



COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

Influência dos materiais constituintes no estado fresco

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Perfil de Construção, pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Eduardo José Airoso Barreia

Orientador Científico: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques (DEC-FCT/UNL)

Lisboa, 2010

À minha família, e amigos.

Índice Geral

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DO TEXTO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA.....	XV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL.....	5
CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL NO ESTADO FRESCO.....	11
CAPÍTULO 4 – ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO.....	25
CAPÍTULO 5 – COMPOSIÇÃO DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL.....	49
CAPÍTULO 6 – APLICAÇÕES DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL	59
CAPÍTULO 7 – INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES.....	65
CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado àqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada. A todos eles deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Ao Professor Doutor Fernando M. A. Henriques, orientador desta dissertação, quero manifestar um agradecimento muito especial pela proposição do tema, orientação e ensinamentos prestados ao longo do mestrado.

À Eng.^a Ana Brás, o meu agradecimento pela extrema utilidade das suas recomendações e pela cordialidade e máxima disponibilidade com que sempre me recebeu.

Aos meus amigos, agradeço pelo constante incentivo e pela total compreensão nos meus momentos de ausência.

Aos meus colegas de curso, quero dedicar um agradecimento pela boa disposição e pelos bons momentos passados.

Por último, mas não de uma maneira menos importante, quero dedicar um agradecimento muito especial aos meus pais, Narciso e Filomena e ao meu irmão Luís, por terem estado sempre presentes e por todo o apoio demonstrado ao longo do meu percurso escolar. À minha namorada Sílvia, agradeço pelo apoio, incentivo e paciência que sempre demonstrou no decorrer da execução deste trabalho.

RESUMO

O betão autocompactável é um betão da classe dos betões especiais, característico pela sua elevada fluidez, e pela dispensa de mecanismos de vibração aquando da sua aplicação.

Trata-se de um material que apresenta inúmeras vantagens de grande interesse para a indústria da construção, nomeadamente a possibilidade de redução de custos, a maior facilidade na betonagem adequada de elementos estruturais complexos e com elevada taxa de armadura, a melhoria do ambiente de obra, entre outros.

No entanto, o completo entendimento dos fenómenos que regem o seu comportamento reológico ainda não se encontra totalmente cimentado. Com efeito, o comportamento do betão autocompactável no estado fresco é influenciado por uma série de factores, entre os quais, o conteúdo em água, o tamanho, volume e disposição dos agregados, o tipo de materiais finos utilizados na composição e, por último, o conteúdo em adjuvantes.

O presente trabalho resulta do interesse crescente no estudo dos fenómenos que influenciam o comportamento do betão autocompactável no estado fresco. Pretende-se, com ele, contribuir para o conhecimento mais aprofundado dos aspectos relacionados com a reologia do betão, principalmente para o entendimento da influência dos materiais constituintes no seu comportamento no estado fresco, tendo em vista o desenvolvimento de novas metodologias de composição que considerem as propriedades dos materiais constituintes.

Para esse efeito foi, primeiramente, efectuada uma pesquisa sobre os conceitos relevantes ao betão autocompactável no estado fresco, nomeadamente os conceitos de reologia, reometria e ensaios utilizados na aferição das características de autocompactabilidade deste tipo de betão. Finalmente, foram apresentadas metodologias, propostas por diversos autores, que relacionam os parâmetros reológicos, com os parâmetros medidos nos ensaios de laboratório e de campo.

De seguida, efectuiu-se um aprofundado levantamento bibliográfico sobre os aspectos relacionados com a composição dos betões. Dele, resultou a enumeração dos diversos métodos de obtenção de composições utilizados na produção do betão autocompactável, seguidos da apresentação da temática relacionada com a influência dos materiais constituintes no comportamento do betão autocompactável no estado fresco.

Apresentam-se ainda as conclusões finais resultantes dessa pesquisa e propostas para desenvolvimentos futuros do trabalho de investigação realizado.

Palavras-chave:

Betão Autocompactável; Bingham; Comportamento; Composição; Estado fresco; Fluidez; Influência dos materiais; Reologia; Tensão de cedência; Viscosidade.

ABSTRACT

Self-Compacting Concrete, which belongs to the special concretes class, is a highly fluid concrete that eliminates the need for vibrating equipments.

This material has many advantages of great interest for the construction industry, namely, reduction in construction costs, greater ease in the proper casting of geometrically complex and highly reinforced structural elements and work environment improvement.

However, the complete understanding of the phenomena that exercises a determining influence on rheological behavior of self-compacting concrete is not yet fully settled.

In fact, the behavior of self-compacting concrete in its fresh state is influenced by several factors, among which, water content, aggregates (size, volume and distribution), powder content and chemical admixtures.

The present work is a product of the growing interest in the study of factors that influence the behavior of self-compacting concrete in its fresh state. The purpose of this work is to contribute for the better understanding of the rheology concepts related to self-compacting concrete, especially, the understanding of the influence of constituent materials on its fresh state behavior, aimed at the development of new mix-design methods that consider the properties of the individual constituent materials.

For this purpose, a research was first carried out, in order to gather information on the relevant concepts relating to self-compacting concrete in its fresh state, especially on the concepts of rheology, rheometry and the multitude of tests used to measure the concrete's self-compacting parameters. Finally, some of the methods used to correlate yield stress and plastic viscosity with rheology were presented.

An extensive literature review on self-compacting concrete mix-design then took place. This resulted in the listing of several mix proportions methods used in the production of self-compacting concrete, followed by the presentation of a wide range of aspects related to the influence of constituent materials on the behavior of its fresh state.

Final conclusions and future work suggestions were also presented.

Keywords:

Bingham; Self-Compacting Concrete; Behavior; Composition; Fresh state; Fluidity; Material influence; Rheology; Yield stress; Viscosity.

ÍNDICE DO TEXTO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DO TEXTO	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA	XV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Enquadramento	1
1.2 – Objectivos.....	2
1.3 – Organização por Capítulos.....	3
CAPÍTULO 2 – BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL	5
2.1 – Objectivo	5
2.2 – Definição de um Betão Autocompactável	5
2.2.1 – Origem do Betão Autocompactável	6
2.2.2 – Aplicações do Betão Autocompactável.....	6
2.3 – Vantagens do betão autocompactável.....	8
2.3.1 – Aumento da Produtividade.....	8
2.3.2 – Melhoria do Ambiente em Obra.....	9
2.3.3 – Melhoria da Homogeneidade	9
2.4 – Desvantagens do Betão Autocompactável	10
2.5 – Conclusões.....	10
CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL NO ESTADO FRESCO	11
3.1 – Objectivo	11

3.2 – Reologia	11
3.3 – Reometria	14
3.4 – Trabalhabilidade.....	17
3.4.1 – Capacidade de Enchimento	17
3.4.2 – Resistência à Segregação.....	18
3.4.3 – Capacidade de Passagem	21
3.4.4 – Resumo.....	21
3.5 – Exsudação e Retracção plástica	22
3.6 – Conclusão	23
CAPÍTULO 4 – ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO	25
4.1 – Objectivo.....	25
4.2 – Introdução	25
4.3 – Ensaio de Espalhamento	26
4.3.1 – Equipamento de ensaio.....	28
4.3.2 – Metodologia de ensaio.....	29
4.3.3 – Precisão do ensaio	29
4.3.4 – Vantagens e desvantagens	30
4.4 – Ensaio do Funil em V.....	30
4.4.1 – Equipamento de ensaio.....	31
4.4.2 – Metodologia de ensaio.....	32
4.4.3 – Precisão do ensaio	33
4.4.4 – Vantagens e desvantagens	33
4.5 – Ensaio da Caixa em L.....	33
4.5.1 – Equipamento de ensaio.....	34
4.5.2 – Metodologia de ensaio.....	35
4.5.3 – Precisão do ensaio	35
4.5.4 – Vantagens e desvantagens	36
4.6 – Ensaio de Segregação.....	36
4.6.1 – Equipamento de ensaio.....	38
4.6.2 – Metodologia de ensaio.....	38
4.6.3 – Precisão do ensaio	39
4.6.4 – Vantagens e desvantagens	39
4.7 – Ensaio do Anel J.....	39
4.7.1 – Equipamento de ensaio.....	41
4.7.2 – Metodologia de ensaio.....	41
4.7.3 – Precisão do ensaio	42
4.7.4 – Vantagens e desvantagens	43
4.8 – Relação entre parâmetros de <i>Bingham</i> e os ensaios.....	43
4.8.1 – Ensaio de espalhamento:	44
4.8.2 – Ensaio da caixa em L:	46

4.8.3 – Outras abordagens	47
4.9 – Conclusões	48
CAPÍTULO 5 – COMPOSIÇÃO DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL.....	49
5.1 – Objectivo	49
5.2 – Introdução.....	49
5.3 – Metodologia de Doseamento de Composições	52
5.3.1 – Método de Okamura e Ozawa	52
5.3.2 – Método de Edamatsu <i>et al.</i>	52
5.3.3 – Método de Ouchi <i>et al.</i>	53
5.3.4 – Método de Petersson <i>et al.</i>	53
5.3.5 – Método de Bui e Montgomery	54
5.3.6 – Método de Gomes <i>et al.</i>	55
5.3.7 – Método de Sedran e De Larrard	55
5.3.8 – Método de Saak <i>et al.</i>	56
5.4 – Recomendações de carácter geral	56
5.4.1 – Recomendações propostas pela RILEM.....	56
5.4.2 – Recomendações do “European Project Group of SCC”	57
5.5 – Conclusões	57
CAPÍTULO 6 – APLICAÇÕES DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL	59
6.1 – Objectivo	59
6.2 – Introdução.....	59
6.3 – Evolução das Directrizes Europeias.....	59
6.4 – Classificação do BAC	61
6.5 – Aplicação do BAC.....	63
6.6 – Conclusões.....	63
CAPÍTULO 7 – INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES	65
7.1 – Objectivo	65
7.2 – Materiais Finos	65
7.2.1 – Cimento	67
7.2.2 – Adições	68
7.3 – Agregados.....	77
7.3.1 – Agregado fino:	79
7.3.2 – Agregado grosso:	80

7.4 – Adjuvantes.....	81
7.4.1 – Superplastificantes.....	81
7.4.2 – Agentes modificadores de viscosidade.....	85
7.5 – Água.....	89
7.6 – Ar.....	89
7.7 – Outros materiais.....	90
7.8 – Conclusões.....	90
CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	93
8.1 – Objectivo.....	93
8.2 – Conclusões finais.....	93
8.2.1 – Medição e previsão dos parâmetros reológicos.....	93
8.2.2 – Composições e influência dos materiais constituintes na reologia.....	94
8.3 – Desenvolvimentos futuros.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Utilização do BAC na construção da ponte de Akashi-Kaikyo</i>	6
<i>Figura 2 – Utilização do BAC na construção dos tanques de gás da Osaka Gas Co.</i>	7
<i>Figura 3 – Processo de betonagem de aduelas pré-fabricadas</i>	7
<i>Figura 4 – Evolução da quantidade de BAC empregue pela indústria do betão</i>	8
<i>Figura 5 – Utilização do BAC num sistema otimizado de construção proposto por Okamura e Ouchi</i>	9
<i>Figura 6 – Comportamento reológico de um fluido Newtoniano e modelo de Bingham</i>	12
<i>Figura 7 – Domínio reológico de um BAC</i>	13
<i>Figura 8 – Reómetro IBB</i>	15
<i>Figura 9 – Reómetro BML</i>	15
<i>Figura 10 – Reómetro BTRHEOM</i>	16
<i>Figura 11 – Mecanismo de Bloqueio</i>	21
<i>Figura 12 – Espalhamento de 65 cm</i>	26
<i>Figura 13 – Mistura de BAC estável</i>	27
<i>Figura 14 – Mistura de BAC instável</i>	27
<i>Figura 15 – Equipamento do ensaio de espalhamento e suas dimensões</i>	28
<i>Figura 16 – Execução do ensaio de funil em V</i>	31
<i>Figura 17 – Equipamento de ensaio do funil em V e suas dimensões</i>	32
<i>Figura 18 – Corte em perfil (A) e em planta (B) do equipamento de ensaio da caixa em L</i>	34
<i>Figura 19 – Execução do ensaio de segregação.</i>	37
<i>Figura 20 – Aspecto final do ensaio do anel J</i>	40
<i>Figura 21 – Equipamento do ensaio do anel J e suas dimensões</i>	41
<i>Figura 22 – Metodologia geral para a obtenção de um BAC</i>	50
<i>Figura 23 – Comparação da composição de um BC versus BAC</i>	50
<i>Figura 24 – Aplicação do BAC em relação à classificação das misturas</i>	63
<i>Figura 25 – Relação esquemática entre a área de espalhamento relativo e a razão A/F</i>	66
<i>Figura 26 – Vários tipos de adições utilizáveis na produção de BAC</i>	69
<i>Figura 27 – a) Filer Calcário. b) Microscopia de partículas de filer calcário.</i>	70
<i>Figura 28 – Microscopia de cinzas volantes resultantes da queima de combustível com baixo teor em carbono: a) ampliação de 100×; b) ampliação de 2000×</i>	72
<i>Figura 29 – Microscopia de cinzas volantes resultantes da queima de combustível com alto teor em carbono: a) ampliação de 100×; b) ampliação de 2000×</i>	73
<i>Figura 30 – Microscopia de partículas vitrificadas presentes na escória de alto-forno</i>	74
<i>Figura 31 – Aspecto final de uma escória de alto-forno moída</i>	74
<i>Figura 32 – Aspecto final de uma sílica de fumo</i>	76
<i>Figura 33 – Microscopia de partículas constituintes da sílica de fumo.</i>	76
<i>Figura 34 – Curva granulométrica dos agregados para a obtenção de BAC, pelo “Testing-SCC Project”</i>	78
<i>Figura 35 – Evolução da tensão resistente de corte, versus tensão normal: a) diferentes conteúdos em areia na argamassa; b) diferentes formas das partículas</i>	79
<i>Figura 36 – Microscopia de partículas de cimento numa solução de A/C sem adição de SP a) e com adição de SP b)</i>	82
<i>Figura 37 – Ilustração do efeito de desfloculação das partículas de cimento imposto pela utilização de SP.</i>	83
<i>Figura 38 – Fenómenos de repulsão electrostática a) e repulsão estérica b)</i>	84
<i>Figura 39 – Mecanismos de funcionamento dos AMV</i>	87

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidade</i>	13
<i>Tabela 2 – Influência de diferentes parâmetros na resistência à segregação estática e dinâmica do BAC</i>	20
<i>Tabela 3 – Exigências de trabalhabilidade</i>	22
<i>Tabela 4 – Classificações de misturas de BAC segundo o Visual Stability Index</i>	27
<i>Tabela 5 – Precisão das medições de espalhamento S e T_{50}</i>	29
<i>Tabela 6 – Precisão do tempo de passagem t_v medido no ensaio do funil V</i>	33
<i>Tabela 7 – Precisão dos coeficientes de passagem P_L e coeficiente de bloqueio B_L</i>	36
<i>Tabela 8 – Precisão do coeficiente de segregação medido no ensaio de segregação</i>	39
<i>Tabela 9 – Classificações de misturas de BAC, segundo o VBI</i>	40
<i>Tabela 10 – Precisão do espalhamento (S_j) e T_{50j} e desnível de bloqueio (B_j)</i>	42
<i>Tabela 11 – Recomendações do Comitê técnico 174-SCC da RILEM</i>	57
<i>Tabela 12 – Recomendações do EPG SCC</i>	57
<i>Tabela 13 – Classificação Europeia proposta pela EFNARC</i>	61
<i>Tabela 14 – Coeficientes de água retida (β_p) e coeficientes de deformação (E_p)</i>	67
<i>Tabela 15 – Exemplos de polímeros solúveis utilizados nos AMV</i>	86
<i>Tabela 16 – Variações na dosagem de SP devido à adição de “goma welan”</i>	88

ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

Δh_0	Altura entre o betão interior e o topo do anel J
Δh_1	Primeira medição da altura entre o betão exterior e o topo do anel J
Δh_2	Segunda medição da altura entre o betão exterior e o topo do anel J
μ'	Coefficiente de viscosidade em fluidos <i>Newtonianos</i>
A/C	Razão água/cimento
A/F	Razão água/finos
A/L	Razão água/ligante
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
AMV	Agente modificador de viscosidade
BAC	Betão autocompactável
BC	Betão convencional
B_j	Desnível de bloqueio
B_L	Coefficiente de bloqueio
CaO	Óxido de cálcio
d_i	Dimensão média da fracção i dos agregados
d_{max}	Máximo diâmetro de espalhamento observável no ensaio de espalhamento
d_{perp}	Diâmetro perpendicular a d_{max} no ensaio de espalhamento
E_c	Energia potencial média de restrição das partículas
E_p	Coefficiente de deformação
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
Fw	Força de corte média
g	Constante de aceleração da gravidade
H	Altura do cone de ensaio
h	Constante de Planck
H_1	Altura atingida pela mistura de betão no início da secção horizontal da caixa em L
H_2	Altura atingida pela mistura de betão no final da secção horizontal da caixa em L
h_{avg}	Altura média entre H_1 e H_2
K'_i	Índice de compactação parcial referente à fracção i
kB	Constante de Boltzmann
K'_c	Índice de compactação do cimento.
K'_f	Índice de compactação dos materiais finos
N	Número de partículas por unidade de secção de corte
N_c	Número de partículas de cimento por unidade de área
P_L	Coefficiente de passagem

r	Repetibilidade
R	Reprodutibilidade
R_a	Área de espalhamento relativo
R_m	Tempo de escoamento relativo
R_{mb}/R_m	Relação entre tempos de escoamento da argamassa no método de Edamatsu <i>et al.</i>
S	Diâmetro de espalhamento
SiO_2	Óxido de Silício
S_J	Espalhamento no anel J
S_p	Dosagens de extracto seco do superplastificante
S_p^*	Dosagem de saturação de extracto seco do superplastificante
SP/F	Razão superplastificante/finos
SR	Coeficiente de segregação
T	Temperatura absoluta
T_{20}	Tempo decorrido até a mistura atingir a marca dos 20cm no ensaio da caixa em L
T_{40}	Tempo decorrido até a mistura atingir a marca dos 40cm no ensaio da caixa em L
T_{50}	Tempo decorrido até a mistura atingir a marca dos 50cm no ensaio de espalhamento
T_{50J}	Tempo decorrido até a mistura atingir a marca dos 50cm no ensaio do anel em J
t_v	Tempo de passagem medido no ensaio do funil em V
t_{vm}	Velocidade média de passagem medido no ensaio do funil em V
V_a	Volume de agregado fino
V_{af}	Volume de argamassa
V_{af}/V_a	Volume de agregado fino por unidade de volume de argamassa
V_c	Volume de cimento por unidade de volume
V_{wc}	Volume da membrana de água de espessura envolvente das partículas de cimento
β_p	Coeficiente de água retida
γ	Gradiente de velocidade
Γ_m	Área de espalhamento relativa
η	Constantes de viscosidade
θ_m	Ângulo de atrito interno médio
Λ_{cm}	Distância média das partículas de cimento em movimento
ρ	Massa volúmica
σ_n	Tensão normal
τ	Tensão de corte
τ_0	Tensão de cedência
φ	Teor de sólidos
φ_0	Teor de sólidos limite para que se dê o escoamento
φ_m	Máximo teor de sólidos

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Enquadramento

A tecnologia dos betões autocompactáveis (BAC) tem vindo a ser cada vez mais utilizada nas mais variadas aplicações, em detrimento da tecnologia dos betões convencionais (BC).

As características únicas do BAC permitem a sua aplicação em elementos estruturais de configuração complexa ou com elevada taxa de armadura, dispensando mecanismos de vibração. A utilização deste tipo de betão permite ainda a obtenção de melhorias na produtividade (reduzindo custos e diminuindo o período de construção), melhorias no ambiente de obra (através da redução de ruído e do melhoramento da saúde dos trabalhadores) e melhorias na homogeneidade das peças betonadas (decorrente do adequado enchimento das cofragens). Finalmente, é também possível a utilização de materiais recicláveis ou de subprodutos industriais na sua composição, colocando-o o BAC no grupo dos betões eco-eficientes.

A indústria da pré-fabricação em sido o principal impulsionador da utilização deste tipo de betão, tirando grande partido das suas características de autocompactabilidade, capazes de garantir a homogeneidade necessária, reduzindo custos com a mão-de-obra e mecanismos de vibração. Pelo facto de a automatização de processos ser mais fácil para o caso destes betões, a adopção de sistemas de controlo de qualidade é também feita com mais simplicidade.

Por outro lado, é notório o contraste na utilização e produção do BAC em obra. No Japão (país de origem desta tecnologia de construção), a utilização *in situ* sofreu, inclusivamente, uma estagnação nos últimos anos. A principal razão apontada foi a ausência de consenso sobre quais deviam ser os ensaios mais apropriados na aferição dos parâmetros específicos do BAC, o maior custo com os materiais (devido à maior utilização de adjuvantes) e o maior conhecimento necessário no respeitante às matérias de metodologias de composição e entendimento dos fenómenos fundamentais que regem as interações entre os materiais constituintes.

Os métodos de ensaio passíveis de utilizar na aferição dos parâmetros e comportamentos reológicos do BAC no estado fresco vão desde os reómetros e viscosímetros, entre outros, aos ensaios de campo como o ensaio de espalhamento, ensaio do funil em V e ensaio da caixa em L, entre outros.

Outras metodologias de comportamento reológico têm vindo a ser desenvolvidas pelos mais diversos autores. Este tipo de metodologias pretende desenvolver expressões matemáticas capazes de aferir com aproximada precisão os parâmetros reológicos das misturas de BAC, tendo em conta determinadas características dos materiais constituintes.

Existem ainda diversas propostas de doseamento, feitas por vários autores. Este é um aspecto de grande importância no desenvolvimento deste tipo de betões, devido às suas características específicas e ao facto de poder incluir uma cada vez mais ampla gama de materiais nas suas composições.

A composição de um BAC é, como já se viu, um aspecto revestido da maior importância. As características dos materiais constituintes têm repercussões acentuadas no comportamento reológico das misturas. Como tal, para que esta recente tecnologia de construção tenha uma implementação mais definitiva, garantindo aos donos de obra a obtenção de todas as vantagens a ela inerentes, torna-se fulcral um aprofundado conhecimento da influência dos materiais constituintes no comportamento do BAC, capaz de abrir caminho a métodos precisos de composição e previsão do seu comportamento reológico.

1.2 – Objectivos

O comportamento reológico do BAC é afectado não só pelo tipo de composição adoptado, mas também pelas características dos materiais constituintes, metodologias de composição, entre outros.

Como tal, o estudo aprofundado destas matérias é fulcral para a maior consolidação desta nova tecnologia enquanto alternativa viável para os processos de construção correntes.

O presente trabalho pretende ser um contributo no entendimento destas matérias.

Para atingir este objectivo foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

- Levantamento dos conceitos base de reologia e reometria;
- Identificação e descrição dos principais ensaios de campo utilizados na aferição dos parâmetros reológicos do BAC e enumeração dos diferentes métodos de previsão do comportamento reológico;
- Enumeração das diferentes metodologias de composição;
- Estudo aprofundado da influência dos componentes no comportamento reológico do BAC.

Resumidamente, pretendeu-se com este trabalho contribuir para o melhor entendimento do comportamento reológico do BAC, a partir da caracterização aprofundada dos materiais constituintes.

Assim sendo, o presente trabalho pretende facilitar a obtenção de misturas de BAC com os parâmetros de autocompatibilidade adequados. Pretende-se também, com este trabalho, incentivar a obtenção de novas metodologias de composição, capazes de prescrever misturas de BAC destinadas a elementos estruturais específicos, com diferentes configurações geométricas e taxas de armadura.

1.3 – Organização por Capítulos

Aqui encerra a parte introdutória deste trabalho. Seguidamente será descrita a organização dos 8 capítulos que compõem esta dissertação.

O primeiro, e presente, capítulo apresenta o enquadramento dos conceitos abordados, objectivos do trabalho e estrutura do documento.

O Capítulo 2 é composto por uma parte introdutória à tecnologia dos BAC, onde é apresentada a definição de BAC, a origem desta tecnologia de construção e alguns exemplos de aplicações à escala mundial. Serão também indicadas as vantagens na utilização deste material.

No Capítulo 3 serão apresentadas as propriedades do BAC no seu estado fresco. Para este efeito, serão abordados conceitos básicos de reologia, reometria e trabalhabilidade. Serão ainda abordados de forma ligeira, os conceitos de exsudação e retracção plástica.

No Capítulo 4 é feito um levantamento dos ensaios mais utilizados na aferição dos parâmetros reológicos do BAC. Serão indicados os seus equipamentos, metodologias e precisão dos ensaios, bem como as suas vantagens e desvantagens. Finalmente serão apresentados modelos de previsão do comportamento reológico que relacionam o comportamento do betão com os parâmetros de *Bingham*.

O Capítulo 5 apresenta os diversos métodos usuais na obtenção de composições de BAC, expondo os seus aspectos principais. Finamente, serão apresentadas recomendações de carácter geral sugeridas pela *Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux* (RILEM) e pelo projecto *European Testing-SCC*, utilizadas na produção e aplicação deste material.

No Capítulo 6 é efectuado o levantamento da evolução das directrizes Europeias. Serão abordadas as classificações dos betões segundo as medições observadas nos ensaios reológicos de campo e a relação dessas classificações com os diferentes tipos de aplicação.

No Capítulo 7 será apresentada a influência dos materiais constituintes no comportamento do betão no estado fresco, nomeadamente, materiais finos, agregados, adjuvantes, água e ar. Nele serão abordados os materiais constituintes mais frequentemente utilizados na produção do BAC. Será estudada a interacção que estes têm com os restantes componentes da mistura e serão indicados os reflexos dessa interacção no comportamento reológico do BAC.

No capítulo 8 tecem-se as conclusões e considerações finais deste trabalho. Finalmente, serão sugeridos alguns desenvolvimentos futuros que poderão dar sequência a este trabalho.

CAPÍTULO 2 – BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

2.1 – Objectivo

O presente capítulo tem como objectivo a apresentação dos aspectos gerais que envolvem a tecnologia do BAC.

Em primeiro lugar é apresentada uma definição de BAC, descrevendo as suas principais características no estado fresco e resumindo algumas das vantagens na aplicação deste material. Seguidamente, apresentam-se os principais casos de aplicação de BAC, com especial enfoque no Japão assim como uma breve análise da evolução na sua utilização à escala mundial. Posteriormente serão enumeradas vantagens e desvantagens no uso desta tecnologia de construção. No final, será apresentada uma breve conclusão dos assuntos abordados no presente capítulo.

2.2 – Definição de um Betão Autocompactável

Os BAC fazem parte do grupo dos denominados betões de alto desempenho e possuem várias vantagens em comparação com os betões convencionais BC.

As suas principais características relacionam-se com as suas condições no estado fresco. Trata-se de um betão capaz de se deformar por acção do seu peso próprio, preenchendo todas secções das cofragens sem necessidade de vibração interna ou externa e com capacidade para atravessar obstáculos sem dificuldade (por exemplo: armaduras) (Skarendahl, 2000a). Estas características devem ser atingidas de modo a que a composição dos seus materiais constituintes evitem a obtenção de misturas que mostrem efeitos de segregação.

A utilização deste tipo de betão é especialmente aconselhável para betonagem de elementos estruturais com elevada percentagem de armadura, com secções de formas complexas ou de difícil acesso. Entre as vantagens significativas a respeito dos BAC podem-se citar: a colocação rápida e muito simples, o acesso a áreas com elevado congestionamento de armaduras, a ausência da necessidade de recorrer a vibrações mecânicas ou a mecanismos de compactação, a obtenção de acabamentos superficiais de boa qualidade, a possibilidade da redução dos custos de obra (através da optimização da mão-de-obra e das equipas de trabalho, e pelo aumento da qualidade e fiabilidade das estruturas), a melhoria das condições de segurança e higiene no trabalho por diminuição dos níveis de ruído e poluição.

2.2.1 – Origem do Betão Autocompactável

Como resultado de estudos levado a cabo pelo Professor Okamura, a meio da década de 80 na universidade de Tóquio, surgiram os primeiros desenvolvimentos do material de construção que hoje se conhece como Betão Autocompactável, ou em inglês, SCC (Self-Compacting Concrete). Este material surgiu como consequência da necessidade de garantir a obtenção das estruturas duráveis (sem defeitos de compactação decorrentes da utilização de mão-de-obra pouco qualificada) e o seu desenvolvimento em laboratório foi alcançado com sucesso pela primeira vez em 1988. (Okamura, 1995)

Posteriormente iniciou-se a expansão desta tecnologia de construção para a Europa, nomeadamente para os países nórdicos (em especial a Suécia) e no final da década de 90, esta surge em força nos Estados Unidos, onde a denominação *Compacting* é substituída por *Consolidating* devido à conotação da primeira com temas relacionados com a mecânica dos solos.

2.2.2 – Aplicações do Betão Autocompactável

As primeiras obras que recorreram à utilização de BAC surgiram no início da década de 90, com a utilização pontual na execução de pontes e edifícios. Com o sucesso destas aplicações, ocorreu um crescimento na utilização do BAC que mais tarde se alastraria à escala internacional.

Actualmente, a utilização de BAC como tecnologia de construção tem principalmente objectivos económicos e ambientais, reduzindo o período de construção e mão-de-obra, eliminação de ruídos resultantes dos processos de vibração e obtenção de boa compactação em todas as secções da estrutura incluindo zonas de difícil acesso (Okamura e Ouchi, 1999).

Existem vários exemplos de aplicação desta tecnologia de construção na execução de estruturas. A ponte suspensa de *Akashi-Kaikyo* (Figura 1), inaugurada em 1998, beneficiou das vantagens da utilização do BAC – foi utilizado na execução das ancoragens da ponte – ao ver reduzido significativamente o seu período de construção. No entanto, a inexistência de normalização na altura originou a que se desse um excessivo número de ensaios *in situ* para que se conseguissem atingir os critérios adequados no betão (Kashima, Kanazawa *et al.*, 1998).



FIGURA 1 – UTILIZAÇÃO DO BAC NA CONSTRUÇÃO DA PONTE DE AKASHI-KAIKYO

Outro exemplo frequentemente referido é o da construção do *Osaka Gas Terminal* (Figura 2). Trata-se de um complexo de tanques pré-esforçados de grandes dimensões destinados ao armazenamento de gás líquido natural. Os benefícios da utilização do BAC foram tais que não só se conseguiu aumentar a capacidade dos novos tanques, como se conseguiu reduzir a mão-de-obra de 150 para 50 trabalhadores e o período de construção dos 22 para os 18 meses (Kitamura, Nishizaki *et al.*, 1998).



FIGURA 2 – UTILIZAÇÃO DO BAC NA CONSTRUÇÃO DOS TANQUES DE GÁS DA OSAKA GAS CO.

A tecnologia dos BAC tem vindo a implementar-se gradualmente na Europa. A utilização de BAC é tida como uma alternativa promissora e muito viável que poderá em alguns casos substituir por completo a utilização do BC (AFGC, 2000).

A Suécia e a Holanda são países onde se podem observar exemplos da aplicação do BAC na Europa (Skarendahl, 1998, Okamura *et al.*, 2000).

As vantagens do BAC foram também amplamente exploradas na construção de túneis, onde a obtenção de determinados critérios de produtividade e ambiente de trabalho são decisivos na escolha deste material.

No caso da construção dita mais convencional, como é o caso dos edifícios, a utilização do BAC deu-se de forma mais tardia, muito devido à controvérsia gerada em torno desta nova tecnologia de construção. Actualmente, existe um maior consenso e estão documentados inúmeros casos de sucesso na utilização do BAC.

Outra indústria ligada à construção civil que beneficiou grandemente das vantagens do BAC foi a indústria da pré-fabricação. A exigência de boa compatibilidade no betão e o variável nível de complexidade das peças pré-fabricadas levou à adopção desta tecnologia de construção (Okamura e Ouchi, 1999). No Japão, a utilização do BAC tem tido bastante sucesso na indústria da pré-fabricação, nomeadamente na construção de aduelas (Figura 3) para o revestimento de túneis.



FIGURA 3 – PROCESSO DE BETONAGEM DE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS (OKAMURA E OUCHI, 2003)

Na Figura 4 são apresentados dois gráficos que ilustram a evolução da utilização do BAC como betão pronto e na indústria da pré-fabricação. Os dados dizem respeito aos anos de 1992 a 2003 e os alvos do estudo foram o Japão e os países Nórdicos, que como se sabe, foram os principais impulsionadores desta nova tecnologia (Danish SCC-Consortium, 2004)

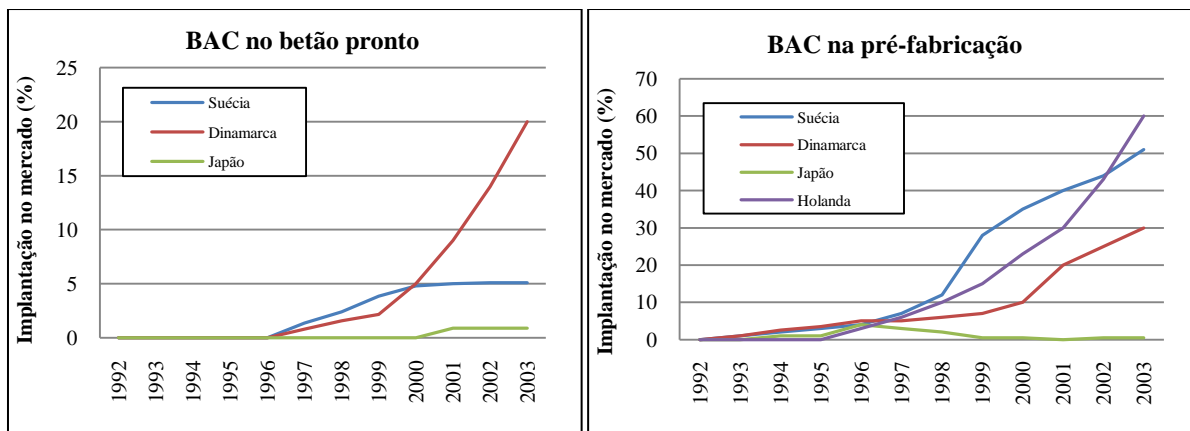


FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE BAC EMPREGUE PELA INDÚSTRIA DO BETÃO (DANISH SCC-CONSORTIUM,2004)

Da análise dos gráficos, pode-se verificar que existe uma maior receptividade da parte da indústria da pré-fabricação à implementação desta nova tecnologia.

