezes é a única forma possível de recuperar o BAC ou de corrigir situações menos correctas quando se inicia o processo de betonagem.

4.4.2. ENSAIO SLUMP FLOW E T_{500}

O ensaio *Slump Flow* é um método utilizado para avaliar a capacidade de deformação e a fluidez do betão submetido apenas ao seu peso próprio e sem qualquer restrição.

Este ensaio por si só não é suficiente para se afirmar que um betão é ou não auto-compactável, nem permite avaliar a capacidade do betão passar através das armaduras. Betões com o mesmo *Slump Flow* poderão ter comportamentos distintos na passagem das aberturas definidas pelas armaduras, dependendo esse comportamento da composição do betão [Noor et al., 1998].

Este ensaio foi realizado da seguinte forma:

Encheu-se o cone de Abrams, sem apiloar o betão; retirou-se o cone e cronometrou-se o tempo até o betão atingir um diâmetro de 500 mm ($T_{50\text{ cm}}$) e o tempo até o betão parar (T_{total}). Mediram-se os diâmetros finais D_1 e D_2 , em duas direcções ortogonais, e determinaram-se a média (D_{final}), que se designará por *Slump Flow*. Os resultados obtidos para as composições realizadas em Laboratório e na empresa PAVICENTRO estão apresentados na Figura 4.3.

Composição	L Box	SLUMP FLOW
	H_2 / H_1 %	D_{Final} mm
LAB 1	–	–
LAB 1 (corrigida)	64	520
LAB 2	72	590
PAV 1	–	–
PAV 2	82	680

Quadro 4.9 – Resultados do Teste Slump Flow e Teste L-box

4.4.3. Ensaio *L Box*

O ensaio *L Box* é o ensaio indicado para verificar se o betão é ou não auto-compactável para a estrutura, pois é possível avaliar a capacidade do betão fluir entre o intervalo das armaduras e aferir a sua fluidez, bloqueio e segregação. O grau

4.Método de composição

de compactabilidade é indicado pela altura que o betão atinge depois de fluir através do obstáculo.

Os resultados obtidos para as composições realizadas em Laboratório e na empresa PAVICENTRO estão apresentados na Figura 4.7.

O teste L-box é utilizado para aferir a capacidade de ultrapassar obstáculos do BAC quando flui através de pequenas aberturas incluindo os espaços entre armaduras e outras obstruções, sem segregar ou bloquear. As composições desenvolvidas no Laboratório e na Empresa PAVICENTRO têm um diâmetro máximo do agregado de 16 mm e 12 mm, respectivamente.,

4.5. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

– RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram desenvolvidos sobre provetes cúbicos de 10 cm de aresta.

Os provetes foram realizados da seguinte forma:

1. Após a amassadura o betão foi colocado, sem qualquer tipo de vibração, em moldes de 10 cm de aresta em que uma parte permaneceu durante 24 horas ao ar livre, à temperatura ambiente, e outra parte também permaneceu durante 24 horas ao ar livre, à temperatura ambiente, mas com os moldes protegidos com película plástica transparente.

2. De seguida os provetes foram desmoldados e colocados dentro de água, numa câmara de cura, à temperatura aproximada de 21° C, até à data do ensaio de resistência à compressão.
- 3.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma NP EN 12390 – 3 (2003).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados ao betão com idade de 3, 14, 28 dias, e ensaiados dois provetes para cada idade, correspondendo o valor da resistência à compressão dos provetes de betão realizado em Laboratório e na Empresa PAVICENTRO, respectivamente, ao valor da média desses valores indicada na Figura 4.9 e na Figura 4.10 .

PROVETES	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
	3 dias	14 dias	28 dias
COMPOSIÇÃO LAB 2	18,8	26,1	28,6
Peso (Kg)	2,200	2,260	2,220
COMPOSIÇÃO LAB 2 *	19,4	26,9	29,3
Peso (Kg)	2,220	2,240	2,260

* Provetes protegidos com película plástica aderente

Quadro 4.10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos provetes da composição LAB 2

Conforme referido, os provetes foram submetidos a diferentes condições de cura nas primeiras 24 horas, antes da descofragem, isto é, alguns dos provetes foram

4.Método de composição

protegidos com película de plástico. O objectivo foi aferir qual a influência da perda de água nas primeiras horas de cura na resistência à compressão.

Os resultados evidenciam que os provetes protegidos com a película nas primeiras 24 horas de cura apresentam um valor para a resistência à compressão ligeiramente superior.

PROVETES	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
	3 dias
COMPOSIÇÃO PAV MPa ₂	16,9
Massa (Kg)	2,187
COMPOSIÇÃO PAV _{2C} MPa	18,0
Massa (Kg)	2,211

Quadro 4.11 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos provetes da composição realizada na Empresa PAVICENTRO

A betonagem na Empresa PAVICENTRO ocorreu recentemente, motivo pelo qual ainda não pode ser avaliada a resistência dos provetes de betão aos 14 e aos 17 dias.

Os resultados também evidenciam que os provetes protegidos com a película nas primeiras 24 horas de cura apresentam um valor para a resistência à compressão ligeiramente superior.

5. FASE EXPERIMENTAL

Na sequência da análise das diversas amostras de betão estudadas, e com o objectivo de validar um processo sequencial para a formulação de uma composição de BAC, em volume, definiu-se uma composição, aferiu-se essa composição em laboratório e, em seguida, foi produzida uma composição numa unidade industrial de pré-fabricação, a empresa PAVICENTRO.

É muito importante controlar a qualidade do betão no local da aplicação, as propriedades de fluência do betão antes e depois da bombagem podem diferir. O controle visual do BAC durante a betonagem é um método importante para registar qualquer segregação, e proceder a alguns ajustamentos e/ou corrigir a técnica de betonagem.

5.1. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS EM LABORATÓRIO

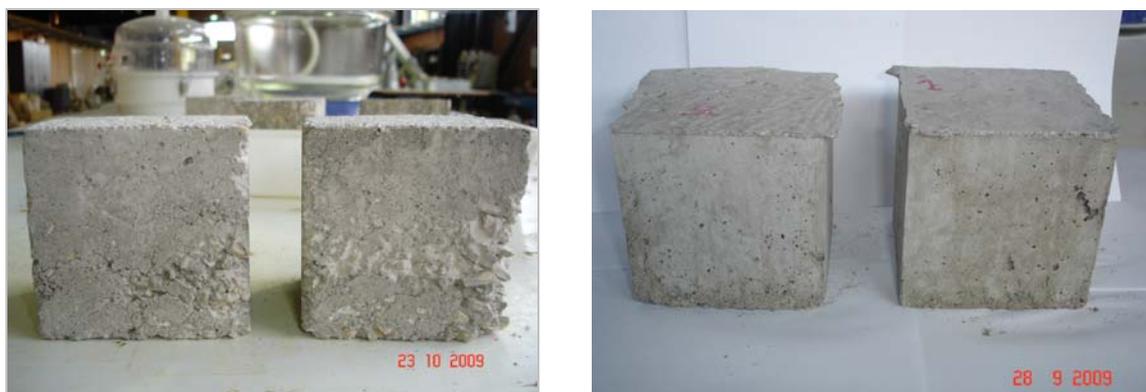


Figura 5.1 – Provetes da composição LAB 1C e da composição LAB 2

5.Fase experimental

A primeira composição definida para execução no Laboratório foi designada por LAB1, e as proporções em volume dos materiais constituintes estão indicadas na Quadro 5.1.

Para executar o betão auto-compactável utilizou-se uma betoneira de eixo horizontal, com a capacidade de 60 litros.

Quantificou-se, portanto, o volume de betão a produzir e, seguindo as proporções em volume recomendadas anteriormente, foram dimensionados os volumes dos diversos materiais constituintes e experimentada a composição.