2.3 – Vantagens do betão autocompactável

São várias as vantagens da utilização do BAC que explicam o aumento gradual na utilização desta tecnologia de construção. As principais vantagens do BAC são, o aumento da produtividade, o melhoramento do ambiente em obra, a melhoria na homogeneidade do betão e a obtenção de melhores acabamentos nas peças betonadas (Okamura, 1999) (Okamura *et al.*, 2000).

2.3.1 – Aumento da Produtividade

A redução de custos em mão-de-obra e a competitividade foram, desde sempre, factores decisivos no desenvolvimento de novas tecnologias de construção. A melhoria obtida com a utilização do BAC pode ser testemunhada num largo leque de aplicações, desde a construção de estruturas de menor dimensão, até às mais complexas, incluindo também a indústria do pré-fabrico (Skarendahl, 2000a) (Skarendahl, 2000b).

Ao ser dispensável a utilização de mecanismos de vibração na aplicação do BAC, aumenta-se assim a velocidade da construção bem como são, nesse aspecto, reduzidos os seus custos. Como consequência, é melhorada a relação custo/eficiência (Skarendahl, 2000a).

A melhoria da produtividade é possível não só no processo de compactação mas também no transporte e colocação (Okamura *et al.*, 2000). Por ser um betão mais fluido do que o BC, diferentes procedimentos de colocação e enchimento de cofragem poderão ser adoptados (Okamura *et al.*, 2000).

Embora se possam reduzir os custos inerentes aos processos de compactação, nem sempre se torna possível a redução custo total da obra, o que sucede com mais frequência em construções em larga escala (Okamura *et al.*, 1999).

A construção com recurso a esta tecnologia poderá ser otimizada com o desenvolvimento de novos sistemas de construção, cofragens, armaduras e suportes (Figura 5) (Okamura *et al.*, 1999).

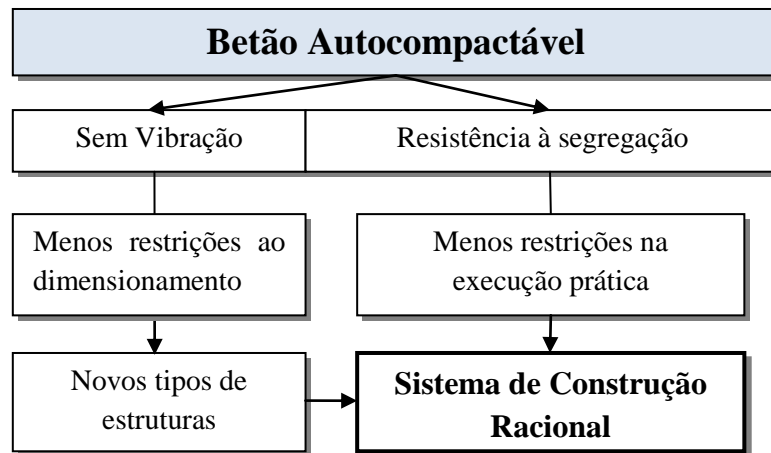


FIGURA 5 – UTILIZAÇÃO DO BAC NUM SISTEMA OPTIMIZADO DE CONSTRUÇÃO PROPOSTO POR OKAMURA E OUCHI (OKAMURA, 1999)

2.3.2 – Melhoria do Ambiente em Obra

A utilização de vibradores de agulha na vibração dos BC é um dos trabalhos mais pesados na construção. Estes aparelhos apresentam vários efeitos nocivos para a saúde, nomeadamente o facto de causarem distúrbios na circulação sanguínea dos trabalhadores que os utilizam bem como o ruído por eles causado que afecta não só a obra em questão, como a área em redor. Associada ao processo de colocação do BC está também a maior necessidade de manuseamento da mangueira de bombagem no local de betonagem o que implica um esforço acrescido por parte dos trabalhadores (Skarendahl, 2000a) (Skarendahl, 2000b).

Com a utilização do BAC consegue-se um ambiente de trabalho mais silencioso (podendo-se atingir reduções de ruído na ordem dos 8 a 10dB), uma menor carga física no trabalho e o ambiente de obra fica mais limpo com a ausência de cabos, transformadores e equipamentos de vibração, aumentando assim o bem-estar dos trabalhadores e possibilitando às empresas a contratação de operários mais experientes e valiosos em prol da redução com os custos de saúde.

2.3.3 – Melhoria da Homogeneidade

A principal razão por trás do desenvolvimento do BAC foi a crescente preocupação com a redução da durabilidade nas estruturas, causada pela inadequada homogeneidade do BC. No Japão, a principal preocupação com a execução de peças betonadas era a obtenção de uma compactação adequada que fizesse o betão preencher todos os espaços das cofragens. Devido ao risco sísmico do país em questão, a percentagem das armaduras nas peças a betonar era bastante elevada, o que levantava dificuldades na utilização do BC, menos fluido e com maior probabilidade de desenvolver fenómenos de bloqueio. As

características do BAC, tornaram mais fácil a resolução destes problemas ao mesmo tempo que asseguram a qualidade do betão (Skarendahl, 2000a).

2.4 – Desvantagens do Betão Autocompactável

A desvantagem que normalmente se associa ao BAC é o seu elevado custo. A composição específica deste material implica a utilização de uma maior percentagem de finos e adjuvantes do que os BC, o que acresce os seus custos. Em todo o caso, a avaliação do custo/benefício que tem sido realizada normalmente apenas diz respeito aos custos com o material, não contabilizado as demais vantagens proporcionadas pela utilização deste material.

Com o surgimento de novos estudos e com o desenvolvimento da experiência na utilização do BAC têm surgido novas propostas de formulação, optimizações das composições, recurso a diferentes materiais de custo mais reduzido, incluindo materiais recicláveis, o que tem resultado no decréscimo sucessivo dos custos associados a esta tecnologia de construção.

No que diz respeito ao seu estado endurecido, a principal desvantagem apontada é a maior susceptibilidade a fenómenos de retracção e fluência que o BAC apresenta quando comparado com o BC. Tal sucede em parte devido à elevada percentagem em finos que fazem parte da sua composição. A solução para contornar este problema passará igualmente pelo surgimento de novas propostas de formulação, pela optimização das composições, nomeadamente através da optimização dos agregados.

2.5 – Conclusões

O BAC trata-se de um material com características muito específicas, daí ser considerado um betão especial, no grupo dos betões de alto desempenho. As suas principais características no estado fresco são a sua capacidade de se deformação, capacidade de enchimento e capacidade de passagem.

Desde o seu surgimento no Japão no final da década de 80, a aplicação desta nova tecnologia rapidamente se estendeu à escala global, sendo inúmeros os estudos desenvolvidos e vasta a experiência adquirida na utilização deste novo material.

Existem vários casos de aplicação desta tecnologia na construção de estruturas, principalmente no Japão, no entanto a sua aplicação à escala mundial tem aumentado significativamente nos últimos tempos. A indústria do pré-fabrico é um caso de sucesso na utilização do BAC, recorrendo a este com cada vez mais frequência.

Como vimos, o BAC permite obter aumentos ao nível da produtividade, ambiente de obra e homogeneidade tendo no entanto algumas desvantagens, nomeadamente o facto de ter custos acrescidos com o material embora se possa considerar que estes sejam minorados pela poupança obtida com o melhoramento da produtividade e do ambiente em obra. Outras desvantagens foram atribuídas às suas características no estado endurecido, nomeadamente a maior tendência para a retracção e fluência.

CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL NO ESTADO FRESCO

3.1 – Objectivo

O objectivo do presente documento é retratar a influência dos componentes do betão autocompactável (BAC), no estado fresco. Para que tal aconteça torna-se necessário, em primeiro lugar, efectuar uma caracterização das propriedades do BAC no estado fresco. De seguida, serão apresentados conceitos base, cruciais para a compreensão dos mecanismos que regem o comportamento do betão no estado fresco. Será abordado o conceito de reologia e serão apresentados diferentes modelos propostos por autores na avaliação da reologia do betão. Seguidamente, serão apresentados os conceitos de reometria envolvidos na tipificação adequada das características reológicas de um betão, bem como os diferentes aparelhos utilizados para o efeito. Posteriormente, será apresentado o conceito de trabalhabilidade e quais os requisitos exigidos, tendo em vista a obtenção da autocompactabilidade. Finalmente, será apresentada uma breve conclusão dos assuntos abordados no presente capítulo.

3.2 – Reologia

A reologia é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda as propriedades físicas que influenciam o transporte de quantidade de movimento num fluido (Barnes, 1991). A propriedade fundamental que influencia o desempenho do betão no estado fresco é o seu comportamento reológico.

Na tecnologia da construção, o estudo reológico de misturas tem as mais variadas utilizações. No âmbito do presente trabalho, a reologia dos betões, argamassas e pastas toma um carácter importante para a compreensão do comportamento do BAC permitindo a optimização da sua composição durante a fase de concepção, tendo em vista determinados parâmetros de trabalhabilidade. Apresentam-se, em seguida, alguns conceitos básicos sobre reologia:

Em primeiro lugar, é apresentado o caso de um líquido submetido a um ensaio de corte τ . O modelo mais simples que representa o comportamento de um líquido quando submetido a estes esforços é o conceito de Fluido *Newtoniano*. Este modelo considera que ao serem aplicadas tensões no fluido, este sofrerá uma deformação contínua no tempo, na medida em que esta tensão permanece aplicada (o que significa que o líquido continua a fluir), independentemente de quão pequena possa ser essa tensão. Neste caso, a tensão de corte é proporcional à taxa de deformação ou gradiente de velocidade $\dot{\gamma}$ e essa constante de proporcionalidade é denominada constante de viscosidade η .

Este coeficiente representa o declive da recta, cujo início se dá na origem das coordenadas, como se ilustra mais à frente na Figura 6. Neste caso, a equação linear é a seguinte:

$$\tau = \eta\gamma \quad (1.1)$$

onde τ é a tensão de corte (Pa), η é a constante de viscosidade (Pa.s) e γ é a taxa de deformação (1/s)

No entanto, o betão não se enquadra exactamente no comportamento descrito, pois trata-se de uma suspensão de sólidos em água, existindo importantes forças de interacção entre as partículas, como tal, o seu comportamento reológico é um pouco diferente. Na realidade, um modelo de cálculo que espelhasse a plenitude destas definições seria algo necessariamente complexo, devido à grande variedade de tamanho de partículas e propriedades dependentes do tempo, à medida que se dão as reacções de hidratação.

O modelo mais simples que se aplica à reologia do betão no estado fresco é o modelo de *Bingham* (Hu, 1996). Neste caso, considera-se que o betão se comporta como um sólido (ou seja, não flui) até que a tensão de corte aplicada exceda um limiar ou uma tensão de cedência (τ_0). Nessa altura, a mistura começa a comportar-se como um líquido que mostra uma relação linear entre a tensão aplicada e o seu gradiente de velocidade (γ) (Nielsson e Wallevik, 2003). A equação da recta neste caso é:

$$\tau = \tau_0 + \mu'\gamma \quad (1.2)$$

onde γ é o gradiente de velocidade (1/s), τ_0 é a tensão de cedência (Pa) e μ' é semelhante ao coeficiente de viscosidade em fluidos *Newtonianos* e é denominado viscosidade plástica (Pa.s). A Figura 6 mostra a linha do modelo descrito, em comparação com um fluido newtoniano.

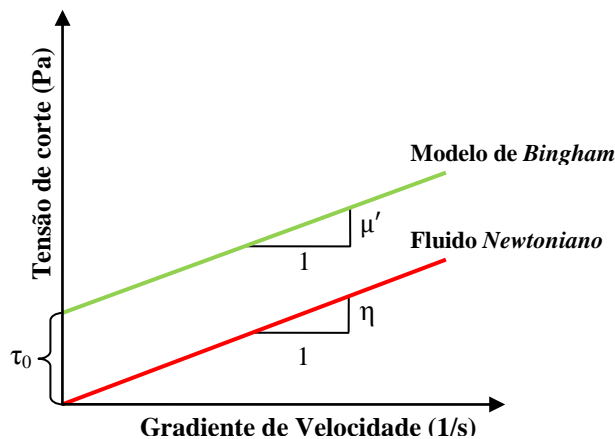


FIGURA 6 – COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE UM FLUIDO *NEWTONIANO* E MODELO DE *BINGHAM*

Existem outros tipos de expressões propostas para descrever o comportamento de suspensões de partículas sólidas num líquido viscoso. A Tabela 1 faz referência a essas relações e aos autores que as propuseram:

TABELA 1 – RELAÇÕES ENTRE A TENSÃO DE CORTE E O GRADIENTE DE VELOCIDADE (FERRARIS, 1999):

Autores:	Expressão:
Newton	$\tau = \eta\dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu'\dot{\gamma}$
Herschel e Bulkley	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}'^n$
Lei de potência	$\tau = A\dot{\gamma}'^n$
Von Berg e Oswald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B\sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Eyring	$\tau = a\dot{\gamma} + B\sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff	$a(\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni, Massida e Sanna	$\tau = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$

onde τ é a tensão de corte, τ_0 é a tensão de cedência, $\dot{\gamma}$ é o gradiente de velocidade, η e μ são constantes de viscosidade e A, a, B, b, C, k, δ , β , α são constantes.

A Figura 7 representa o domínio reológico de um BAC, em comparação de outros tipos de betão.

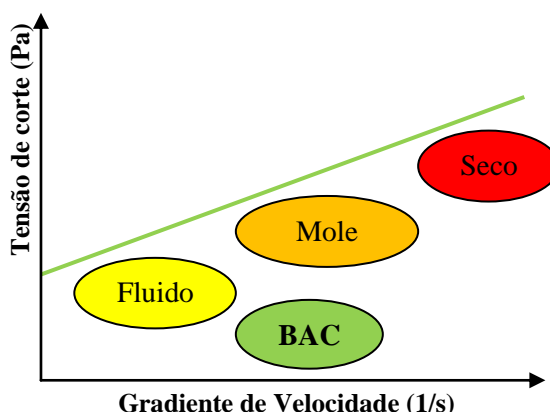


FIGURA 7 – DOMÍNIO REOLÓGICO DE UM BAC

A experiência mostra que as suspensões de partículas têm uma característica importante denominada “coesão”. Esta propriedade está ligada principalmente à distância entre as partículas e depende, nomeadamente, da relação entre superfície sólida e líquida da suspensão. Essa coesão manifesta-se principalmente pela tensão de cedência τ_0 , abaixo do qual a suspensão (pasta, argamassa ou betão) se comporta como um sólido quase-elástico.

O termo “coesão” pode levar a algumas confusões. Com efeito, neste caso o termo refere-se a uma propriedade reológica da pasta ou betão, ou seja, a tensão que é necessária aplicar ao material para que este comece a fluir. O que é diferente do termo “mistura coesa” que depende de outros factores, e está associado com a capacidade da mistura de betão se manter homogénea.

O BAC é uma mistura de betão que possui a deformabilidade necessária para preencher as cofragens na sua totalidade sem a necessidade de compactação mecânica interna ou externa, fazendo-o sem segregar e com baixo risco de bloqueio da mistura nas armaduras.

O comportamento reológico do betão é definido então, de acordo com o que foi referido, por duas variáveis: a tensão de cedência (τ_0) e a viscosidade plástica (η'). Para que um betão adquira

propriedades de autocompactabilidade, deverá ser respeitado um equilíbrio delicado entre as duas variáveis reológicas mencionadas, da seguinte forma:

- Um valor de τ_0 nulo ou muito baixo (ou seja, uma mistura com alta fluidez), de forma a estar-se perante um comportamento próximo ao de um fluido newtoniano;
- Um valor moderado de η' a fim de promover uma adequada resistência à segregação dos materiais constituintes.

A experiência mostra que o valor de τ_0 da mistura deve ser obtido com recurso à adição de superplastificantes (SP), que são responsáveis pela dispersão das partículas de cimento, mas a mera utilização de um aditivo SP não é suficiente, pois isso poderia levar à obtenção de misturas que apresentam problemas de segregação.

Portanto, a fim de controlar a segregação (agindo sobre a viscosidade plástica η') e evitar o bloqueio nas armadura, os cuidados usuais a ter na concepção das misturas são (Khayat e Tangtermsirikul, 2000):

- Percentagem elevada de finos (material com menos de 74 μm proveniente do cimento e adições), na ordem dos 450-600 kg/m^3 de betão. Juntamente com o cimento Portland poderão ser utilizadas adições de escória de alto-forno, fíler calcário, fumo de sílica, cinzas, entre outras;
- No caso de não se recorrer a este tipo de adições, será necessário o recurso a um agente modificador de viscosidade (AMV);
- Percentagens de agregado grosso inferiores às do BC com menores dimensões máximas (variando entre 12,5 mm e 19 mm), tendo como objectivo a redução do atrito entre as partículas de agregados, proporcionando ao betão a capacidade suficiente para superar obstáculos sem problemas.

Os factores predominantes que regem o comportamento reológico são o atrito entre as partículas e o teor em água, ambos dependentes da tensão superficial e de dispersão das partículas.

3.3 – Reometria

Os parâmetros reológicos característicos do betão, argamassa e pastas, podem ser determinados com recurso a aparelhos chamados reómetros ou viscosímetros. Entre os mais comuns incluem-se o BML, IBB e BTRHEOM. No entanto, deve notar-se que o princípio da medição dos parâmetros é diferente em cada um destes aparelhos e que por isso, os seus resultados não são comparáveis. Isso é um aspecto importante a ter em conta na interpretação dos resultados.

Existem vários trabalhos que mostram em detalhe o funcionamento dos aparelhos mencionados e a relação entre os parâmetros com as propriedades do BAC no estado fresco (Brite-EuRam, 2000, Ferraris *et al.*, 2000).

O IBB (Figura 8) foi desenvolvido no Canadá e consiste num recipiente cilíndrico onde é colocado betão, com um rotor (pá) em forma de H que gira com velocidade variável.



FIGURA 8 – REÓMETRO IBB

O momento gerado pela resistência da amostra de betão é medido em (N.m) e a velocidade de rotação da pá em (rpm). A relação destes dois valores permite a obtenção de uma linha recta, cuja inclinação é a viscosidade plástica e a interceptação com o eixo das ordenadas é a tensão de cedência. Resumidamente:

- η' = viscosidade plástica (N.m.s)
- τ_0 = tensão de cedência (N.m)

O BML (Figura 9) é constituído por dois cilindros coaxiais. Um externo que efectua um movimento de rotação e um interno que se encontra fixo. Neste cilindro interno encontra-se um dispositivo de medição do momento gerado pela resistência da mistura.



FIGURA 9 – REÓMETRO BML

De forma semelhante ao IBB, os resultados obtidos permitem determinar a recta que correlaciona a tensão de cedência com a viscosidade plástica, a qual é reflectida pela seguinte expressão:

$$T = g + h * N \quad (1.3)$$

Onde:

- h = viscosidade plástica (N.m.s)
- g = tensão de cedência (N.m)

O BTRHEOM (Figura 10) é um reómetro constituído por duas placas paralelas, uma fixa (a inferior) e outra que efectua um movimento rotacional com velocidade variável (a superior), de modo a que a amostra de betão contida entre elas seja submetida ao corte.



FIGURA 10 – REÓMETRO BTRHEOM

Os parâmetros reológicos podem ser calculados com recurso à equação de *Bingham*. Devido à geometria da área de corte, é possível calcular os resultados em Pa, tal que:

- η' = viscosidade plástica (Pa.s)
- τ_0 = tensão de cedência (Pa)

As referências bibliográficas consultadas mostram concordância no que diz respeito aos valores necessários para a obtenção de um BAC.

De facto, segundo (Brite-EuRam, 2000), os valores recomendados para um BAC com base nas experiências com o BTRHEOM são:

- $\eta' < 200$ (Pa.s)
- $\tau_0 < 400$ (Pa)

Importa esclarecer que, embora a fonte citada não especifique um valor mínimo de viscosidade, a consideração de um valor muito pequeno de viscosidade pode dar azo a fenómenos de segregação, especialmente das partículas maiores presentes na mistura.

Segundo (Ferraris *et al.* 2000), os valores (avaliados com recurso ao BTRHEOM) devem ser:

- $100 \text{ (Pa. s)} < \eta' < 200 \text{ (Pa.s)}$
- $\tau_0 < 200 \text{ (Pa)}$

Será interessante considerar as relações encontradas através da pesquisa bibliográfica que cruzam os parâmetros reológicos do betão no estado fresco com os resultados obtidos nos diversos ensaios que podem ser efectuados em misturas de BAC (estes ensaios são descritos no Capítulo 4).

3.4 – Trabalhabilidade

No caso dos BAC, a trabalhabilidade pode ser definida como “autocompactabilidade”, ou a capacidade que estas misturas apresentam para fluir apenas pela acção do seu próprio peso, e de preencher todos os espaços das cofragens, a fim da obtenção de um acabamento sem defeitos e de qualidade uniforme.

Para alcançar este objectivo de “autocompactabilidade”, são exigidas a um BAC três propriedades especiais (Khayat e Tangtermsirikul, 2000):

- Capacidade de enchimento;
- Resistência à segregação;
- Capacidade de passagem.

3.4.1 – Capacidade de Enchimento

Uma mistura de BAC no seu estado fresco deve ser capaz de se deformar pela acção do seu próprio peso (Khayat e Tangtermsirikul, 2000). Esta exigência de capacidade de enchimento envolve:

- Capacidade de deformação, em termos da distância a que a mistura de betão pode fluir ou espalhar-se a partir do seu ponto de descarga;
- Taxa ou velocidade de deformação, em termos da velocidade a que este movimento ocorre.

Para alcançar uma boa capacidade de enchimento, deve haver um equilíbrio adequado entre a capacidade de deformação e a taxa de deformação.

Exemplificando, um betão de alta resistência que apresenta baixo teor água/ligante (A/L) e que recorre ao uso de SP, normalmente tem uma capacidade de deformação elevada, mas apresenta uma baixa velocidade de deformação, ou por outras palavras, uma elevada viscosidade. De tal forma, que se torna necessária a utilização de meios de compactação mecânica para que este ocupe convenientemente todos os espaços das cofragens do elemento estrutural a betonar (Khayat e Tangtermsirikul, 2000).

Assim, este equilíbrio entre a capacidade de deformação e a taxa de deformação, depende fortemente das características da estrutura a betonar, nomeadamente da quantidade de armaduras presente, do tamanho e complexidade do elemento estrutural, da altura da queda, da importância do acabamento

final, e da longitude a ser percorrida e preenchida pela mistura de BAC. Uma adequada capacidade de enchimento da mistura pode ser obtida através de:

a) Redução do atrito entre as partículas sólidas.

Inclui não só os agregados finos e grossos, mas também todos os tipos de partículas finas menores que 74 μm (cimento e adições);

Esta redução pode ser alcançada através da redução do volume de agregados (ou aumentando o volume de pasta) e usando uma combinação de cimento e adições que resultem numa distribuição contínua das dimensões das partículas que compõem a mistura (Khayat e Tangtermsirikul, 2000).

b) Aumento na deformabilidade da pasta.

É importante visar uma elevada fluidez (baixo valor de τ_0) ao mesmo tempo que uma elevada resistência à segregação (valor de η' moderado) a fim de alcançar uma boa capacidade de enchimento da mistura.

O aumento da deformabilidade pode ser conseguido com recurso a adições de SP (geralmente compostos à base de policarboxilatos). Ao contrário da água, que reduz tanto o valor do τ_0 como η' , ao ser adicionado um SP, aumenta-se a fluidez (reduzindo o τ_0) e diminui-se (embora de forma limitada) a resistência à segregação. Assim, obtém-se uma mistura com alta fluidez, sem perda significativa de viscosidade.

Além disso, a redução da percentagem água/finos (A/F) pode limitar a deformabilidade da pasta. Um aumento desta relação pode garantir deformabilidade alta, mas também pode aumentar a possibilidade de segregação.

Por conseguinte, é necessário alcançar um equilíbrio adequado de A/F (Khayat e Tangtermsirikul, 2000).

3.4.2 – Resistência à Segregação

Uma mistura de BAC não deve apresentar as seguintes formas de segregação, quer no estado estacionário quer em movimento:

- Exsudação de água (ou *bleeding*);
- Segregação da pasta e dos agregados;
- Segregação do agregado grosseiro, resultante de fenómenos de bloqueio;
- Distribuição não uniforme dos vazios.

Além disso, deve-se mencionar que existem dois tipos de segregação neste tipo de misturas, ou seja, (Daczko, 2002):

1. Segregação Dinâmica: que ocorre durante a betonagem quando a mistura de BAC deve fluir no interior da cofragem. Este fenómeno é facilmente detectável através da realização de testes à mistura no estado fresco e deve ser corrigido durante a fase de concepção.
2. Segregação Estática: É mais difícil de avaliar e está associado aos fenómenos de sedimentação que podem ocorrer quando o betão se encontra em repouso dentro das cofragens. É razoável considerar que misturas onde não se manifestem fenómenos de segregação dinâmica possam, no entanto, apresentar fenómenos de segregação estática, como por exemplo, a sedimentação de agregado grosso no fundo das cofragens. Existem ensaios que avaliam quantitativamente este comportamento e que são descritos no próximo capítulo.

Para evitar a segregação entre a água e sólidos, é essencial reduzir a quantidade de água que possa “interagir” na mistura (água livre). Como tal, deverá recorrer-se às seguintes premissas na dosificação da mistura:

- Redução do teor de água
- Baixa relação A/F
- Utilização de adições ou de cimento com elevada superfície específica
- Utilização de agentes modificadores de viscosidade (AMV)

As restantes categorias de segregação podem ser evitadas através da concepção de pastas capazes de transportar o ar e as partículas de agregado, deixando apenas um pequeno intervalo de composição entre a pasta e o agregado. Isto pode ser conseguido através da redução da relação A/F ou incorporando um AMV.

Por outro lado, um betão de alta viscosidade pode segregar a partir do momento em que não consiga assegurar uma deformação uniforme capaz de ultrapassar as obstruções. Isto pode causar a separação de partículas grossas do agregado, perto de espaços confinados da cofragem. Neste caso, esse comportamento pode ser corrigido através da redução da máxima dimensão do agregado (MDA) e do volume de agregados. Em suma, para reduzir a possibilidade de uma separação ou segregação dos sólidos será necessário para implementar as seguintes acções, que nem sempre se equivalem nos seus efeitos:

- Limitar o teor de agregados;
- Reduzir a MDA;
- Reduzir a taxa de A/F e/ou utilizar AMV.

A Tabela 2 (Daczko, 2002) mostra uma lista de variáveis a ter em conta e a sua influência na resistência à segregação estática e dinâmica de uma mistura de BAC.

TABELA 2 – INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS NA RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA DO BAC (DACZKO, 2002)

<i>Variável 1: Materiais constituintes</i>	<i>Efeito sobre a Estabilidade Dinâmica</i>	<i>Efeito sobre a Estabilidade Estática</i>
Material Cimentício	Fornece viscosidade à pasta, resultando numa baixa tendência para a segregação.	Fornece viscosidade à pasta, resultando numa baixa tendência para a segregação.
Agregado Grosso	O volume de agregado grosso influencia a capacidade de passagem através de áreas reduzidas.	O volume e o peso do agregado grosso podem influenciar a segregação estática. O tamanho das partículas influencia a exsudação (<i>bleeding</i>) e a segregação.
Agregado Fino	Não promove efeitos adversos, desde que a sua percentagem seja bem equilibrada com o volume de agregado graúdo.	A distribuição das dimensões das partículas influencia o risco de segregação e exsudação.
Água	Controla a viscosidade da pasta, influenciando o risco de bloqueio.	Controla a viscosidade da pasta, influenciando o risco de segregação estática.
Aditivos superplastificantes	Sobredosagem pode originar a instabilidade da mistura.	Sobredosagem pode originar a instabilidade da mistura.
Percentagem de Ar	Fornece volume à mistura, resultando no aumento entre a distância das partículas dos agregados, reduzindo assim o risco de bloqueio.	Ajuda a manter as partículas em suspensão, reduzindo assim o risco de segregação estática.
<i>Variável 2: Comportamento da mistura</i>		
Fluidez (Ensaio de espalhamento)	Com as demais variáveis constantes, uma maior fluidez da mistura resulta num maior potencial de segregação.	Com as demais variáveis constantes, uma maior fluidez da mistura resulta num maior potencial de segregação.
<i>Variável 3: Características de aplicação</i>		
Congestionamento das armaduras	Quanto maior a restrição à passagem do betão, maior a tendência para o bloqueio.	Mínima a nenhuma influência.
Distância a percorrer pelo BAC	Quanto maiores as distâncias, maiores as probabilidades de ocorrer a separação entre a pasta e o agregado grosso.	Mínima a nenhuma influência.
Altura de queda	Quanto maior a altura de queda, maior o risco de segregação.	Mínima a nenhuma influência.
Geometria da cofragem (altura, largura, complexidade)	Quanto mais estreita e complexa é a cofragem, maiores os efeitos de parede e maior a probabilidade de segregação dinâmica.	A altura da cofragem pode influenciar o grau de segregação estática.
Transporte sem agitação	A vibração decorrente do transporte pode causar a deposição dos agregados.	Mínima a nenhuma influência.
Bombagem	A pressão pode originar segregação da mistura nos tubos.	Mínima a nenhuma influência.

3.4.3 – Capacidade de Passagem

Há casos em que o betão deve fluir através de pequenas aberturas nas cofragens ou através de secções com elevado congestionamento de armaduras. Nesses casos, o BAC deve satisfazer um requisito adicional, a fim de impedir o bloqueio dos agregados grosseiros nestas aberturas.

Deste modo, deve haver uma compatibilidade entre o tamanho e a quantidade das partículas de maiores dimensões numa mistura de BAC e o afastamento entre os varões de armaduras e aberturas presentes nas peças a betonar, através das quais a mistura deve fluir.

O mecanismo de bloqueio pode ser explicado pela observação da Figura 11. Nas proximidades da abertura, há uma colisão entre as partículas do agregado que pode causar o chamado “efeito de arco”, assim, impedindo a passagem das restantes partículas. Para isso acontecer, deve considerar-se que estamos perante uma MDA de ordem de grandeza considerável e que o conteúdo de partículas de agregado de grande dimensão é muito alto.

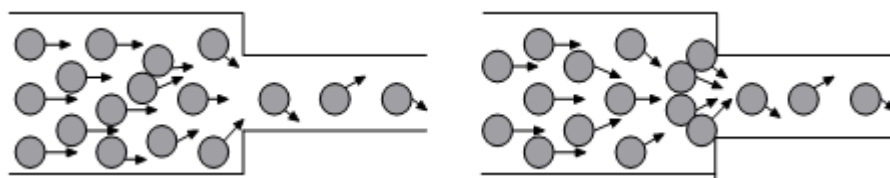


FIGURA 11 – MECANISMO DE BLOQUEIO (SKARENDAHL, 2000B)

A tendência para o bloqueio aumenta se a mistura de BAC for susceptível a fenómenos de segregação. Desta forma, nestes casos o bloqueio pode ocorrer, mesmo que a MDA não seja muito grande.

Em suma para uma boa capacidade de passagem, devem ser considerados:

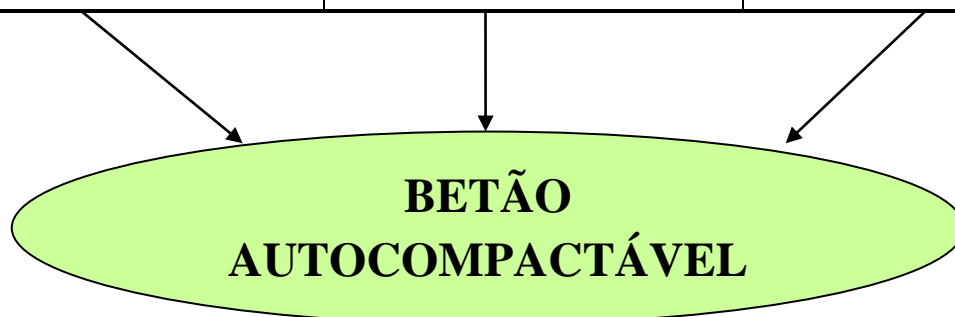
- Aumento da resistência à segregação, reduzindo o rácio A/F da mistura ou através do recurso a um AMV;
- Estabelecer uma compatibilidade entre o espaço livre disponível para a passagem da mistura e as características do betão e agregados, reduzindo o volume de agregados e a MDA.

3.4.4 – Resumo

A Tabela 3 proposta por Khayat (1999), resume sucintamente os requisitos necessários para a obtenção de um BAC com condições adequadas de trabalhabilidade:

TABELA 3 – EXIGÊNCIAS DE TRABALHABILIDADE (KHAYAT, 1999)

EXCELENTE DEFORMABILIDADE	BAIXA OU NENHUMA TENDÊNCIA PARA SEGREGAR	REDUZIDO RISCO DE BLOQUEIO
<p>1. Aumento da deformabilidade da pasta:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Usar SP b. Relação A/F equilibrada 	<p>1. Reduzir a segregação dos sólidos</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Limitar o conteúdo de agregados b. Reduzir TMA c. Aumentar da viscosidade para o qual existem duas maneiras: <ul style="list-style-type: none"> • Baixa relação A/F • Utilização de um AMV 	<p>1. Reduzir a separação dos agregados, enquanto se dá o escoamento da mistura:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Baixa relação A/F b. Utilização de um AMV
<p>2. Reduzir o atrito entre as partículas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Deve conjugar-se um baixo volume de agregado grosso juntamente com um elevado volume de pasta b. Distribuição contínua de partículas. 	<p>2. Minimizar a exsudação (água livre)</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Baixo conteúdo de água. b. Baixa relação A/F c. O uso de pós com superfície específica elevada d. Usando AMV 	<p>2. Grau de separação compatível entre as barras de reforço, a MDA e o teor de agregado grosso:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Baixo nível de agregado grosso b. Baixa MDA



3.5 – Exsudação e Retracção plástica

A exsudação ou sangramento, consiste no aparecimento de água constituinte da composição na superfície do betão. Este fenómeno está associado a misturas com pouca percentagem de finos nos agregados (incluindo cimento), ou demasiada água contida na mistura. A fim de reduzir a exsudação, podem ser tomadas várias medidas, tais como a redução da água contida na mistura, o ajuste do conteúdo de finos, a utilização de agentes estabilizadores ou a optimização da curva granulométrica dos agregados. (Khayat e Tangtermsirikul, 2000).