O procedimento para a execução do BAC em Laboratório teve a seguinte sequência:

- Mediram-se os volumes de todos os materiais constituintes do betão;
- Mediu-se o volume da água na qual foi diluído o superplastificante;
- As superfícies da betoneira e dos equipamentos a utilizar foram humedecidas
- Colocaram-se os materiais na betoneira, e iniciou-se o fabrico do betão , pela execução do traço seco e foi-se acrescentando quase a totalidade da água, verificando-se haver água em excesso.

De imediato, procedeu-se à correcção da composição mantendo a proporção inicialmente definida para os diversos constituintes.

Esta experiência demonstrou a importância de proceder à junção da água de forma gradual, e o seu volume fosse ajustado à composição com a ajuda da inspecção visual.O betão obtido não resultou, verificando-se logo no ensaio do Slump-flow

indicação de eventual segregação, conforme registado na figura 6. tendo-se de facto verificado.

COMPOSIÇÃO	COMPOSIÇÃO EM VOLUME					W/Pó	Vpasta/ Vagregados	Vagreg finos/ Vpasta
	V agreg.f m ³	Vagreg. g m ³	V agreg. m ³	V pó m ³	V pasta m ³			
LAB 1	0,31	0,31	0,63	0,21	0,38	0,80	0,60	0,83
LAB 1 _(corrigida)	0,32	0,32	0,64	0,21	0,36	0,73	0,56	0,89
LAB 2	0,38	0,30	0,68	0,17	0,32	0,85	0,46	1,22

Quadro 5.1 – Proporção em volume dos constituintes do betão auto-compactável das composições desenvolvidas no Laboratório

5.1. 1. MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais utilizados para a execução dos provetes de betão, na parte experimental, correspondem a materiais utilizados de forma corrente na produção de betões no mercado nacional, disponibilizados pela empresa PAVICENTRO, com excepção do metacaulino, proveniente da Cerâmica Condestável, e do filler utilizado na indústria.

5.1.1.1. CIMENTO E ADIÇÕES



Figura 5.2- Cimento Portland Tipo I 42,5 R e Metacaulino (Cerâmica Condestável)

O cimento utilizado foi o cimento portland tipo I classe 42,5 R, produzido no Centro de Produção de Souselas, e o metacaulino fornecido pela Cerâmica Condestável.

5.1.1.2. AGREGADOS GROSSOS E AGREGADOS FINOS

Os agregados utilizados foram uma areia de uma exploração de areias na zona de Vale de Ílhavo, e uma brita 1 e uma brita 2 de origem calcária da zona de Pombal.

- AGREGADOS GROSSOS



Figura 5.3 - Britas de origem calcária 8/16 e 4/8

- AGREGADOS FINOS



Figura 5.4 - Areia de Salgueiro (Vale de Ílhavo)

5.1.1.3.SUPERPLASTIFICANTE

O superplastificante utilizado foi o Sika ViscoCrete 3002 HE, caracterizado por ser um superplastificante utilizado em betão ou argamassa quando sejam requeridos, simultaneamente, um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas iniciais, uma muito forte redução de água e uma consistência muito favorável a uma boa colocação. ou forte redutor de água para betão.

5.1.1.4.Água

A água utilizada foi da rede de distribuição pública, neste caso de Aveiro.

5.1. 2. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS

As amassaduras foram realizadas numa misturadora de eixo vertical, e em cada uma foi realizado um volume aproximadamente de 0,050 m³ de betão. Os materiais sólidos foram colocados no tambor da misturadora, por camadas alternadas, de acordo com

5.Fase experimental

a sequência brita, areia, cimentos, metacaulino, tendo-se adicionado aproximadamente 80% da água da amassadura com o superplastificante diluído.

Colocou-se a misturadora em funcionamento durante 1,5 minutos, em seguida adicionou-se a restante água, continuando a misturar por mais 3,5 minutos.

As quantidades dos materiais usados em cada amassadura, em volume, estão indicadas na Figura 5.5.

COMPOSIÇÃO	Cimento Its.	Filler Its.	W Its.	Agreg. Finos Its.	Agreg. Grossos (Its)		SP/ VMA Its.	V _{Total} Its.
					4/8	8/16		
LAB 1	7,00	3,00	8,00	15,00	5,00	10,00	0,036	48,00
LAB 1 _(corrigida)	7,75	3,25	8,00	17,00	5,60	11,40	0,036	53,00
LAB 2	5,00	3,00	6,80	18,00	5,00	9,00	0,1385	46,94

Quadro 5.2 - Composições do betão auto-compactável

O processo desenvolvido em Laboratório para a sua execução teve a seguinte sequência:

- Preparação da betoneira e do recipiente no qual se vai colocar o BAC, com humedecimento das superfícies;
- Preparação dos moldes e dos equipamentos para ensaio do BAC enquanto fresco – Slump flow e L-box;
- Medição em volume de todos os materiais conforme a composição definida;
- Mediu-se o volume da água na qual foi diluído o superplastificante;

- Colocaram-se os materiais na betoneira, e iniciou-se o fabrico do betão , pela execução do traço seco. Foi-se acrescentando quase a totalidade da água, verificando-se haver água em excesso.

Iniciou-se a execução do betão colocando os materiais em seco (traço em seco) e foi-se acrescentando a água com o superplastificante diluído.

Verificou-se haver excesso de água e, de imediato, procedeu-se à correcção da composição LAB 1 acrescentando todos materiais e mantendo as suas proporções em volume, resultando a composição LAB 1C.

De imediato, procedeu-se à correcção da composição mantendo a proporção inicialmente definida para os diversos constituintes.

Esta experiência demonstrou a importância de adicionar a água de forma gradual, e ajustar o seu volume à composição sendo muito importante a inspecção visual.

O betão obtido não resultou, verificando-se logo no ensaio do Slump Flow indicação de eventual segregação, conforme registado na figura 6. tendo-se de facto verificado.

Embora apresentasse um aspecto visual aceitável, o ensaio do Slump Flow foi indicativo da ocorrência de segregação (Figura 5.6).

5.1.3. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL EXECUTADO EM LABORATÓRIO COMPOSIÇÃO LAB 1C

CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Realizaram-se os ensaios de *Slump Flow* e *L Box* sobre o betão fresco, para cada amassadura, para verificação da auto-compactação. Prepararam-se também 12

5.Fase experimental

provetes cúbicos de 10 cm de aresta para posterior realização de ensaios de resistência à compressão.

5.1.3.1. INSPECÇÃO VISUAL



Figura 5.5 - Amostra LAB 1C . Inspeção visual

5.1.3.2. SLUMP FLOW



Figura 5.6 – Ensaio do Slump-flow (520 mm)

Quando se realizou o teste do Slump Flow, observou-se uma aureola circular de pasta no BAC, o que indica a probabilidade de ocorrência de segregação, o que de facto se veio a verificar.

5.1.3.3. L-BOX



Figura 5.7 - Amostra LAB 1C Ensaio L-box (64 mm)

5.1.3.4. HOMOGENEIDADE E ACABAMENTO DAS SUPERFÍCIES



Figura 5.8 - Amostra LAB 1C (segregação visível)

5.Fase experimental

5.1.4. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL EXECUTADO EM LABORATÓRIO COMPOSIÇÃO LAB 2

5.1.4.1. INSPECÇÃO VISUAL E SLUMP FLOW



Figuras 5.9 - Ensaio do Slump-flow (590 mm). Amostra LAB 2

5.1.4.2. L-BOX



Figura 5.10 - Ensaio da L-box (72 mm) Amostra LAB 2

A capacidade do BAC fluir permite que este envolva completamente armadura densamente armada sem ser utilizada qualquer vibração. Por outro lado o BAC é capaz de fluir por espaços com configuração geométrica complicada em que não há a possibilidade de aceder com o vibrador. A ausência de vibração garante também que não há qualquer dano na estrutura de aço da peça a betonar.