A retracção plástica está associada aos fenómenos de exsudação. Este fenómeno ocorre em consequência da perda de água do betão por exsudação ou evaporação e é acelerado pela exposição

das superfícies do betão às intempéries, tais como vento, baixa humidade relativa do ar e aumento da temperatura ambiente. (Khayat e Tangtermsirikul, 2000).

Dado que o conteúdo corrente dos BAC apresenta percentagens de finos significativamente maiores que os BC, a sua capacidade de exsudação é também significativamente reduzida. Embora este facto seja benéfico para os BAC do ponto de vista da estabilidade estática da mistura (especialmente em elementos estruturais verticais), esta torna-os particularmente sensíveis à fissuração por retracção plástica nos elementos com uma grande superfície de exposição em relação ao seu volume (lajes, tabuleiros de pontes, entre outros) Por esta razão, deve ser dada atenção ao processo de cura dos BAC de modo a evitar ou reduzir o risco de fissuração. (Khayat e Tangtermsirikul, 2000).

3.6 – Conclusão

Como foi visto, a especificidade do BAC reside sobretudo nas suas propriedades no estado fresco.

Relativamente às propriedades do BAC no estado fresco é possível concluir que em meio não confinado, o comportamento do BAC é regido por mecanismos que se baseiam na reologia das suspensões de partículas.

A revisão bibliográfica incidiu principalmente sobre os aspectos reológicos e de trabalhabilidade. No que diz respeito à capacidade de enchimento de um betão, concluiu-se que para alcançar uma boa capacidade de enchimento, deve existir um equilíbrio adequado entre a capacidade e velocidade de deformação.

A fim de mitigar os fenómenos de segregação, pode-se recorrer à redução da quantidade de água livre na mistura, à redução da relação A/F, à incorporação um AMV ou à redução da máxima dimensão do agregado e do volume de agregados.

Para que se atinja uma boa capacidade de passagem na mistura, poderá recorrer-se 1) ao aumento da resistência à segregação reduzindo o rácio A/F da mistura, 2) à utilização de um AMV ou 3) ao estabelecimento de uma compatibilidade entre o espaço livre disponível para a passagem da mistura e as características do betão e agregados através da redução do volume destes e da sua máxima dimensão.

A avaliação destes parâmetros reológicos pode, como foi visto, ser feita com recurso a reómetros tais como o BML, o IBB e BTRHEOM. No entanto, estes equipamentos mostram ser muito dispendiosos e pouco expeditos para utilização em obra, sendo o seu uso limitado a avaliações pontuais dos parâmetros de reologia do betão, em laboratório.

CAPÍTULO 4 – ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

4.1 – Objectivo

Como discutido no Capítulo 3, existem equipamentos (Reómetros) capazes de medir a tensão de cedência (τ_0) e viscosidade plástica (η') de uma mistura de betão, argamassa ou pasta de cimento, caracterizando assim o comportamento reológico de qualquer betão e, em particular das misturas de BAC.

Para estimar estes parâmetros sem recorrer a estes equipamentos, que são considerados caros e pouco expeditos, vários autores têm proposto diferentes metodologias, tendo como objectivo a avaliação destas propriedades de forma indirecta. Foi no Japão que se iniciaram estes desenvolvimentos, especialmente com os estudos na Universidade de Tóquio por Okamura e Ozawa (1995), Ouchi (1998) e outros.

O presente capítulo tem como propósito a descrição dos vários ensaios expeditos utilizados para aferir os parâmetros reológicos do BAC, equipamentos, metodologias, precisão, vantagens e desvantagens. Finalmente, serão apresentadas abordagens teóricas e empíricas propostas por diversos autores, que relacionam os parâmetros de *Bingham* com alguns dos ensaios abordados.

4.2 – Introdução

No Capítulo 3, foram definidos métodos de obtenção de autocompactabilidade e demonstrados os seus três requisitos principais:

- Capacidade de enchimento;
- Resistência à segregação;
- Capacidade de passagem.

Essas propriedades não são independentes entre si, estando mesmo relacionadas umas com as outras a vários níveis. Desta forma, os métodos de ensaio, na sua generalidade, não avaliam estas propriedades de forma isolada e ao invés, cobrem várias delas simultaneamente. No entanto, o desenvolvimento de ensaios permitiu estimar estes parâmetros sem recorrer a equipamentos de reometria, que são considerados caros e pouco expeditos.

A utilidade destes ensaios abriu caminho ao desenvolvimento de estudos de diversos autores que procuram relacionar os parâmetros de autocompactabilidade com os ensaios, através da proposta de fórmulas resultantes de abordagens empíricas e teóricas, tentando assim identificar todas as variáveis envolvidas no comportamento reológico das pastas durante os processos de ensaio.

Seguidamente, será feita uma breve descrição de alguns dos equipamentos utilizados na experiência japonesa (Okamura e Ozawa, 1995) (Ouchi, 1998) e europeia (Billberg, 1999) (Skarendahl, 2000a).

4.3 – Ensaio de Espalhamento

O ensaio de espalhamento é o ensaio mais simples de executar e, talvez por isso, o mais utilizado na aferição dos parâmetros reológico das misturas de BAC (EFNARC, 2002). Trata-se de um ensaio que permite estimar dois dos parâmetros que caracterizam o comportamento reológico do BAC.

Este ensaio é regido pela norma Europeia EN 12350-8 (2007).

O espalhamento medido neste ensaio tem como objectivo avaliar a capacidade que uma mistura apresenta para fluir livremente e é efectuado com recurso a um cone de Abrams, que é preenchido sem compactação. Após o levantamento do cone, é medido o diâmetro atingido pela mistura. Este valor, chamado espalhamento, apresenta uma correlação sólida com o valor do τ_0 (tensão de cedência), sendo normalmente recomendados valores de espalhamento da ordem dos 65 ± 5 cm. O intervalo de valor recomendado é, no entanto, meramente indicativo e, na prática, deve estar adequado ao elemento a betonar. A Figura 12 mostra a aparência de um espalhamento de 65 cm.



FIGURA 12 – ESPALHAMENTO DE 65 CM

Dackzo (2002) propôs três intervalos diferentes de espalhamento a fim de seleccionar a mistura de BAC mais adequada, dependendo do tipo de estrutura a betonar. Esta proposta também considera a possibilidade de obtenção de resultados de espalhamento fora dos intervalos propostos:

- Tipo 1: Espalhamento inferior a 56 cm;
- Tipo 2: Espalhamento entre 56 cm e 66 cm;
- Tipo 3: Espalhamento superior a 66 cm (ou seja, alta fluidez da mistura).

Como parte do mesmo ensaio de espalhamento, é medido o tempo que a mistura leva a espalhar-se até um diâmetro de 50 cm (T50). Este valor permite avaliar qualitativamente a viscosidade plástica da mistura, sendo recomendados valores entre 2 e 5 segundos. De acordo com o mesmo autor, podem ser considerados três intervalos de T50:

- Tipo A: T50 superior a 2 segundos (ou seja, baixa viscosidade da mistura);
- Tipo B: T50 superior a 2 segundos e inferior a 4 segundos;
- Tipo C: T50 superior a 4 segundos.

Como tal, e a título de exemplo, existirão estruturas a que se adequem eventualmente a utilização de misturas do tipo 3-A (ou seja, misturas de BAC com alta fluidez e baixa viscosidade) e outras para as quais a combinação oposta 1-C será suficiente (misturas de BAC com baixa fluidez e alta viscosidade).

Além disso, é também importante a inspeção visual do espalhamento da mistura o que permite observar a distribuição do agregado grosso a fim de aferir se a mistura terá tendência para segregar na frente de escoamento. De modo a cobrir este aspecto, vários autores propuseram a adopção de um índice de estabilidade visual (VSI em Inglês), sendo-lhe atribuídos valores de 0 a 3 (Daczko, 2002). Às misturas que são completamente estáveis é-lhes atribuído o valor 0 e às claramente instáveis, o valor 3, sendo 1 e 2 valores intermédios.

A Tabela 4 resume as classificações segundo o índice de estabilidade visual proposto por Daczko:

TABELA 4 – CLASSIFICAÇÕES DE MISTURAS DE BAC SEGUNDO O *VISUAL STABILITY INDEX* (DACZKO, 2002)

VSI	Crítérios
0 = Altamente estável	Sem indícios de segregação ou exsudação
1 = Estável	Sem indícios de segregação e ligeiros indícios de exsudação manifestados sob a forma de um brilho no topo da amostra
2 = Instável	Surgimento de um anel de argamassa exterior de dimensões reduzidas (≤ 10 mm) e/ou acumulação ligeira de agregado grosso no centro da amostra
3 = Altamente instável	Claros indícios de segregação através do surgimento de um anel exterior de argamassa de dimensões consideráveis (> 10 mm) e/ou nítida acumulação de agregado grosso no centro da amostra

As Figuras 13 e 14 mostram o aspecto de dois ensaios de espalhamento em que a mistura mostra comportamentos bem diferenciados.

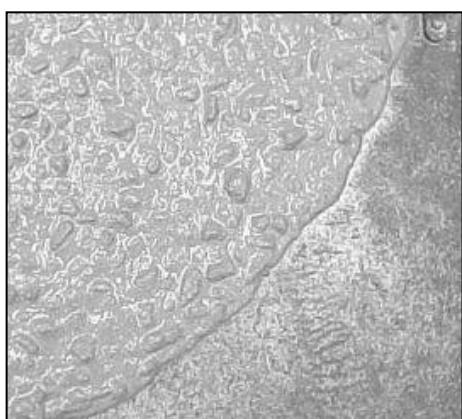


FIGURA 13 – MISTURA DE BAC ESTÁVEL

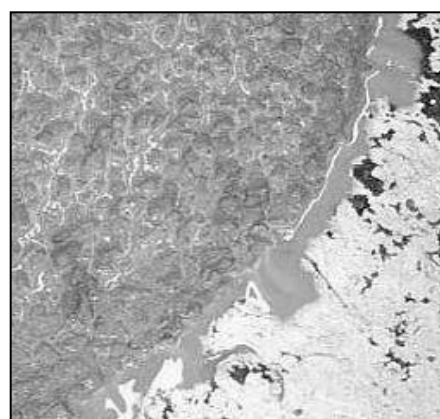


FIGURA 14 – MISTURA DE BAC INSTÁVEL

No entanto, outros autores (Khayat e Assad, 1999) desacreditaram esta classificação, considerando-a inadequada para a aferição da real resistência à segregação de uma mistura de BAC e afirmando a sua incapacidade em substituir um verdadeiro ensaio de segregação, bem como de reflectir os fenómenos de segregação estática da mistura em obra.

4.3.1 – Equipamento de ensaio

Segundo o descrito pela norma Europeia EN 12350-8 (2007), o equipamento necessário para a execução do ensaio de espalhamento é composto por:

- Base com dimensões de pelo menos 900 x 900 mm feita de material impermeável e rígido, marcada com circunferências de diâmetro de 200 e 500mm;
- Cone de Abrams com diâmetros internos superior e inferior de respectivamente 100 e 200 mm e uma altura de 300 mm;
- Cronómetro com precisão de 0.1 s para medição do T_{50} ;
- Régua ou fita métrica graduada em mm;
- Balde com capacidade pelo menos 6 L utilizado no armazenamento da amostra;
- Esponjas humedecedoras e panos de limpeza.

Sendo ainda opcional a utilização de um anel de peso (> 9 kg), utilizado para fixar o cone aquando do seu preenchimento com betão, podendo este ser dispensado caso o peso do cone seja maior que 10 kg.

A Figura 15 ilustra o equipamento que compõe o ensaio de espalhamento, bem como as suas dimensões (em mm).

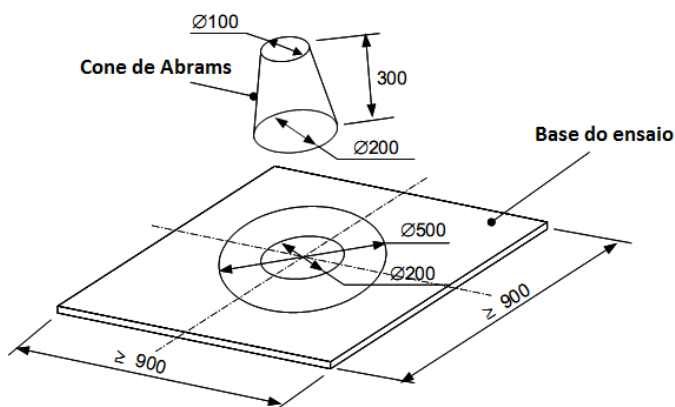


FIGURA 15 – EQUIPAMENTO DO ENSAIO DE ESPALHAMENTO E SUAS DIMENSÕES (EFNARC, 2005)

4.3.2 – Metodologia de ensaio

- Com a base de ensaio devidamente limpa e colocada em local nivelado, procede-se ao enchimento do balde com aproximadamente 6 a 7 L da mistura de BAC a ensaiar, deixando-se depois a mistura a repousar durante cerca de 1 minuto;
- Durante o tempo de espera, pré-humedecer o interior do cone e a base de ensaio, tendo o cuidado de evitar deixar zonas secas, bem como zonas com excesso de água acumulada;
- Colocar o cone de ensaio no centro da circunferência de 200 mm da base e colocar, caso seja necessário, o anel de peso no topo do cone, de forma a mantê-lo no lugar aquando do seu enchimento com a mistura de betão;
- Encher o cone de ensaio com a mistura de betão, sem recurso a qualquer meio de compactação externa. Após o enchimento, qualquer betão em excesso que se encontre quer no topo do cone, quer na base de ensaio deverá ser removido;
- De seguida, o cone deverá ser levantado verticalmente e num movimento contínuo, de maneira a que o betão flua livremente para a base sob acção do próprio peso. A cronometragem deverá começar assim que o cone perder o contacto com a base;
- Quando o espalhamento do betão atingir a circunferência de diâmetro de 500mm, a cronometragem deverá ser parada. O tempo medido pela cronometragem é o valor T_{50} da mistura, arredondado à décima e expresso em s;
- O ensaio termina quando o betão terminar o seu espalhamento. O valor final de espalhamento (S), expresso em mm, é então obtido através da média entre o diâmetro máximo de espalhamento da amostra e o diâmetro perpendicular a esse. (Skarendahl, 2000b).

4.3.3 – Precisão do ensaio

De acordo com ISO 5725, a repetibilidade de um resultado (r) é definida como a diferença entre dois valores consecutivos do ensaio, efectuados pelo mesmo operador com recurso ao mesmo instrumento que deve ser excedido somente uma vez em cada 20 vezes, e a reprodutibilidade (R) é definida como a diferença entre dois valores consecutivos do ensaio, obtidos por operadores diferentes com recurso a instrumentos diferentes que devem ser excedidos somente uma em cada 20 vezes.

Baseado na investigação levada a cabo pelo projecto Europeu “Testing-SCC” em que foram ensaiadas 2 amostras por 16 operadores de 8 laboratórios diferentes, os valores da repetibilidade e reprodutibilidade das medições de espalhamento (S) e T_{50} são os listados na Tabela 5:

TABELA 5 – PRECISÕES DAS MEDIÇÕES DE ESPALHAMENTO S E T_{50} (DE SCHUTTER, 2005)

Espalhamento S (mm)	< 600	600 ~ 750	> 750
Repetibilidade r (mm)	Não Disponível	42	22
Reprodutibilidade R (mm)	Não Disponível	43	28
T_{50} (s)	≤ 3.5	3.5 ~ 6	> 6
Repetibilidade r (s)	0.66	1.18	Não Disponível
Reprodutibilidade R (s)	0.88	1.18	Não Disponível

4.3.4 – Vantagens e desvantagens

Em conclusão do anteriormente exposto, apresentam-se as vantagens e desvantagens do ensaio de espalhamento.

As vantagens do ensaio de espalhamento são as seguintes:

- O ensaio permite a obtenção de uma medida independente da capacidade de enchimento;
- É um ensaio amplamente utilizado, e simples de executar;
- É um ensaio económico e de fácil transporte;
- A amostra necessária para a execução do ensaio é de dimensões reduzidas;
- Os resultados obtidos pelo ensaio são confiáveis e repetíveis;
- Neste ensaio estabelecem-se correlações nítidas entre o espalhamento medido e a tensão de cedência e entre o valor T50 e a viscosidade plástica de uma mistura de BAC;
- O ensaio permite a visualização do processo de fluência do betão.

As desvantagens do ensaio de espalhamento são as seguintes:

- A simples utilização do VSI pode mostrar-se incapaz de assegurar à mistura uma eficiente resistência à segregação;
- Os resultados do ensaio não reflectem todos os aspectos relacionados com a capacidade de enchimento;
- O ensaio deve ser conduzido numa base lisa e nivelada e em condições de humidade que podem não ser facilmente reproduzíveis.

4.4 – Ensaio do Funil em V

Desenvolvido por Okamura *et al.* (Okamura e Ozawa, 1995), o equipamento de ensaio é composto por um funil em forma de V, com uma abertura na sua secção inferior que pode ser aberta ou fechada com o auxílio de uma tampa metálica de contenção. O ensaio consiste no enchimento do funil em forma de V com a amostra de mistura de BAC a ensaiar e, em seguida, na medição do tempo que o betão demora a escoar completamente através do orifício de abertura.

Este ensaio é regido pela norma Europeia EN 12350-9 (2007).

O ensaio do funil em V é utilizado na medição da capacidade de enchimento e é realizável tanto para argamassas como para betão, adoptando-se para cada caso, diferentes dimensões do funil. No caso de misturas de BAC, a secção transversal do funil terá dimensões superiores de 75 mm x 515 mm e inferiores de 75 mm x 65 mm. A altura é de 600 milímetros (450 mm da altura superior + 150 mm da parte inferior). A Figura 16 ilustra a situação do presente ensaio em execução.



FIGURA 16 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE FUNIL EM V

No ensaio do funil em V, considerando que quando o tamanho e a quantidade de agregado grosso presentes na mistura são suficientemente pequenos em relação ao tamanho da abertura inferior do funil, a interação e colisão entre as partículas de maiores dimensões são desprezáveis, neste caso, o tempo de passagem é um indicador da viscosidade plástica e tensão de cedência da mistura. Para fluidos com tensões de cedência muito próximas do zero, os resultados são na sua base função da viscosidade plástica. (Roussel, 2005) Como tal, a um tempo de passagem longo, estará associada uma maior viscosidade plástica da mistura (e portanto, maior resistência à segregação).

Por outro lado, se o tamanho e a quantidade agregado grosso presentes na mistura não forem suficientemente pequenos em relação ao tamanho da abertura inferior do funil, a interação e colisão entre as partículas de maiores dimensões será factor preponderante nas características do fluxo da mistura. Nestas condições, o ensaio de funil em V é útil na avaliação da capacidade de passagem da mistura através de aberturas pequenas pelo facto de que consegue aferir a dificuldade que uma mistura com estas características, apesar da sua elevada viscosidade, pode apresentar ao passar no funil, devido ao predomínio da interação entre as partículas de agregado grosso (fenómenos de bloqueio), da mesma maneira que uma mistura com baixa viscosidade apresenta tempos de passagem elevados. Assim sendo, nestas condições de agregado grosso dominante, é aconselhável a adopção de uma viscosidade moderada na mistura. (Khayat, 1999)

No caso de misturas de BAC, os valores de tempo de passagem recomendados variam entre os 5 e os 10 segundos. Como complemento ao ensaio, a velocidade média de passagem (t_{vm}) poderá ser calculada.

4.4.1 – Equipamento de ensaio

De acordo com a norma Europeia EN 12350-9 (2007), o equipamento necessário para a execução do ensaio de funil em V é composto por:

- Funil em V com as dimensões especificadas pela norma em vigor e com tampa metálica de contenção;

- Cronómetro com precisão de 0.1 s para medição do tempo de passagem t_v ;
- Base de suporte para o funil que irá garantir o nivelamento da amostra de betão;
- Balde com capacidade de 12 a 14 L utilizado no armazenamento da amostra;
- Esponjas humedecedoras e panos de limpeza.

A Figura 17 ilustra o equipamento que compõe o ensaio do funil em V, bem como as suas dimensões (em mm).

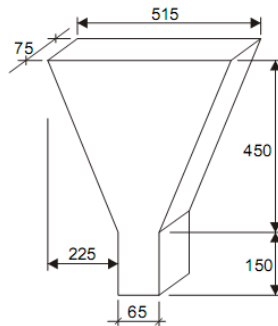


FIGURA 17 – EQUIPAMENTO DE ENSAIO DO FUNIL EM V E SUAS DIMENSÕES (DE SCHUTTER, 2005)

4.4.2 – Metodologia de ensaio

- Colocar o funil em V previamente limpo na base de suporte e humedecer o seu interior com o auxílio da esponja humedecedora, tendo o cuidado de não deixar zonas excessivamente humedecidas.
- Fechar a tampa metálica de contenção e colocar um balde debaixo do funil, balde este que servirá de recipiente para a amostra que escoará pelo funil.
- Encher o funil completamente com a amostra de BAC a ensaiar, sem o auxílio de vibração ou compactação.
- Após um período de repouso de aproximadamente 10 segundos (± 2 segundos), abrir a tampa metálica de contenção e iniciar o cronómetro.
- Através da visualização do escoamento da amostra de betão no interior do funil, parar o cronómetro quando for possível observar uma abertura na extremidade oposta do funil. Este tempo deverá ser anotado como o tempo de passagem t_v .

Como complemento ao ensaio, a velocidade média de passagem (t_{vm}) pode ser calculada com recurso à seguinte fórmula:

$$t_{vm} = \frac{2.05}{t_v} \quad (2.1)$$

onde t_{vm} é a velocidade média de passagem (m/s) e t_v é o tempo de passagem medido (s).

4.4.3 – Precisão do ensaio

A definição de repetibilidade de um resultado (r) e reprodutibilidade (R) de um ensaio é definida como no capítulo 4.3.3 do presente documento.

Baseado na investigação levada a cabo pelo projecto Europeu “Testing-SCC” em que foram ensaiadas 2 amostras por 20 operadores de 10 laboratórios diferentes, apresentam-se de forma resumida os valores da repetibilidade (r) e reprodutibilidade (R) dos resultados de tempo de passagem (t_v) medidos no ensaio do funil em V, listados na Tabela 6:

TABELA 6 – PRECISÃO DO TEMPO DE PASSAGEM T_V MEDIDO NO ENSAIO DO FUNIL V (DE SCHUTTER,2005)

Tempo de passagem t_v (s)	3	5	8	12	≥ 15
Repetibilidade r (mm)	0.4	1.1	2.1	3.4	4.4
Reprodutibilidade R (mm)	0.6	1.6	3.1	5.1	6.6

4.4.4 – Vantagens e desvantagens

Apresentam-se seguidamente as vantagens e desvantagens do ensaio de funil em V.

As vantagens do ensaio de funil em V são as seguintes:

- O ensaio é relativamente simples de executar e os resultados obtidos consistem num único valor, podendo estes ser relacionados com a capacidade de enchimento e, até certo ponto, com a capacidade de passagem e resistência à segregação de uma mistura;
- Para misturas que possam ser consideradas como fluidos homogêneos e sem segregação, os resultados tornam-se função da tensão de cedência e da viscosidade plástica. Para fluidos com tensões de cedência muito próximas do zero, os resultados são na sua base função da viscosidade plástica.

As desvantagens do ensaio de funil em V são as seguintes:

- O ensaio não fornece um valor que seja independente dos parâmetros de capacidade de enchimento, capacidade de passagem ou resistência à segregação de uma mistura de betão;
- O funil é largo, pesado e a sua colocação deverá ser feita num suporte ou superfície nivelada.

4.5 – Ensaio da Caixa em L

Este ensaio teve a sua origem na Suécia e não no Japão, como a maioria dos ensaios desenvolvidos para testar misturas de BAC. É um ensaio que foi escolhido pelo projecto Europeu “Testing-SCC” como o método de referência para a aferição da capacidade de passagem de uma mistura de BAC e ajuda a observar a capacidade de enchimento, a capacidade de passagem, a resistência à segregação e a capacidade de autonivelamento de uma mistura (De Schutter, 2005). É portanto um ensaio muito útil

de onde se podem retirar bastantes dados acerca da amostra que se pretende ensaiar. O ensaio da caixa em L é eficiente na aferição destes parâmetros quando a percentagem de agregado grosso não é muito elevada. (Skarendahl, 2000)

Este ensaio é regido pela norma Europeia EN 12350-10 (2007).

O ensaio consiste no enchimento da secção vertical da caixa em formato de L com a mistura de betão a ensaiar (secção transversal: 200 mm x 100 mm, altura: 600 mm), mantendo fechada a comporta que a liga à secção horizontal da mesma (comprimento: 700 mm). Na junção destas duas secções, existe um portão que poderá ter dois (2) ou três (3) varões colocados, com 12 mm de diâmetro e com uma distância entre eles que deverá ser de 41 ou 59 mm, respectivamente. Após a abertura da comporta, o betão deverá fluir para a secção horizontal do aparelho de ensaio.

A primeira medida a retirar do ensaio é o tempo que a mistura demora a atingir os 20 cm e 40 cm da secção horizontal, medidos a partir do portão de entrada (denominados T_{20} e T_{40}). Estes valores estarão, de certo modo, relacionados com a viscosidade plástica da mistura, embora Nielsson e Wallevik (2003) tenham considerado dispersos os resultados obtidos no seu estudo que visava o estabelecimento desta correlação.

Finalmente é medida a altura atingida pela mistura após o escoamento, quer no início, quer no fim da secção. A relação entre estes dois valores é denominada de coeficiente de passagem, valor este que deverá ser superior a 0,80. (De Schutter, 2005)

4.5.1 – Equipamento de ensaio

De acordo com a norma Europeia EN 12350-10 (2007), o equipamento necessário para a execução do ensaio da caixa em L é composto por:

- Caixa em L com as dimensões especificadas pela norma em vigor, juntamente com os portões de duas (2) ou três (3) barras que serão utilizados no ensaio;
- Nível de bolha que irá garantir o nivelamento da caixa;
- Balde que irá conter a amostra a ensaiar (aproximadamente 12,7 L).

A Figura 18 ilustra o equipamento que compõe o ensaio da caixa em L, bem como as suas dimensões (em mm).

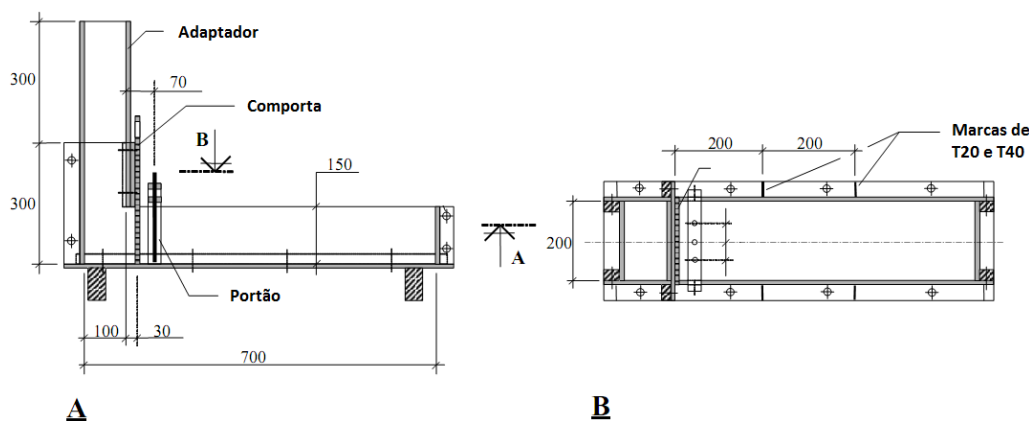


FIGURA 18 – CORTE EM PERFIL (A) E EM PLANTA (B) DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO DA CAIXA EM L (DE SCHUTTER, 2005)

4.5.2 – Metodologia de ensaio

- Após a colocação do aparelho de ensaio de forma estável e nivelada e com a comporta deslizante fechada, procede-se ao enchimento da parte vertical da caixa com a mistura de betão (aproximadamente 12,7 L).
- De modo a aferir estabilidade da mistura, esta deverá ser deixada em repouso durante aproximadamente 1 minuto na secção vertical da caixa. Ao fim deste tempo, a mistura mostrará indícios de presença ou ausência de segregação.
- Seguidamente, procede-se ao levantamento da comporta deslizante, deixando a mistura de betão contida na secção vertical da caixa fluir para a secção horizontal da mesma, através dos varões. O cronómetro é iniciado em simultâneo com a abertura da comporta.
- Anotar os tempos em que ocorre o espalhamento da mistura às marcas de 20 e 40 cm. Estes tempos serão denominados respectivamente T_{20} e T_{40} .
- Quando a mistura de betão cessar o escoamento, medir a altura atingida pela mistura de betão, no início e final da secção horizontal da caixa (respectivamente H_1 e H_2). Esta medida deverá ser feita segundo uma média em três posições, uma central e duas laterais.

O coeficiente de passagem (P_L) ou coeficiente de bloqueio (B_L) da mistura será aferido com recurso às seguintes equações e deverá ser arredondado por excesso, à centésima. (EFNARC, 2005)

$$P_L = \frac{H_2}{H_1} \quad (2.2)$$

ou

$$B_L = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (2.3)$$

onde P_L é o coeficiente de passagem, ou B_L é o coeficiente de bloqueio, H_1 é altura atingida pela mistura de betão no início da secção horizontal da caixa (mm) e H_2 é a altura atingida pela mistura de betão no final da secção horizontal da caixa (mm).

4.5.3 – Precisão do ensaio

A definição de repetibilidade de um resultado (r) e reprodutibilidade (R) de um ensaio é definida como no capítulo 4.3.3 do presente documento.

Baseado na investigação levada a cabo pelo projecto Europeu “Testing-SCC”, em que foram ensaiadas 2 amostras, por 22 operadores, de 11 laboratórios diferentes, apresentam-se de forma resumida os valores da repetibilidade (r) e reprodutibilidade (R) dos resultados de coeficiente de passagem (P_L) ou coeficiente de bloqueio (B_L) medidos no ensaio da caixa em L, listados na Tabela 7:

TABELA 7 – PRECISÕES DOS COEFICIENTES DE PASSAGEM P_L E COEFICIENTE DE BLOQUEIO B_L MEDIDOS NO ENSAIO DA CAIXA EM L (DE SCHUTTER, 2005)

Coefficiente de passagem P_L	1	0.9	0.8	0.7	< 0.65
Coefficiente de bloqueio B_L	0	0.1	0.2	0.3	> 0.35
Repetibilidade r	0.01	0.06	0.10	0.15	0.18
Reprodutibilidade R	0.03	0.07	0.11	0.16	0.18

4.5.4 – Vantagens e desvantagens

Em conclusão do anteriormente exposto, apresentam-se as vantagens e desvantagens do ensaio da caixa em L.

As vantagens do ensaio da caixa em L são as seguintes:

- O ensaio permite a fácil visualização da forma como o betão irá fluir na peça a betonar;
- A quantidade de betão utilizado no ensaio e que por acção do seu peso próprio irá forçar a sua passagem através das barras é bastante representativa em relação ao que se passa em obra;
- Existe uma relação próxima entre os resultados obtidos em laboratório e o observado em obra.

As desvantagens do ensaio da caixa em L são as seguintes:

- Embora este ensaio seja utilizado na aferição da capacidade de passagem e da capacidade de enchimento, os resultados obtidos não permitem uma distinção entre os dois;
- O material que compõe o ensaio é de tamanho considerável, tornando-o de difícil transporte. Acresce que o equipamento de ensaio é também de difícil limpeza. Deste modo, o ensaio da caixa em L torna-se pouco adequado para ensaios em obra;
- Os critérios de selecção para o uso dos portões com dois (2) ou três (3) varões não estão bem estabelecidos;
- A aferição dos coeficiente de passagem e bloqueio requerem duas medições e três cálculos separados. Uma medição única para obtenção do resultado final não é possível;
- É necessário um volume considerável de betão para executar o ensaio.

4.6 – Ensaio de Segregação

O ensaio de segregação, desenvolvido pela *GTM Construction*, visa quantificar a resistência à segregação de uma mistura de betão, através da medição da porção de mistura que passa através de um peneiro de 5 mm. No caso de uma mistura que passa facilmente através do peneiro, conclui-se que a mistura terá uma fraca resistência à segregação estática e vice-versa. Como tal, a proporção de mistura peneirada é indicadora da estabilidade da mistura. (EFNARC, 2002)

Este ensaio é regido pela norma Europeia EN 12350-11 (2007).

De forma sucinta, para a execução do ensaio, uma amostra de betão (aprox. 10L) é vertida para um balde selado e posta em repouso durante 15 mins a fim de permitir a ocorrência de segregação. Nesta situação, qualquer segregação que ocorra será de ordem estática, cujo resultado será a migração do

agregado grosso para o fundo do balde, tornando assim as propriedades da mistura no topo do balde mais aproximadas com as de uma argamassa.

Seguidamente uma porção dessa parte superior da amostra é recolhida e vertida a cerca de 500 mm de altura para um peneiro de 5 mm.

A amostra é deixada a peneirar durante 2 minutos e, findo esse tempo, é feito o quociente entre a amostra que passou o peneiro e o total de amostra peneirada, ou coeficiente de segregação (SR). (De Schutter, 2005)

A Figura 19 ilustra a execução do ensaio de segregação.



FIGURA 19 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE SEGREGAÇÃO.

A quantidade de mistura que atravessa o peneiro depende em certa medida da sua resistência à segregação dinâmica, dado que uma mistura mais viscosa terá maior dificuldade em atravessar o peneiro. Como tal, uma vez que esta análise é efectuada numa porção resultante da segregação da mistura original de betão, após o período de 15 minutos dentro do balde, os resultados do ensaio podem não reflectir adequadamente as condições em obra, em que o betão é vertido de forma contínua. Como tal, em prol de uma melhor aferição em termos da resistência à segregação dinâmica da mistura em causa, alguns autores mostraram-se a favor da adopção de um tempo de espera inferior a 15 minutos.