5.1.3.4. HOMOGENEIDADE ACABAMENTO DAS SUPERFÍCIES



Figura 5.11 – Provetes da composição LAB 2 protegidos com película

5.1. 4.4. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados sobre provetes cúbicos de 10 cm de aresta.

Provetes, cura e ensaio de resistência à compressão

Os provetes foram realizados da seguinte forma:

1. Após a amassadura o betão foi colocado, sem qualquer tipo de vibração, em moldes de 10 cm de aresta que permaneceram durante 24 horas ao ar livre, à temperatura ambiente.
2. De seguida os provetes foram desmoldados e colocados dentro de água, numa câmara de cura, à temperatura aproximada de 21° C, até à data do ensaio de resistência à compressão.

Os procedimentos utilizados na realização dos ensaios de resistência à compressão foram os especificados na NP EN 12390-3.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no betão com idade de 3, 14, 28, e ensaiados dois provetes para cada idade.

Os provetes foram submetidos a diferentes condições de cura nas primeiras 24 horas, antes da descofragem, isto é, alguns dos provetes foram protegidos com película de plástico. O objectivo foi aferir qual a importância da existência de perda de água nas primeiras horas de cura na resistência à compressão. Após descofragem foram colocados na câmara com temperatura e humidade controlada.

Os resultados mostram que os provetes submetidos nas primeiras 24 horas de cura apresentam um valor para a resistência à compressão ligeiramente superior.



Figura 5.12 – Provete LAB 2 após o ensaio de resistência à compressão (3 dias)



Figura 5.13 – Provete LAB 2 após o ensaio de resistência à compressão (14 dias)



Figura 5.14 – Provete LAB 2 após o ensaio de resistência à compressão (28 dias)

5.2. COMPOSIÇÕES DESENVOLVIDAS NA INDÚSTRIA

5.2.1. OBJECTIVO

Conforme referido anteriormente, o objectivo deste trabalho é o desenvolvimento da produção do betão auto-compactável na indústria da construção.

Neste sentido foi contactada uma empresa da área da pré-fabricação, a empresa PAVICENTRO, que desde o primeiro contacto demonstrou grande interesse em executar na fábrica a composição de betão desenvolvida no Laboratório.

A PAVICENTRO – Pré-fabricação, SA, é uma empresa fundada em 1971 sediada em Eixo, Aveiro, que desenvolve actividade na área da pré-fabricação, sendo actualmente a empresa mãe do grupo PAVICENTRO.



Figura 5.15 – Cofragem da peça a betonar



Figura 5.16 – Preparação da cofragem da peça a betonar

5.2. 2. MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais utilizados, cimento agregados e superplastificante, foram exactamente os mesmos, com excepção do filler. Em Laboratório foi utilizado o metacaulino e na indústria foi.

5.2. 3. CARACTERIZAÇÃO DO BAC NO ESTADO FRESCO

É muito importante controlar a qualidade do betão no local da aplicação, as propriedades de fluência do betão antes e depois da bombagem podem diferir. O controle das propriedades do betão “in situ”

5.2.3.1. OBSERVAÇÃO VISUAL



Figura 5.17 – Início da descarga do betão auto-compactável PAV 1C



Figura 5.18 – Inspeção visual da composição PAV 1C

É muito importante controlar a qualidade do betão no local da aplicação, as propriedades de fluência do betão antes e depois da bombagem podem diferir.

5.2.3.2. SLUMP FLOW

Figura 5.19 - Ensaio do Slump-flow (680 mm e T_{500} 2s)

5.Fase experimental

A observação visual de dois betões com o mesmo Slump Flow com elevada e baixa viscosidade indica que flui facilmente ou lentamente, respectivamente. Podem fluir à mesma distância mas a velocidade de fluência é diferente.



Figura 5.20 - Ensaio do Slump-flow (680 mm)

5.2.3.3. L- BOX



Figura 5.21 - Ensaio L-box 82 mm

Observou-se uma ligeira acumulação de agregados atrás das barras



Figura 5.22 - Provetes da composição PAV 2

5.2. 4. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

5.2. 4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os provetes da composição PAV 2 foram realizados a 17 Outubro.09 e, por este motivo, não foi ainda possível obter a resistência à compressão aos 14 e 28 dias.



Figura 5.23 - Ensaio de resistência à compressão PAV 2 (3 dias)

5.2. 4.2. INTERFACE PASTA/MATERIAL GRANULAR



Figura 5.24 - Ensaio de resistência à compressão PAV 2 (3 dias)

5.2. 4.3. HOMOGENEIDADE E ACABAMENTO DAS SUPERFÍCIES



Figura 5.25 - Provete de betão auto-compactável PAV 2



Figura 5.26 - Peça de betão auto-compactável PAV 2

6.CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A análise comparativa das características e das proporções dos constituintes de diversas composições, contribuíram para a definição de uma metodologia de composição do BAC, tendo como objectivo a convergência para um processo racional de desenvolvimento do BAC.

Com este estudo obtiveram-se valores para os parâmetros essenciais da composição que poderão ser utilizados para a definição da composição do betão auto-compactável.

O estudo vem também confirmar que existe uma enorme diversidade de composições do betão auto-compactável, e que não há uma única composição para uma dada aplicação ou exigência, motivo para investir na optimização das composições para uma maior eficiência e economia.

No entanto, a proximidade dos valores dos parâmetros fundamentais da composição, tais como volume de agregados, volume do pó e volume da pasta, que variam num intervalo relativamente pequeno, tal como

Volume dos agregados 0,55 a 0,63

Volume do pó 0,18 a 0,23

Volume da pasta 0,36 a 0,43

E a relação

Agregados finos/Agregados grossos, em massa de 0,85 a 1,18.

permite adoptar estes valores na concepção da composição de BAC baseada na proporção em volume dos materiais constituintes.

As composições experimentais realizadas em laboratório e na indústria, definidas a partir destes valores, vieram comprovar ser possível obter BAC com os requisitos exigíveis, verificados através dos ensaios Slump flow e L- box de aplicação muito acessível “in situ”.

E o facto de se adoptar um processo simplificado para a composição do BAC partindo da proporção em volume dos materiais, semelhante ao processo já usado para o betão convencional, poderá facilitar e potenciar uma maior utilização desta tecnologia.

Verificou-se também que o BAC assim produzido tem características que superam o betão tradicional, tais como, a qualidade do acabamento das superfícies, o valor obtido para a resistência à compressão considerando a quantidade de cimento usado, a economia de mão de obra e de energia na sua produção.

A partir dos resultados experimentais obtidos, em laboratório e na indústria, deverão continuar a desenvolver-se composições a partir das proporções dos materiais em volume, diversificando os materiais a utilizar.

É importante analisar e aprofundar em desenvolvimentos futuros a relação entre as suas propriedades no estado endurecido, nomeadamente a resistência à compressão, e qual a influência das características dos materiais constituintes. Há estudos que revelam que a razão água ligante é um dos factores que mais influenciam a resistência à compressão, e que o volume da pasta tem um efeito marginal na resistência à compressão, outros defendem que a resistência à

compressão é controlada principalmente pela composição do ligante e não pela razão água/ligante.