Alguns estudos indicaram uma inconstância nos resultados obtidos com este ensaio (Bartos *et al.*, 2002) e De Schutter, Sonebi e Cussigh encontraram correlações entre os resultados deste ensaio e do ensaio de penetração (Cussigh *et al.*, 2003)

O ensaio de segregação foi recomendado pelo projecto Europeu “Testing-SCC” como um ensaio de referência para a medição da resistência à segregação de uma mistura. (De Schutter, 2005)

4.6.1 – Equipamento de ensaio

De acordo com o previsto pela norma Europeia EN 12350-11 (2007), o equipamento necessário para a execução do ensaio de segregação é composto por:

- Peneiro de malha quadrada de 5 mm, diâmetro de 300 mm ou 315 mm e altura de 40 mm ou 75 mm;
- Tigela metálica facilmente acoplável/desacoplável ao peneiro;
- Balança digital calibrável com precisão de ± 20 g e capacidade total de 10 kg;
- Balde com tampa e capacidade de 10 a 12 L utilizado no armazenamento da amostra.

4.6.2 – Metodologia de ensaio

- O ensaio é iniciado com a colocação da balança num local nivelado seguida da sua calibração.
- Proceder-se então à pesagem da tigela metálica que acompanha o peneiro. Este peso será denominado de W_P .
- O balde é então enchido com a mistura de betão a ensaiar $10 \pm 0,5$ L, coberto com a tampa de modo a evitar a evaporação e deixado em repouso durante aproximadamente $15 \pm 0,5$ mins.
- Durante o tempo de repouso, procede-se ao *reset* da balança com o peso da tigela metálica acoplada ao peneiro.
- Após o tempo de repouso, deverá efectuar-se uma inspeção visual do topo da amostra a fim de detectar indícios de exsudação resultantes da segregação da mistura e anotar a sua presença, se for caso disso.
- Com o peneiro e a tigela metálica acoplados e em cima da balança, verter aproximadamente $4,8 \pm 0,2$ kg da mistura de betão situada no topo do balde, para o peneiro, a partir de uma altura de 50 ± 5 cm.
- Anotar o peso mostrado na balança. Este peso será denominado de W_C .
- Dois minutos após serem vertidos os 4,8 kg de mistura, remover sem movimentos bruscos a tigela metálica, de modo a evitar a passagem forçada de mais material pelo peneiro.
- Pesar a tigela com os materiais peneirados. Este peso será denominado de W_{PS} .

O coeficiente de segregação (SR) ou a percentagem de mistura que passa pelo peneiro, será calculado através da seguinte fórmula (SR arredondado por excesso, à unidade):

$$SR = \frac{W_{PS} - W_P}{W_C} * 100 \quad (2.4)$$

onde W_{PS} é o peso da tigela metálica com o material peneirado em kg, W_P é o peso da tigela metálica, em kg e W_C é o peso da tigela metálica com o peneiro e a amostra de betão vertida, em kg.

4.6.3 – Precisão do ensaio

A definição de repetibilidade de um resultado (r) e reprodutibilidade (R) de um ensaio é definida como no capítulo 4.3.3 do presente documento.

Baseado na investigação levada a cabo pelo projecto Europeu “Testing-SCC”, em que foram ensaiadas 2 amostras, por 22 operadores, de 11 laboratórios diferentes, apresentam-se os valores da repetibilidade (r) e reprodutibilidade (R) dos resultados de coeficiente de segregação (SR) medidos no ensaio de segregação, listados na Tabela 8:

TABELA 8 – PRECISÕES DO COEFICIENTE DE SEGREGAÇÃO MEDIDO NO ENSAIO DE SEGREGAÇÃO (DE SCHUTTER, 2005)

Coefficiente de segregação SR (%)	≤ 20	> 20
Repetibilidade r (%)	3.7	10.9
Reprodutibilidade R (%)	3.7	10.9

4.6.4 – Vantagens e desvantagens

Em conclusão do anteriormente exposto, apresentam-se as vantagens e desvantagens do ensaio de segregação.

As vantagens do ensaio de segregação são as seguintes:

- O ensaio permite uma medição da resistência à segregação independente dos outros parâmetros reológicos que caracterizam uma mistura de BAC;
- Se bem que algo moroso, o ensaio é relativamente fácil de executar.

As desvantagens do ensaio de segregação são as seguintes:

- O ensaio leva demasiado tempo a ser executado o que o torna pouco adequado para ensaios em obra;
- O ensaio não é capaz de aferir com exactidão a resistência à segregação dinâmica de uma mistura.

4.7 – Ensaio do Anel J

O ensaio do anel J tem como objectivo a aferição da capacidade de enchimento e capacidade de passagem de uma mistura de BAC. Tal como no ensaio da caixa em L, este simula o escoamento de uma mistura de BAC através das armaduras, com a diferença de neste ensaio estarmos perante uma simulação de condições de não-confinamento.

Este ensaio pode também ser utilizado para obter uma ideia acerca da resistência à segregação, através da comparação dos resultados obtidos em duas amostras da mesma mistura.

A norma Europeia em vigor para o ensaio do anel J é a EN 12350-12 (2007).

O anel metálico que compõe o equipamento de ensaio é normalmente utilizado em conjunto com outros ensaios, tais como o ensaio de espalhamento ou ensaio de funil em V, por forma a acrescentar aos ensaios referidos a componente que visa simular as armaduras presentes nas peças a betonar (EFNARC, 2002).

Os parâmetros medidos neste ensaio são o diâmetro final de espalhamento, o valor de T_{50J} que corresponde ao tempo que a mistura leva a espalhar-se até um diâmetro de 50cm quando aplicado o anel J e finalmente o desnível devido ao bloqueio que consiste na diferença entre as alturas de betão atingidas nas secções interior e exterior do anel. A Figura 20 ilustra o aspecto final do ensaio do anel J.



FIGURA 20 – ASPECTO FINAL DO ENSAIO DO ANEL J

Para além do estipulado pela norma, e tal como foi efectuado no ensaio de espalhamento, Daczko sugeriu a utilização de um sistema de classificação do bloqueio observado (VBI – *Visual Blocking Index*), apresentado na Tabela 9. (Daczko, 2003) Este baseia-se na observação da disposição final da mistura na zona dos varões do anel.

TABELA 9 – CLASSIFICAÇÕES DE MISTURAS DE BAC, SEGUNDO O VBI (DACZKO, 2003)

VBI	Descrição
0	Sem vestígios de bloqueio, o que resultaria numa quantidade superior de agregado grosso na zona interior do anel. Sem vestígios de segregação na zona exterior do anel.
1	É visível uma pequena acumulação de agregado grosso na zona interior do anel e ligeiros vestígios de segregação na zona exterior do anel.
2	Claramente visível uma grande acumulação de agregado grosso na zona interior do anel bem como vestígios significativos de segregação na zona exterior do anel.
3	Bloqueio significativo da mistura na zona interior do anel, o que normalmente dá origem a valores de escoamento significativamente reduzidos.

O trabalho desenvolvido por Daczko levou-o a concluir que o ensaio do anel J distinguia de maneira mais ilustrativa a capacidade que a mistura de betão tem em fluir através de obstáculos do que o ensaio da caixa em L e sugeriu a utilização de valores de espalhamento para este ensaio no controlo de qualidade das misturas. (Daczko, 2003)

4.7.1 – Equipamento de ensaio

De acordo com a norma Europeia EN 12350-12 (2007), o equipamento necessário para a execução do ensaio do anel J é composto por:

- Todos os equipamentos mencionados para o ensaio de espalhamento (Capítulo 4.3.1);
- O anel J com as dimensões em mm ilustradas pela Figura 21.

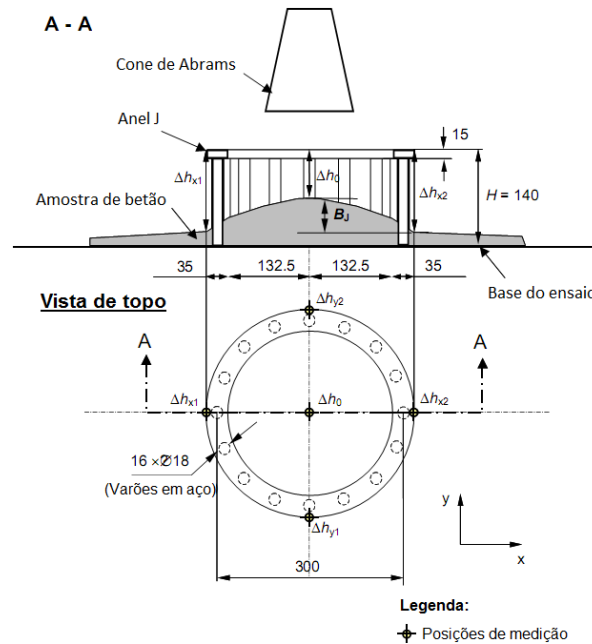


FIGURA 21 – EQUIPAMENTO DO ENSAIO DO ANEL J E SUAS DIMENSÕES (DE SCHUTTER, 2005)

4.7.2 – Metodologia de ensaio

- O ensaio do anel J requer outro equipamento suplementar na sua execução (cone de Abrams, funil em V, entre outros), o método de ensaio será iniciado com a colocação do anel em cima da base de ensaio, que deverá estar limpa e nivelada, seguindo-se a colocação do equipamento de ensaio suplementar no centro do anel.
- A preparação da mistura será feita de acordo com os passos adoptados no capítulos referentes ao equipamento suplementar que se esteja a ser utilizado.
- Quando for iniciado o escoamento do betão, iniciar a contagem do tempo com o auxílio do cronómetro.
- O cronómetro deverá ser parado quando a mistura atingir um diâmetro de 500mm, o que corresponderá ao valor T_{50J} que deverá ser expresso em segundos e arredondado por excesso à décima.
- O ensaio é dado como terminado assim que o escoamento do betão cessar.
- De seguida, medem-se as diferenças entre a altura atingida pelo betão no centro do anel e a altura do próprio anel (Δh_0), bem como a altura atingida pelo betão na zona exterior imediatamente a seguir ao anel, em quatro posições. Duas segundo um eixo horizontal (Δh_{x1} , Δh_{x2}) e duas segundo um eixo vertical (Δh_{y1} , Δh_{y2}), marcadas na Figura 21.

Finalmente é medido o máximo diâmetro de escoamento observável (d_{max}) e o diâmetro perpendicular a este (d_{perp}). O espalhamento no anel J (S_j) é obtido pela média dos diâmetros d_{max} e d_{perp} sendo arredondado ao múltiplo de 5 mm mais próximo.

$$S_j = \frac{d_{max} + d_{perp}}{2} \quad (2.5)$$

onde d_{max} é o máximo diâmetro de espalhamento da amostra (mm) e d_{perp} é o diâmetro perpendicular ao máximo diâmetro de espalhamento da amostra (mm).

O desnível de bloqueio (B_j) é calculado com recurso à seguinte expressão cujo valor deverá ser arredondado ao milímetro, por excesso:

$$B_j = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0 \quad (2.6)$$

4.7.3 – Precisão do ensaio

A repetibilidade de um resultado (r) e a reprodutibilidade (R) de um ensaio são definidas de acordo com o descrito no capítulo 4.3.3 do presente documento.

Baseado na investigação levada a cabo pelo projecto Europeu “Testing-SCC”, em que foram ensaiadas 2 amostras, por 16 operadores, de 8 laboratórios diferentes, apresentam-se os valores da repetibilidade (r) e reprodutibilidade (R) dos resultados de espalhamento (S_j), T_{50j} e desnível de bloqueio (B_j), medidos no ensaio do anel J, listados na Tabela 10:

TABELA 10 – PRECISÕES DO ESPALHAMENTO (S_j) E T_{50j} E DESNÍVEL DE BLOQUEIO (B_j), MEDIDOS NO ENSAIO DO ANEL J (DE SCHUTTER, 2005)

Espalhamento no anel J S_j (mm)	< 600	600 ~ 750	> 750
Repetibilidade r (mm)	59	46	25
Reprodutibilidade R (mm)	67	46	31
Tempo de escoamento T_{50j} (s)	≤ 3.5	3.5 ~ 6	> 6
Repetibilidade r (s)	0.70	1.23	4.34
Reprodutibilidade R (s)	0.90	1.32	4.34
Desnível de bloqueio B_j (mm)	≤ 20		> 20
Repetibilidade r (mm)	4.6		7.8
Reprodutibilidade R (mm)	4.9		7.8

4.7.4 – Vantagens e desvantagens

Para concluir o anteriormente exposto, apresentam-se as vantagens e desvantagens do ensaio do anel J.

As vantagens do ensaio do anel J são as seguintes:

- Este ensaio mede de maneira independente a capacidade de passagem de uma mistura, ao invés do ensaio da caixa em L que, na obtenção dos resultados não distingue a capacidade de passagem, da capacidade de enchimento de uma mistura;
- O ensaio representa adequadamente as condições encontradas em obra e distingue adequadamente misturas com diferentes graus de capacidade de passagem;
- O equipamento é de baixo custo e pode ser facilmente transportável para a obra.

As desvantagens do ensaio do anel J são as seguintes:

- A relação entre os resultados obtidos neste ensaio e o comportamento da mistura em obra ainda não está bem estabelecida;
- A quantidade de betão utilizada no ensaio e que, por acção do seu peso próprio irá forçar a sua passagem através das barras é menos representativa em relação à quantidade de betão que é utilizada em obra, do que no que diz respeito ao caso do ensaio da caixa em L. No entanto, no caso do ensaio do anel J, ao considerarmos a incidência de um menor peso próprio, estamos perante uma situação mais conservativa.
- A utilização de apenas uma configuração de barras, pode levar à obtenção de valores de capacidade de passagem demasiado favoráveis para situações em que o ensaio não espelha tão adequadamente a realidade, como por exemplo, em misturas que venham a ser utilizadas em secções de elevado congestionamento.

4.8 – Relação entre parâmetros de *Bingham* e os ensaios

O facto de os viscosímetros serem equipamentos muito dispendiosos e poucos expeditos resulta na sua parca utilização em obra. No entanto, em laboratório, o seu uso no estudo da reometria das composições de betão é frequente, tendo em vista quantificação das tensões de cedência e viscosidades plásticas das misturas.

Nesse sentido, foram desenvolvidos esforços por diversos autores, que tiveram como objectivo o relacionamento dos resultados obtidos nos ensaios reométricos, com os resultados obtidos ensaios utilizados em obra.

O presente capítulo resume os resultados obtidos nesses estudos.

4.8.1 – Ensaio de espalhamento:

4.8.1.1 – Abordagens teóricas:

4.8.1.1.1 – Tanigawa *et al.*:

Várias tentativas de relacionar a tensão de cedência e a viscosidade com o espalhamento do betão têm sido efectuadas. Tanigawa *et al.* (1992) foram pioneiros no desenvolvimento de métodos analíticos para a avaliação do comportamento do betão quando submetidos ao ensaio de espalhamento e estabeleceram uma relação entre o espalhamento e a tensão de cedência. Para o desenvolvimento desta relação, não só consideraram que o betão se comporta como um fluido de *Bingham* mas também que as tensões verticais presentes desenvolviam-se segundo a acção do próprio peso do betão, sendo as tensões nas outras direcções, desprezáveis.

A relação proposta é apresentada na seguinte equação:

$$\tau_0 = \frac{\alpha \rho g (H - S_1)}{\sqrt{3}} = 3.30 \rho (H - S_1) \quad (2.7)$$

onde τ_0 é a tensão de cedência, ρ (kg/m^3) é a massa volúmica, g (m/s^2) é a constante de aceleração da gravidade, α é um factor que descreve a geometria do betão e que toma valores entre 7 e 12, H (m) é a altura do cone de ensaio e S_1 (m) é o espalhamento obtido no betão.

4.8.1.1.2 – Chidiac *et al.*:

De modo a ultrapassar a limitação de valores imposta pelo factor descritivo da geometria do betão utilizado na relação proposta por Tanigawa *et al.* (1992), Chidiac *et al.* (2000) propuseram a seguinte relação:

$$\tau_0 = \frac{4gV}{\sqrt{3}\pi S_f^2} \rho = 39.7 \times 10^{-3} \frac{\rho}{S_f^2} \quad (2.8)$$

onde τ_0 é a tensão de cedência, ρ (kg/m^3) é a massa volúmica, S_f (m) é o espalhamento obtido no betão e V (m^3) é o volume do cone de ensaio.

4.8.1.1.3 – Schowalter e Christensen:

Uma relação alternativa foi apresentada por Schowalter e Christensen (2006). Para o desenvolvimento desta relação os autores consideraram que as tensões de corte no betão seriam aproximadamente metade das tensões normais e que o betão não se deforma ou flui, a não ser que ceda. Para o seu modelo analítico, consideraram que o betão era composto por uma camada superior que não se espalha ou cede e que a camada inferior estaria sujeita a deformação. A altura da camada superior seria dada pela cota a que a tensão de corte seria igual à tensão de cedência.

Isto levou à seguinte relação:

$$\tau_0 = \frac{\rho g(0.3 - h_0 - S_1)}{2 \ln \left(\frac{7}{\left(1 + \frac{h_0}{0.3}\right)^3 - 1} \right)} \quad (2.9)$$

onde τ_0 é a tensão de cedência, ρ (kg/m^3) é a massa volúmica, g (m/s^2) é a constante de aceleração da gravidade, S_1 (m) é o espalhamento obtido no betão e h_0 (m) é a altura da camada superior indeformável, cujo valor pode ser encontrado iterativamente através da seguinte equação:

$$\tau_0 = 0.075\rho g \left(\left(1 + \frac{h_0}{0.3}\right) - \frac{1}{\left(1 + \frac{h_0}{0.3}\right)} \right) \quad (2.10)$$

4.8.1.1.4 – Chidiac e Habibbeigi:

Através da utilização de modelos de métodos de elementos finitos, Chidiac e Habibbeigi (2005) simularam o espalhamento do betão durante um ensaio de espalhamento e chegaram à relação:

$$\tau_0 = 0.3635\rho g(H - S_1) = 3.56\rho(0.3 - S_1) \quad (2.11)$$

onde τ_0 é a tensão de cedência, ρ (kg/m^3) é a massa volúmica, g (m/s^2) é a constante de aceleração da gravidade, S_1 (m) é o espalhamento obtido no betão e H (m) é a altura do cone de ensaio.

4.8.1.2 – Abordagens empíricas:

4.8.1.2.1 – Hu *et al.*:

Várias abordagens empíricas têm sido desenvolvidas na análise da relação entre os parâmetros de *Bingham* e o espalhamento do betão. Através da utilização de regressões nos resultados dos ensaios efectuados, vários investigadores foram capazes de chegar a relações entre espalhamento e tensão de cedência. Hu *et al.* (1996) propõem:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{0.27}(0.3 - S_1) = 3.70\rho(0.3 - S_1) \quad (2.12)$$

onde τ_0 é a tensão de cedência, ρ (kg/m^3) é a massa volúmica e S_1 (m) é o espalhamento obtido no betão.

4.8.1.2.2 – Ferraris e de Larrard:

Uma revisão desta da expressão matemática apresentada por Hu *et al.* foi efectuada por Ferraris e de Larrard (1998) através do recurso à análise de uma amostragem maior.

A expressão apresentada foi a seguinte:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{0.347}(0.3 - S_1) + 212 = 2.88\rho(0.3 - S_1) + 212 \quad (2.13)$$

onde τ_0 é a tensão de cedência, ρ (kg/m³) é a massa volúmica e S_1 (m) é o espalhamento obtido no betão.

4.8.1.2.3 – Murata e Kikukawa:

Uma terceira equação empírica obtida através da análise de medições efectuadas num viscosímetro coaxial foi apresentada por Murata e Kikukawa (1992):

$$\tau_0 = 715 - 474 \log(10S_1) \quad (2.14)$$

onde S_1 (m) é o espalhamento obtido no betão.

4.8.2 – Ensaio da caixa em L:

4.8.2.1 – Abordagens teóricas:

4.8.2.1.1 – Nguyen *et al.*:

Nesta abordagem teórica desenvolvida por Nguyen *et al.* (2006), foi considerada a ausência de heterogeneidade na mistura decorrente do escoamento.

Foi demonstrado que perante um procedimento de ensaio em que o portão de alimentação do betão é levantado num movimento contínuo, o escoamento do betão é regido por efeitos de inércia, estando no entanto os resultados sempre dependentes do operador e da velocidade de abertura do portão.

São apresentadas duas equações decorrentes desta abordagem teórica, uma para a situação de ensaio sem varões e outra para a situação de ensaio com varões.

Para a situação de ensaio sem varões:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{2h_{avg} - (h_1 - h_2)}{2h_{avg} + (h_1 - h_2)} \cong \frac{\rho g - 84\tau_0}{\rho g + 84\tau_0} \quad (2.15)$$

Para a situação de ensaio com varões:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{2h_{avg} - (h_1 - h_2)}{2h_{avg} + (h_1 - h_2)} \cong \frac{\rho g - 100\tau_0}{\rho g + 100\tau_0} \quad (2.16)$$

onde h_1 (m) é a altura atingida pelo betão secção vertical da caixa, h_2 (m) é a altura de betão atingida no final da secção horizontal da caixa, h_{avg} (m) é a altura média entre h_1 e h_2 (m), ρ (kg/m^3) é a massa volúmica, g (m/s^2) é a constante de aceleração da gravidade.

4.8.3 – Outras abordagens

4.8.3.1 – de Larrard:

Neste modelo semi-empírico, de Larrard (2000) considerou a divisão do conjunto granular tendo em vista a maximização do volume ocupado. Através do estudo de uma amostra de medições efectuadas com recurso a um réómetro BTRHEOM, de Larrard propôs a seguinte expressão matemática:

$$\tau_0 = \exp\left(2,537 + \sum_i [0,736 - 0,216 \log(d_i)] K'_i + \left[0,224 + 0,910 \left(1 - \frac{S_p}{S_p^*}\right)^3\right] K'_c\right) \quad (2.17)$$

onde d_i corresponde à dimensão média da fracção i dos agregados; K'_i é o índice de compactação parcial referente à fracção i ; S_p e S_p^* são, respectivamente, as dosagens de extracto seco do superplastificante e dosagem de saturação, relativas à dosagem de cimento; K'_c é o índice de compactação do cimento.

Para casos de diferentes materiais finos utilizados, de Larrard propôs:

$$\tau_0 = \exp\left(0,154 + \sum_i [0,736 - 0,216 \log(d_i)] K'_i + \left[1,1039 + 0,2326 \left(1 - \frac{S_p}{S_p^*}\right)^3\right] \sum_f K'_f\right) \quad (2.18)$$

onde K'_f são os índices de compactação dos diferentes materiais finos utilizados (cimento, filer e finos das areias).

4.8.3.2 – Zhuguo Li:

Tendo como base a teoria de Eyring sobre gases, Li (2001) propôs um modelo que considera os materiais cimentícios como um conjunto de partículas coesivas (cimento) e não coesivas (agregados), estando estas envolvidas por uma membrana de água. A expressão matemática proposta é a seguinte:

$$\gamma = \frac{2k_B T}{h} \cdot N_c \cdot \Lambda_{cm} \cdot e^{\frac{E_c}{k_B T}} \cdot \sinh\left\{\frac{(V_c + V_{wc})\Lambda_{cm}}{2k_B T \cdot N_c} \cdot [\tau - (\sigma_n + N \cdot F_w) \cdot \tan \theta_m]\right\} \quad (2.19)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann (JK^{-1}), T é a temperatura absoluta (K), h é a constante de Planck (J.s), N_c é o número de partículas de cimento por unidade de área (m^{-2}), Λ_{cm} é a distância média das partículas de cimento em movimento (m), E_c é a energia potencial média de restrição das partículas

(J), V_c é o volume de cimento por unidade de volume (m^3/m^3), V_{wc} é o volume da membrana de água de espessura constante que envolve as partículas de cimento (m^3/m^3), F_w é a força de corte média necessária para vencer a resistência individual das partículas (N), τ é a tensão de corte aplicada, σ_n é a tensão normal (N/m^2), N é o número de partículas por unidade de secção de corte (m^{-2}), e θ_m é o ângulo de atrito interno médio.

4.8.3.3 – Robert Flatt:

Nesta abordagem levada a cabo por Flatt (2006), foi considerado um modelo teórico de disposição de partículas que contabilizou as forças de superfície que se dão entre as partículas de cimento e SP. A relação proposta foi a seguinte:

$$\tau_0 = m_1 \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{\varphi_m(\varphi_m - \varphi)} \quad (2.20)$$

onde φ é o teor de sólidos, φ_m é o máximo teor de sólidos possível, φ_0 é o teor de sólidos limite para que se dê o escoamento, e m_1 um factor que é função da distribuição granulométrica e das forças de superfície entre partículas.

4.9 – Conclusões

A fim de avaliar os parâmetros de autocompactabilidade do betão no seu estado fresco, foram desenvolvidos vários ensaios, dos quais se destacam pela sua maior utilização, o ensaio de espalhamento, o ensaio do funil em V, a caixa em L, o ensaio de segregação e o ensaio do anel J. Alguns destes ensaios, como o ensaio de espalhamento e o ensaio do funil em V, mostraram boas correlações com os parâmetros reológicos (tensão de cedência e viscosidade plástica) em condições de escoamento onde não ocorram fenómenos de segregação e bloqueio. Importa referir que a avaliação dos parâmetros reológicos a partir dos ensaios de espalhamento e fluidez deve ser entendida como relativa, mesmo estando perante o caso de uma mistura que demonstre ausência de fenómenos de segregação e bloqueio, já que a velocidade do escoamento no ensaio do funil em V é afectada pela capacidade de deformação no ensaio de espalhamento, para misturas com igual viscosidade. O ensaio do anel J mostra ser eficiente na aferição da capacidade de enchimento e capacidade de passagem de uma mistura de BAC simulando o escoamento de uma mistura de betão através de armaduras sob condições de não-confinamento. Este ensaio pode também ser utilizado para obter uma ideia acerca da resistência à segregação, através da comparação dos resultados obtidos em duas amostras da mesma mistura.

No que diz respeito aos modelos de relação entre os parâmetros de *Bingham* e os ensaios em obra, o presente capítulo apresentou de forma resumida, diversas expressões matemáticas que se consideram ser eficazes na previsão dos valores de tensão de cedência e viscosidade plástica de misturas de betão.

CAPÍTULO 5 – COMPOSIÇÃO DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

5.1 – Objectivo

O presente capítulo tem como objectivo o estudo das composições do BAC que deverão ser definidas de forma a satisfazer um conjunto de requisitos, nomeadamente, autocompactabilidade, resistência e durabilidade. A conciliação das diferentes exigências e desempenho no estudo da composição dos BAC quer no estado fresco, quer no estado endurecido, é manifestamente mais complexa comparativamente com os BC, exigindo o controlo de um leque mais alargado de variáveis. Serão, assim, apresentados os vários tipos de composições possíveis de utilizar numa mistura de BAC. Serão, também, abordados os vários métodos de cálculo de misturas propostos por diversos autores bem como recomendações de carácter geral propostas para a obtenção de um BAC.

5.2 – Introdução

No Capítulo 3, vimos que uma mistura de BAC no estado fresco deve cumprir três requisitos:

- Capacidade de enchimento (preenchimento de todos os espaços das cofragens);
- Resistência à segregação (a mistura permanece coesa e homogénea sob condições estáticas e dinâmicas);
- Capacidade de passagem (habilidade para ultrapassar obstáculos e zonas de congestionamento de armaduras).

Tais exigências de trabalhabilidade têm como consequência a necessidade de projectar misturas com um alto volume de pasta, o que pode promover problemas relacionados com mudanças de volume no estado endurecido, como a contracção por secagem (*shrinkage*) ou a fluência (*creep*).

Por outro lado, a diversidade de componentes disponíveis no mercado (adições minerais, agregado britado ou rolado, diferentes tipos de aditivos SP, AMV, cimentos compostos, entre outros) podem tornar o doseamento de misturas numa tarefa complexa.

Ao limitar-se o volume de agregado grosso obtém-se a redução da quantidade de colisões entre partículas, o que aliado ao consequente aumento do volume de pasta irá garantir à mistura a necessária capacidade de passagem. Por outro lado, uma baixa razão A/F juntamente com a utilização de um aditivo SP irá contribuir para o aumento da resistência à segregação e fluidez da mistura. A dosagem de misturas de BAC poderá recorrer à utilização de AMV, no entanto, tal não é considerado nesta metodologia geral.

A Figura 22 esquematiza a metodologia geral adoptada na obtenção dos requisitos de autocompactabilidade citados.

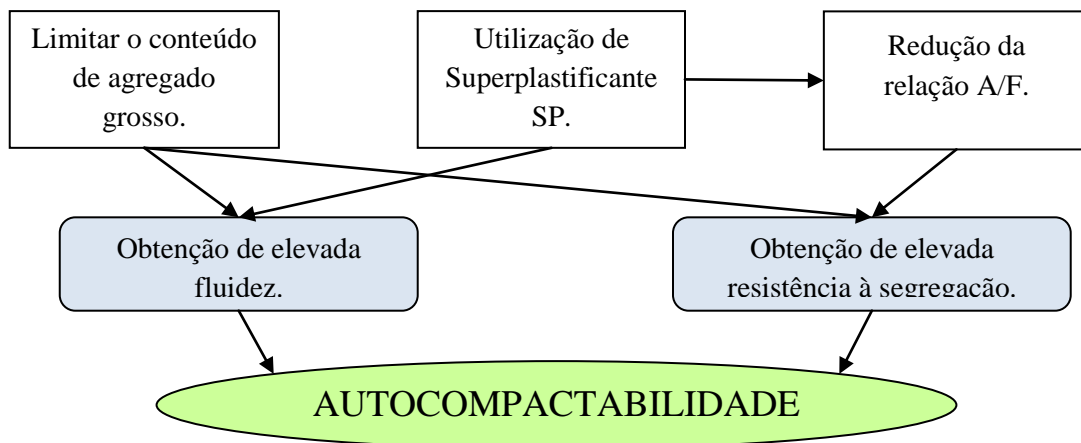


FIGURA 22 – METODOLOGIA GERAL PARA A OBTENÇÃO DE UM BAC (SKARENDAHL, 2000A)

Vários métodos de doseamento de misturas têm vindo a ser desenvolvidos, mas devem ser destacadas duas diferenças fundamentais que os distinguem do doseamento de misturas de BC (Skarendahl, 2000a):

1. O primeiro factor a ter em conta nos doseamentos de misturas de BAC é o objectivo de alcançar propriedades satisfatórias do ponto de vista da autocompactabilidade. Esta condição influencia o volume de pasta e por vezes também a razão A/F. Em geral, a resistência destes betões no estado endurecido é suficiente para a maior parte das exigências estruturais, no entanto, caso tal não aconteça, a composição da mistura pode ser optimizada pela adequada combinação dos diferentes tipos de materiais finos, como o cimento, as cinzas volantes, escória, fíler calcário, entre outros;
2. A avaliação da interacção entre os diferentes materiais componentes da mistura é uma tarefa complexa. Por esse motivo, regra geral, torna-se necessária a realização um estudo prévio sobre as fases pasta e argamassa, de forma a reduzir à raiz, a quantidade futura de ensaios a realizar sobre a mistura.

A Figura 23 ilustra as diferenças entre a composição de uma mistura de BAC e de uma mistura de BC.

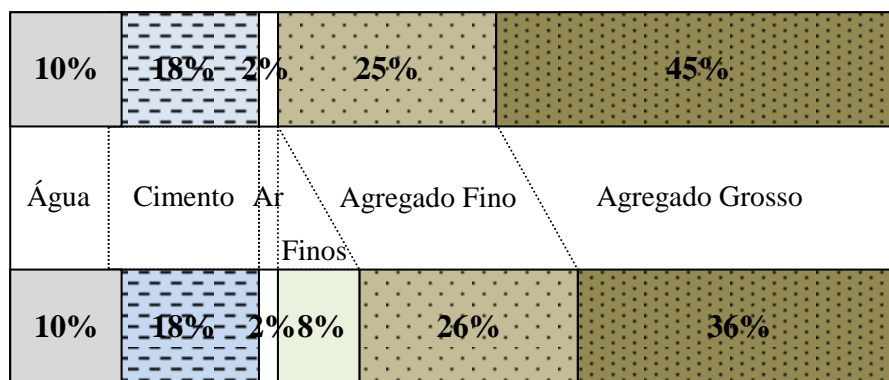


FIGURA 23 COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE UM B C VERSUS BAC

Da análise da Figura 23 conclui-se que o BAC apresenta uma maior percentagem de finos em detrimento da redução da percentagem de agregados, principalmente do agregado grosso.

Os diferentes tipos de composições existentes podem ser classificados da seguinte forma (Nawa *et al.*, 1998):

- Composições do tipo finos, onde a estabilidade é obtida com recurso a elevado teor em finos;
- Composições do tipo AMV, onde a estabilidade é obtida com recurso a com utilização de AMV;
- Composições do tipo combinado, onde a estabilidade é obtida com recurso tanto a alto teor em finos como também a AMV.

Em cada um destes tipos de composições podem constatar-se as seguintes observações:

1. Composições do tipo finos: Utilização de um maior teor em finos, mantendo o volume de pasta constante, donde resultarão uma tensão de cedência e viscosidade plástica maiores. Tal poderá ser contrariado através da utilização de superplastificantes (SP), podendo ser possível baixar a tensão de cedência até valores próximos dos nulos, mantendo-se no entanto, o mesmo valor de viscosidade.

Com recurso à recta que ilustra o modelo de *Bingham* (Capítulo 3 do presente texto), poderemos visualizar a metodologia anteriormente proposta como a obtenção de uma recta de elevado declive e ordenada na origem (respectivamente viscosidade e tensão de cedência altas pelo recurso a uma composição com maior teor de finos) ao que se sucede um abaixar da recta (utilização de SP) para valores de ordenadas próximos da origem (tensões de cedência quase nulas), mantendo no entanto o mesmo declive (ou seja, a mesma viscosidade da mistura).

Estes tipos de BAC apresentam em geral elevada resistência e durabilidade;

2. Composições do tipo AMV: A característica mais óbvia neste tipo de betões é a sua elevada fluidez, mesmo utilizando baixos teores de finos, o que favorece a homogeneidade da mistura;
3. Composições do tipo combinado: Este tipo de composições é mais utilizado no caso de ser necessário prevenir problemas provenientes da alteração das características reológicas dos betões devidas por exemplo a variações no teor de humidade dos agregados. Tal é conseguido através da utilização de pequenas quantidades de AMV em composições do tipo de finos.

Seguidamente, serão apresentados os métodos de doseamento mais difundidos, considerando-se, no entanto, que o aprofundamento de cada um deles, é um objectivo que ultrapassa o âmbito do presente documento, aconselhando-se para esse efeito a consulta da referência bibliográfica disponibilizada.

5.3 – Metodologia de Doseamento de Composições

5.3.1 – Método de Okamura e Ozawa

Este método foi desenvolvido na universidade de Tóquio e é conhecido como sendo o Método Geral para a composição de uma mistura de BAC. Trata-se de um método que se executa “passo-a-passo” e cuja aplicação é de relativa simplicidade (Okamura e Ozawa, 1995).

O método considera que uma mistura de BAC é composta por duas fases (argamassa e agregados), é válido para agregado grosso de dimensões entre 5 e 20 mm e recorre à utilização de adições para o alcance da viscosidade (sem a utilização de AMV). Para o desenvolvimento de uma mistura são utilizados cimentos de baixo calor de hidratação (baixo teor em C_3A e C_4AF) e também cimentos ricos em silicato bicálcico (C_2S), dado que estes não só favorecem a acção dispersante dos SP como também têm influência positiva em determinadas propriedades do betão, tais como: redução do calor gerado durante o processo de cura, obtenção de maiores resistências, redução da contracção proveniente da secagem, entre outras.

Este método estabelece que o volume de sólidos da mistura será composto por 50% de agregado grosso e que o volume de argamassa será composto por 40% de agregado fino (não considerando a percentagem de ar).

O volume de finos (partículas de dimensões inferiores a 0,09 mm), água e adições são determinados ao nível da argamassa em quantidades que garantam o parâmetro de viscosidade necessária e uma mistura de elevada fluidez (medidas respectivamente com o ensaio do funil em V e com o ensaio de espalhamento).

Trata-se de um método geral e simples, com resultados fiáveis que evitam o risco de bloqueio devido à obtenção de misturas com um elevado volume de pasta mas que, no entanto, podem ser misturas pouco económicas nas quais poderão ocorrer problemas de fissuração.

5.3.2 – Método de Edamatsu *et al.*

Este método deriva do método anterior e especifica a composição do agregado fino (fixo em 40% do volume de argamassa, tal como no método geral) com diferentes tipos de areias e materiais finos (cimento e adições) (Edamatsu *et al.*, 1999).

A avaliação da relação argamassa/agregado far-se-á com recurso ao ensaio do funil em V e ensaio de espalhamento para argamassas utilizando na mistura, esferas de vidro de 10 mm de diâmetro no papel do agregado grosso (25% de volume).

A relação entre as velocidades de escoamento da argamassa com e sem os 25% de volume em esferas de vidro fornece uma boa correlação com a altura de enchimento medida nos ensaios da caixa em U. Este coeficiente (denominado R_{mb}/R_m) é um bom indicador da interacção argamassa/agregado, sendo que pode ser adoptada uma altura de enchimento específica no ensaio da caixa em U como base para o desenvolvimento da mistura.

Este método estabelece ainda as relações entre o coeficiente R_{mb}/R_m e o volume de agregado fino da argamassa, contendo diferentes tipos de finos. Assim, torna-se possível seleccionar uma relação volume de agregado/volume de argamassa (normalmente com valores superiores a 0,4) adequada para atingir o objectivo de autocompactabilidade da mistura.

5.3.3 – Método de Ouchi *et al.*

É também um método derivado do método geral de Okamura. Nele é proposto um procedimento mais racional para a determinação da razão A/F e da dose de SP a utilizar. Cada parâmetro é determinado de forma independente, minimizando assim o número de ensaios (Ouchi *et al.*, 1997).

Neste método de doseamento são também utilizados os ensaios de espalhamento e funil em V para argamassas cujos resultados são expressos em Γ_m (área de espalhamento relativa) e em R_m (tempo de escoamento relativo).

No desenvolvimento do método, foi realizada uma grande quantidade de ensaios a fim de estabelecer uma relação entre os parâmetros citados, dos quais se concluiu:

- A existência de uma relação linear com o eixo das ordenadas para qualquer valor da relação superplastificante/finos (SP/F);
- A existência de uma relação do tipo $R_m = A * \Gamma_m^{0.4}$ para qualquer valor da razão A/F em volume.

Concluiu-se também a existência de apenas uma relação de A/F e SP/F para qualquer combinação específica de R_m e Γ_m . Deste modo, adoptando os valores propostos por Okamura e Ozawa no seu método geral para os parâmetros acima citados (respectivamente 1 para o R_m e 5 para o Γ_m), podem então ser obtidos os valores de doseamento das relações A/F e SP/F recorrendo a uma menor quantidade de ensaios.

Não existem indicações sobre a validade deste método para misturas que contenham AMV na sua composição.

5.3.4 – Método de Petersson *et al.*

A diferença mais importante em relação aos métodos, baseados no método geral de Okamura consiste na forma como é determinado o volume de pasta (ou inversamente, o volume de agregados). O objectivo principal deste método é a obtenção de misturas mais eficientes em termos do seu volume (Petersson e Billberg, 1999).

Neste método, considera-se que o betão é composto por duas fases: uma fase sólida (agregados finos e grossos) e uma fase líquida (cimento, adições, SP, água e ar).

O método é baseado no trabalho desenvolvido por Tangtrensirikul e Bui (1995) onde, através da utilização do ensaio da caixa em L, é encontrado o volume mínimo de pasta necessário para que se

obtenha uma capacidade de passagem adequada, sem que ocorram fenómenos de bloqueio. Ou por outras palavras, avaliando qual o volume de agregado causador do bloqueio.

Torna-se então possível determinar a quantidade mínima de pasta (ou inversamente, volume máximo de agregados) que é preciso aplicar, quer para cada relação agregado grosso/agregado total, através da utilização de curvas experimentais obtidas, quer para o caso de utilização de agregado grosso britado ou rolado. Normalmente, a relação agregado grosso/agregado total, em massa, toma valores muito próximos ou mesmo iguais ao mínimo índice de vazios dos agregados.

O critério baseia-se na consideração da soma das contribuições dos diferentes tamanhos das partículas constituintes do agregado para o bloqueio da mistura, quando esta flui através das armaduras.

O risco de bloqueio é então determinado pela soma das relações de volume de cada fracção de agregado (ou seja, o volume de agregado de cada fracção por volume de betão), dividida pela relação de volume de bloqueio (isto é, o volume de agregado causador do bloqueio por volume de betão). Esta relação deverá ser menor ou igual a um, para que não ocorra bloqueio.

O volume de finos, água e SP são ajustados para que se atinja um valor específico de resistência e de modo a obter uma viscosidade moderada e uma baixa tensão de cedência (valores que serão medidos com recurso a um viscosímetro coaxial) numa argamassa contendo partículas de dimensões inferiores a 250 µm.

Para a avaliação do comportamento da mistura calculada a partir dos critérios mencionados, o método propõe o ensaio de espalhamento e o ensaio da caixa em L.

Este método não fornece recomendações para a concepção de misturas que recorram a AMV.

5.3.5 – Método de Bui e Montgomery

Tal como o método de Petersson *et al.*, este método é baseado na determinação de uma quantidade mínima de pasta, com a diferença de neste método se utilizarem dois critérios, em vez de um. (Bui e Montgomery, 1999)

O primeiro critério a seguir será a determinação do volume mínimo de pasta (ou o máximo volume de agregado), baseando-se na avaliação do bloqueio da mistura, numa abordagem semelhante ao método de Petersson *et al.* Este primeiro critério irá então definir a fase sólida da mistura (agregado grosso e fino).

O segundo critério determina o volume mínimo de pasta necessário para que se atinja a deformabilidade pretendida (espalhamento), sem que ocorra segregação. Este segundo critério irá assim definir a fase líquida da mistura (incluindo o cimento, adições, água, aditivos e ar).

Finalmente, a determinação do volume de pasta será efectuada com recurso a uma fórmula resultante dos doseamentos volumétricos atrás referidos, considerando ainda a hipótese de que todas as partículas apresentam forma esférica. Neste cálculo é possível obter o volume mínimo de pasta que é necessário aplicar para garantir propriedades de autocompactabilidade à mistura, propriedades essas que serão depois avaliadas segundo os ensaios de espalhamento e penetração.

No caso do volume de pasta obtido pelos cálculos ser superior a 420 l/m^3 , deverá então ser utilizado um valor superior de máxima dimensão de agregados.

5.3.6 – Método de Gomes *et al.*

Este método é baseado na separação dos processos de otimização da composição da pasta e otimização do esqueleto granular do agregado. Como nos casos anteriores, a pasta será constituída por água, cimento, adições, SP e ar, enquanto que o esqueleto granular será constituído por areia e agregado grosso. (Gomes *et al.*, 2002)

A composição da pasta é estudada através da utilização do cone de Marsh, a fim de aferir a dose de saturação de SP a utilizar e através da utilização do mini cone de Abrams para determinar a dosagem de fíler.

Dado que este método é indicado para obtenção de dosagens de betões de alta resistência, é utilizada sílica de fumo na sua composição (10% da massa do cimento), bem como uma relação de A/L inferior a 0,40 (dependendo da resistência que seja necessária garantir no estado endurecido).

A composição do esqueleto granular é determinada pela relação areia/agregado grosso da mistura, seguindo um critério que visa a máxima compacidade no estado seco, sem que se recorra a compactação.

Uma vez determinada a composição da pasta e a relação areia/agregado grosso, é então determinada a quantidade ideal de pasta (em volume) necessária para atender às exigências de autocompatibilidade requeridas.

5.3.7 – Método de Sedran e De Larrard

Este método utiliza um *software* que possibilita a otimização do esqueleto granular através da simulação numérica de diferentes composições, tendo por base o Modelo de Compacidade Compressível, proposto por De Larrard. (Sedran e de Larrard, 1999)

O modelo determina a densidade virtual de compacidade, definida como a máxima densidade que é possível obter em determinado esqueleto granular quando este é solicitado por uma energia infinita de compactação. O betão é considerado uma suspensão de sólidos e como tal, torna-se possível obter uma previsão de certas propriedades da mistura no estado fresco, tais como a tensão de cedência, a viscosidade, o espalhamento máximo, entre outras.

O método é válido para cimentos do tipo *standard* e para misturas que não recorram à utilização de AMV.

5.3.8 – Método de Saak *et al.*

A teoria que suporta este método sugere que a reologia de pasta de cimento têm influência principalmente na resistência à segregação e trabalhabilidade da mistura de BAC, quando considerada determinada granulometria e volume de agregados. (Saak *et al.*, 2001)

O método é baseado no controle da segregação das partículas constituintes da matriz cimentícia, segundo condições estáticas e dinâmicas.

Para este efeito, recorre-se a uma análise das forças que actuam sobre uma partícula sob condições estáticas e dinâmicas. As forças envolvidas no sistema são a força da gravidade, a impulsão e a força necessária para estabelecer o equilíbrio de forças. Com base nesta análise é realizado o estudo reológico de diferentes tipos de pastas e é determinada a denominada Zona de Autofluidez (Self-Flow Zone) caracterizada pela densidade, tensão de cedência e viscosidade da pasta. Esta zona fornece assim os valores críticos dos parâmetros acima descritos, tornando-se possível evitar a segregação da mistura para o tipo e distribuição de agregados que se queira usar.

A validade dos resultados obtidos por este método é avaliada com recurso ao ensaio da caixa em U.

5.4 – Recomendações de carácter geral

5.4.1 – Recomendações propostas pela RILEM

A experiência mostra que existe uma ampla gama de composições de misturas capazes de produzir um BAC de comportamento satisfatório. No entanto, o Comité Técnico 174-SCC da RILEM (*Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux*) recomenda a adopção dos seguintes valores de dosagem: (Skarendahl, 2000a)

- O volume de agregado grosso deverá situar-se entre os 30 a 34% do volume de betão;
- A razão A/F, em volume, deverá situar-se entre os 0,8 e 1,2. Sendo que misturas que na sua composição contenham AMV, deverão adoptar valores de uma zona superior do intervalo referido;
- O volume de água deverá variar entre os 155 e os 175 l/m³ para o caso de misturas que não recorram a AMV e entre 175 a 200 l/m³ no caso de misturas que recorram a AMV;
- O volume de pasta deverá corresponder entre 34 a 40% do volume de betão;
- O volume de agregados finos deverá corresponder entre 40 a 50% do volume de argamassa.

Em termos de massas, os valores recomendados são os seguintes:

- Agregado grosso, entre 750 a 920 kg/m³;
- Agregado fino, entre 710 a 900 kg/m³;
- Finos, entre 450 a 600 kg/m³;
- Água, entre 150 a 200 kg/m³.

A Tabela 11 apresenta, de uma forma sucinta, as recomendações do Comité Técnico 174-SCC da RILEM para obter uma mistura de BAC.

TABELA 11 – RECOMENDAÇÕES DO COMITÉ TÉCNICO 174-SCC DA RILEM (SKARENDAHL, 2000A)

Parâmetro / Composição	Valores recomendados
Total de finos (kg/m ³)	450 – 600
Total de agregado grosso (kg/m ³)	750 – 920
Total de agregado fino (kg/m ³)	710 – 900
Dosagem de água (kg/m ³)	155 – 200
Volume de agregado grosso (%)	30 – 34
Volume de agregado fino	*
Razão água/finos em massa	*
Razão água/finos em volume	0.8 – 1.2
Volume de pasta (%)	34 – 40
Razão agregado fino/argamassa (%)	40 – 50

5.4.2 – Recomendações do “European Project Group of SCC”

De forma análoga, a associação europeia de investigação do “European Group Project of Self-Compacting Concrete” sugere intervalos de valores de dosagem para cada componente constituintes de uma mistura de BAC.

A Tabela 12 apresenta os valores recomendados pela EPG-SCC.

TABELA 12 – RECOMENDAÇÕES DO EPG SCC (EPG SCC, 2005)

Componente	Massa (kg/m ³)	Volume (l/m ³)
Finos (pó)	380 – 600	*
Pasta	*	300 – 380
Água	150 – 210	150 – 210
Agregado grosso	750 – 1000	270 – 360
Agregado fino	Deverá equilibrar o volume dos outros materiais constituintes, normalmente 48% – 55% do peso total do agregado	
Água/finos	*	0.85 – 1.10

5.5 – Conclusões

Vários métodos têm sido propostos para o cálculo de composições de BAC, variando desde os mais simples até aos mais complicados e sofisticados modelos de previsão do comportamento do betão no estado fresco. Os diferentes métodos avaliados neste capítulo correspondem em geral aos métodos

mais divulgados. No entanto, outras tantas propostas ou contributos de outros autores poderiam também ser referidas, ainda que se acredite que os métodos escolhidos sejam os mais representativos e ilustrem satisfatoriamente o estado actual do conhecimento nesta área.

CAPÍTULO 6 – APLICAÇÕES DO BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

6.1 – Objectivo

O presente capítulo tem como objectivo resumir a evolução das directrizes respeitantes à tecnologia do BAC, importantes na sua adequada definição, aplicação e fabrico. Para além do relato evolutivo destas directrizes, este capítulo irá resumir as classificações dos parâmetros de trabalhabilidade por elas propostos, relacionando-as com as possíveis aplicações do BAC na execução de estruturas.

6.2 – Introdução

A utilização do BAC teve o seu início na década de 90 no Japão. A principal razão para a utilização deste tipo de misturas de betão surgiu da necessidade de evitar inconvenientes associados à dificuldade de acesso do betão em determinadas zonas das cofragens, zonas onde se torna difícil a execução da compactação do betão, problemas de bloqueio em zonas de maior congestionamento de armaduras ou betonagem de elementos estruturais de formas complexas.

A sua utilização estendeu-se a outros países durante a década de 90 (nomeadamente Suécia e França), principalmente devido aos benefícios que a utilização de BAC apresenta no aumento da produtividade, redução dos custos totais (de mão-de-obra, equipamentos, entre outros), bem como nas melhorias do ambiente de trabalho (através da redução de ruído, vibrações, poeiras, entre outros). Além disso, a qualidade de acabamento das superfícies obtida no produto final, bem como a obtenção de peças mais homogéneas e a melhoria das propriedades no estado endurecido (resistência e durabilidade) ajudaram à crescente implementação desta tecnologia de construção, como uma alternativa válida aos métodos convencionais (Goodier, 2003).

No início da década de 2000, a utilização desta tecnologia foi alargada a outros países da Ásia, Europa e América.

6.3 – Evolução das Directrizes Europeias

Como foi visto atrás, a utilização do BAC tem vindo a crescer rapidamente em toda a Europa desde meados da década de 90. Como resultado disto, têm vindo a surgir na Europa várias directrizes para a sua obtenção, utilização e classificação.

A primeira edição de directrizes europeias foi redigida em 2002 pela EFNARC tendo esta sido baseada nos mais recentes resultados de pesquisas e vasta experiência prática reunidos até então (EFNARC, 2002).

Um dos objectivos desta directriz era a definição clara de quais eram as propriedades-chave do BAC (capacidade de enchimento, capacidade de passagem e resistência à segregação), algo que até à data ainda não tinha sido efectuado de forma definitiva, tendo ainda sido especificados os requisitos a ter em conta na escolha dos materiais constituintes e nas aplicações práticas do BAC.

No que respeita às adições a utilizar na mistura concluiu-se que, para além das cinzas volantes, se poderiam também utilizar outros materiais como sílica de fumo, brita fina ou vidro, o que incentivou outros estudos sobre diferentes tipos de adições possíveis de utilizar no BAC. A directriz acrescentou ainda informação sobre a utilização de fibras de aço ou polímeros na composição das misturas, o que alargou ainda mais o espectro de aplicação dos BAC.

O documento redigido forneceu ainda métodos de ensaio e critérios de aceitação para as misturas de BAC, cujo tamanho máximo de agregado fosse até aos 20 mm e que apresentassem um espalhamento na faixa dos 650 aos 800 mm. Estes valores-padrão definidos, resultariam na obtenção de misturas com maior fluidez do que as utilizadas no Japão. De facto, quando comparadas com as misturas desenvolvidas no Japão, as misturas de BAC europeias apresentam tipicamente, índices mais elevados de agregado fino e menor conteúdo em pó.

Alguns dos ensaios desenvolvidos nos estágios iniciais de desenvolvimento do BAC, como por exemplo, o ensaio da caixa em U e o ensaio de Fill-Box foram descritos nas directrizes. Entretanto, estes ensaios têm vindo a cair em desuso, sendo substituídos ou por combinações de diferentes tipos de ensaios correntes, ou por outros aparelhos e métodos de ensaio mais expeditos e/ou precisos ou que apresentem uma maior correlação com o comportamento real de uma mistura em obra.

Para o ensaio de segregação foram recomendados valores de 5 a 15%. Foram também recomendadas tolerâncias para os ensaios (por exemplo ± 50 mm para o ensaio de espalhamento). Estes valores foram, no entanto, obtidos com base na experiência adquirida e não através de dados precisos.

A directriz não especificava métodos de composição de misturas, referindo apenas o método geral Japonês de Okamura e Ozawa, juntamente com intervalos típicos de proporções constituintes da composição.

A segunda edição das directrizes foi editada em 2005, sendo esta uma actualização do documento anteriormente existente (EFNARC, 2005).

Neste documento, o estado da arte foi actualizado, tendo sido fornecida informação destinada a produtores, utilizadores e compradores.

Com base no acréscimo de informação proveniente dos vários estudos levados a cabo até à data e também do aumento da experiência adquirida no uso desta tecnologia, as directrizes definiram o BAC de forma mais adequada, classificando as suas várias propriedades, propondo métodos de ensaio (abrindo assim o caminho para a implementação de normas que regulassem os processos), forneceram informação adicional sobre os materiais constituintes e as suas propriedades e recomendaram valores de aceitação para vários tipos de aplicação.

Por conseguinte, estas directrizes têm vindo a ser gradualmente aceites por muitos países fora da Europa.

6.4 – Classificação do BAC

Segundo a (European Group Project of Self-Compacting Concrete – EPG SCC), autora das directrizes Europeias “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use” (2005), a classificação das diferentes misturas de BAC poderá ser feita de acordo com a Tabela 13.

TABELA 13 – CLASSIFICAÇÃO EUROPEIA PROPOSTA PELA EFNARC (EFNARC, 2005)

Propriedade	Classe				
Capacidade de enchimento	SF1	Espalhamento (mm)		550 a 650	
	SF2			660 a 750	
	SF3			760 a 850	
	VS1/VF1	T ₅₀ (s)	≤ 2	Tempo de passagem no Funil em V (s)	≤ 8
	VS2/VF2		> 2		9 a 25
Capacidade de Passagem	PA1	Coeficiente de bloqueio na caixa em L	≥ 0.80 (com 2 barras)	Desnível de bloqueio no Anel J (mm)	B _J ≤ 15 (com 59 mm de espaçamento entre barras)
	PA2		≥ 0.80 (com 3 barras)		B _J ≤ 15 (com 41 mm de espaçamento entre barras)
Resistência à segregação	SR1	Coeficiente de segregação (%)		≤ 20	
	SR2			≤ 15	

Na tabela anterior, a capacidade de deformação do BAC está dividida em três classes de espalhamento, SF1, SF2 e SF3, que dizem respeito respectivamente a capacidades de enchimento baixas, médias e altas. (EFNARC, 2005)

- A classe SF1 é um requisito mínimo para uma mistura se considerar um BAC. Misturas de espalhamentos inferiores a 600 mm podem exigir vibração aquando da sua aplicação;
- Misturas de classe SF2 são adequadas para a maioria das aplicações práticas. Estudos efectuados indicam que quase metade das misturas de BAC aplicadas são de classe SF1, enquanto 35% são de classe SF2;
- A classe SF3 diz respeito a misturas que geralmente fluem com bastante facilidade e através de longas distâncias. Este tipo de misturas pode ser exigido nos casos em que seja necessária a betonagem de elementos estruturais que apresentem formas complexas ou com grande percentagem de armadura. Deve ser dada especial atenção à avaliação da capacidade de passagem e resistência à segregação de um betão desta classe, de forma a garantir a sua homogeneidade.

A velocidade de deformação de uma mistura de BAC é dividida em duas classes:

- T_{50} no ensaio de espalhamento ≤ 2 s ou tempo de passagem no funil em $V(t_v) \leq 8$ s, cujos valores são indicadores de misturas que apresentam uma alta velocidade de deformação;
- $T_{50} > 2$ s ou T_v entre 9 a 25 s, indicando uma baixa ou moderada velocidade de deformação da mistura.

A gama típica de valores de T_{50} e T_v são 2 a 5s e 5 a 12s, respectivamente. Note-se que a consideração de que na mistura não ocorre segregação é um pré-requisito para a medição destes valores.

Como foi visto no Capítulo 4, a capacidade de passagem de um BAC pode ser avaliada através do coeficiente de bloqueio no ensaio da caixa em L (B_L). O valor mínimo de B_L recomendado é de 0,80.

- Misturas em que se obtenha um valor de $B_L \geq 0,80$ quando se recorre à utilização de um ensaio com 2 barras, têm uma capacidade de passagem adequada para aplicações carácter geral, com pouco ou nenhuma percentagem de armadura;
- Misturas com a $B_L \geq 0,80$ quando se recorre à utilização de um ensaio com 3 barras são adequadas para a betonagem de elementos estruturais que contenham elevada percentagem de armaduras ou secções de passagem reduzidas.

A capacidade de passagem é também classificada pelo desnível de bloqueio obtido no ensaio do anel J (B_J):

- Valores de B_J entre 1 a 10 mm, indicam misturas com baixo risco de bloqueio. Estas misturas de BAC são adequadas para estruturas com elevada percentagem de armadura;
- Valores de B_J na faixa dos 10 a 20 milímetros indicam um risco moderado a elevado de bloqueio da mistura. Estas misturas de BAC são adequadas para estruturas baixa percentagem de armadura.

A gama típica de valores de B_L e B_J são de 0,85 a 0,95 e 3 a 20 mm, respectivamente.

O coeficiente de segregação (SR) de uma mistura de BAC foi dividido em duas classes:

- Misturas com $SR \leq 15$ apresentam uma boa resistência à segregação estática;
- Misturas com $SR \leq 20$ apresentam uma resistência suficiente à segregação estática. A gama típica de valores de SR é de 10 a 20%. Uma mistura que apresente $SR < 5\%$ terá uma viscosidade demasiado elevada para ser considerada autocompactável.

6.5 – Aplicação do BAC

As principais aplicações do BAC podem ser resumidas da seguinte forma (Walraven, 2003):

- Zonas de elevado risco sísmico;
- Reabilitação em áreas de difícil acesso e secções congestionadas;
- Pré-fabricação;
- Elementos de construção vertical (paredes estruturais ou não, pilares, entre outros);
- Elementos de fundação, muros e lajes;
- Pontes;
- Túneis;
- Barragens;
- Paredes de diafragma;
- Tanques.

A Figura 24, apresenta exemplos de aplicações nos elementos estruturais em relação às classes abordadas no Capítulo 4.

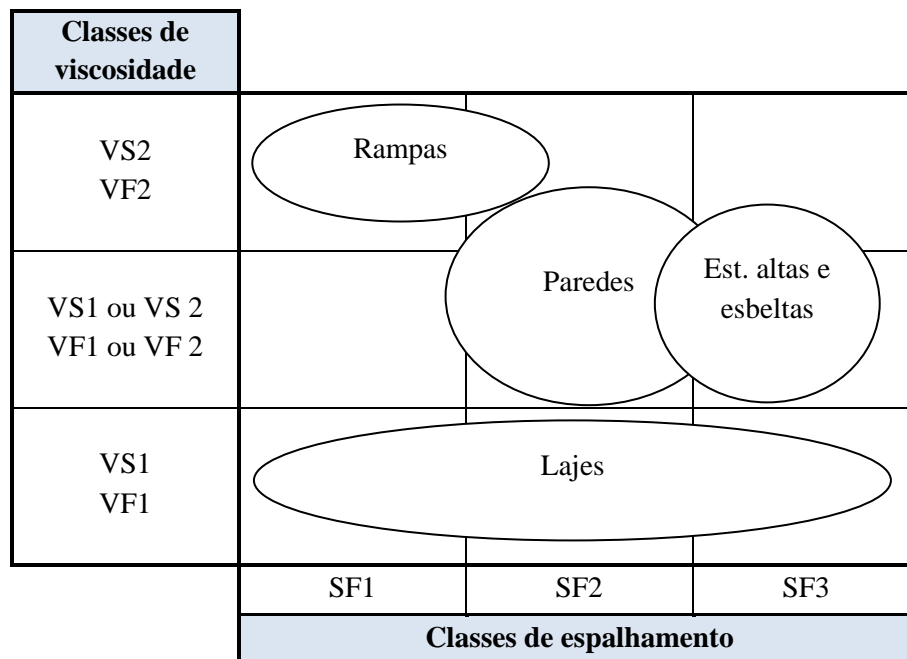


FIGURA 24 – APLICAÇÃO DO BAC EM RELAÇÃO À CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS (WALRAVEN, 2003)

6.6 – Conclusões

As composições dos BAC dependem em larga medida da aplicação, no que se refere ao elemento a betonar e ao processo de betonagem. Com efeito, as exigências para as propriedades no estado endurecido, a capacidade de enchimento, a resistência à segregação e a habilitação para fluir por espaços estreitos dependerão da aplicação. Por outro lado, o tipo de materiais disponíveis e os métodos de estudo dos betões são muito diversos, pelo que conduzem a diferentes composições.

A crescente utilização do BAC e o acréscimo de informação daí proveniente levou à execução de directrizes que durante muito tempo nortearam os processos de fabrico e aplicação. A existência destas directrizes permitiu regrar a utilização desta tecnologia de construção, reunindo, assim, informação consistente através da experiência adquirida. Esta informação culminou mais tarde na implementação de normas que hoje em dia regulam os processos.

A classificação dos parâmetros de trabalhabilidade proposta pela “European Group Project of Self-Compacting Concrete – EPG SCC” enquadra os valores obtidos pelos ensaios mais correntes da tecnologia dos BAC em classes próprias. Estas classes são ainda relacionadas com o vasto leque de aplicações do BAC, podendo ser facilmente relacionado o tipo de estrutura a construir com o ensaio mais adequado a efectuar ao betão que se pretenda utilizar.

CAPÍTULO 7 – INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES

7.1 – Objectivo

O presente capítulo tem como objectivo o levantamento dos efeitos dos materiais constituintes do BAC, no seu comportamento reológico. Na tecnologia do BAC, a aferição dos efeitos que os materiais constituintes podem ter na reologia do betão toma especial importância pois, embora se possam utilizar os mesmos materiais utilizados no BC a especificidade do BAC exige um maior cuidado no doseamento das misturas. Através do conhecimento do papel que cada material toma na reologia dos betões é possível ainda conseguir a optimização das dosagens, permitindo uma redução nos custos, ao mesmo tempo que se conseguem obter misturas mais eficientes. A eficiente caracterização dos efeitos reológicos provocados pelos materiais constituintes poderá ainda abrir caminho a novos métodos de cálculo de dosagens, podendo no futuro culminar em métodos capazes de projectar, em laboratório, dosagens de betão com determinados parâmetros de autocompactabilidade, destinados a aplicações específicas para determinados elementos estruturais, ou seja, apresentando uma fórmula para um determinado tipo de aplicação.

Neste capítulo serão apresentados os tipos de materiais mais comumente utilizados na tecnologia dos BAC, resumindo brevemente o seu processo de fabrico e composição química. Será também feita a definição do papel de cada material constituinte na composição do betão e serão apresentados e explicados os processos de interacção desenvolvidos por cada material constituinte.

7.2 – Materiais Finos

Os materiais finos têm efeitos mais pronunciados no BAC do que no BC, devido ao seu maior conteúdo. É importante utilizar os materiais finos adequados para atingir as propriedades do betão necessárias, quer no estado fresco, quer no estado endurecido.

Estes materiais incluem todas as partículas finas do betão, nomeadamente os cimentos (simples ou compostos) e as adições (quase inertes ou pozolânicas). Em alguns casos são também contabilizados como materiais finos as partículas finas, abaixo de determinado diâmetro de malha de peneiro, partículas essas que são transportadas pelos agregados, em especial pelos agregados finos (Skarendahl, 2000a). Assim, a definição de material fino poderá variar de país para país, dependendo parcialmente das diferenças nas dimensões dos peneiros. Enquanto que na Europa o tamanho máximo das partículas consideradas como finos é de 0,075 ou 0,125 mm, no Japão esse tamanho máximo é de 0,090 mm (Billberg, 1999; EFNARC, 2005).

Os agregados utilizados na produção do BAC afectam principalmente o bloqueio da mistura, enquanto que as partículas de material fino preenchem os vazios entre os agregados, afectando assim a fricção e colisão entre agregados. Desta forma, a compactidade das partículas de material fino torna-se importante para a obtenção do BAC, que dependerá da forma, tamanho e características da superfície das partículas e do seu comportamento durante a mistura.

A quantidade de partículas com dimensões menores que 100 μm é um factor importante na contribuição para o aumento da capacidade de enchimento e resistência à segregação da mistura. Okamura *et al.* (200) realizaram ensaios em pastas que recorriam a escórias de alto-forno de diferentes finuras e mostraram que a pasta cuja composição incluía o material mais fino desenvolvia uma maior resistência à segregação, concluindo que tal se devia ao aumento do teor em água decorrente da absorção causada pela superfície das partículas do material mais fino.

Khayat *et al.* (1999) também concluiu que um aumento no teor de pó de partículas de dimensões menores que 80 μm , conduzia a uma maior homogeneidade da mistura, no entanto, no caso da grande presença de partículas muito finas (de dimensões menores que 20 μm), a ocorrência de fenómenos de coagulação poderá requerer o uso de uma maior dosagem de SP, de modo a promover a dispersão das partículas (Felekoglu, 2008).

Conclui-se, portanto, que uma das principais características dos materiais finos é a sua capacidade para reter uma grande quantidade de água, o que pode ser expresso pelo gráfico da Figura 25, que relaciona o coeficiente de água retida (β_p) com o coeficiente de deformação (E_p) (Domone e Chai, 1997).

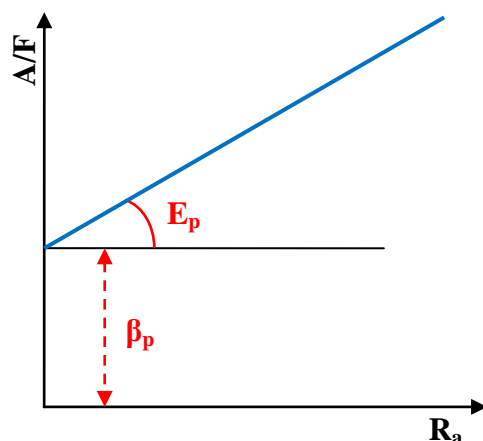


FIGURA 25 – RELAÇÃO ESQUEMÁTICA ENTRE A ÁREA DE ESPALHAMENTO RELATIVO E A RAZÃO A/F (DOMONE E CHAI, 1997)

Conforme ilustrado na Figura 25, existe uma relação linear entre a área de espalhamento relativo (R_a) e a razão de A/F. β_p e E_p são respectivamente as interceptações entre a linha de regressão e da inclinação com o eixo A/F. Os coeficientes β_p e E_p têm sido utilizados no estudo das adições (Takada *et al.*, 1998).

O coeficiente de água retida β_p reflecte o conteúdo em água necessário para se iniciar o espalhamento e inclui a água absorvida pela superfície das partículas e a água que preenche os vazios entre partículas do material fino. Quanto mais baixo o valor de β_p , menor será a quantidade de água necessária para iniciar o espalhamento β_p , sendo que este valor de β_p irá depender da composição e finura das partículas de material fino.

O coeficiente de deformação E_p reflecte a sensibilidade da pasta às variações de conteúdo de água, pelo que quanto maior o valor de E_p , mais robusta será a pasta.

β_p e E_p , dependem portanto das características do material fino utilizado. Alguns destes materiais mais utilizados no fabrico do BAC são apresentados na Tabela 14 (Domone e Chai, 1997).

TABELA 14 – COEFICIENTES DE ÁGUA RETIDA (β_p) E COEFICIENTES DE DEFORMAÇÃO (E_p) DE DIFERENTES TIPOS DE MATERIAL FINO (DOMONE E CHAI, 1997)

	Cimento Portland	Escória de alto-forno	Fíler Calcário	Cinzas Volantes
β_p	1,08	1,10	0,77	0,59
E_p	0,061	0,046	0,037	0,024

A cinza volante tem o menor β_p e E_p dos materiais apresentados, ou seja, misturas com a presença de cinzas volantes, tendem a fluir com um menor volume de água necessário e são mais sensíveis à variação da razão A/F. Tal deve-se à forma esférica das partículas constituintes deste material. Por outro lado, o cimento apresenta valores altos de β_p e E_p . A substituição de cimento com escórias de alto-forno, fíler calcário e cinzas volantes irá portanto levar a um decréscimo na quantidade de água necessária para iniciar o espalhamento e a um aumento da sensibilidade à razão A/F.

7.2.1 – Cimento

Uma das principais propriedades do BAC no estado fresco é a sua elevada deformabilidade, causada fundamentalmente pela dispersão das partículas de cimento devido ao efeito do adjuvante, mas também pelas características dos finos (Nawa *et al.*, 1998). Das principais características do cimento que afectam a reologia do betão destacam-se, entre as propriedades físicas, a distribuição granulométrica e a forma das partículas, entre as propriedades químicas, a influência dos componentes minerais do cimento na adsorção do adjuvante.

7.2.1.1 – Composição do cimento Portland

O cimento Portland é essencialmente composto por clínquer com quatro fases principais, descritas seguidamente (Petersson, 2000):

- Silicato tricálcico (C_3S), entre 20% a 80% da massa do cimento;
- Silicato bicálcico (C_2S), entre 10% a 55%;
- Aluminato tricálcico (C_3A), entre 0% a 15%;
- Aluminoferrato tetracálcico (C_4AF), entre 5% a 15%.

Ao clínquer junta-se ainda sulfato de cálcio (CS), na forma de gesso ou de hemi-hidrato, o que após moagem conjunta resulta no produto final. A heterogeneidade do cimento é um factor importante, sendo a distribuição das fases de silicatos e aluminatos determinada pelo processo de moagem e pela relativa resistência à fractura de cada um dos minerais.

As propriedades químicas do cimento afectam fundamentalmente a forma como o adjuvante é adsorvido pelos componentes minerais do cimento, influenciando o grau de dispersão das partículas. A adsorção das moléculas de adjuvante pelo cimento ocorre inicialmente à superfície dos componentes do cimento que hidratam mais rapidamente, nomeadamente o aluminato tricálcico (C_3A) e o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). O restante adjuvante é adsorvido pelo silicato tricálcico (C_3S) e pelo silicato bicálcico (C_2S), que são os principais componentes do cimento (Nawa *et al.*, 1998).

Dada a forma como ocorre a adsorção das moléculas de SP, por parte dos componentes minerais do cimento, recomenda-se a utilização de cimentos com uma quantidade moderada de aluminatos (C_3A e C_4AF) para que a adsorção seja mais uniforme em toda a superfície do cimento e a acção dispersante do adjuvante seja exercida plenamente (Nawa *et al.*, 1998).

A EFNARC (2002) recomenda que o teor de C_3A no cimento seja inferior a 10% em massa, de modo a garantir uma maior eficácia do adjuvante na acção dispersante. Além disso, os sulfatos existentes no cimento, geralmente colocados sobre a forma de gesso para retardar a presa, podem constituir um problema para a acção do SP. A etringite, produto de hidratação do C_3A e C_4AF com gesso, cobre as partículas de cimento não hidratadas impedindo que estas adsorvam o SP. Adicionalmente, num betão onde o conteúdo em cimento é elevado levanta-se o problema do elevado calor de hidratação. No caso particular do BAC a utilização de um cimento com menor quantidade de C_3A e C_4AF (de calor de hidratação moderado) ou de um cimento rico em silicato bicálcico (C_2S) permite aproveitar a acção de dispersão de uma forma mais eficaz e inibe o desenvolvimento do calor de hidratação (Nawa *et al.*, 1998).

A superfície específica e a distribuição granulométrica das partículas do cimento são factores importantes na velocidade de hidratação, uma vez que a hidratação ocorre na interface entre a partícula e a água. Quanto mais finos os cimentos, maior superfície existe para hidratar.

Verificou-se, também, que quanto maior a compacidade das partículas, maior a fluidez da pasta, ou seja, menor o valor da tensão de cedência. Por outro lado, quanto maior a superfície específica do cimento, maior será a viscosidade plástica. Num cimento com maior superfície específica, o número de partículas de finos na pasta aumenta, e assim aumenta a área em contacto com a água. Desta forma, a distância entre partículas diminui e a frequência de colisão e os pontos de contacto entre as partículas aumenta (Nawa *et al.*, 1998).

7.2.2 – Adições

A produção de BAC normalmente requer um alto conteúdo em material fino. No caso de apenas ser utilizado cimento, a produção de BAC torna-se demasiado dispendiosa, para além de poder ocorrer fendilhação, devido ao excesso de calor de hidratação e retracção (Gettu e Agulló, 2004). Torna-se, portanto, necessário substituir algum do cimento por adições tais como cinzas volantes, escória de alto-forno, fíler calcário, entre outros (Figura 26).

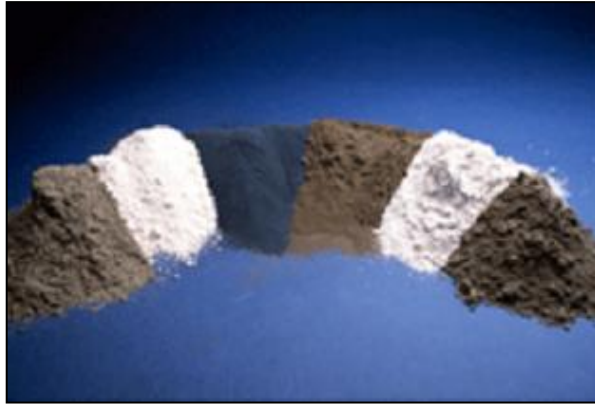


FIGURA 26 – VÁRIOS TIPOS DE ADIÇÕES UTILIZÁVEIS NA PRODUÇÃO DE BAC

As adições são materiais muito finos, utilizados na produção de betão e têm como objectivo o melhoramento ou obtenção de determinadas propriedades. Segundo a norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007), estes podem ser de dois tipos:

- Adições tipo I – adições quase inertes;
- Adições tipo II – adições pozolânicas.

7.2.2.1 – Adições tipo I – adições quase inertes

As adições do tipo I são materiais quimicamente inertes que, quando na forma de pó, são atacados pela cal e pelos álcalis libertados durante a hidratação do cimento Portland, favorecendo o aparecimento, a longo prazo, de efeitos benéficos à resistência mecânica, permeabilidade e resistência química. Exemplos disto são: quartzo, dolomite, rochas calcárias e vários produtos rochosos siliciosos, além do granito.

Este tipo de adições promove uma acção física, aumentando a compacidade da mistura.

7.2.2.1.1 – Fíler calcário

O fíler calcário (Figura 27) é um material muito fino, com finura semelhante à do cimento e é composto geralmente por carbonato de cálcio (CaCO_3) na forma de calcite (75-85%). Para ser utilizado como adição na composição de misturas de betão, este deverá estar livre de matéria orgânica e argila. A sua composição química é variada, dependendo, entre outras coisas, das condições ambientais a que esteve submetida a camada de substrato rochoso da qual foi extraído.

Dependendo da sua composição química, o fíler calcário pode ser classificado como calcítico ou dolomítico. Como visto atrás, o calcário calcítico é composto basicamente por carbonato de cálcio (CaCO_3) sendo este o mais utilizado na produção de betão, enquanto que no caso do calcário dolomítico, este é obtido pela substituição de parte do cálcio por magnésio, formando a dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). O teor em magnésio do fíler dolomítico constitui um problema para a sua utilização no betão, já que a possibilidade de ocorrência de reacções álcali-carbonato compromete a durabilidade do mesmo (EFNARC, 2002).

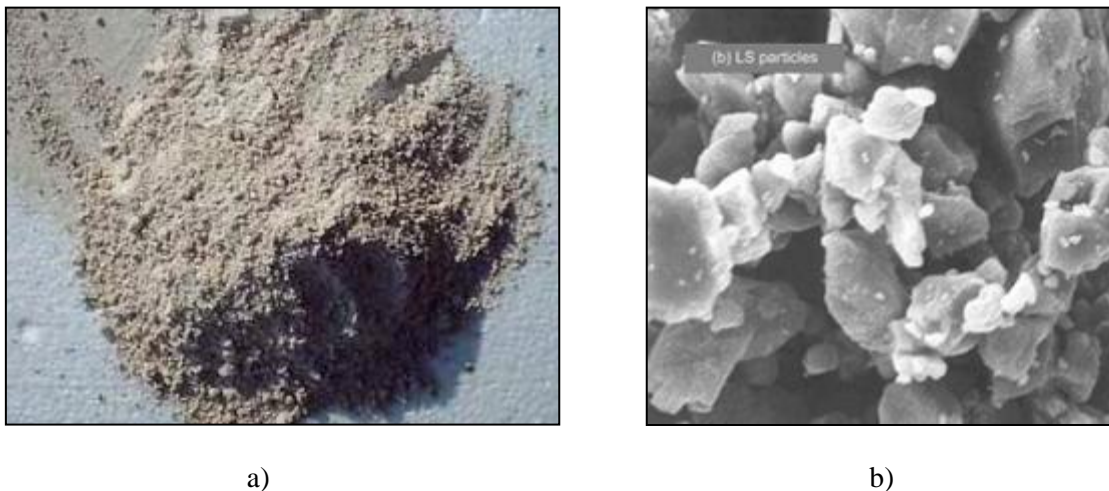


FIGURA 27 – A) FÍLER CALCÁRIO. B) MICROSCOPIA DE PARTÍCULAS DE FÍLER CALCÁRIO.

O fíler calcário, tal como o caso das cinzas volantes pode ser utilizado na produção de betão, de forma directa, sob a forma de adição ou até mesmo fazendo parte do próprio cimento, como no caso de alguns Cimentos tipo II.

Este material é amplamente utilizado no fabrico de betão e sua adição à mistura afecta favoravelmente as suas propriedades e comportamento, dando ao betão boas características reológicas e sobretudo ajudando a melhorar a hidratação da pasta, aumentando a sua trabalhabilidade, fluidez e deformabilidade. O fíler calcário também garante a coesão e viscosidade necessárias para evitar a segregação e o atrito entre partículas, melhorando a retenção de água, o que resulta num melhor desempenho contra os fenómenos de retracção e fissuração.

A acção do fíler calcário ocorre quer por efeito físico, quer por efeito químico, de forma que não constitui um material completamente inerte. A capacidade do fíler reagir com o cimento depende essencialmente do seu grau de cristalização e da sua finura. O efeito físico do fíler ocorre essencialmente devido à sua finura, permitindo por um lado, uma melhoria da distribuição granulométrica da composição de betão, o que conduz a uma melhoria da trabalhabilidade, e por outro lado, uma maior retenção de água eliminando a exsudação mas aumentando a viscosidade. Esping (2003) ao analisar diferentes tipos de fíleres na produção de misturas de BAC, verificou que, quanto maior a superfície específica, maior a necessidade de água para que se sejam cumpridos os requisitos exigidos de autocompactabilidade. Assim sendo, mantendo constante o conteúdo de água das misturas, quanto mais fino for o fíler maior a necessidade de SP, para que sejam atingidas as mesmas características de deformabilidade. Ao nível do betão endurecido o facto de o fíler promover uma granulometria mais contínua aumenta a compacidade da mistura, o que melhora a durabilidade do betão.

7.2.2.1.2 – Fíler granítico

Num estudo realizado com o objectivo de identificar a possível utilização de fíler granítico, versus fíler calcário na produção de BAC, através da sua substituição parcial em prol do cimento Portland e usando SP de última geração à base de policarboxilatos, Ho *et al.* (2002) chegaram à conclusão que cada tipo de fíler influencia de maneira diferente as propriedades de escoamento do betão.

O fíler granítico (pó de pedra) usado, foi um subproduto da produção de agregados para betão, obtido durante o processo de britagem de rochas graníticas. Segundo os autores, as diferentes influências de cada fíler no escoamento do betão dever-se-iam às dimensões e distribuições geométricas da partículas dos fíleres, sendo que após análise das mesmas, as partículas de fíler granítico mostravam ser mais finas do que as partículas de fíler calcário.

Cada uma das adições foi utilizada em percentagens do cimento de 35% e 50% (em massa). A dosagem de plastificante foi obtida para que se conseguisse uma tensão de cedência próxima do zero, característica que foi aferida com recurso a um reómetro coaxial. A razão A/L foi de 0,36.

Os betões obtidos através destas composições comportaram-se de forma semelhante, situando-se os valores de espalhamento de ambos entre os 665 e os 715 mm e o coeficiente H_2/H_1 obtido no ensaio da “caixa em L” entre os 0,75 e os 0,83.

Em conclusão, o citado estudo demonstrou que o fíler granítico é uma alternativa viável na produção de BAC, no entanto, a utilização de fíler granítico demonstrou ser necessária uma maior dosagem de SP para se obterem propriedades reológicas semelhantes às do betão que recorria a fíler calcário (cerca de 25% superior, em volume absoluto).

7.2.2.2 – Adições tipo II – adições pozolânicas

A pozolana é definida como um material silicioso ou silicioso e aluminoso que, por si só, não possui qualquer característica cimentícia, mas que quando presente sob a forma de partículas muito finas e na presença de humidade, reage quimicamente a temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio, obtendo-se dessa forma compostos com características cimentícias semelhantes aos originados na hidratação dos constituintes do clínquer Portland.

Ao grupo de adições do tipo II pertencem as cinzas volantes, cinzas vulcânicas ácidas naturais ou calcinadas, xistos e argilas calcinadas e alguns subprodutos industriais, como a sílica de fumo e as escórias granuladas de alto-forno (NP EN 206-1 2007). As adições pozolânicas consistem essencialmente em SiO_2 reactivo e Al_2O_3 , com teor mínimo em SiO_2 reactivo de 25% em massa, definido de acordo com a norma Portuguesa NP EN 450-1 (2006); o restante contém Fe_2O_3 e outros óxidos.

7.2.2.2.1 – Cinzas volantes

A cinza volante é um material obtido pela precipitação electrostática, ou captação mecânica em filtros ou outros dispositivos semelhantes, das poeiras contidas no fumo produzido pela queima de combustível nas centrais termoeléctricas a carvão.

Este pó é, em geral, muito fino e de combustão muito rápida, em grande parte constituído por pequenas partículas esféricas, com dimensões que variam entre 0.5 μm e 100 μm , que ganham a sua estrutura característica por solidificarem em suspensão no fluxo gasoso resultante da queima. O material resulta da fusão e calcinação das impurezas minerais incombustíveis contidas no carvão que é queimado a altas temperaturas e pressões. A temperatura no interior dos fornos situa-se normalmente entre 1500 e 2000 $^{\circ}\text{C}$, valores superiores ao da fusão da maioria dos minerais presentes, que assim sofrem alterações químicas e físicas (Estevéz e Gutiérrez, 1990). A natureza dessas alterações depende da temperatura, da permanência do material na região mais quente do forno, do tipo e da finura do combustível utilizado, entre outros (Estevéz e Gutiérrez, 1990).

Deste modo, a presença de partículas de grandes dimensões (superiores a 125 μm) poderá estar associada a grandes quantidades de carbono no combustível. Tratando-se de um material altamente poroso, constituído por partículas de grandes dimensões e, portanto, tendo uma grande superfície específica, a utilização deste tipo de material irá requerer uma maior necessidade de água na produção de betões.

Park *et al.* (2005) constataram que cinzas volantes com a presença de carbono não queimado podem absorver em demasia o SP, o que poderá dar à redução na trabalhabilidade das misturas.

Nas Figuras 28 e 29, ilustram-se respectivamente imagens microscópicas de alta resolução, com diferentes ampliações de cinzas volantes, resultantes da queima de combustível com baixo e alto teor em carbono, onde se pode verificar a diferença entre as dimensões das partículas constituintes num e noutro caso, a sua forma esférica, bem como a sua textura porosa.

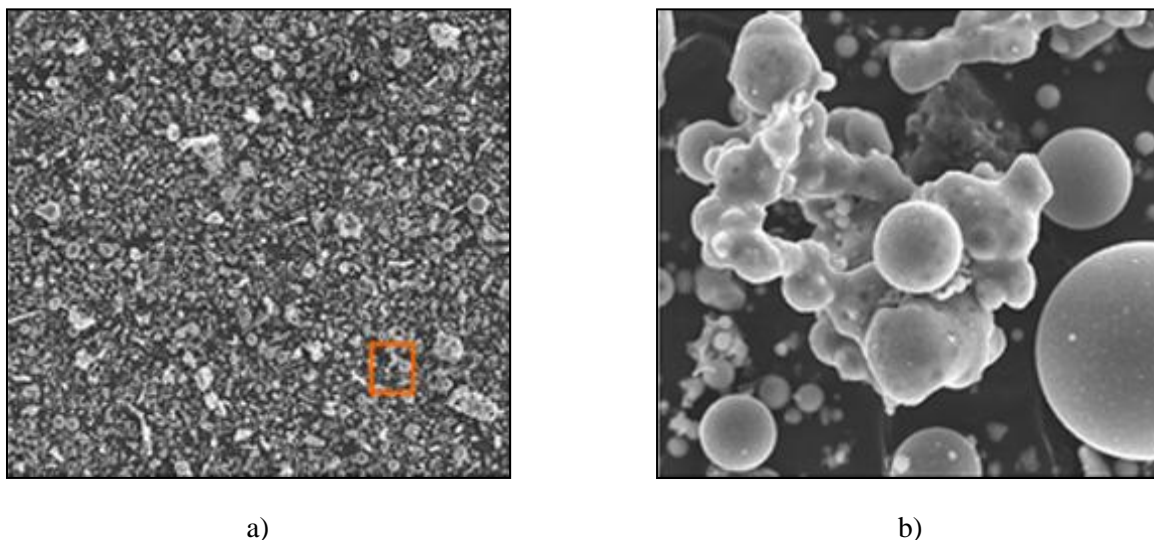


FIGURA 28 – MICROSCOPIA DE CINZAS VOLANTES RESULTANTES DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEL COM BAIXO TEOR EM CARBONO: A) AMPLIAÇÃO DE 100 \times ; B) AMPLIAÇÃO DE 2000 \times

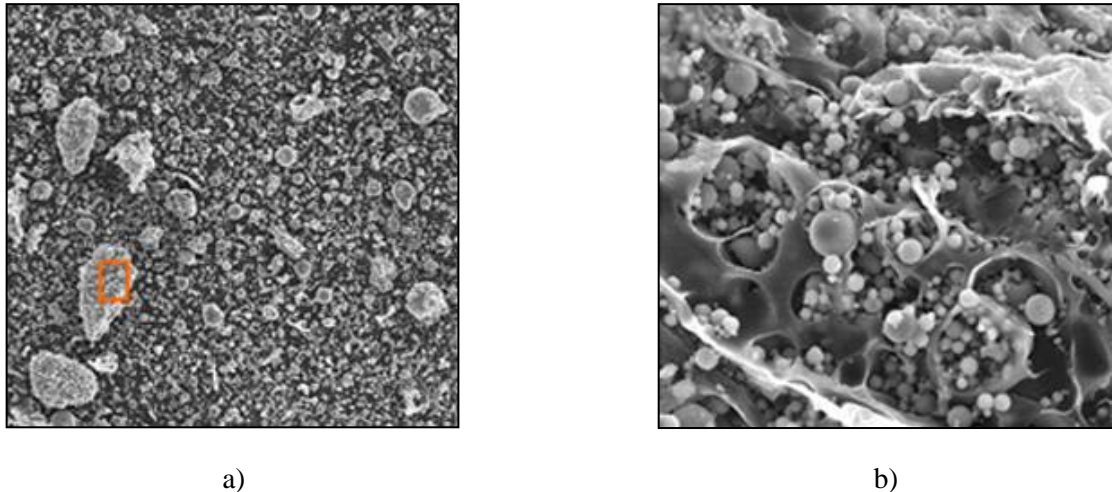


FIGURA 29 – MICROSCOPIA DE CINZAS VOLANTES RESULTANTES DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEL COM ALTO TEOR EM CARBONO: A) AMPLIAÇÃO DE 100x; B) AMPLIAÇÃO DE 2000x

Decorrendo principalmente da natureza do carvão, as suas características podem variar. Como tal, as cinzas volantes estão agrupadas em quatro tipos básicos (Estevez e Gutiérrez, 1990):

- Cinzas volantes betuminosas;
- Cinzas volantes linhíticas;
- Cinzas volantes sub-betuminosas;
- Cinzas volantes antracíticas.

Dado que estas cinzas apresentam propriedades pozolânicas acentuadas, tornou-se comum a sua utilização como adição em argamassas e betões, sendo por essa razão as pozolanas artificiais mais comuns.

A utilização das cinzas volantes na produção de betões resulta, regra geral, numa melhoria da trabalhabilidade devido à forma esférica das partículas e no atraso da presa.

No que concerne ao comportamento reológico dos betões, a cinza volante actua aumentando a compacidade dos materiais cimentícios, Sonebi (2004) concluiu que as cinzas volantes reduzem efectivamente a tensões de cedência, mas podem aumentar ou diminuir a viscosidade plástica da mistura.

Por outro lado, Park *et al.* (2005), num estudo desenvolvido em pastas que recorriam ao uso de SP, constataram que a cinza volante resultava numa redução ligeira das tenções de cedência e no aumento da viscosidade plástica.

Shadle e Somerville (2002) concluíram também que a utilização de cinzas volantes pode reduzir o sangramento e melhorar a estabilidade do betão.

De forma geral, os autores concordam que as cinzas volantes actua de modo semelhante aos AMV, isto é, permitem aumentar a viscosidade do betão fresco a fim de obter boa resistência à segregação, sem que no entanto tenham influência acentuada ao nível da fluidez.

Existem ainda outras vantagens na utilização deste tipo de adições nomeadamente melhorias ao nível da durabilidade, retracção de secagem e propriedades mecânicas, assuntos que não serão abordados em maior detalhe, por se situarem fora do âmbito da temática abordada.

7.2.2.2.2 – Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é um subproduto do fabrico do ferro fundido. O minério de ferro é constituído por uma mistura de óxidos de ferro com outras substâncias ricas em cálcio, silício e alumínio. Para a obtenção deste material, o minério de ferro, carvão e um fundente (em geral o calcário) são lançados na parte superior do alto-forno. Esta mistura vai descendo lentamente e aquecendo, até à zona de fusão onde atinge temperaturas da ordem dos 1500°C.

Na parte inferior do alto-forno recolhem-se duas substâncias com densidades diferentes, o ferro fundido (também denominado gusa) e um material mais leve designado escória (Aitcin, 1998).

Quando as escórias submetidas a arrefecimento suficientemente rápido em água, são obtidos grãos em forma de areia e vidro (Figura 30).

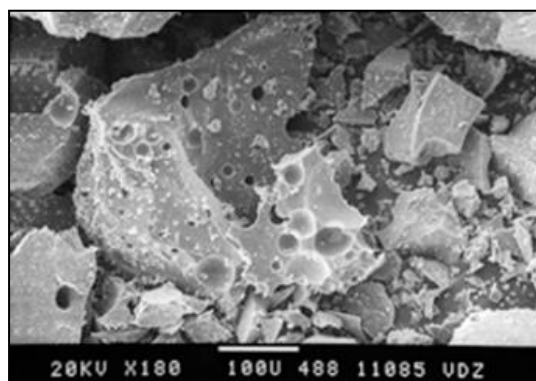


FIGURA 30 – MICROSCOPIA DE PARTÍCULAS VITRIFICADAS PRESENTES NA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A escória é portanto um subproduto industrial, produzindo-se cerca de 300 kg por cada tonelada de ferro e consiste numa mistura de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 , isto é, os mesmos óxidos que compõem o cimento Portland, mas em proporções diferentes (Ramachandran, 1995)

O material final em forma de pó fino (Figura 31) é obtido através da moagem da escória granulada, o que irá aumentar a sua actividade de hidratação.



FIGURA 31 – ASPECTO FINAL DE UMA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO MOÍDA

No entanto, as escórias de alto-forno de elevada finura não iniciam as reacções de hidratação imediatamente após o contacto com a água, como no caso das partículas de clínquer. Contudo, uma vez que a superfície das partículas é vidrada e lisa, mesmo que estas escórias sejam usadas como

adições no betão, os efeitos adversos tais como o aumento da dosagem de água, não ocorrem (Nawa *et al.*,1998).

O material resultante é, portanto, um material de grande actividade hidráulica, muito fino e com baixo calor de hidratação. As suas características assemelham-se bastante às de um cimento, embora tenha como desvantagem um endurecimento mais lento, o que pode ser corrigido quando combinado com clínquer. Na composição dos betões, a escória de alto-forno pode substituir até 70% do cimento, em massa.

A partir de estudos reológicos realizados com um viscosímetro, tem sido constatado que a tixotropia da pasta que incorpora escórias granuladas de alto-forno com elevada finura é comparativamente menor que a tixotropia da pasta de cimento Portland normal (Nawa *et al.*,1998). Por esta razão, a escória de alto-forno de elevada finura tem sido usada na produção de cimentos ou como adição em betões de elevada fluidez (Nawa *et al.*,1998). Assim sendo, tal como para o caso de outro tipo de adições, a escória de alto-forno pode ser utilizada no fabrico do betão, quer directamente quer como uma adição à mistura ou mesmo fazendo parte do próprio cimento, como no caso de alguns cimentos do tipo II, III e V, denominados respectivamente por cimento com adições, cimento com escória de alto-forno e cimentos compostos.

No que diz respeito ao comportamento reológico de misturas de BAC que recorrem a escórias de alto-forno, é do consenso geral considerar-se que este material melhora a trabalhabilidade das misturas, devido à sua textura suave e à sua elevada densidade, mas não na mesma proporção que as cinzas volantes (Park *et al.* 2005) (Billberg 2000).

Regra geral, as misturas que recorrem a escória de alto-forno apresentam um maior tempo de presa. Tal poderá ser considerado vantajoso pois irá permitir um maior tempo para a colocação, mas poderá também ser considerado prejudicial quando se pretendem determinadas resistências no betão em idades precoces, como é o caso da pré-fabricação.

A utilização de escórias de alto-forno na produção de BAC, resulta geralmente num aumento da viscosidade do betão. Quando comparadas com as cinzas volantes e com o fíler calcário, as escórias de alto-forno mostram ser mais resistentes à variação no conteúdo em água (Domone e Chai, 1997).

7.2.2.2.3 – Sílica de fumo

A sílica de fumo, ou microssílica, começou a ser utilizada na Escandinávia como adição na produção de betões, demorando cerca de dez anos a ser aplicada na América do Norte.

Trata-se de um subproduto da preparação do metal silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos eléctricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas (cerca de 2000°C)

O material resultante deste processo de fabrico (Figura 32) é um material superfino, cujas partículas apresentam forma aproximadamente esférica (Figura 33), sendo a dimensão média das partículas de 0.1µm e constituído fundamentalmente por SiO₂ (85 a 90%) (Ramachandran, 1995).



FIGURA 32 – ASPECTO FINAL DE UMA SÍLICA DE FUMO

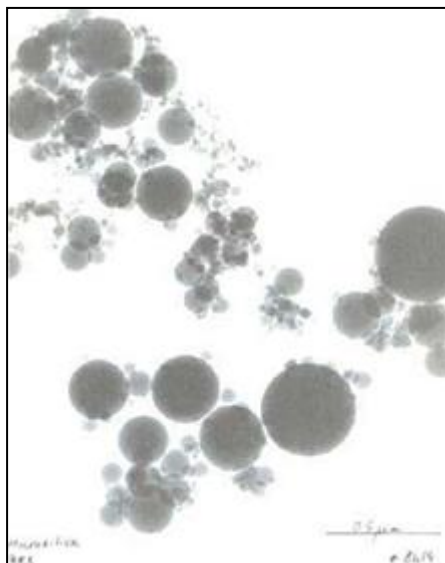


FIGURA 33 – MICROSCOPIA DE PARTÍCULAS CONSTITUINTES DA SÍLICA DE FUMO.

Habitualmente, utiliza-se até cerca de 15% (em geral cerca de 8-10%) de sílica de fumo em relação à massa de cimento, obtendo-se bons resultados a nível de resistências, durabilidade e resistência aos ciclos gelo/degelo. Para alcançar o maior proveito das propriedades da sílica de fumo é necessário o uso de SP, de forma a garantir a sua boa dispersão na mistura do betão (Mehta e Monteiro, 1994).

A sílica de fumo promove melhorias nas propriedades do betão fresco, nomeadamente, o aumento da coesão, garantindo misturas mais estáveis, e a drástica redução da exsudação, devido ao tamanho reduzido das partículas (EFNARC, 2005). A sílica de fumo pode melhorar as características reológicas do betão e aumentar a estabilidade quando utilizado em baixas dosagens, geralmente na substituição de cimento em valores inferiores a 4-6%, mas tem efeitos negativos sobre a reologia em dosagens mais elevadas.

Qualquer redução na trabalhabilidade que se verifique num betão que recorra a adições de sílica de fumo deve-se geralmente à elevada finura deste material. Tal fenómeno é, no entanto, compensado pela forma esférica das partículas que constituem o material. De acordo com Park *et al.* (2005), a alta actividade hidráulica das partículas de sílica de fumo pode aumentar a absorção de SP, o que irá reduzir a quantidade disponível em solução e nas partículas de cimento, necessária para que a mistura adquira os critérios de autocompactabilidade e de trabalhabilidade necessários. Tal dever-se-á também ao facto de as composições que recorrem a sílica de fumo serem potencialmente menos deformáveis do que as composições que não as incluem, quando se mantém constante a razão A/F. Em segundo

lugar, o uso da sílica de fumo reduz significativamente a razão A/F para se obter uma determinada viscosidade, mas uma redução desta relação diminui a deformabilidade da mistura caso a dosagem de SP seja mantida constante. Em terceiro lugar, a adsorção do SP à superfície das partículas da sílica de fumo é bastante intensa devido à sua elevada reactividade inicial e finura (Takada *et al.*, 1998). Conclui-se que, muito provavelmente, estes fenómenos ocorram conjuntamente, contribuindo assim para o aumento na dosagem de SP necessária para obter uma mistura com elevada deformabilidade e viscosidade adequada.

Estudos realizados em pastas projectadas para o fabrico de BAC, Vikan e Justnes (2003) constataram que a adição de sílica de fumo em valores de substituição do cimento, na ordem dos 10%, melhorou a tensão de cedência das misturas. Verificou-se também um decréscimo na viscosidade plástica, após a adição de um SP à base de policarboxilatos. No entanto, a adição de um SP à base de naftaleno, originou um aumento na viscosidade da mistura. Esta diminuição da viscosidade plástica da mistura foi atribuída pelos autores ao deslocamento da água entre os grãos de cimento e à forma esférica das partículas de sílica de fumo.

Por outro lado, Park *et al.* (2005) observaram que no caso de pastas que recorrem a SP, o uso da sílica de fumo em valores de substituição do cimento, na ordem, de 5, 10 e 15%, conferiam um acréscimo significativo à tensão de cedência e viscosidade plástica das misturas. Sugerem, ainda, a adopção da sílica de fumo na composição de misturas, tendo em vista o aumento da viscosidade plástica e assim diminuir a ocorrência de fenómenos de segregação, ao passo que o forte aumento na tensão de cedência deverá ser compensado pela utilização de um sistema cimentício ternário que inclua na sua composição cinzas volantes ou escória de alto-forno.

Domone *et al.* (Domone, 1999) investigaram também a retenção da trabalhabilidade em argamassas com associações binárias e ternárias de materiais finos, incluindo cimento Portland, escórias de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo e fíler calcário. Os autores concluíram igualmente que a sílica de fumo se revelou muito útil na retenção da trabalhabilidade, quando utilizada em combinações ternárias com os outros componentes.

7.3 – Agregados

A granulometria contínua dos agregados, resulta numa melhor capacidade de deformação do betão, o que se torna adequado no caso do BAC. Na verdade, a adopção de curvas granulométricas, com diferentes tipos, tamanhos e formas têm sido utilizadas na produção de BAC. A Figura 34 (Aarre e Domone, 2004) mostra que o BAC pode ser produzido com curvas granulométricas bastante diferenciadas.

Dependendo das mais variadas experiências de cada país e na disponibilidade na obtenção dos materiais locais, o limite de dimensão que diferencia agregado fino de agregado grosso pode variar. Por exemplo, o limite de dimensão entre agregados finos e grossos é de 4 milímetros na generalidade dos países Europeus (EFNARC, 2002), 5 mm no Japão (Nawa *et al.*, 1998) e 8 mm na Suécia (Billberg, 1999).

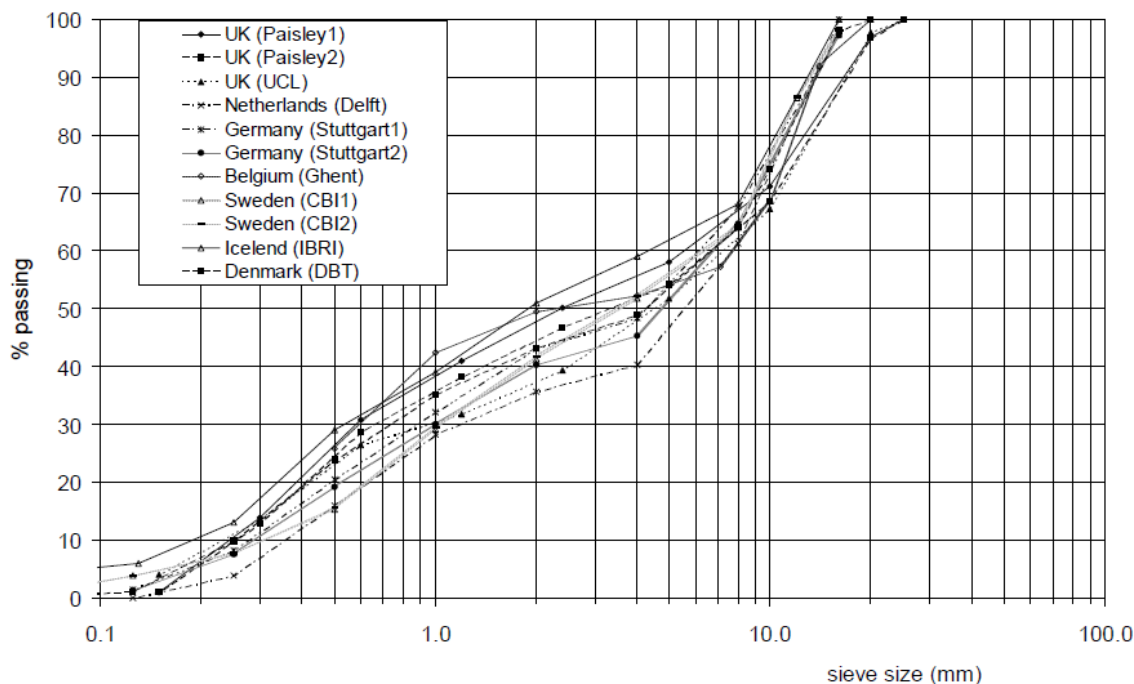


FIGURA 34 – CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS PARA A OBTENÇÃO DE BAC, PELO “TESTING-SCC PROJECT” (AARRE E DOMONE, 2004)

Um aspecto que pode influenciar drasticamente a reologia do betão prende-se com o volume total de agregados na composição e a proporção entre agregado fino e grosso. Para garantir um nível adequado de autocompactabilidade no BAC, é necessário reduzir a quantidade de agregado grosso em função de um aumento do teor de partículas finas (Okamura e Ouchi, 2003).

Embora a compacidade não tenha influência sobre a resistência final do betão, este tem um efeito considerável sobre as propriedades do betão no estado fresco. Na verdade, a obtenção de um BAC está fortemente dependente da compacidade dos agregados, já que a adopção de uma curva granulométrica extensa e contínua aumenta a densidade de compacidade, o que leva à necessidade de menores dosagens de SP e menores volumes de pasta (Khayat *et al.*, 1999). Uma boa compacidade dos agregados também ajuda na mitigação de fenómenos de segregação, pois os agregados de menores dimensões ajudam no transporte dos agregados de tamanho médio, que por sua vez ajudam no transporte dos agregados de maiores dimensões (Bönen *et al.*, 2007).

Agregados com uma elevada superfície específica e textura áspera necessitam de maiores quantidades de pasta e água para obter elevada fluidez enquanto que partículas arredondadas potenciam uma melhoria na fluidez.

Uma melhor compacidade dos agregados aumenta também a resistência e durabilidade do betão devido à redução da percentagem de vazios da mistura. Quanto mais denso é o betão, mais eficaz é a pasta, que lubrifica e preenche os espaços vazios no betão conferindo-lhe consistência e resistência.

A fim de minimizar a interação entre os agregados, a forma e textura das partículas são também importantes na produção do BAC. A adopção de agregados rolados pode ser preferível em relação aos agregados britados, pois uma superfície arredondada e pouco áspera dos agregados irá resultar numa diminuição do atrito entre partículas e em consequência, em melhores capacidades de enchimento. Em contrapartida, o agregado britado confere um efeito benéfico na resistência final do betão. (Billberg, 2002)

De acordo com o método de Petersson, a utilização de agregados britados requer mais volume de pasta e menos agregado, de forma a evitar o bloqueio, exigindo também uma maior dosagem de SP (Petersson, 1999). Fenómenos de bloqueio também ocorrem facilmente, caso a forma dos agregados não é esférica.

Como tal, a forma, distribuição, finura, densidade de compactidade e proporção entre agregado grosso e fino mostram ter influência nas propriedades do betão no estado fresco.

7.3.1 – Agregado fino:

No que diz respeito aos agregados finos, a sua distribuição, forma e absorção são factores importantes na produção de BAC. As areias limpas e de forma esférica, são consideradas preferíveis em relação a areias de forma irregular. No entanto, a disponibilidade local dos materiais é normalmente o factor decisivo na escolha dos materiais para a produção do BAC (Skarendahl, 2003). O aumento do volume de pasta e da viscosidade da mistura pode ser uma alternativa no caso de utilização de areias mal graduadas ou de forma irregular (Westerholm *et al.*, 2008).

Quando o betão é colocado nas cofragens, desenvolvem-se tensões normais e de corte provocadas pelo contacto entre os agregados da mistura ou por eventuais obstáculos ao escoamento. A tensão de cedência do betão é afectada pelas características físicas dos agregados finos (Figura 35) de tal forma que, quanto maior o seu volume e angulosidade, maior será a resistência ao corte e menor será a deformabilidade (Okamura e Ouchi, 2003).

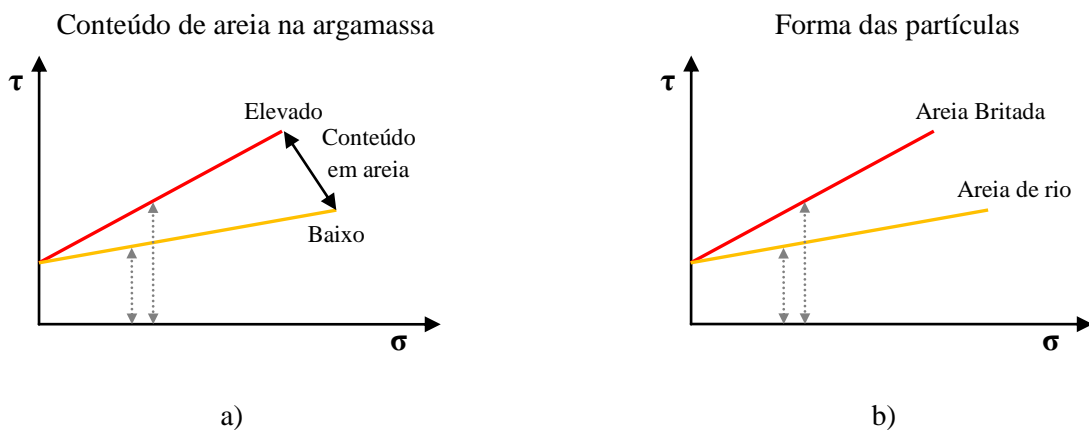


FIGURA 35 – EVOLUÇÃO DA TENSÃO RESISTENTE DE CORTE, VERSUS TENSÃO NORMAL: A) DIFERENTES CONTEÚDOS EM AREIA NA ARGAMASSA; B) DIFERENTES FORMAS DAS PARTÍCULAS (OKAMURA E OUCHI, 2003)

No entanto, não devem ser adoptadas composições cujo volume de agregado fino seja muito baixo ou muito alto. Existe um volume óptimo de agregado fino por unidade de volume de argamassa (V_{af}/V_a), que depende do tipo de agregado fino e da forma das partículas, para um mesmo valor do módulo de finura. Se o V_{af}/V_a for demasiado baixo, o esqueleto granular pode ser insuficiente para a quantidade de pasta, conduzindo a segregação e/ou exsudação e se o V_{af}/V_a for muito elevado, a fluidez do betão diminuirá devido à insuficiente quantidade de pasta entre as partículas de agregados (Fang *et al.*, 1999).

Billberg (1999) concluiu que variações na composição das areias utilizadas afectam o desempenho do BAC, mostrando que a influência da finura do agregado no espalhamento e altura atingida no ensaio

da caixa em U, varia consoante o teor de humidade dos agregados finos. O efeito da humidade afecta principalmente os agregados finos, sendo portanto importante controlar a humidade superficial nas areias durante a produção de BAC.

Bartos, (2005) concluiu que um erro no cálculo do teor de humidade da areia, na ordem dos 0,5%, poderá causar uma mudança no teor de água da mistura até aos 8 kg/m³ de betão, o que poderá ter consequências no espalhamento em cerca de 45 mm. O mesmo autor, sugere que a humidade mínima de todos os agregados seja mantida acima do nível de saturação superficial seco, ou seja, num estado em que as superfícies das partículas dos agregados estejam saturadas, evitando assim a absorção de água, mas de tal forma que os vazios entre partículas se mantenham secos. Nesta condição, o conteúdo em agregado não irá afectar o conteúdo em água livre da mistura.

A proporção de partículas finas na areia, tem uma influência mais acentuada na produção de BAC do que na produção de BC (Skarendahl, 2003). Vários autores demonstraram que a presença de partículas finas de dimensão inferior a 125µm no agregado fino, aumenta a viscosidade da mistura (Felekoglu, 2008), ao actuarem de modo semelhante às partículas de argila, 1) aumentando a razão A/F, 2) atrasando a hidratação do cimento, 3) tendo efeitos adversos à estabilidade do betão e 4) contribuindo para a necessidade de aumento na dosagem de SP, o que leva à diminuição da resistência final do betão (Felekoglu, 2008).

7.3.2 – Agregado grosso:

As características físicas do agregado grosso têm um papel fundamental na aferição das propriedades do BAC no estado fresco, sendo considerado um material constituído por duas fases, argamassa e agregado grosso, em muitos métodos de cálculo de misturas. A sua forma, natureza, quantidade e máxima dimensão interferem nas propriedades de autocompatibilidade do betão

Vários autores desenvolveram estudos que permitiram concluir que a escolha dos agregados da mistura poderá depender da disponibilidade local dos materiais (Domone, 2006), havendo também a possibilidade de se utilizarem como agregado grosso materiais provenientes de betão reciclado ou até materiais leves na produção de BAC.

A definição da dimensão máxima do agregado grosso deve ter em conta a distância mínima entre os obstáculos, de forma a evitar o bloqueio. Quanto maior a quantidade de agregado grosso e a dimensão máxima desse agregado, menos uniforme é o fluxo e menor é a capacidade. Regra geral, são utilizados agregados grossos de dimensões entre os 16 e os 20 mm, dependendo da disponibilidade local e dos métodos usualmente praticados na região em questão (Domone, 2006 e EFNARC, 2002).

Okamura e Ouchi (2003) relataram uma diminuição da capacidade de enchimento devido a um aumento do volume de agregado grosso no betão, acrescentando ainda que este fenómeno se desenvolvia independentemente da forma das partículas de agregado. Por outro lado, segundo a *European Group Project of Self-Compacting Concrete – EPG SCC*, a dimensão e distribuição das partículas do agregado grosso tem influência directa no espalhamento e capacidade de passagem e volume de pasta do BAC, acrescentando que quanto mais esférica for a superfície das partículas, menores serão as probabilidades de ocorrência de fenómenos de bloqueio, devido à redução do atrito interno entre partículas (EFNARC, 2005).

7.4 – Adjuvantes

A Norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007) define adjuvante como um produto que é adicionado em pequenas quantidades referidas à massa do cimento, antes ou durante a amassadura ou numa operação adicional de amassadura, provocando as modificações requeridas das propriedades normais.

7.4.1 – Superplastificantes

A utilização de superplastificantes (SP), tem influência sobre as misturas de betões, permitindo aumentar a plasticidade da pasta. O SP pode ser adicionado no final da mistura com o propósito de aumentar a sua trabalhabilidade, ou poderá ser adicionado durante a amassadura a fim de reduzir a água ao, mesmo tempo que se mantém a trabalhabilidade.

Os SP actualmente utilizados, são baseados em:

- Polímeros de naftaleno sulfonado;
- Melamina sulfonada;
- Copolímeros vinílicos;
- Policarboxilatos modificados.

Estes últimos são os SP de última geração, permitindo reduções de água até aos 40% (Petersson *et al.*, 2000).

A utilização de policarboxilatos modificados no fabrico dos SP veio facilitar a utilização do BAC como tecnologia de construção (Bury e Christensen, 2002). Quando comparados com os demais SP, os SP à base de policarboxilatos requerem dosagens menores para terem a eficácia necessária, não têm influência significativa no tempo de presa, garantem uma manutenção da trabalhabilidade durante um tempo mais prolongado e aumentam a estabilidade da mistura (Jeknavorian *et al.* 2003).

Em comparação com os demais SP, os SP à base de policarboxilatos garantem, regra geral, características reológicas mais favoráveis à mistura, o que resulta num benefício para a produção e utilização do BAC. Este tipo de SP à base de policarboxilatos, permite uma maior redução das tensões de cedência, ao passo que, para um dado decréscimo de tensão de cedência, a redução na viscosidade plástica é menor no caso dos SP à base de policarboxilatos (Cyr e Mouret, 2003)

Yamada et al (2000) concluíram ainda que através da utilização de SP à base de policarboxilatos era possível reduzir a tensão de cedência em misturas de razão A/F elevada, enquanto que em misturas de baixa razão A/F a sua utilização reflectia-se num ligeiro decréscimo da viscosidade plástica.

De acordo com Hanehara e Yamada (1999), os SP à base de policarboxilatos necessitam de doses menores para começarem a influenciar o espalhamento de argamassas no mini-cone de Abrams. No caso dos SP à base de sulfonatos, o período necessário para que estes produzam efeitos visíveis é mais longo, no entanto, a partir do momento em que o SP produz efeitos visíveis, a influência no

espalhamento de argamassas no mini-cone de Abrams resulta mais acentuada do que no caso dos SP à base de policarboxilatos.

As interacções entre as partículas de cimento e os adjuvantes foram alvo de estudo aprofundado pelos mais diversos autores. Dois tipos de interacções cimento-adjuvante foram identificadas:

- Interacções físicas – relacionadas com a modificação das forças de superfície entre partículas e a alteração da tensão superficial da fase aquosa;
- Interacções químicas – devido ao modo como os adjuvantes modificam as reacções de hidratação.

Entre as acções produzidas pelos SP sobre as partículas de cimento, distinguem-se quatro tipos de efeitos (Pettersson *et al.*, 1995):

1) Efeito da composição química do SP:

Sendo por norma os SP utilizados no betão constituídos por polímeros carregados negativamente e solúveis em água, verificou-se que quanto maior a massa molecular do adjuvante melhor se efectuará a adsorção por parte das partículas de cimento.

2) Efeito de adsorção, em função do tipo de cimento:

Ao entrarem em contacto com a superfície das partículas de cimento, as moléculas de polímeros carregadas negativamente são adsorvidas, fixando-se às primeiras. Esta camada superficial de polímeros que se forma difere da camada original, conferindo às partículas de cimento uma importante carga negativa necessária para que ocorra a desfloculação do cimento (Figura 36 e 37). (Mehta e Monteiro, 1994)

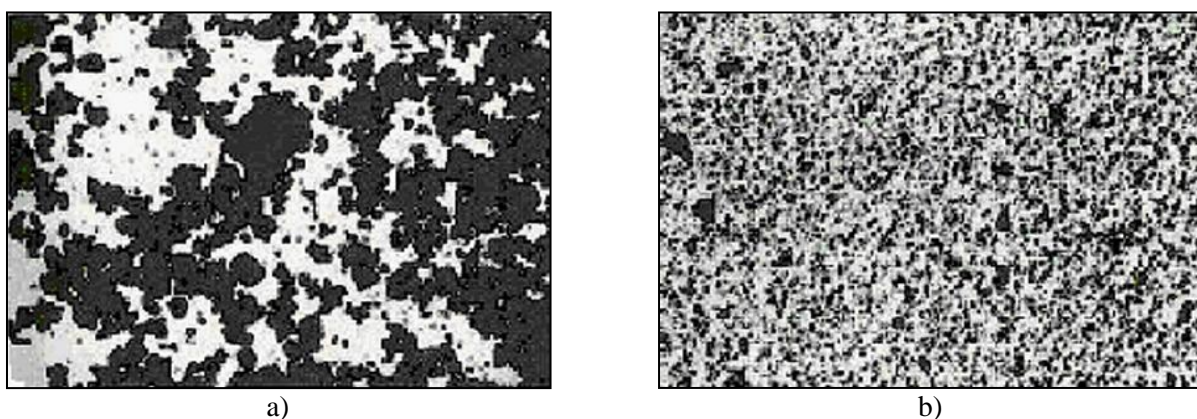


FIGURA 36 – MICROSCOPIA DE PARTÍCULAS DE CIMENTO NUMA SOLUÇÃO DE A/C SEM ADIÇÃO DE SP A) E COM ADIÇÃO DE SP B) (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

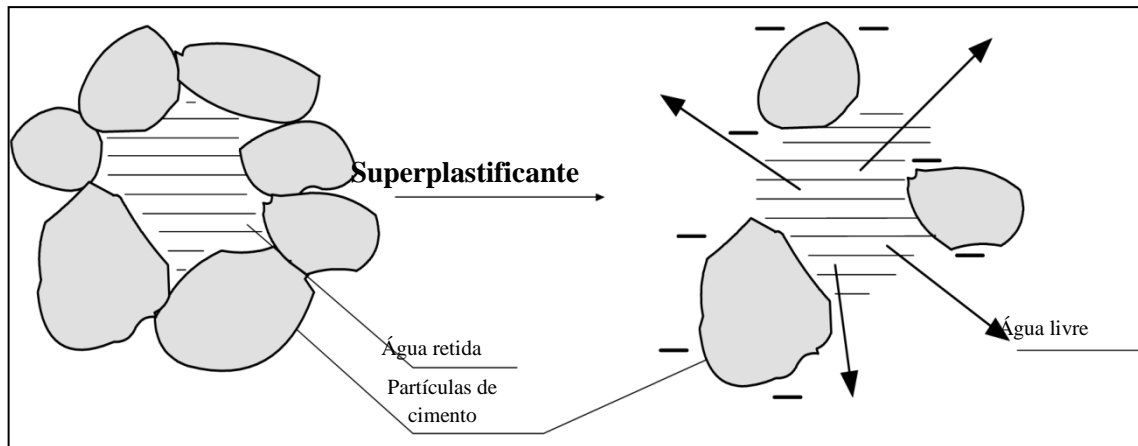


FIGURA 37 – ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DE DESFLOCULAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE CIMENTO IMPOSTO PELA UTILIZAÇÃO DE SP.

A forma de adsorção do SP difere da composição química do cimento, sendo no caso do aluminato de cálcio (C_3A) muito rápida e forte, enquanto que no caso do silicato tricálcico (C_3S) é mais lenta e uniforme. Por outro lado o SP só deve ser adicionado à mistura, após ter decorrido algum tempo de mistura do cimento com a água, para que a adsorção seja uniforme e eficaz.

3) Efeito da estabilização electrostática:

Num meio aquoso, superfícies carregadas similarmente repelem-se por um mecanismo electrosmótico, usualmente chamado de estabilização electrostática. Esta adsorção dos polímeros de SP na superfície das partículas de cimento confere-lhes uma elevada carga negativa, de tal forma que as partículas se repelem umas às outras e a dispersão fica estabilizada.

4) Efeito da estabilização estérica

Os produtos à base de policarboxilatos, além de agirem por repulsão electrostática, promovem a dispersão das partículas de cimento responsável pelo aumento de fluidez, o que pode ser relacionado com um efeito conhecido como repulsão estérica. O efeito da estabilização estérica é produzido pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero.

Esta arquitectura produz um forte efeito dispersante, uma vez que o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de adjuvante cria uma capa de adsorção de grande volume, que impede a aproximação das partículas de cimento.

A acção dos polímeros de melamina sulfonada e dos polímeros de naftaleno sulfonado baseia-se na repulsão electrostática. Quando comparada com o grupo carboxilo, a maior facilidade dissociativa iónica do grupo sulfónico permite desenvolverem-se mais facilmente cargas negativas nas partículas de cimento. As partículas de cimento têm uma concentração iónica elevada e assim é possível estabilizar a dispersão.

No caso dos carboxilatos modificados, o mecanismo que rege a dispersão das partículas de cimento baseia-se na repulsão estérica. Este tipo de SP é constituído pela ligação de polímeros a cadeias de óxido etileno tendo estas uma grande facilidade em reter água, formando assim uma película de

absorção espessa na superfície das partículas de cimento. O efeito provocado por esta película leva a que se desenvolva a repulsão estérica. (Bury e Christensen, 2002) (Li *et al.*, 2005)

A Figura 38 ilustra os fenómenos de repulsão electrostática e repulsão estérica:

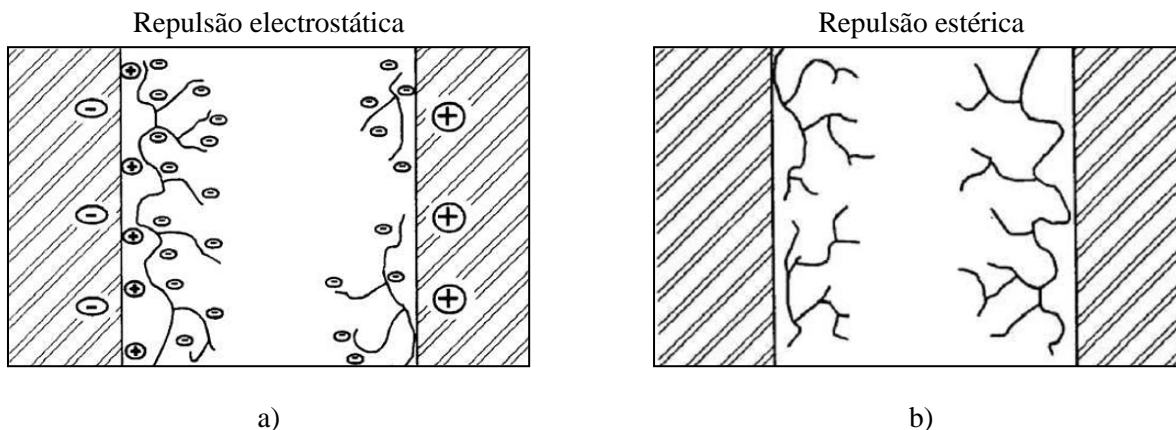


FIGURA 38– FENÓMENOS DE REPULSÃO ELECTROSTÁTICA A) E REPULSÃO ESTÉRICA B) (RAMACHANDRAN, 1998)

No caso de não se recorrer ao uso de SP, as partículas de cimento tendem a flocular devido às forças atractivas geradas entre si. Esta floculação é responsável pela retenção de água da mistura e, quanto maior é o seu efeito, maior será a tixotropia da mistura, resultando numa menor capacidade de espalhamento quando sujeita apenas ao seu próprio peso (Bury e Christensen, 2002).

Estes fenómenos aumentam a viscosidade da mistura e reduzem a área específica dos grãos de cimento disponível para as reacções de hidratação. Para que a distribuição da água na mistura seja homogénea e para que a adsorção se dê na superfície de todos os grãos, as partículas de cimento devem estar desfloculadas e manter-se num alto grau de dispersão. Observa-se que a dispersão promovida pelos SP confere maior homogeneidade à mistura e distribui mais uniformemente os espaços entre grãos.

Desta forma, será previsível que as características dos materiais pulverulentos e dos SP influenciem as propriedades reológicas das misturas de betão.

Os SP influenciam o comportamento das misturas de diversas formas, tendo em vista a minimização do atrito entre as partículas que compõem o betão. Os SP podem ser utilizados com três diferentes objectivos:

- Adição do SP ao betão sem alterar a composição da mistura no caso de se querer um betão mais fluido;
- Adição do SP com o intuito de reduzir o conteúdo em água e o conteúdo em cimento, no caso de se querer um betão mais económico;
- Adição do SP com o intuito de reduzir principalmente o conteúdo em água, no caso de se querer um betão com melhores propriedades no estado endurecido, nomeadamente melhor durabilidade e resistência à compressão.

No caso do BAC, o recurso a SP tem como objectivo a obtenção de um betão de elevada trabalhabilidade mas ao mesmo tempo reduzindo o conteúdo em água. Como resultado da melhor trabalhabilidade do betão no estado fresco contendo SP, o betão obtido é mais denso e com uma

estrutura mais homogénea, o que na maioria dos casos, resulta em menor permeabilidade (Pettersson *et al.*, 1995).

Contudo, a utilização dos SP pode provocar alguns efeitos indesejáveis, como por exemplo, incorporação de ar ou retardamento exagerado no tempo de presa. Por estas razões e até por questões económicas, será necessário realizar um estudo da sua contribuição efectiva no sentido de se obterem betões duráveis e resistentes.

7.4.2 – Agentes modificadores de viscosidade

No desenvolvimento do BAC, a propriedade mais procurada é, como o próprio nome indica, a autocompatibilidade. No entanto, pequenas variações nas quantidades ou características dos seus materiais componentes podem afectar significativamente essa propriedade. A variável mais importante neste processo é o teor em água dos finos, uma vez que qualquer alteração que ocorra implicará uma mudança de teor em água da mistura de betão. A fim de resolver este problema, empregam-se AMV, eficazes no controle das variações no teor em água do betão, aumentando significativamente a coesão do mesmo, assim como inibindo a exsudação e a segregação de mistura (Gettu e Agulló, 2004).

Os AMV são aditivos químicos que quando aplicados ao BAC têm como objectivo influenciar a tensão de cedência, viscosidade plástica e tixotropia da mistura, ou todas estas propriedades ao mesmo tempo. São compostos por polímeros solúveis em água, de alto peso molecular que induzem viscosidade moderada a alta ao betão, o que faz com que este se comporte de um modo pseudoplástico, isto é, a sua viscosidade diminui à medida que se aumenta a taxa de deformação, melhorando assim as suas propriedades no estado fresco, gerando uma mistura estável que irá impedir fenómenos de sangramento, ou mesmo para casos em que se aumentam acidentalmente os teores de água da mistura ou a altura de queda da betonagem (Gettu e Agulló, 2004).

Estes AMV, desenvolvidos originalmente para betão subaquático (Córdoba, 2007) quando utilizados em conjunto com SP de última geração, possibilitam a obtenção de uma mistura de BAC com elevada estabilidade e grande fluidez, garantindo assim uma boa capacidade de passagem da mistura, bombagem fácil de executar e acabamentos excelentes.

Por outro lado, após a aplicação, a viscosidade aumenta e garante ao betão a capacidade de reter água e manter a sustentabilidade das partículas (Khayat *et al.*, 1999).

O emprego de um agente de viscosidade não é contudo imprescindível para obter um betão autocompactável, a sua utilização é indispensável unicamente no caso dos finos, por si só, não serem capazes de conferir suficiente coesão à mistura (AFGC, 2000).

Embora seja claro que o recurso a AMV contribui grandemente para a qualidade da mistura de betão, facilitando ainda a sua produção, ao conseguir que a mistura de betão seja menos sensível a pequenas mudanças no seu conteúdo (Okamura *et al.*, 2000), o facto de se poder recorrer a AMV não deverá evitar que se proceda a uma boa formulação da mistura e a uma selecção cuidadosa dos materiais constituintes.

Os AMV normalmente utilizados poderão conter polímeros naturais, semi-sintéticos ou sintéticos. Exemplos de alguns desses polímeros para cada uma das classes apresentadas são apresentados na Tabela 15:

TABELA 15 – EXEMPLOS DE POLÍMEROS SOLÚVEIS UTILIZADOS NOS AMV (KHAYAT, 1998)

Naturais	Semi-Sintéticos	Sintéticos
<ul style="list-style-type: none"> • Amidos • Goma guar • Goma de alfarroba • Goma de alginato • Ágar • Goma arábica • Goma welan • Goma xantana • Goma rhamsan • Goma gellan • Proteína vegetal 	<ul style="list-style-type: none"> • Amido decomposto e derivados • Derivados de éteres de celulose <ul style="list-style-type: none"> ○ Hipromelose (HPMC) ○ Hidroxietilcelulose (HEC) ○ Carboximethylcelulose(CMC) • Electrólitos <ul style="list-style-type: none"> ○ Alginato de sódio ○ Alginato de propilenoglicol 	<ul style="list-style-type: none"> • Polímeros etilenos • Óxido de polietileno • Poliacrilamida • Poliacrilato • Polímeros vinílicos • Álcool polivinílico

Os AMV à base de polímeros solúveis em água afectam, normalmente, a fase de água do betão. Khayat (1995) descreve três modos de acção pelos quais os AMV funcionam. O primeiro deles consiste na absorção da água pelos polímeros do AMV, o que faz com que uma porção da água fique presa e que os polímeros se expandam. O segundo modo de funcionamento consiste no desenvolvimento de forças de atracção pelos polímeros que assim bloqueiam o movimento da água. Finalmente, o terceiro modo consiste no entrelaçamento em cadeias por parte dos polímeros a baixas tensões de corte, entrelaçamento esse que é quebrado com o aumento das tensões de corte. Este comportamento da mistura é desejável, pois, a baixas tensões de corte, o betão permanece coeso e com alta viscosidade aparente, enquanto que com o aumentar das tensões de corte são quebradas as ligações entre os polímeros, o resulta em menos energia necessária para os processos de mistura, transporte e consolidação.

De entre os AMV actualmente existentes, os bio-polímeros (principalmente a “goma welan”), caracterizam-se pela propriedade que as suas partículas constituintes têm de absorver e expandir quando em contacto com a água. O resultado conjunto destes dois fenómenos é o confinamento da água, de modo semelhante ao que acontece com as partículas de cimento. Os bio-polímeros são constituídos por cadeias lineares de moléculas de glucose tratadas com uma base forte que lhes atribui solubilidade na água, ao mesmo tempo possuindo inúmeras pontes moleculares de hidrogénio que lhes conferem uma configuração helicoidal. Estes compostos apresentam uma massa molecular muito elevada que depende do número de unidades de monossacarídeos que se unem para os formar. A configuração helicoidal desenvolvida na formação destes bio-polímeros irá influenciar o comportamento pseudoplástico do SP (Gettu e Agulló, 2004).

Estudos desenvolvidos por Nawa *et al.* (1998), relatam a influência que a variação nas dosagens da água de amassadura teve nos parâmetros de autocompactabilidade (recorrendo ao ensaio da caixa em L), na capacidade de deformação (recorrendo ao ensaio de espalhamento) e na velocidade de deformação (recorrendo ao ensaio do Funil em V). Do resultado desses estudos foi possível concluir que os AMV à base de glicol foram aqueles que proporcionaram uma maior estabilidade no ensaio de

autocompactabilidade (altura na Caixa em L). Por outro lado, concluiu-se que os AMV à base de “goma welan” proporcionam maior estabilidade nos ensaios de avaliação da capacidade de deformação (diâmetro de espalhamento) e da velocidade de deformação (tempo de escoamento no ensaio do Funil em V).

Compatibilidade

As interações entre os SP e AMV adsorventes são importantes na produção do BAC. Se a compatibilidade for pobre, poderão ocorrer perdas de consistência ou fenômenos de segregação, resultando numa má mistura. Com AMV não adsorventes, como a “goma welan”, poderão existir conflitos entre as cadeias de polímeros do AMV e do SP, o que conseqüentemente irá requerer uma dosagem maior de SP para uma determinada capacidade de enchimento necessária (Takada *et al.*, 1999).

A Figura 39 ilustra os mecanismos de funcionamento dos AMV adsorventes e não adsorventes:

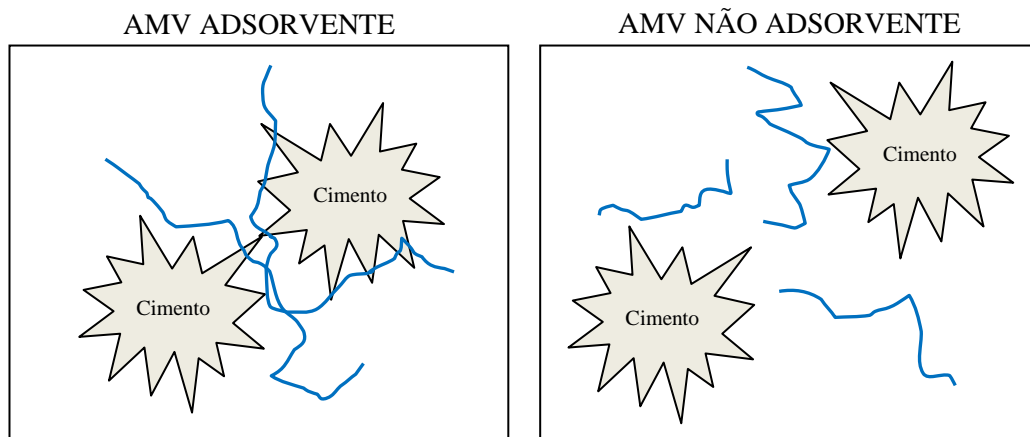


FIGURA 39 – MECANISMOS DE FUNCIONAMENTO DOS AMV (NAWA *ET AL.*,1998)

Pensa-se que a compatibilidade poderá estar intimamente relacionada com o peso molecular dos AMV e com a estrutura química do SP (Nawa *et al.*,1998). No entanto, os mecanismos intervenientes neste conflito ainda não são claros.

Vários estudos mostraram que os AMV de derivados da celulose podem ser utilizados conjuntamente com SP baseados em melamina mas que estes são incompatíveis com SP à base de naftaleno. Por outro lado, a “goma welan” mostrou ser compatível com SP à base de melamina e à base de naftaleno (Khayat, 1998).

Quanto aos efeitos na reologia dos betões, como referido, os AMV aumentam a tensão de cedência e a viscosidade plástica das misturas de BAC. Misturas que recorrem a AMV mostram um comportamento tixotrópico (Khayat, 1998), ou seja, exibem viscosidade alta a uma tensão de cedência baixa, mas a viscosidade é reduzida com o aumento da tensão de cedência. Este fenómeno facilita a colocação do betão dado que este, ao ser colocado, irá sofrer um aumento da sua viscosidade devido ao emaranhamento das cadeias poliméricas do AMV a uma baixa tensão de cedência (Khayat *et al.*, 1999).

Como resultado, a perda de consistência das misturas de BAC com recurso a AMV é maior do que a de misturas de BAC que não recorrem a este aditivo, o que é uma desvantagem. Poderá assim ser

necessária uma quantidade maior de SP para compensar a perda de consistência, resultante da adição dos AMV (Schwartzentruber *et al.*, 2006). Petersson e Billberg (1999) relataram que o espalhamento diminuía mais rapidamente com o aumento da quantidade de “goma welan”, chegando à conclusão que misturas que recorriam a AMV perdiam consistência mais rapidamente do que as misturas que não recorriam a este tipo de aditivos.

O exemplo da Tabela 16 (Khayat, 1995) mostra que, para manter um espalhamento inicial de 190 ± 5 mm com um rácio A/C de 0,41 e um cimento do tipo I, um teor maior AMV requer uma dose maior SP.

TABELA 16 – VARIAÇÕES NA DOSAGEM DE SP DEVIDO À ADIÇÃO DE “GOMA WELAN” (KHAYAT, 1995)

Conteúdo em “goma welan” (%)	0	0,12	0,20	0,24
Conteúdo em SP à base de naftaleno sulfonado (l/m^3)	1,0	3,5	4,0	4,5

Também é mostrado que uma pequena dose de “goma welan” levou a uma grande mudança na exigência de SP. Isso pode posteriormente conduzir a uma maior mudança no desempenho do betão.

No entanto, o AMV não afectou a saturação de SP: apesar do aumento da percentagem de AMV ter levado à diminuição do espalhamento e ao aumento do tempo de espalhamento, a percentagem de saturação da dosagem de SP manteve-se nos 0.2% (Schwartzentruber *et al.*, 2006).

Como visto anteriormente, ao adicionar-se um AMV, a mistura de BAC vai melhorar consideravelmente a sua robustez e ver reduzido o seu risco de segregação.

A capacidade que o AMV tem para diminuir a sensibilidade do BAC ao teor de água foi demonstrada através da execução de ensaios à capacidade de enchimento por Okamura e Ozawa (1994). Apesar de se ter feito variar o teor de água em $\pm 10 l/m^3$, os resultados obtidos nos ensaios da caixa em U ficaram dentro de limites aceitáveis.

Em geral, a adição de um AMV pode resultar em atrasos no tempo de presa, devido ao facto das cadeias de polímeros do AMV absorverem as partículas de cimento, interferindo assim na precipitação dos vários minerais na solução e influenciando a taxa de hidratação da mistura (Khayat e Guizani, 1997).

O tempo de presa irá depender do tipo e do conteúdo do AMV utilizado, bem como do SP, da composição de cimento e pó e da relação A/C. A título de exemplo, ensaios feitos por Khayat e Yahia (1997) mostraram que o tempo de presa inicial de uma argamassa aumentou de 11 horas e 30 minutos para 20 horas e 30 minutos, após a incorporação de uma percentagem de 0,03% da massa do cimento de “goma welan”. Um novo aumento da percentagem de “goma welan” em 0,05% da massa do cimento resultou num aumento do tempo de presa em 2 horas e 30 minutos. A mistura utilizada no ensaio era constituída por um cimento do tipo I, apresentado uma relação A/C de 0,40 e recorrendo a SP à base de naftaleno numa porção que quantificava 0,8% da massa do cimento.

O atraso no tempo de presa foi também mostrado em betões por Khayat (1995), sendo a mistura constituída por uma relação de A/C de 0,45, um cimento do tipo II e uma percentagem de SP de 0,65% da massa do cimento. A mistura mostrou um ligeiro atraso no tempo de presa sem recorrer a AMV, mas a adição de 0,15% de “goma welan” resultou num atraso de 80 minutos no tempo de presa. No caso de misturas de BAC, Lachemi *et al.* (2004) reportaram um aumento de 3 a 6 horas no tempo de presa de misturas de BAC que recorriam a “goma welan” e a AMV baseados em polissacarídeos.

Em suma, dois aspectos dos AMV devem ser tidos em conta quando estes sejam utilizados em misturas de BAC, as suas características e sua interacção com o SP. Os AMV não devem alterar significativamente a consistência do betão, podendo a compatibilidade entre AMV e SP ser avaliada com recurso a ensaios que possam garantir que a consistência da mistura é mantida.

7.5 – Água

A água tem um efeito considerável quer no estado fresco, quer no estado endurecido de um BAC, promovendo a diminuição da tensão de cedência do betão bem como a sua viscosidade plástica. No entanto, o betão é muito susceptível a fenómenos de segregação caso as misturas recorram apenas à adição de água. Como tal, o desenvolvimento de BAC não pôde ser efectuado até que surgissem SP que evitassem estes fenómenos.

A água presente no betão fresco inclui a água livre e a água retida pelos finos (adições e cimento), areia e AMV. O agregado grosso, por si só, é incapaz de reter água.

É esta água livre que controla o desempenho do BAC. Segundo Okamura *et al.* (2000), a presença de água livre é um dos principais factores que determinam a capacidade de enchimento e resistência à segregação de uma mistura. Estudos desenvolvidos por Khayat e Tangtermsirikul (2000) em ensaios de espalhamento de argamassas, com um teor em água livre específico, mostraram ter sucesso na predição do espalhamento final das argamassas e do T_{50} , recorrendo a um modelo de deformabilidade.

O teor de humidade do agregado tem um efeito significativo sobre o conteúdo de água livre da mistura. Uma variação da humidade na areia, na ordem dos 3 a 4%, corresponde a uma variação da razão de A/F em $\pm 0,1$ (Persson, 2000). Como tal, torna-se importante calcular correctamente o teor de humidade dos agregados, principalmente nos agregados finos.

7.6 – Ar

A utilização de agentes introdutores de ar no betão é importante nos casos em que se pretende elevada resistência à acção de gelo/degelo ou quando há falta de finos, permitindo corrigir a granulometria, melhorando a trabalhabilidade, devido ao efeito lubrificante de “rolamento de esferas” das bolhas de ar.

Por outro lado, a presença de ar aumenta o espalhamento e reduz a viscosidade plástica da mistura (Nielsson e Wallevik, 2003). Uma vez que as bolhas de ar apenas conseguem limitar uma pequena quantidade de água, não podendo assim impedir que as partículas de agregado entrem em contacto, estas são consideradas simplesmente como materiais de enchimento na produção de BAC (Okamura e Ozawa, 1995). No entanto, a presença de bolhas de ar na mistura de betão é um sinal de ocorrência de fenómenos de segregação.

7.7 – Outros materiais

Outros materiais como a fibra de carbono, fibras de aço, fibra de vidro têm sido utilizados com sucesso na obtenção de BAC, sendo possível melhorar as suas características no estado endurecido, nomeadamente a ductilidade e a resistência. Porém, no que diz respeito ao comportamento reológico de misturas que recorrem a estes materiais, verificaram-se diminuições na capacidade de enchimento e aumento dos fenómenos de bloqueio (Groth, 1999).

7.8 – Conclusões

O presente capítulo procurou fazer uma caracterização aprofundada dos diversos componentes utilizados na produção do BAC, das suas características e da sua influência no comportamento do BAC no estado fresco. Seguem-se as conclusões mais pertinentes retiradas dos conceitos abordados:

Existem diversos materiais constituintes passíveis de ser utilizados na tecnologia dos betões. Todos os materiais mencionados neste capítulo podem ser utilizados tanto na produção do BC como na produção do BAC. No entanto, a maior especificidade do BAC no estado fresco implicou o surgimento de vários estudos que tiveram como objectivo a melhor caracterização dos seus materiais constituintes bem como a influência que estes têm no seu comportamento reológico.

No que diz respeito aos cimentos, concluiu-se que a eficaz dispersão das suas partículas está dependente de interacções químicas e físicas. As interacções químicas dispersantes dizem respeito às interacções entre os componentes do cimento e os adjuvantes, enquanto que as interacções físicas estão relacionadas com a distribuição granulométrica das partículas de cimento e a sua forma.

A utilização de cimentos Portland de baixo calor de hidratação ou cimentos ricos em silicato bicálcico (C_2S) são tidos como adequados para a utilização na composição dos BAC, visto que acentuam a acção dispersante dos SP. O aumento da compacidade do cimento mostrou ser útil no aumento da coesão da mistura.

No que diz respeito às adições, verificou-se existirem adições do tipo I (quase inertes) e adições do tipo II (pozolânicas).

Do grupo de adições do tipo I destaca-se o fíler calcário que corresponde à adição correntemente mais utilizada, tendo mostrado sucesso na substituição parcial do cimento, melhoramento das propriedades reológicas do BAC e redução nas dosagens de SP.

Quanto ao grupo de adições do tipo II, destacam-se as cinzas volantes que correspondem às adições do tipo II utilizadas mais frequentemente. As cinzas volantes mostraram ser capazes de proporcionar melhorias ao nível da trabalhabilidade do betão, como consequência do efeito de rolamento proporcionado pela forma esférica das suas partículas. À semelhança do fíler calcário, as cinzas volantes permitem também reduzir bastante as dosagens de SP através da substituição parcial do cimento.

Ainda no grupo de adições do tipo II, importa mencionar a sílica de fumo. A principal vantagem apresentada pela sílica de fumo é a possibilidade de alargar o período de trabalhabilidade das misturas,

contudo, a sua utilização poderá levar a um consumo de SP superior ao decorrente da utilização de qualquer uma das restantes adições abordadas.

Respectivamente aos agregados a utilizar na composição de misturas de BAC, a sua escolha mostrou estar fortemente dependente da disponibilidade local. No entanto, esta escolha implicará necessariamente uma adequada aferição das suas características dado que estas são susceptíveis de afectar bastante o comportamento reológico do BAC. Concluiu-se que a optimização do volume total de agregados e a proporção entre agregado fino e grosso é da maior importância na composição de um BAC. A granulometria contínua e uma melhor compactidade dos agregados resulta numa maior capacidade de deformação do betão.

O surgimento dos SP, nomeadamente dos SP à base de policarboxilatos modificados permitiu grandes avanços na tecnologia do BAC. O seu efeito no melhoramento reológico das misturas é amplamente reconhecido, assim como a sua maior eficiência comparativamente aos restantes SP. Os SP à base de policarboxilatos modificados permitem dosagens de misturas que recorrem a menores dosagens de SP, mantendo os parâmetros de autocompactabilidade necessários.

No que respeita aos AMV, estes são normalmente utilizados para controlar os fenómenos de segregação no BAC. No entanto podem também ser utilizados para reduzir os efeitos da variação de humidade no agregado fino, o que pode influenciar significativamente a dosagem de água de amassadura.

Foi dado especial destaque aos AMV à base de “goma welan” e glicol. O AMV à base de “goma welan” mostra ser eficiente na promoção da estabilidade aquando da medição da sua capacidade de espalhamento (ensaio de espalhamento) e deformação (ensaio do funil em V) enquanto que os AMV à base de glicol são eficientes na promoção da estabilidade aquando da medição dos seus parâmetros de autocompactabilidade (ensaio da caixa em L).

CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

8.1 – Objectivo

O presente capítulo tem como objectivo a apresentação das conclusões mais importantes retiradas da caracterização dos assuntos relevantes à influência da composição no comportamento reológico do BAC. Finalmente será reservado um espaço referente a matérias que se considera serem merecedoras de desenvolvimentos futuros.

8.2 – Conclusões finais

Ao longo desta dissertação, foi desenvolvido um trabalho no sentido de caracterizar a influência da composição no comportamento reológico do BAC. Procuraram-se identificar detalhadamente os conceitos de reologia e reometria de misturas no estado fresco, os equipamentos utilizados para a sua aferição e os tipos de composições que são frequentemente mais utilizados na produção do BAC juntamente com os métodos de doseamento mais difundidos, assim como se procurou efectuar o levantamento das directrizes respeitantes à aplicação e estudo desta nova tecnologia de construção, descrevendo a sua evolução ao longo dos últimos anos. Finalmente, no capítulo mais extenso do presente documento, foi efectuada uma pesquisa detalhada sobre a influência dos materiais constituintes mais frequentemente utilizados nas composições do BAC, procurando descrever os efeitos que estes têm na reologia do BAC do ponto de vista físico e químico.

8.2.1 – Medição e previsão dos parâmetros reológicos.

O BAC é uma tecnologia de construção que oferece muitas vantagens, tais como a capacidade de enchimento de zonas com elevada taxa de armadura ou em zonas onde é impossível aplicar mecanismos de compactação e vibração, permitindo a redução de custos inerentes à utilização deste tipo de equipamentos;

Os ensaios de aferição dos parâmetros reológicos do BAC que foram abordados no presente documento são nomeadamente o ensaio de espalhamento, o ensaio do funil em V, o ensaio da caixa em L, o ensaio de segregação e o ensaio do anel J;

Para o caso do ensaio de espalhamento e do funil em V, concluiu-se existir uma boa correlação com os parâmetros reológicos (tensão de cedência e viscosidade plástica) em condições de escoamento onde não ocorram fenómenos de segregação e bloqueio;

O ensaio do anel J mostra ser eficiente na aferição dos parâmetros de autocompactabilidade de uma mistura de BAC, pretendendo simular o escoamento de uma mistura de betão através de armaduras sob condições de não-confinamento;

Vários autores procuraram desenvolver expressões matemáticas que relacionassem os resultados obtidos nos ensaios de obra com a tensão de cedência e viscosidade plástica medidos em viscosímetros e reómetros. As primeiras expressões apresentadas referem-se aos casos do ensaio de espalhamento e do ensaio da caixa em L, resultando de abordagens teóricas e empíricas sobre os ensaios e os seus resultados. Houve alguma dificuldade na obtenção de expressões que correlacionassem os parâmetros de *Bingham* com os parâmetros medidos nos restantes ensaios de obra. Tal poderá estar relacionado, por um lado, com a maior tendência para a utilização do ensaio de espalhamento e do ensaio da caixa em L.

Por outro lado, foram incluídas abordagens desenvolvidas por outros autores que procuraram desenvolver expressões de previsão do comportamento reológico, não estando estas dependentes de valores de medição dos ensaios expeditos.

8.2.2 – Composições e influência dos materiais constituintes na reologia

8.2.2.1 – Características e metodologia de obtenção de composições

As diferenças de processos entre a obtenção de um BAC e a obtenção de um BC consistem no cuidado a ter em conta no doseamento das misturas do BAC a fim de se obterem os parâmetros de autocompactabilidade desejados, o que poderá ter influência no volume de pasta e na relação A/F. Outro aspecto a ter em conta é o facto de ser necessária a realização de um estudo prévio sobre as fases de pasta e argamassa que terá como objectivo a redução da quantidade de ensaios futuros a realizar sobre a mistura;

As composições dos BAC dependem em larga medida da aplicação, no que se refere ao elemento a betonar e ao processo de betonagem. Com efeito, as exigências para as propriedades no estado endurecido, a capacidade de enchimento, a resistência à segregação e a habilitação para fluir por espaços estreitos dependerão da aplicação. Por outro lado, o tipo de materiais disponíveis e os métodos de estudo dos betões são muito diversos pelo que conduzem a diferentes composições;

A crescente utilização do BAC e o acréscimo de informação daí proveniente levou à execução de directrizes. A existência destas directrizes permitiu regrar a utilização desta tecnologia de construção durante o tempo em que não existiam normas em vigor para a análise específica do BAC. Isto permitiu reunir informação consistente através da experiência adquirida, o que culminou mais tarde na redacção de normas que hoje em dia regulam os processos.

8.2.2.2 – Influência dos materiais constituintes no comportamento do BAC

O âmbito do tema da presente dissertação implicou uma pesquisa, a mais aprofundada possível, que permitisse caracterizar a influência de cada componente no comportamento do BAC no seu estado

fresco. Foram enumerados os principais componentes utilizados na produção do BAC, tendo sido feita a descrição das suas características e dos seus princípios e modos de actuação;

Os cimentos Portland de baixo calor de hidratação ou cimentos ricos em silicato bicálcico (C_2S) mostram ser mais adequados para a utilização no BAC, visto acentuarem a acção dispersante dos SP;

A superfície específica e a distribuição granulométrica das partículas do cimento são factores importantes na velocidade de hidratação uma vez que a hidratação ocorre na interface entre a partícula e a água. Quanto mais finos os cimentos maior superfície existe para hidratar;

Concluiu-se também que quanto maior a compacidade das partículas finas, maior a fluidez da pasta, ou seja, menor o valor da tensão de cedência. Por outro lado quanto maior a superfície específica do cimento, maior será a viscosidade plástica. Num cimento com maior superfície específica, o número de partículas de finos na pasta aumenta, e assim aumenta a área em contacto com a água. Desta forma, a distância entre partículas diminui e a frequência de colisão e os pontos de contacto entre as partículas aumenta;

No que concerne às adições, verificou-se existirem dois tipos: adições do tipo I (quase inertes) e adições do tipo II (pozolânicas);

O fíler calcário, que corresponde à adição do tipo I utilizada com mais frequência, mostra ser eficiente na substituição parcial do cimento, melhorando as propriedades reológicas do BAC e reduzindo as dosagens de SP;

As cinzas volantes, que correspondem a adições do tipo II, mostraram ser eficazes na obtenção de melhorias ao nível da trabalhabilidade do betão devido à forma esférica das suas partículas. À semelhança do fíler calcário, as cinzas volantes permitem também reduzir bastante as dosagens de SP através da substituição parcial do cimento;

Ainda no grupo de adições do tipo II, importa mencionar a sílica de fumo que mostrou ser eficiente no alargamento do período de trabalhabilidade das misturas. Contudo, a sua utilização poderá levar a um maior consumo de SP;

No que diz respeito aos agregados, concluiu-se que a optimização do volume total de agregados e a proporção entre agregado fino e grosso é da maior importância na composição de um BAC. A granulometria contínua e uma melhor compacidade dos agregados resulta numa maior capacidade de deformação do betão;

Do levantamento das características dos SP, pode concluir-se ser considerável o seu efeito no melhoramento reológico das misturas de BAC, reduzindo a tensão de cedência e viscosidade plástica. O seu efeito dispersante resulta de interacções químicas e físicas entre as partículas finas, estando as interacções físicas relacionadas com a modificação das forças de superfície entre partículas e a alteração da tensão superficial da fase aquosa, enquanto que as interacções químicas baseiam-se no modo como os adjuvantes modificam as reacções de hidratação;

No que respeita aos AMV, estes são normalmente utilizados para controlar os fenómenos de segregação no BAC. No entanto podem também ser utilizados para reduzir os efeitos da variação de humidade no agregado fino, o que pode influenciar significativamente a dosagem de água de amassadura;

Foi dado especial destaque aos AMV à base de “welan gum” e glicol. O AMV à base de “welan gum” mostra ser eficiente na promoção da estabilidade aquando da medição da sua capacidade de espalhamento (ensaio de espalhamento) e deformação (ensaio do funil em V) enquanto que os AMV à base de glicol são eficientes na promoção da estabilidade aquando da medição dos seus parâmetros de autocompactabilidade (ensaio da caixa em L).

8.3 – Desenvolvimentos futuros

Espera-se que nos próximos anos, a tecnologia do BAC tenha uma maior utilização devido à padronização dos ensaios e evolução das directrizes. Para além disto, será benéfico para a maior implementação do BAC, um estudo mais aprofundado relacionado com a influência dos componentes no comportamento do betão no seu estado fresco e endurecido. Para este efeito, a investigação efectuada nesta dissertação pode ser continuada pelos seguintes trabalhos:

Obtenção de métodos de doseamento de composições para utilizações mais específicas (diferentes fórmulas para diferentes elementos estruturais, ou prescrição de diferentes tipos de materiais consoante o elemento estrutural a que se destina o betão) que tenham em conta as propriedades de cada material constituinte e o seu efeito na reologia das misturas;

Desenvolvimento de modelos numéricos baseados em abordagens empíricas ou teóricas, capazes de relacionar os parâmetros medidos nos ensaios de reologia com as medições obtidas nos ensaios de trabalhabilidade, nomeadamente nos ensaios do funil em V e do anel J, tendo em conta as características dos materiais constituintes.

Considera-se assim cumprido o objectivo desta dissertação, embora seja muito vasto o âmbito em que o presente documento se insere. De facto, seria impossível em tempo útil, a concretização de uma pesquisa que abrangesse a vasta gama de materiais possíveis de utilizar na composição de um BAC. Não obstante, pensa-se terem sido cumpridos todos os objectivos propostos à redacção do presente documento com a caracterização dos parâmetros de reologia, sua aferição, enumeração de várias expressões matemáticas de previsão do comportamento no estado fresco, exposição dos diferentes métodos de composição e levantamento da influência dos materiais constituintes, mais frequentemente utilizados, no comportamento de um BAC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarre, T., & Domone, P. (2004). Summary report on Workpackage 2:Development of mix designs and material selection assurance.
- AFGC (2000). Betons Auto-Plaçants: Recommandations Provisoires. *Documents Scientifiques et Techniques*. Association Française de Génie Civil.
- Aitcin, P.C. (1998). *High Performance Concrete*. New York: E&FN Spon.
- Barnes, H.A., Hutton, J.F., & Walters, K. (1991). *An Introduction to Rheology* (1st Ed.). New York: Elsevier, (pp. 11-15).
- Bartos, P. (1998). An Appraisal of the Orimet Test: as a Method for On-site Assessment of Fresh SCC Concrete. *International Workshop on Self-Compacting Concrete* (pp. 119-137).
- Bartos, P. (2005). Testing-SCC: towards new European standards for fresh SCC., *SCC- China 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete* (pp. 25-44). Paris: RILEM Publication SARL.
- Bartos, P., Sonebi, M., Tamimi, A.K. (Eds.). (2002). *Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests*. Cachan Cedex, France: RILEM.
- Billberg, P. (1999). Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience. *Swedish Cement and Concrete Research Institute* (pp. 142-163). Estocolmo.
- Billberg, P. (2000). Influence of superplasticizers and slag blended cement on the rheology of fine mortar part of concrete. *Nordic Concrete Research*, 24.
- Billberg, P. (2002). Mix design model for self-compacting concrete., In *The 1st North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete* (pp. 62-71). Chicago.
- Bonen, D., Deshpande, Y.S., Olek, J., Shen, L., Struble, L.J., Lange, D.A., & Khayat, K.H. (2007). Robustness of SCC. In Lange, D.A., (Ed), *Self-consolidating concrete – A white paper by researchers at the Center of Advanced Cement Based Materials* (ACBM) (pp. 4-22).
- Brite-Euram (2000). Rational Production and Improved Working Environment Through Using SCC. *Brite-EuRam Project BPPR-CT96-0866. Report Task 4*, (pp. 3-22).
- Bui, V. Montgomery, D., (1999). Mixture proportioning method for self compacting high performance concrete with minimum paste volume. *Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC*. Estocolmo. (pp. 371-386).
- Bury, M.A., & Christensen, B.J. (2002). Role of innovative chemical admixtures in producing self-consolidating concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*. Chicago, IL: ACBM.
- Chidiac, S.E., & Habibbeigi, F. (2005). Modelling the Rheological Behaviour of Fresh Concrete: An Elasto-Viscoplastic Finite Element Approach. *Computers and Concrete*, 2, (2), 97-110.
- Chidiac, S.E.; Maadani, O.; Razaqpur, A.G.; & Mailvaganam, N.P. (2000). Controlling the Quality of Fresh Concrete – A New Approach. *Magazine of Concrete Research*, 52, (5), 353-363.
- Córdoba, B. (2007). *Creep and Shrinkage of Self-Consolidating Concrete (SCC)*. Master Thesis: Master of Science in Civil Engineering. University of Wyoming, U.S.A: Department of Civil and Architectural Engineering.
- Cussigh, F., Sonebi, M., & De Schutter, G. (2003). *Project Testing SCC – Segregation Test Methods*.
- Cyr, M., & Mouret, M. (2003). Rheological Characterization of Superplasticized Cement Pastes Containing Mineral Admixtures: Consequences of Self-Compacting Concrete Design. In Malhotra, V.M. (Ed), *Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, (pp. 241-255).

Referências Bibliográficas

- Daczko, C. (2002). Stability of Self Consolidating Concrete, Assumed or Ensured?. In *First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete*. USA, (pp. 242-252).
- Daczko, J.A. (2003). A comparison of passing ability test methods for self-consolidating concrete. In *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, (pp. 332-348). Reykjavik, Iceland.
- Danish SCC-Consortium (2004). What is the objective of the SCC-Consortium. *Newsletter nº1 from the SCC-Consortium*.
- De Schutter, G. (2005). Testing-SCC: Guidelines for testing fresh self-compacting concrete.
- Domone, P. (2006). Mortar tests for material selection and mix design of SCC. *Concrete International*.
- Domone, P., Chai, H., & Jin, J. (1999). Optimum Mix Proportioning of Self-Compacting Concrete. In *Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction* (pp. 272-288). London: Thomas Telford.
- Domone, P., Chai, H.W. (1997). Testing of binders for high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 27, (8), 1141-1147.
- Edamatsu, Nishida, & Ouchi (1999). A rational mix-design method for SCC considering interaction between coarse aggregate and mortar particles. *Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC*, (pp. 307-320). Estocolmo, Suécia.
- EFNARC (2002). Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete.
- EFNARC (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, production and use*.
- EN 12350-10 (2007). *Testing fresh concrete – Part 10: Self-compacting concrete – L-box test*.
- EN 12350-11 (2007). *Testing fresh concrete – Part 11: Self-compacting concrete – Sieve segregation test*.
- EN 12350-12 (2007). *Testing fresh concrete – Part 12: Self-compacting concrete – J-ring test*.
- EN 12350-8 (2007). *Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test*.
- EN 12350-9 (2007). *Testing fresh concrete – Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test*.
- Esping, O. (2003). Methods for characterisation of fillers and fines for selfcompacting concrete. *3rd International RILEM Symposium of SelfCompacting Concrete*, Reykjavik, Iceland.
- Estevéz, J., & Gutiérrez, M. (1990). Hormigón de alta resistencia. Estado actual de conocimientos. *Centro de estudios y experimentación de obras públicas*, (pp. 189). Madrid: Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.
- Fang, W., Jianxiong, C., et al. (1999). Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives. *1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 11-16 September, Estocolmo, Suécia.
- Felekoglu, B. (2008). A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22, (4), 646-654.
- Ferraris, C. F., & De Larrard, F. (1998). Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology. *NISTIR 6094, National Institute of Standards and Technology*.
- Ferraris, C.F. (1999). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104, (5), 461-478.
- Ferraris, C.F., Brower, L. Ozyildirim, C., & Daczko, J. (2000). Workability of Self-Compacting Concrete. In *Proceedings of International Symposium on High Performance Concrete, PCI/FHWA/FIB*, (pp. 398-407). Orlando, Florida.
- Flatt, R., Bowen, P. (2006). Yodel: A yield stress model for suspensions. in *Journal of the American Ceramic Society*, 89, (4), 1244-1256

- Gettu, R., & Agulló, L. (2004). *Estado del Arte del Hormigón Autocompactable y su caracterización. Parte I: Cemento y Hormigón*, (pp. 50-67).
- Gomes, P., Gettu, R., Agulló, L., & Bernard, C. (2001). Experimental optimization of high strength self-compacting concrete. *Proceedings of The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, (pp. 376–386). Tokio, Japan.
- Goodier, C. I. (2003). Development of self-compacting concrete, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 156, (4), 405 – 414.
- Groth, P. & Nemegeer, D. (1999), The Use of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete. *1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete on Self-Compacting Concrete*, (pp. 497-507), França.
- Hanehara, S., & Yamada, K. (1999). Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, adsorption behavior of admixture, and paste rheology. *Cement and Concrete Research*, 29, 1159-1165.
- Ho, D., Sheinn, A., Ng, C.C., & Tam, C.T. (2002). The use of quarry dust for SCC applications. *Cement and Concrete Research*, 32, 505-511.
- Hu, C., & Larrard, F. (1996). The rheology of fresh high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, (2), 283-294.
- Hu, C., De Larrard, F., Sedran, T., Boulay, C., Bosc, F., & Deflorenne, F. (1996). Validation of BRTHEOM, The New Rheometer for Soft to Fluid Concrete. *Materials and Structures*, 29, 620-631.
- Jeknavorian, A.A., Jardine, L., Ou, C.C., Koyata, H., & Folliard, K. (2003). Interaction of Superplasticizers with Clay-Bearing Aggregates. In Malhotra, V.M., (Ed.), *Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, (pp.143-159).
- Kashima, S. & Kanazawa, K., Okada, R., (1998). Application of self compacting concrete made with low-heat cement for bridge substructures of Honshu-shikoku bridge authority. *International Workshop on Self-Compacting Concrete*, pp. 255-261. Japan.
- Khayat, K.H. (1995). Effects of Antiwashout Admixtures on Fresh Concrete Properties. *ACI Materials Journal*, 92, (2), 164-171.
- Khayat, K.H. (1998). Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials – An overview. *Cement and Concrete Composites*, 20, (2-3), 171-188.
- Khayat, K.H. (1999). Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete. *ACI Materials Journal*, 96, (3), 346-353.
- Khayat, K.H., & Tangtermsirikul, S. (2000). Fresh Concrete Properties (Background Document). In *Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, (pp. 17-22).
- Khayat, K.H., and Guizani, Z. (1997). Use of Viscosity Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete, *ACI Materials Journal*, 94(4), 332-340.
- Khayat, K.H., Hu, C., & Monty, H. (1999). Stability of Self-Consolidating Concrete, Advantages and Potential Applications. *1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, (pp. 141-155). Stockholm: Proceedings RILEM Publications.
- Khayat, K.H., Yahia, A. (1997). Effect of welan gum-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout. *ACI Materials Journal*, 94, (5), 365 –372.
- Kitamura, H., Nishizaki, T. & Chikamatsu, R., (1998). Construction of prestressed concrete outer tank for LNG storage using high-strength self-compacting concrete. *International Workshop on Self-Compacting Concrete* (pp. 18-28). Japan.
- Lachemi, M., Hossain, K., Lambros, V., Nkinamubanzi, P.C., & Bouzoubaa, N. (2004). Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 34, (2), 185-193.

- Larrard, F. (2000). *Structures granulaires et formulation des bétons*, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (OA34), Paris
- Li, C.-Z. (2001). Investigation on shear flow of self compacting concrete, *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan, (pp. 68-79)
- Li, C.-Z., Feng, N.Q., Li, Y-D., & Chen, R.-J. (2005). Effects of polyethylene oxide side chains on the performance of polycarboxylate-type water reducers. *Cement and Concrete Research*, 35, 867–873.
- Mehta, P.K., Monteiro, P. (1994). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais* (1.Ed), p.573. São Paulo: PINI.
- Murata, J., & Kikukawa, H. (1992). Viscosity Equation for Fresh Concrete. *ACI Materials Journal*, 89, (3), 230-237.
- Nawa, T., Izumi, T., Edamatsu, Y. (1998). State-of-the-art Report on Materials and Design of Self-Compacting Concrete. In *International Workshop on Self-Compacting Concrete*, (pp. 158-190).
- Nguyen, T., Roussel, N., & Coussot, P. (2006). Correlation between L-Box Test and Rheological Parameters of a Homogeneous Yield Stress Fluid. *Cement and Concrete Research*, 36, (10), 1789-1796.
- Nielsson, I., & Wallevik, O.H. (2003). Rheological evaluation of some empirical test methods-preliminary results. In *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, (pp. 59-68). Reykjavik, Iceland.
- NP EN 206-1 (2005), *Betão Parte1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*.
- NP EN 450-1 (2006). *Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (1999). Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future (keynote Lectures). In *Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, (pp. 3-14). Suécia.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, (1), 5-15.
- Okamura, H., & Ozawa, K. (1994). Self-compactable high-performance concrete in Japan. In *International Workshop on High-performance Concrete*, (pp. 1-16).
- Okamura, H., & Ozawa, K. (1995). Mix design for self-compacting concrete. *Concrete Library of JSCE*, n° 25, 107-120.
- Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M. (2000). Self-Compacting Concret. In *Structural Concrete: Journal of the fib*, 1, (1), 3-17. Thomas Telford Ltd.
- Ouchi, M.(1998). State of the art report: self- compactability evaluation for mix proportioning and inspection. In *International Workshop on Self-Compacting Concrete*, (pp.108-145). Kochi, Japan.
- Ouchi, M., Hibino, & Okamura, H. (1997). Effect of Superplasticizer on Self Compactability of Fresh Concrete. *Transportation Research Record*, 1574, 37-40.
- Park, C.K., Noh, M.H., & Park, T.H. (2005). Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35, 842-849.
- Persson, B. (2000). Consequence of cement constituents, mix composition and curing conditions for self-desiccation in concrete. *Materials and structures*, 33, 352-362.
- Petersson, O. (2000). Test Method Description: L-Shape Box Test (Background Document). In *Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, (pp. 126-128).
- Petersson, O., & Billberg, P. (1999). Investigation on blocking of SCC with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler. *Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC* (pp. 320-348). Estocolmo, Suécia.
- Petersson, O., Billberg, P., et al. (1995). *Effects of the second generation of superplasticizers in concrete properties*.
- Ramachandran, V.S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook*. Noyes Publications.

- Ramachandran, V.S., *et al.* (1998). *Superplasticizers: properties and applications in concrete*. Ottawa: CANMET.
- Roussel, N., & Le Roy, R. (2005). The Marsh cone: a test or rheological apparatus?. *Cement and Concrete Research*, 35, 823-830.
- Saak, A., Jennings, H., & Shah, S. (2001). New methodology for designing SCC. *ACI Materials Journal*, 429-439.
- SCC European Project Group (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete-Specification, Production and Use*. UK.
- Schowalter, W. R., & Christensen, G. (1998). Toward a Rationalization of the Slump Test for Fresh Concrete: Comparisons of Calculations and Experiments. *Journal of Rheology*, 42, (4), 865-870.
- Schwartzentruber, L.D., Le Roy R., & Cordin, J. (2006). Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). *Cement and Concrete Research*, 36, (7), 1203-1213.
- Sedran, & Larrard (1999). Optimization of SCC thanks to packing model. In *Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC*, (pp. 315-338). Estocolmo, Suécia.
- Shadle, R., & Somerville, S. (2002). The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self-Compacting Concrete. In *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, (pp. 235-241). Chicago, IL: ACBM.
- Skarendahl, A. (1998). Self-Compacting Concrete in Sweden – Research and Application. In *International Workshop on Self-Compacting Concrete*, (pp. 45-74).
- Skarendahl, A. (2000a). Definitions and Development Objectives (Background Documents). In *Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, (pp. 4-15).
- Skarendahl, A. (2000b). Environment (Background Document). In *Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, (pp. 91-92).
- Skarendahl, A. (2003). The present – The future. In Wallevik, O.H., & Nielsson, I., (Eds), *The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, (pp. 8-19).
- Sonebi, M. (2004). Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete Research*, 34, (7), 1199-1208.
- Takada, K., Pelova, G., & Walraven, J.C. (1999). Influence of chemical admixtures and mixing on the mix proportion of general purpose self-compacting concrete. *Modern Concrete Materials: Binders, Additions and Admixtures*, (pp. 653-673). Londres, Reino Unido.
- Takada, K., Pelova, G., Walraven, J.C. (1998). The first trial of self-compacting concrete in the Netherlands according to the Japanese design method. In *The 13th FIP Congress*, (pp. 111-118).
- Tangtermsirikul, S.; Bui, V. K. (1995). Blocking criteria for aggregate phase of self compacting high performance concrete. In *Proceedings of Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering*, (pp. 48-59). Bangkok, Tailândia.
- Tanigawa, Y., Mori, H., Kurokawa, Y., & Komura, R. (1992). Rheological Study on Slumping Behavior of Fresh Concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. 14, (pp. 2-9).
- Vikan, H., & Justnes, H. (2003). Influence of silica fume on rheology of cement paste. In *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, (pp. 190-201). Reykjavik, Islândia.
- Walraven, J. (2003). Structural applications of self compacting concrete. *Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, PRO 33, (pp.15-22)
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., & Forssberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30, (4), 274-282.