Promover o desenvolvimento de composições baseada nesta metodologia e, para além do envolvimento de Laboratório e, neste caso da Indústria da Pré-fabricação, procurar envolver outros actores da indústria da construção, nomeadamente Projectistas e Empresas de Construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alexandre Pineand, Richard Cabrillac, Sebastian Remond, Pierre Pimienta, Phillippe Rivillon (2005) Mechanical Properties of Self-compacting concrete – influence of composition parameters, in fourth International RILEM symposium on self compacting concrete, Chicago, Illinois
- [2] A. Bettencourt Ribeiro e Arlindo Gonçalves. A Low Cost Self compacting Concrete (2001) - Proceedings of The Second International Symposium on Self-compacting Concrete. Kazuma Ozawa & Masahiro Ouchi, Tokio, Japan
- [3] A review of hardened mechanical properties of self-compacting concrete P.L.DOMONE Department of Civil and Environmental Engineering University College London, London
- [4] Casting of self Compacting Concrete (2006) RILEM Paper – Final report of RILEM Technical Committee 188 – CSC
- [5] Cleaner Technology Solutions in The Life Cycle of Concrete Products (TESCOP)
- [6] Effect of water cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete Burak Felekoglu, Selçuk Turkel, Bulent Baradan Department of Civil Engineering, Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey
- [7] G. de Schutter. Guidelines for testing fresh self compacting concrete. (2005) European Research Project - Testing SCC (2001-2004)
- [8] Jurg Schlumpf. Self-compacting concrete structures in Switzerland (2004) Marketing & Technical Department, Tunneling & Mining Division, SIKA Schweiz, AC, Switzerland

- [9] Hajime Okamura and Masahiro Ouchi. Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology (2003)
- [10] Ozawa, K, Markaya, K, Knishima, M., and Okamura, H. Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. EASEC-2 (1989).
- [11] L.D'Aoia Schwartzentruber, R. Le Roy, J. Cordin. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC) (2004) Laboratoires Central des Ponts et Chaussées
- [12] Mahesh and Manu Santhanam. Simple test methods to characterise the rheology of SCC. ICJ, June 2004
- [13] Manuel Vieira and António Bettencourt. Deformability of hardened SCC (2003) Proceedings of The 3rd International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, RILEM Pro 33, RILEM Publications, Iceland
- [14] Nan Su, Kung Shung Hsu, His-Wen Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete. Cement and Concrete Research
- [15] Nunes, S, Coutinho, J.S., Figueiras, J – Tecnologia do betão auto-compactável. (2003) . Simpósio EPSUP sobre Estruturas de Concreto
- [16] O.Wallevik and Nielsson. Proceedings Pro 033 – Self Compacting Concrete (2003) Third International Symposium on SCC RILEM Technical Committee 188 - CSC
- [17] P. L. Domone. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies (2005) Department of Civil and Environmental Engineering, University College London, London, UK

- [18] P. L. Domone. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete (2006) Department of Civil Engineering , University College London, London, UK
- [19] Praveen Kumar, Mohammad Ajazul Haq, S.K. Kaushik. Early age strength of SCC with large volumes of fly ash.ICJ, June 2004
- [20] S. Girish, Jagadish Vengala and R.V.Ranganath. Volume fractions in self-compacting concrete.A review. Department of Civil Engineering, Bangalore,India
- [21] Sandra Nunes, Helena Figueiras, Joana Sousa Coutinho, Joaquim Figueiras. Método para a definição de betão auto-compactável (2005) LABEST/Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- [22] Sandrine Bethmont . Mécanismes de ségrégation dans les Bétons Autoplaçants. Etude expérimentale des interactions granulaires. (2005) Laboratoires Central des Ponts et Chaussées
- [23] Sedran, T and de Larrard, F. Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. Proceedings of the 1st RILEM Symposium on self-compacting concrete
- [24] Skarendal A. The present-the future. (2003) Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete . ReyKjaviK, Iceland
- [25] Sustainable Development : Understanding the Social and Economic Value of Construction
- [26] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. (2005) Specification, Production and Use
- [27] T.L.H. Nguyen, N. Roussel, P.Cousot. Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid . Laboratoires Central des

Ponts et Chaussées, Paris, France .Laboratoire des Materiaux et Structures du Génie Civil, Champs sur Marne, France

[28] Yogini Deshpande, Jan Olek. Development of rapid setting self-consolidating concrete using small size aggregate. 2nd International RYLEM Symposium on advances in Concrete through Science and Engineering (2006)

[29] Paulo C. C. Gomes, Ravindra Gettu, Luis Agullo and Camilo Bernad (2001) Experimental optimization of high-strength self compacting concrete, in 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan