

BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL ECO- EFICIENTE

FRANCISCO QUINTAS ARAÚJO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de
Sousa Coutinho

SETEMBRO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

A apresentação da minha Dissertação de Mestrado não ficaria completa, sem o meu reconhecimento a todos aqueles que contribuíram para mais uma etapa da minha formação.

Começo por agradecer à minha orientadora Professora Joana Sousa Coutinho, pela contínua motivação e disponibilidade. Sempre soube que organizar um trabalho com a sua orientação, era uma boa escolha.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção, em especial ao Gil, Irene, Manuel, Cecília, Fernando e Eng^a. Patrícia, pela ajuda e disponibilidade, facilitando o meu trabalho.

À Eng^a Ana Mafalda Matos, pela inigualável simpatia, disponibilidade no auxílio e contínua presença em todas as fases do trabalho.

Aos meus colegas Telma e José, por ter sido possível contar com eles sempre que quisesse, só possível entre amigos.

Aos meus professores do Departamento de Materiais, com quem muito aprendi e que tenho de reconhecer-lhes competência por elevada qualidade técnica e humana.

À minha querida mulher Madalena basilar da família e aos meus filhos Diogo, Vasco e Inês, pela compreensão de lhes ter retirado momentos em conjunto, para favorecer os meus estudos. Tendo abdicado muito de si para proporcionar esse tempo, espaço e suporte indispensável à conclusão de mais esta etapa.

Aos meus pais que me estimularam e me auxiliaram nos momentos menos bons, acreditaram, desde o primeiro instante, pelo que lhes fico muito grato, por toda a educação.

Ao meu irmão, pela dinâmica criada, que me ajudou a não esmorecer, acompanhando-me sempre neste trajecto.

A todos quanto, de algum modo contribuíram e não foram aqui mencionados, agradeço a atenção e dedicação de que fui alvo.

RESUMO

Na actualidade, o betão e o aço são os materiais mais usados em estruturas na Engenharia Civil. Estes materiais complementam-se e apresentam na estrutura as suas propriedades mais relevantes, agora majoradas pela excelente capacidade de se agruparem como um todo. Conhecidas que são as propriedades dos aços, nomeadamente a crescente capacidade resistente a tensões de serviço e sua melhor ductilidade, é apropriado também que o betão acompanhe esse desenvolvimento, sendo sempre capaz de na estrutura desempenhar as suas principais atribuições, muito em particular a de proteger o aço de corrosão e a de ser capaz de se defender das agressões ambientais, para que se obtenha uma estrutura durável.

Em fase de projecto, antes mesmo de calcular e quantificar a capacidade resistente da estrutura, tomando como partida as acções a que a estrutura poderá vir a estar sujeita durante a sua vida útil, é fundamental avaliar correctamente as condições de exposição às agressões ambientais, para que se possa seleccionar um betão e seus constituintes, capaz de responder com eficiência aos requisitos de durabilidade e assim, produzir uma estrutura apta para retribuir convenientemente a vida útil de projecto.

Desde sempre se reconheceu sucesso ao betão. As suas propriedades mecânicas e o baixo custo de produção são-lhe muito favoráveis quando comparado com outros materiais utilizados na Engenharia Civil. Contudo, talvez o seu maior êxito venha da habilidade e possibilidade de ser moldado em qualquer forma estrutural exigida, tirando partido do seu comportamento no estado fresco. Acresce-se ainda, a possibilidade de o produzir, utilizando facilmente constituintes e adições acessíveis na natureza, no processamento de materiais inorgânicos anteriormente usados na construção e no uso de resíduos industriais habitualmente capturados em filtros desde a implementação de leis ambientais mais rigorosas, ou até, mesmo, recorrendo à preparação de resíduos, tornando-os hidráulicos ou hidráulicos latentes quando em conjunto com cimento Portland, e que, podendo ser reciclados para outras indústrias, habitualmente são colocados em aterros. Este paradigma torna o betão eco eficiente, pois ao ser produzido com menos recursos pode ser eficiente e ter impacto ambiental reduzido.

O conceito cada vez mais actual de durabilidade e a consciência em respeitar os princípios ambientais, pode tornar o betão, o principal dinamizador de uma construção ecológica e sustentável. Efectivamente é por todos reconhecido que o aquecimento global deve-se em grande parte à emissão de CO₂ e que, na indústria do betão, mais de 85% da emissão de carbono provem dos fornos de produção do clínquer. Torna-se urgente repensar esta indústria da construção e em particular o próprio betão. Numa análise mais distinta, pode-se considerar que, a palavra/conceito redução é desde logo um objectivo, quaisquer que sejam as propostas de actuação. Se a construção de estruturas com menos betão pode ser pensada, também menos cimento nas misturas de betão e menos clínquer para produzir o cimento deve ser estudado. No momento já cerca de 35% a 65% da massa de clínquer presente no cimento Portland, pode ser substituída por diversos materiais complementares. Os exemplos mais comuns são as cinzas volantes e pozolanas naturais.

A proposta a desenvolver neste trabalho será a de, produzir um betão eco eficiente, com substituição parcial do cimento Portland por resíduo de vidro finamente moído, com capacidade de se compactar sem recurso a energia de vibração, produzir betões de elevada resistência, ou betões que visam as necessidades da indústria do Betão Pronto, onde mais de 95% do betão é produzido com níveis de resistência à compressão de 35 MPa ou menos, assegurando sempre os requisitos de durabilidade intrínseca da estrutura ou da sua exposição ambiental.

ABSTRACT

Nowadays, concrete and steel are the materials most commonly used on structures in Civil Engineering. These materials complement each other and present their most important properties in the structure, now increased by the excellent ability to behave as a whole. As the properties of steel are known, including the increased ability of resistant service strains conditions and improved ductility, it is also appropriate that the concrete follows this development, being always able to perform its main duties in the structure, particularly to protect steel from corrosion and to be able to defend itself against environmental aggressions, in order to create a durable structure.

In the design stage, before calculating and quantifying the resistance capacity of the structure, starting from the actions that the structure may be exposed to during its lifetime, it is essential to properly assess the conditions of exposure to environmental aggressors, in order to select a concrete, and its constituents, that are capable of responding effectively to the requirements of durability and thus produce a structure conveniently able to render the lifetime of the project.

Concrete success has always been rightfully recognized. Because of the concrete's mechanical properties and low production cost, it is very favorable when compared to other materials used in Civil Engineering. But perhaps its greatest success comes from the ability to be molded into any required structural form, taking advantage of its fluid behavior in early ages. Moreover, the possibility of production using easily accessible components and additions found in nature, the processing of inorganic material previously used in construction and the use of industrial waste usually captured in filters, since the introduction of stricter environmental laws, or even using the preparation of waste, making them latent hydraulic or hydraulic when combined with Portland cement, which can be recycled for other industries and are usually placed in landfills. This paradigm makes concrete eco-efficient, which means it's produced with fewer resources and therefore having a reduced environmental impact.

The increasingly more current concept of durability and respect for environmental principles, make the concrete the main promoter of a sustainable and green construction. Recognized by everybody, global warming is in large part due to the emission of CO₂ and in the concrete industry, over 85% of carbon emissions come from the production of clinker kilns. It is urgent to rethink this construction industry and in particular the concrete itself. In a more distinct analysis, we can consider that the word/concept "Reduction" is a clear objective, whatever the policy proposals. If the construction of structures with less concrete can be thought of, less cement in concrete mixtures and less clinker to produce cement should also be studied. Currently, about 35% to 65% of the clinker's mass present in Portland cement can be replaced by various complementary materials, being the most common examples fly ash and natural pozzolana.

The proposal to develop this work will be to produce an eco-efficient concrete with partial replacement of Portland cement with thin ground waste glass, with the ability to compact without the use of vibrating energy, to produce high-strength concrete or concrete that addresses the needs of ready-mixed concrete industry, where more than 95% of concrete is produced with compressive strength levels of 35 MPa or less, while ensuring the intrinsic durability requirements of the structure or its environmental exposure.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
TERMINOLOGIA	xvii
SIMBOLOGIA	xix

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 CONSIDERAÇÕES 1

1.1.1 O BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL 1

1.1.2 O RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO 2

1.2 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO 4

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO..... 5

2 NÍVEL DO CONHECIMENTO 7

2.1 CONSIDERAÇÕES 7

2.2 PROGRESSO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL 9

2.3 VANTAGENS DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL 10

2.4 USO DO VIDRO COMO ADIÇÃO 11

3 INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES 15

3.1 PRINCÍPIOS PARA O ENCHIMENTO COM BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL..... 15

3.2 CIMENTO	18
3.3 FÍLER CALCÁRIO (ADIÇÃO)	20
3.4 SÍLICA DE FUMO (MICROSÍLICA)	21
3.5 RESÍDUO DE VIDRO FINAMENTE MOÍDO (GPF)	23
3.6 ÁGUA	28
3.7 AGREGADOS	28
3.8 ADJUVANTES.....	31
3.8.1 HISTÓRIA	31
3.8.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS	31
3.8.3 MECANISMO DE ACÇÃO DOS SUPERPLASTIFICANTES PCE.....	32
3.8.4 MECANISMO DE ACÇÃO DOS MODIFICADORES DE VISCOSIDADE	35
3.9 AR	37
 4 BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL TIPO FINOS.....	 39
4.1 INTRODUÇÃO	39
4.2 MÉTODO.....	39
4.3 FASE EXPERIMENTAL	41
4.3.1 OPTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	41
4.3.2 ENSAIOS DA PASTA (PÓ).....	43
4.3.3 COMPOSIÇÃO DO BETÃO	47
4.3.4 AMASSADURA DO BETÃO	47
4.3.5 ENSAIOS REALIZADOS E PROCEDIMENTOS	48
4.3.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	51
 5 BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL TIPO MODIFICADOR DE VISCOSIDADE	 53
5.1 INTRODUÇÃO	53

5.2 MÉTODO E ENSAIOS	53
5.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA	57
5.4 FASE EXPERIMENTAL.....	59
5.4.1 OPTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	60
5.4.2 PROPORÇÃO DE MISTURA	61
5.4.3 AMASSADURA DO BETÃO	62
5.4.4 ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS.....	62
 6 VALIDAÇÃO DO DESEMPENHO DAS COMPOSIÇÕES EM PRODUÇÃO REAL	 65
6.1 INTRODUÇÃO.....	65
6.2 PRODUÇÃO E RESULTADOS <i>IN SITU</i>	67
6.2.1 PRODUÇÃO E BETONAGEM	67
6.2.2 ENSAIOS <i>IN SITU</i>	71
6.3 ENSAIOS NO LEMC.....	72
6.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SEGUNDO NP EN 12390-3:2009	73
6.3.2 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DE PROVETES SEGUNDO NP EN 12390-6:2009	77
6.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE EM COMPRESSÃO SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E397:1993	78
6.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE BASEADO NA ESPECIFICAÇÃO LNEC E393:1993	81
6.3.5 RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E391:1993.....	84
6.3.6 COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E463:2004.....	88
6.3.7 ENSAIO ACELERADO DA REACÇÃO ALCALI SÍLICA SEGUNDO A ASTM C1260:2007	90
6.4 OUTROS ENSAIOS <i>IN SITU</i>	93
6.4.1 ENSAIOS NA PREFABRICAÇÃO.....	93
6.4.2 ENSAIOS NO BETÃO PRONTO	97
 7 CONCLUSÕES	 103

7.1 CONSIDERAÇÕES.....	103
7.2 O FUTURO	104
7.3 BIBLIOGRAFIA	105
 ANEXOS:.....	 109

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Trabalho de vibração em betonagem de laje	7
Fig. 2.2 - Armadura tipo R1	8
Fig. 2.3 - Necessidades de mão-de-obra em betão auto-compactável, Okamura e Ouchi (<i>RILEM</i>)	8
Fig. 2.4 - Panteão de Agripa.....	12
Fig. 3.1 - Modelo reológico de Bingham-Körper e o comportamento de um fluido Newtoniano	16
Fig. 3.2 - Tensão superficial é reduzida. Melhor trabalhabilidade do betão	16
Fig. 3.3 - Comparação de um BAC com betão vibrado, [H. Grube e J. Rickert, VDZ Düsseldorf, Beton (1999)].....	17
Fig. 3.4 - Cone de Häger (Hägermanntrichter)	17
Fig. 3.5 - Formação da etringite	18
Fig. 3.6 - Fíler calcário	20
Fig. 3.7 - Sílica de fumo vista no MEV (<i>König, 2007</i>)	22
Fig. 3.8 - Sílica cristalina (esquerda), sílica amorfa (direita) (<i>Georgia Institute of Technology</i>)	23
Fig. 3.9 - Aspecto do GPF após ser preparado em moinho com água	25
Fig. 3.10 - Aspecto do GPF após secagem em estufa	26
Fig. 3.11 - Preparação do GPF na máquina Los Angeles.....	26
Fig. 3.12 - Tambor da máquina Los Angeles calafetado.....	27
Fig. 3.13 - Recolha do GPF para armazenamento em depósito	27
Fig. 3.14 - Adsorção dispersão das partículas de cimento (<i>Schrimpf, 2001</i>).	32
Fig. 3.15 - Grau de adsorção (<i>Hauck, 1999</i>)	33
Fig. 3.16 - Polímero éter de policarboxilato, adsorção pelo cimento, (<i>König, 2001</i>)	33
Fig. 3.17 - Cadeia de polímero PCE, (<i>König, 2001</i>)	34
Fig. 3.18 - Mecanismo de acção dos superplastificantes PCE, (<i>König, 2001</i>).....	34
Fig. 3.19 - Mecanismo de acção dos superplastificante PCE, com alto desempenho, (<i>Euromodal 2001</i>)	35
Fig. 3.20 - Water envelope, (<i>Euromodal, 2007</i>)	36
Fig. 3.21 - Aparelho para medir teor de ar (pressiométrico)	38
Fig. 3.22 - Aparelho “Air-Void Analyzer”	38
Fig. 4.1 - Ensaio de espalhamento NP EN 12350-5.....	40
Fig. 4.2 - Baridade compactada da mistura	42
Fig. 4.3 - Sequência da mistura de finos	43
Fig. 4.4 - Verificação do espalhamento.....	44
Fig. 4.5 - Sequência da amassadura do betão	48

Fig. 4.6 - Ensaio na mesa de espalhamento	49
Fig. 4.7 - Medição do diâmetro de espalhamento no “Ensaio de espalhamento do betão”	50
Fig. 4.8 - Anel japonês	50
Fig. 4.9 - Ensaio por escoamento no funil V	51
Fig. 5.1 - Método da sonda (o arame de ferro tem um diâmetro de 1.6 mm)	55
Fig. 5.2 - Ensaio de estabilidade estática	55
Fig. 5.3 - Ensaio da resistência à segregação no peneiro	56
Fig. 5.4 - Procedimento de mistura do BAC-MV	58
Fig. 5.5 - Esquemas de polímeros (EUROMODAL, 2008)	59
Fig. 5.6 - Misturadora de eixo vertical	62
Fig. 5.7 - Ensaio de espalhamento e de penetração por método da sonda	63
Fig. 6.1 - Peças Lego	65
Fig. 6.2 - Moldes dos provetes para ensaio no LEMC	66
Fig. 6.3 - Transporte das adições e moldes	66
Fig. 6.4 - Central de betão	67
Fig. 6.5 - Produção, transporte e colocação do BAC nos moldes	68
Fig. 6.6 - Molde para peça Lego	69
Fig. 6.7 - Betonagem do molde para peça Lego	70
Fig. 6.8 - Superfície do BAC-F 20%GPF	70
Fig. 6.9 - Ensaio de espalhamento no BAC-MV 20%GPF	71
Fig. 6.10 - Extração das carotes	73
Fig. 6.11 - Ensaio de resistência à compressão na prensa do LEMC	74
Fig. 6.12 - Ensaio de tracção por compressão diametral “ensaio brasileiro”	77
Fig. 6.13 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade por compressão	79
Fig. 6.14 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	81
Fig. 6.15 - Provetes pulverizados com fenolftaleína	85
Fig. 6.16 - Medição da penetração da carbonatação	85
Fig. 6.17 - Preparação dos provetes por saturação de Ca(OH)_2	88
Fig. 6.18 - Barras para ensaio RAS	92
Fig. 6.19 - Aspecto da mesa preparada para receber o BAC, para elemento parede	94
Fig. 6.20 - Aspecto da viga/pilar antes e após betonagem	94
Fig. 6.21 - Aspecto do molde e armadura, para a produção do carril	95
Fig. 6.22 - Carril pré-fabricado e painéis parede	96
Fig. 6.23 - Centro de produção de betão pronto da S. Pintos	97
Fig. 6.24 - Bombagem do BAC-MV 20%GPF	98

Fig. 6.25 - Betonagem de laje maciça	98
Fig. 6.26 - Betonagem de laje aligeirada.....	99
Fig. 6.27 - Betonagem de laje maciça por descarga directa da autobetoneira (<i>EUROMODAL</i>).....	99

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Controlo estatístico mensal do cimento CEM I 42,5 R.....	19
Quadro 3.2 - Análise química do fíler A.....	20
Quadro 3.3 - Análise da distribuição de partículas do Fíler A.....	21
Quadro 3.4 - Análise química do vidro moído GPF.....	24
Quadro 3.5 - Caracterização dos agregados.....	29
Quadro 3.6 - Dados técnicos dos adjuvantes.....	37
Quadro 4.1 - Distribuição granulométrica, optimização dos agregados.....	41
Quadro 4.2 - medição do espalhamento da pasta.....	45
Quadro 4.3 - Resultados da medição do espalhamento da pasta.....	45
Quadro 4.4 - Projecto do sistema da pasta.....	46
Quadro 4.5 - Cálculo da composição do betão auto-compactável.....	47
Quadro 4.6 - Resultados das amassaduras do BAC-F.....	52
Quadro 5.1 - Especificação dos BAC no estado fresco (adaptado de [APEB, 2007]).....	57
Quadro 5.2 - Distribuição granulométrica, optimização dos agregados.....	60
Quadro 5.3 - Cálculo da composição do BAC-MV.....	61
Quadro 5.4 - Resultados das amassaduras do BAC-MV.....	63
Quadro 6.1 - Resultados das amassaduras do BAC.....	71
Quadro 6.2 - Resultados da resistência à compressão do BAC a diferentes idades (N/mm ²).....	74
Quadro 6.3 - Resultados da resistência à tracção por compressão do BAC aos 28 dias de idade (N/mm ²).....	78
Quadro 6.4 - Resultados do módulo de elasticidade por compressão do BAC aos 28 dias de idade.....	80
Quadro 6.5 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade (mm/min ^{0,5}).....	82
Quadro 6.6 - Resultados da carbonatação.....	87
Quadro 6.7 - Resultados difusão de cloretos no BAC aos 28 e 90 dias de idade.....	89
Quadro 6.8 - Resultados da expansão média em ensaio acelerado da reacção alcali-sílica (%).....	92
Quadro 6.9 - Resultados do BAC-F na prefabricação.....	96
Quadro 6.10 - Resultados do BAC-MV no betão pronto.....	101

TERMINOLOGIA

air-void analyzer	analisador de bolhas de ar
high-performance concrete	betão de elevado desempenho
Kajima fill box	enchimento na caixa Kajima
L-Box	caixa-L
polymer Backbone	cadeia central do polímero
self-compacting concrete	betão auto-compactável
selfcompacting high performance concrete	betão auto-compactável de elevado desempenho
sieve segregation test	ensaio de segregação no peneiro
steric hindrance	repulsão estérica
U-Box	caixa-U
V-Funnel	ensaio de fluidez do betão
water envelope	cela de água

SIMBOLOGIA

β_p	razão volumétrica água/finos correspondente a deformação da pasta nula
D_{ns}	coeficiente de difusão aparente
D_{nsm}	coeficiente médio de difusão aparente
E_p	factor de deformação
G_m	área de espalhamento relativa para as pastas
$m_{10\text{ dm}^3} \text{ Topf}$	massa dos agregados compactados num volume de 10 dm ³
M_p	massa total de pasta
V_p	volume de pasta
V_v	volume de vazios
V_w/V_p	razão volumétrica água/finos
w/c	razão entre a massa de água e a massa de cimento
$XC...$	Classes de exposição para o risco de corrosão induzida por carbonatação

1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES

1.1.1 O BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

Durante muitos anos o problema da durabilidade das estruturas em betão foi tema principal de discussão. Para produzir estruturas de betão duráveis, para além de resistências mecânicas e teores de cimento elevados, era necessário utilizar energia suficiente de compactação de modo a tornar o betão o mais compacto possível provocando a saída do ar e facilitando o arranjo interno das partículas, devendo também o contacto com o molde e com as armaduras, ser perfeito. Para tal, a execução deste trabalho terá de ser sempre realizado por operários especializados. Apesar de se poderem dispor dos melhores meios e bons operários, é elevada a possibilidade de patologias não previstas na estrutura, como a falha no enchimento do molde e, mais especificamente, não haver envolvimento da armadura, assim como o aparecimento de “ninhos de brita”, obrigando a maior parte das vezes a onerosos trabalhos de reparação, seja de cosmética ou até mesmo de reforço estrutural.

A falta de trabalhadores especializados e a possibilidade de a própria intervenção humana poder originar falhas, promover a redução da qualidade dos trabalhos de construção. Também o betão é, na maior parte das vezes, compactado por trabalhadores não especializados, em que o acompanhamento por um técnico especializado não é efectuado. O recurso a vibração por agulha como procedimento mais habitual na compactação do betão fresco constitui uma razão para atrasos e aumento de custos, sendo os distúrbios de saúde provocados pela própria vibração transmitida aos trabalhadores um factor do absentismo dos operários.

Uma solução para obter estruturas duráveis, independentemente da qualidade da especialização dos seus operários, é o betão auto-compactável (BAC), que pode ser compactado exclusivamente pelo seu próprio peso e sem necessidade de energia de compactação. A necessidade deste tipo de betão foi proposto por Okamura em 1986.

Desde então, várias investigações foram realizadas e este tipo de betão tem sido utilizado nas estruturas, principalmente pelas grandes construtoras ou na pré-fabricação. Os seus parâmetros de exigências manifestam-se na supressão completa de vibração e na redução considerável do número de trabalhadores envolvidos na betonagem. O betão é facilmente colocado no interior do molde e o acabamento de superfície será de muito boa qualidade e os custos finais deverão ser reduzidos.

Joost Walraven da Universidade Alemã de Darmstadt defende que, agora, o “betão de desempenho determinado” poderá ser já considerado como o herdeiro natural do “betão de elevado desempenho”. O betão passa então a acompanhar mais fielmente os requisitos do projecto e os cada vez mais

exigentes aspectos arquitectónicos, garantindo sempre as resistências mecânicas e de durabilidade, mas agora com compromisso relativamente às propriedades requeridas no estado fresco e endurecido.

Investigadores, empresas de construção, Universidades e outras instituições, desenvolveram trabalhos com vista ao estabelecimento de métodos de estudo da composição e de métodos de ensaio de auto-compactabilidade, sendo que, alguns deles são agora conhecidos pelo nome do seu mentor. Todos eles estavam imbuídos do mesmo esforço, que seria, o de tornar o betão auto-compactável, um betão corrente.

Com as diferentes abordagens, versando os constituintes do betão auto-compactável, seu desempenho e propriedades, foi possível classificar este betão, em função do método utilizado para prevenir a ocorrência de segregação com o aumento da viscosidade da pasta. Simplificadamente são conhecidos como sendo:

- **Tipo finos (BAC-F)**, com recurso a um elevado volume de finos;
- **Tipo agente de viscosidade (BAC-MV)**, adicionando um agente de viscosidade;
- **Tipo combinação**, combinação dos dois métodos anteriores.

O betão auto-compactável, sob o ponto de vista ecológico e ambiental é de primordial importância, já que, qualquer que seja o tipo seleccionado permite contribuir para a sustentabilidade na construção, pois está isento do uso de energia de compactação com inevitável eliminação do ruído e, assim, redução da poluição sonora. Também é requerida menos energia para a mistura dos seus componentes quando comparado com um betão tradicional. A utilização de novos polímeros adjuvantes permite redução dos teores de cimento e de volume de finos, com óbvias implicações na redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂). A sua importância de eficiência ecológica é igualmente comprovada, pela capacidade deste betão poder incluir subprodutos industriais, alguns inertes outros em substituição parcial do cimento, sem comprometer o necessário desempenho das estruturas de betão, de forma a garantir a manutenção de períodos de vida útil suficientemente alargados.

1.1.2 O RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO

Em todo o mundo e em particular na União Europeia, nos países industrializados e economicamente mais desenvolvidos, assiste-se agora a uma maior preocupação com a consolidação e sustentabilidade do desenvolvimento alcançado. Entre essa preocupação, os aspectos ambientais tornam em si importância essencial. O tema da indústria da construção vê-se agora, fixado em acompanhar as novas referências de exigências ambientais, já com tradição em consciência social e opinião pública, muitas delas traduzidas em Leis Ambientais.

Sendo estatisticamente reconhecido que, o betão a seguir à água é o produto mais consumido no planeta e que, apesar de o betão ter só 10% a 15% de cimento na sua constituição, em cada ano a indústria de betão usava 1,6 biliões de toneladas de cimento como ligante (*Mehta, 2002*), sendo o valor actual de cerca de 3 biliões de toneladas (*Zampini, 2009*). Mas não é só a utilização dos recursos naturais e os consumos energéticos fósseis, com a prejudicial emissão de dióxido de carbono, com que a Indústria de Construção se depara. A deficiente durabilidade de um grande número de estruturas de betão armado, com dispendiosas intervenções de reparação e manutenção não previstas em projecto, provocou um apreciável acréscimo no consumo de cimento e de recursos não renováveis, não contribuindo para uma construção sustentável.

A utilização na Indústria da Construção de produtos provenientes de estruturas demolidas ou de resíduos de outras indústrias é um dos pontos em foco. Contudo, a reutilização nem sempre está livre

de inconvenientes, havendo, para isso, necessidade de avaliar de um modo científico, as implicações físicas e químicas que a introdução desses resíduos possam vir a carrear para a nova estrutura, quando avaliado o seu desempenho e durabilidade.

Na Indústria da Construção a reutilização do vidro é, na prática, de difícil execução. Muitas vezes é utilizado na construção de estradas, nas camadas de base ou de desgaste, ou, então, no fabrico de novo vidro, sendo as impurezas levadas para aterro. Numa análise menos cuidada, o estudo da reutilização do vidro poderia em si não ser matéria de atenção, contudo, objectivamente, sabemos que o vidro é constituído essencialmente por sílica amorfa e em pequenas percentagens de sódio e cálcio. Assim, o vidro contém, à partida, uma composição química muito vantajosa ao desenvolvimento da reacção pozolânica.

Não obstante toda a produção de vidro, se resumir, essencialmente, a reunir materiais básicos baratos com pequenas quantidades de aditivos, a maior parte do custo desse produto final está na instalação necessária à sua produção e à energia utilizada na fusão desses componentes, com inevitável emissão de CO₂. Também, a indústria vidreira é responsável por uma enorme quantidade de resíduos de vidro. Apesar disso, o vidro é um material ideal para ser reciclado, podendo, em abstracto, ser infinitamente reutilizado e reciclado, reduzindo assim o volume enviado para aterros sanitários, minorando o consumo de energia e indo ao encontro do definido nas directrizes do Protocolo de Quioto.

A utilização do resíduo de vidro como substituto parcial do cimento é em princípio, duplamente benéfica para o ecossistema mundial, já que passará a estar intimamente ligada a uma diminuição das emissões de CO₂ para a atmosfera. De facto, se ao ser empregue elimina o envio desses volumes eventualmente para aterro ou para reutilização com inevitável consumo de energia, ao aproveitar as propriedades pozolânicas deste material, diminui-se a produção de cimento Portland, sendo relevante que, esta produção é responsável pela emissão de uma tonelada de dióxido de carbono por cada tonelada de clínquer produzido e que a indústria do cimento concorre com cerca de 7% do total de emissões para a atmosfera.

Se como já observado, há um elevado uso de recursos na reparação e manutenção não previstas de estruturas, convém estar atento às propriedades de alguns resíduos e subprodutos industriais, que tenham propriedades pozolânicas, pois eles, com essas propriedades, podem contribuir para a durabilidade do betão, nomeadamente em condições de agressões ambientais muitas vezes de difícil previsão, como são o ataque de cloretos, os ataques químicos e as reacções alcali-sílica. O vidro pelo seu elevado conteúdo em sílica amorfa (SiO₂ $\simeq$ 70%) é caracteristicamente um material pozolânico, contudo, numa primeira análise não satisfaz o requisito para o teor em alcalis, segundo a NP 4220, devido à elevada percentagem ($\simeq$ 15%) de óxido de sódio (Na₂O), facto que desde logo deverá levar a uma cuidada atenção.

A utilização de resíduo de vidro, na condição de vidro finamente moído (GPF) como constituinte pozolânico, está relacionada com o entendimento existente quanto às medidas preventivas para a reacção alcali-sílica, assim, se o resultado provável desta reacção está relacionado com os diferentes iões contidos nos poros da água da amassadura e da disponibilidade evidenciada pela sílica e pelos alcalis, também se reconhece entre outras acções preventivas, que a adição numa mistura, de sílica reactiva finamente moída, pode reduzir ou eliminar essa reacção expansiva (*Bhatty, 1985*).

A acumulação progressiva de resíduos de vidro e consequentes questões ambientais tem incentivado vários estudos com o intuito de avaliar o uso de vidro como substituição parcial de cimento e substituição parcial de agregados finos. No caso de agregado fino, tem vindo a ser comprovado experimentalmente que a expansão do betão é tanto maior quanto menor o tamanho da partícula, até a

um diâmetro aproximadamente de 75 μm , sendo que para valores inferiores a reacção desenvolve-se de forma mais dispersa e sem grandes expansões (Coutinho, 2011).

O resíduo de vidro dificilmente está disponível, pronto a ser utilizado como adição, pelo contrário, está facilmente acessível em pequenos fragmentos ou cacos, após recolha e selecção, dos resíduos industriais e domésticos, o que obrigará sempre à sua preparação, pela conveniente redução da dimensão das partículas. Não obstante, a selecção poder melhorar as características do produto final, a sua moagem e manipulação, acarretam alguns custos, podendo estes ser significativamente reduzidos e controlados, quando houver uma produção mais industrializada.

1.2 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

Na perspectiva de contextualizar como objectivo deste trabalho, a produção de betões auto-compactáveis eco-eficientes, serão avaliados dois tipos de betão auto-compactável, do tipo finos e outros do tipo agente de viscosidade. Em ambos os casos prevalecerá o interesse na substituição parcial do cimento, tendo em conta não só a sua eco-eficiência, mas também, os requisitos de resistência e de durabilidade.

Fica previamente estabelecido que segundo a Especificação LNEC E464:2007 ambos os betões deverão cumprir os requisitos para a classe de exposição ambiental XC4. O betão auto-compactável do tipo finos (BAC-F) terá uma resistência à compressão superior ao mínimo definido e deverá garantir o C50/60, enquanto o betão auto-compactável do tipo modificador de viscosidade (BAC-MV) deverá ter a classe de resistência definida pela Especificação, ou seja, será no mínimo um C30/37.

O trabalho de dissertação permitirá, estudar experimentalmente diferentes tecnologias para a produção de betão auto-compactável, com recurso a metodologias diferenciadas, em que se avalia o efeito sobre o betão fresco e endurecido, da substituição do cimento por resíduo de vidro moído (GPF), mantendo a razão água/ligante, tendo como finalidade vir a ser usado na indústria de pré-fabricação e na indústria de betão pronto.

Na fase experimental o principal interesse, é o de tentar responder às necessidades da indústria do betão, poder otimizar as composições de betão auto-compactável para resistências diferenciadas, mas assegurando sempre os requisitos de durabilidade. A substituição parcial do cimento por GPF será avaliada pela utilização de misturas, que são ligantes hidráulicos, em conformidade com a NP 4220 e com a Especificação LNEC E464, para situações relacionadas com a durabilidade. Para conveniente análise dos resultados, serão feitas misturas de controlo só com CEM I e outras com sílica de fumo como adição tipo II.

Foi também objectivo de, na fase experimental abordar e identificar os ensaios existentes para betão fresco, assim como, executar alguns deles. Em produção serão adoptados aqueles que se achar por mais conveniente, tendo em conta as condições existentes e a cadência de produção.

Com o propósito de avaliar, com aplicações práticas as composições estudadas, serão produzidos *in situ*, elementos prefabricados para posterior caroteamento com vista a ensaios de durabilidade. Para o desempenho do betão fresco e durabilidade do betão endurecido, todas as misturas servirão para a construção de elementos pré-fabricados, assim como, serão utilizadas em central de Betão Pronto com posterior entrega do betão produzido, numa obra para construção de laje maciça.

Como este assunto é pouco desenvolvido em Portugal, foi muito relevante o estado de conhecimento das tecnologias utilizadas em outros países, dando particular relevo à Alemanha e Holanda, donde realçamos a MFPA da Universidade de Weimar, em particular o Prof. Dr. Wolfgang Bethge.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- CAPITULO 1 - reflexão sobre algumas considerações relevantes e descrevendo os objectivos e a estrutura do trabalho presente.
- CAPITULO 2 - desenvolve de um modo sumário não só a história e principais motivos para o progresso do betão auto-compactável e do recurso à utilização de materiais inorgânicos adicionados na amassadura, mas também aborda o estado do conhecimento de maior relevância.
- CAPITULO 3 - influência individual dos constituintes utilizados nestes betões auto-compactáveis, com particular incidência nos que apresentam particularidades para a produção de betões eco-eficientes.
- CAPITULO 4 - descrição do betão auto-compactável tipo finos, inicialmente proposto por Okamura et al (1986), agora com desenvolvimento, de um projecto de mistura sistemático, respectiva avaliação dos resultados do betão fresco e endurecido, dos ensaios efectuados em laboratório. Neste Capítulo são também descritas as experiências à escala real realizadas *in situ*.
- CAPITULO 5 - descrição do betão auto-compactável tipo agente de viscosidade, respectiva avaliação dos resultados do betão fresco e endurecido, dos ensaios efectuados em laboratório. Neste Capítulo são também descritas as experiências à escala real realizadas *in situ*.
- CAPITULO 6 - validação do desempenho das composições estudadas em produção real numa pré-fabricação, com fabrico de elementos para posteriores ensaios.
- CAPITULO 7 - conclusões relevantes do trabalho realizado, dando particular realce às observações feitas em obra e expectativas de alguns agentes envolvidos na utilização desta tecnologia emergente.

2 NÍVEL DO CONHECIMENTO

2.1 CONSIDERAÇÕES

No início dos anos 80 e durante vários anos, o problema da durabilidade das estruturas em betão foi um tema central de maior interesse no Japão. Para fabricar estruturas de betão duráveis era necessário o recurso a trabalhadores especializados em compactar o betão. Contudo, com a diminuição de trabalhadores disponíveis para esta arte de moldagem do betão e a dificuldade em inspeccionar todo o sistema, como se atenta na figura 2.1, levou, em paralelo a uma redução na qualidade da construção, tendo sido, muito em especial, o Japão, a comandar a avaliação sobre esses receios. É conveniente compactar o betão de forma correcta e deve interromper-se a vibração quando o ar deixa de sair do seu interior, pois vibrações excessivas ou insuficientes são prejudiciais, tendo como resultado natural, a redução da capacidade de desempenho da estrutura. A utilização dos vibradores de betão é muito nociva para os seus operadores, já que a própria vibração transmitida aos operadores dos vibradores de agulha é responsável por alterações na circulação sanguínea e no sistema vascular, provocando doenças de trabalho designadas por “white finger syndrome” também conhecida como síndrome dos dedos mortos. Esse distúrbio afecta não só os vasos sanguíneos, como também, os nervos, músculos e articulações da mão, punho e braço, prejudicando dezenas de milhares de trabalhadores. Este distúrbio pode tornar-se permanente e em casos extremos o doente pode perder os dedos, sendo justificação frequente para a ausência do trabalhador.



Fig. 2.1 - Trabalho de vibração em betonagem de laje

Na abordagem à durabilidade do betão, é essencial que toda a estrutura em betão continue a executar a sua função prevista, mantendo a sua resistência e serviço, durante o tempo de vida útil previsto no

projecto. O betão deve ser capaz de suportar os processos de deterioração, que seja expectável virem a ser expostos e então, este betão diz-se durável.

Uma das dificuldades em poder obter resultados convenientes é a colocação e compactação do betão em zonas de grande densidade de armadura do tipo R1 (com armadura $> 350 \text{ kg/m}^3$, recomendação da JSCE - Japan Society of Civil Engineers) como é visível na Figura 2.2, em zonas do molde com geometrias desfavoráveis, com, em geral, dificuldades de acesso e de vibração eficaz, onde o betão tradicional tem muita dificuldade em preencher totalmente essas zonas.



Fig. 2.2 - Armadura tipo R1

Uma solução para conseguir uma estrutura de betão durável, independentemente da qualificação dos seus trabalhadores ou da geometria dos seus elementos estabelecidos no projecto de arquitectura, é o betão auto-compactável, que pode ser colocado em toda a cofragem, simplesmente pelos seu próprios meios com recurso à gravidade e sem necessitar de qualquer efeito de energia de vibração, como proposto por Okamura em 1986, (Fig. 2.3).

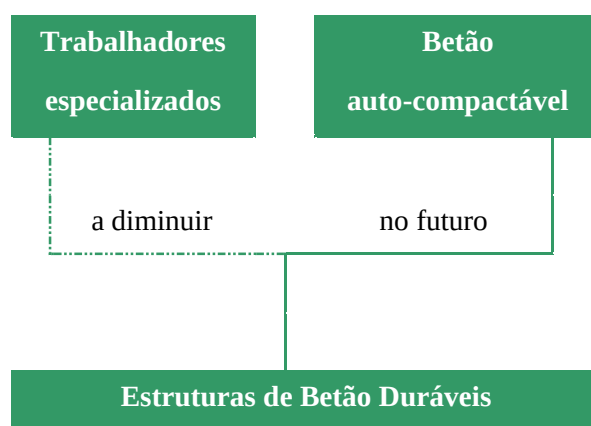


Fig. 2.3 - Necessidades de mão-de-obra em betão auto-compactável, Okamura e Ouchi (RILEM)

Vários foram os investigadores que tentaram estabelecer métodos de ensaio e métodos racionais para qualificação de misturas, tendo em vista tornar o betão auto-compactável um betão corrente. Foi muito importante o empenho das grandes empresas Japonesas, na medida em que eram elas também as mais prejudicadas com os avultados custos de reparação e tratamento das patologias decorrentes da

utilização de betões compactados por energia de vibração. Note-se também que no Japão é obrigatório em empresas de construção, investir uma certa percentagem do lucro em investigação.

2.2 PROGRESSO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

Sempre que, anteriormente fosse necessário colocar betão em que a sua compactação era inexequível, eram desenvolvidas composições que melhorassem o comportamento do betão fresco. Algumas dessas betonagens como a construção de estacas moldadas ou as betonagens submersas, concretizadas com bons resultados, foram efectuadas com recurso a elevados teores de cimento, normalmente superior a 500 kg/m^3 e estabilizadas a partir dos anos 80 com adjuvantes bio-polímero (Untervassercompound) compostos por polissacarídeos, com capacidade de aumentar fortemente a coesão do betão, quando colocado debaixo de água (Sogo, 1985). Quando estas composições eram produzidas, também com o recurso a adjuvantes superplastificantes para se obterem aumentos de fluidez, esse desígnio era atingido, mas com a fatalidade de se obterem amassaduras instáveis, com segregações muito elevadas e mesmo assim, muitas vezes necessitando de compactação.

A ideia de um betão auto-compactável proposta por Okamura em 1986 estaria nessa altura, a dar os primeiros passos, mas a tarefa não seria fácil, pois o betão submerso era um betão que estava sujeito às pressões envolventes e desse modo podia expelir algum do ar ocluso. Porém o betão que se procurava era um betão para ser utilizado na superestrutura onde o tipo submerso não teria bom desempenho, pois a forte coesão da matriz de betão promove uma viscosidade demasiado elevada, não permitindo que o ar aprisionado se liberte para o exterior, impedindo, assim, que o betão seja auto-compactável.

O primeiro modelo exemplar do betão auto-compactável foi inicialmente desenvolvido em 1988, usando materiais correntes do mercado (RILEM). O protótipo teve um desempenho satisfatório no que respeita ao endurecimento, às retracções do betão endurecido, calor de hidratação, densidade após endurecido, entre outras propriedades. Este betão foi denominado de “High Performance Concrete” e foi definido pelas três seguintes etapas do betão:

- Fresco: auto-compactável;
- Idade jovem: evitar defeitos iniciais;
- Endurecido: protecção contra factores externos.

Quase ao mesmo tempo o “High Performance Concrete” foi definido como um betão de elevada durabilidade devido à baixa razão w/c, pelo Professor Aitcin et al. Desde então, o termo *high performance concrete*, tem sido usado em todo o mundo, para designar um betão de elevada durabilidade e resistência. Por esse motivo, alguns autores mudaram a designação do betão, para “selfcompacting high performance concrete” (RILEM).

Já em 1989 na Universidade de Tóquio, foi revelado pela primeira vez o desempenho deste novo betão. A experiência consistiu em colocar a par dois conceitos de betão, um convencional e um outro novo material que se esperava demonstrar. Foram betonados dois moldes, um com o betão tradicional e o outro com o betão auto-compactável tendo os resultados sido bem expressivos: enquanto no betão convencional a superfície apresentava cavidades por compactação deficiente, o betão auto-compactável apresentava a superfície livre de vazios, tendo sido obtido total enchimento do molde.

Com esta visibilidade, várias foram as empresas, Institutos e Universidades Japonesas, que aderiram a este sucesso, desenvolvendo, muitas delas, métodos e soluções, como foi o caso da Kajima e da Maeda. Também em outros países foram feitos seminários, permitindo a permuta de conhecimentos e, assim, acelerar o processo de desenvolvimento do betão auto-compactável, passando em muitos dos casos pelo desenvolvimento de novos adjuvantes, com melhor aptidão para este novo conceito de

betão. Estes novos adjuvantes são agora conhecidos como “Adjuvantes de Nova Geração” e baseados em Éter de Policarboxilato (PCE).

Na Europa foi de fundamental relevância a formação do RILEM “The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures”, TC 174-SCC (1997), cuja finalidade era avaliar o estado da arte. De particular importância na fase inicial foi também a visita em 1993, do Prof. Joost Walraven ao laboratório do Prof. Okamura, na Universidade de Tóquio, assim como, a possibilidade que o grupo do Prof. Walraven, entretanto formado, teve em receber por um período alargado na Universidade de Delf, o investigador técnico japonês Kazunori Takada, com larga experiência enquanto investigador da Kajima (Skarendahl, 2000).

As empresas químicas multinacionais produtoras de polímeros souberam sempre acompanhar o desenvolvimento deste novo conceito, com a apresentação de novos polímeros com base em PCE, agora reconhecidos como de Terceira Geração. Os novos adjuvantes melhoram, genericamente, todas as propriedades incluindo a reologia do betão auto-compactável, podendo, com o seu aparecimento, ser usadas dosagens inferiores, sendo os betões produzidos mais robustos, mesmo quando confrontados com diferenças químicas nos cimentos.

2.3 VANTAGENS DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

As mais-valias desta tecnologia emergente são muito diversas, contudo, podem ser elencadas em duas grandes vertentes. Se por um lado, a redução de custos pode ser considerada factor de especial atenção pelos agentes intervenientes na selecção do betão a ser utilizado na estrutura, também não é menos verdade que a sustentabilidade ecológica/ambiental terá de ser um factor relevante na sua selecção.

Tomando a redução de custos como tema central, rapidamente se verifica que, com esta nova tecnologia de fabricar betão, muitas das patologias do betão armado serão eliminadas, nomeadamente aquelas que advêm da utilização de betões que não prescindem do recurso a energia de vibração para poderem ser moldados com eficácia. Estas falhas materializam-se nas mais diversas patologias, pondo em causa a resistência e durabilidade dos elementos estruturais, e, por consequência, a estrutura na qual estão incorporados, obrigando a dispendiosos custos não só de reparação como de tempo necessário para a intervenção.

Neste capítulo não é só a vantagem técnica aquela que é digna de realce mas devem ser também incluídos todos aqueles que estão envolvidos no processo produtivo, desde o fornecedor dos materiais até ao dono de obra, passando pelos técnicos responsáveis pelo projecto, incluindo a área comercial, pois produzir melhor, em menos tempo e com menor custos é um objectivo que satisfaz qualquer um dos intervenientes. A redução de custos resulta, numa primeira análise, do facto de já não ser necessário vibrar para se asseverar o enchimento total do molde, incluindo locais de difícil acesso e completo envolvimento da armadura com a conveniente passivação, também aproveitando alguma capacidade auto-nivelante, podendo o acabamento por talochamento ser eliminado, obtendo-se, mesmo assim, superfícies uniformes e aveludadas. Homogeneidade na cor do elemento e a possibilidade de estar isenta de poros ou imperfeições, são valores acrescidos à utilização deste novo conceito. Não obstante, o betão auto-compactável requer uma composição bem estudada e testada, controlo apertado de toda a produção e uso de cofragem de boa qualidade e técnica de colocação. Estudos recentes passaram a garantir que, o betão auto-compactável pode ser já um betão de uso corrente, na medida em que se podem obter custos de produção compatíveis com os betões tradicionais e com resistências mecânicas mais comumente utilizadas pelos projectistas.

O betão auto-compactável pode ser aplicado com um ritmo superior ao de um betão tradicional, dada a sua consistência, que promove a disponibilidade de se deformar mais facilmente e de percorrer o interior do molde com o efeito esperado e também a altura a que os moldes podem ser cheios é maior, pois não necessita que o vibrador seja colocado na sua matriz. O aumento da viscosidade do betão mantendo-o mais coeso, facilita a bombagem, permite reduzir a pressão da bombagem logo menor desgaste destes equipamentos e promove um melhor planeamento dos trabalhos. A rigidez dos moldes deixa de ser utilizada, pois também as tensões criadas pela vibração são eliminadas. Não é mais necessário o recurso a mão-de-obra especializada para compactar o betão com recurso a vibradores.

Ambientalmente as vantagens são óbvias, porque é eliminado o ruído em todo o processo de colocação do betão. Não só na construção *in-situ* mas muito em especial na construção em fábrica de elementos pré-fabricados, onde a exposição dos trabalhadores ao ruído é total, pelas condições habituais de produção (interior de instalações). Não só os operários que estão a colocar o betão deixam de estar expostos, mas também as outras artes que partilham a fábrica ficam isentas desta moléstia. A saúde dos que tinham de vibrar é cuidada, quando foi eliminado um dos malefícios para esses trabalhadores, a da já abordada, desordem na circulação sanguínea. Pode-se considerar que, com esta inovação, também para os operários prestadores de mão-de-obra fica mais atractiva a profissão que escolheram e a angariação de nova mão-de-obra fica mais facilitada.

Em breve resumo ficam abordadas as vantagens de utilização do betão auto-compactável:

- Não ser necessária energia para vibração (menos ruído);
- Maior frequência no enchimento/utilização dos moldes;
- Menos pessoal no local de trabalho;
- Possível efeito auto-nivelante até ao enchimento total;
- Pleno contacto com a armadura e completo enchimento do molde de trabalho;
- Menos desgaste e menos sujidade do molde;
- Superfícies perfeitas e lisas;
- Economicamente interessante e de melhor qualidade;
- Rumo à produção de betões eco-eficientes.

2.4 USO DO VIDRO COMO ADIÇÃO

A crescente valorização do significado das emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera e a consciencialização dos problemas por elas criados ao ecossistema mundial, levam a que a população e em particular a comunidade científica se preocupem, cada vez mais, com a sustentabilidade. De facto, a construção e em particular a que utiliza betões de ligantes hidráulicos, é já um ponto de maior preocupação e interesse para se vir a estabelecer uma construção sustentável, ecologicamente competente e acima de tudo ainda mais durável pois a reduzida vida dos edifícios actuais combinado com a dependência crescente do cimento, agravam ainda mais os impactes negativos.

Não obstante a indústria vidreira ser um grande contribuinte de resíduos, também é uma das indústrias com maior capacidade de reciclar, reutilizar e reduzir os resíduos provenientes da utilização do vidro, muito comum em vasilhame, na indústria automóvel e na construção civil.

O destino a dar aos resíduos que se produzem cada vez em maior quantidade é um problema da sociedade, com enorme compromisso em termos ambientais, obrigando à colaboração de todos os cidadãos, pois estes têm um papel fundamental em todo o processo, já que, com a sua atitude proactiva pode-se reduzir a quantidade de resíduos, e os que subsistirem serão encaminhados para recipientes

próprios em ecopontos, poupando-se assim recursos naturais, emissões de substâncias poluentes para a atmosfera e aproveitamento energético.

Contribuir para um mundo mais saudável e equilibrado é responsabilidade de todas as pessoas, e os cidadãos que muitas vezes se sentem à margem dos destinos da sociedade, têm, assim, uma forma simples e eficaz de participação civicamente responsável e tecnicamente interessante, já que, em muitos casos a utilização de resíduos, convenientemente tratados, podem para além de promover economia nos custos, melhorar a qualidade e durabilidade dos materiais obtidos, como é o caso, já bem estudado e identificado, da utilização de adições na substituição parcial do cimento, muitas delas com reacções pozolânicas, contribuindo muito para a durabilidade das estruturas, principalmente em condições ambientais muito adversas para o betão.

Durante vários séculos recorreu-se ao uso das pozolanas na preparação de argamassas hidráulicas. Muitas das estruturas construídas com uso deste material, não só chegaram aos nossos dias como apresentam uma longevidade dificilmente explicável, mesmo para os conhecimentos actuais. Algumas dessas estruturas ultrapassam mesmo os 20 séculos de idade, como é exemplo o Panteão de Agripa, em Roma, construído em 27 a.C.. Apesar de o Panteão de Agripa ter sido destruído por um incêndio em 80 d.C. foi reconstruído em 125, encontrando-se actualmente em perfeito estado de conservação, ver figura 2.4. Objectivamente, podemos considerar válido que muita da informação e do conhecimento para produzir essas argamassas, não chegaram à actualidade.



Fig. 2.4 - Panteão de Agripa

De facto o uso de materiais cimentícios é muito antigo, principalmente os que recorriam às cinzas vulcânicas ricas em sílica activa e alumina que, quando misturadas com cal ou carbonato de cálcio obtinham o conhecido cimento pozolânico, em nome da aldeia de Pozzuoli perto do Vesúvio. Com a invenção e criação da patente do cimento Portland, no início do século XIX, verificou-se ser possível, a produção de um forte ligante hidráulico, preparado pelo aquecimento de uma mistura de argila e calcário num forno, até à libertação total de CO_2 , tendo sido mais tarde optimizado com a queima a temperaturas mais elevadas, de uma mistura de argila e cal até à formação do clínquer. O aparecimento deste cimento artificial foi acompanhado por uma forte redução na utilização dos materiais pozolânicos, até que, mais recentemente se reconheceu e demonstrou o interesse e a importância destes materiais no fabrico de betão. As pozolanas, agora reconhecidas como adições, quando conjugadas com o cimento Portland ou quando em sua substituição parcial, cooperam com o cimento, influenciando as propriedades do betão produzido, principalmente reduzindo o calor de hidratação e aumentando a resistência a agentes agressivos.

As adições foram por desempenho, subdivididas em dois tipos: as de Tipo I como as de origem calcária, são quimicamente inertes e só desempenham acção física, enquanto as de Tipo II são pozolanas, algumas com hidraulicidade, outras hidráulicas latentes quando combinadas com cimento Portland, para se ser mais específico dever-se-á dizer, quando combinada com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Estas adições podem influenciar as propriedades físicas do betão, nomeadamente a trabalhabilidade, o teor de água na amassadura, a densidade do betão, resistências mecânicas a idade jovem e tempos de presa.

A eficiência comprovada das reacções pozolânicas na melhoria das propriedades do betão permite assegurar que o betão com cimento Portland associado às adições Tipo II, pode então desempenhar um papel importante para uma construção sustentável e durável.

Apesar de os desenvolvimentos químicos, em particular o dos novos polímeros com nanomoléculas de múltiplas cadeias, ser capaz de induzir pozolanicidade a diversos materiais, mesmo que potencialmente não reactivos, o uso de materiais que, não tendo propriedades ligantes hidráulicas, são capazes de ter reacção hidráulica quando combinados com o hidróxido de cálcio mesmo à temperatura ambiente e de produzir compostos idênticos aos resultantes da hidratação do cimento Portland, ainda está no início do seu desenvolvimento. Sendo muito comum o uso de resíduos industriais como a cinza volante, a sílica de fumo ou a escória granulada de alto-forno, também outros poderão vir a seguir-lhes o seu préstimo, após se verificar a aptidão química, classificar a classe de pozolanicidade e o índice de actividade, como são os casos já em estudo da argila siliciosa, das cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar ou o metacaulino.

O quadro agora apresentado, assim como, a gigantesca emissão anual de CO_2 libertado para a atmosfera, que segundo a WRI-World Resources Institute supera já as 35 megatoneladas anuais, já bastam para justificar uma pesquisa sobre materiais cimentícios para um desenvolvimento sustentável e que vai muito para além do aspecto ambiental, na medida em que, as questões económicas e sociais são também relevantes.

O vidro é constituído essencialmente por sílica amorfa. Uma das definições mais correntes das pozolanas, que as classificam como material cimentício, é a de que sendo um material artificial ou natural, contém sílica amorfa, logo em forma reactiva. Por seu lado a American Society for Testing and Materials, preconiza a pozolana como sendo um material silicioso ou sílico-aluminoso que, não sendo cimentício, quando finamente moído e na presença da água reagem quimicamente com o Ca(OH)_2 a temperaturas comuns, formando compostos com propriedades cimentícias.

É conhecido ser fundamental, para haver reacção química da sílica com o hidróxido de cálcio, que a pozolana seja finamente dividida e que a sílica seja amorfa isto é estrutura vítrea, já que a sílica cristalina é muito pouco reactiva. Assim, o vidro contém, à partida, uma composição química muito vantajosa ao desenvolvimento da reacção pozolânica. Basta para isso reduzi-lo a uma finura conveniente, que será tanto melhor quanto menor for a dimensão das suas partículas, se possível, inferiores às do cimento. De qualquer modo, a reacção pozolânica não é completamente conhecida, sabe-se que a superfície específica e a composição química são importantes, mas a sua reacção química pode não se limitar à combinação com o Ca(OH)_2 , mas também a reacções com o aluminato tricálcico (C_3A) e até mesmo com outros produtos da hidratação do cimento.

3

INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES

3.1 PRINCÍPIOS PARA O ENCHIMENTO COM BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

A necessidade deste tipo de betão proposto por Okamura em 1986 foi amadurecida, culminando no princípio que um betão auto-compactável, é um betão de elevada viscosidade plástica, de modo a obter a necessária estabilidade, ter bons valores de água/finos ($< 0,125\text{mm}$), diminuição do limite de fluxo (Newton-fluid). Isso significa enchimento até auto nivelamento e uso de agentes fluidificantes com base em PCE's (Éter de Policarboxilato).

Estes dados, apesar de absolutos levaram a que durante alguns anos, não tenha ficado clara a expressão “betão auto-compactável”, pois muitas vezes não foi distinguido do “betão de elevada fluidez”, do “betão de alto desempenho” ou até de “betão auto-nivelante” entre outras designações. Convém por isso esclarecer as diferenças daquela que foi a designação inicial adoptada pelo Professor Okamura, ou seja o “self-consolidating concrete” e que mais tarde foi comumente substituída por “self-compacting concrete”, pois o que o distingue é a capacidade de, no estado fresco, fluir pelo seu próprio peso, auto compactar-se, ficar livre de ar sem utilizar qualquer energia vibradora e encher por completo todas as partes do molde. As outras denominações não representam um betão auto-compactável, pois podem ter elevada fluidez, mas não se auto-compactarem, pode ser auto-nivelante, mas não necessariamente auto-compactável, e também não se poderá designar como betão de elevado desempenho, pois apesar dessa aptidão o BAC possui uma característica única que o particulariza.

O intrincado conjunto de especificações necessárias para a elaboração de uma composição, capaz de desempenhar o que é caracterizado como betão auto-compactável, tem como principal finalidade o estudo da reologia do betão no seu estado fresco. A caracterização reológica é feita ao material fino em suspensão, através da “tensão de cedência” e da “viscosidade plástica” tendo como base o modelo de Bingham-Körper (Figura 3.1). Este modelo descreve que é necessário haver inicialmente uma tensão de corte para que o movimento se inicie (τ_0 - tensão de cedência), o declive da recta estabelece simetria com a viscosidade plástica (μ em Pa.s).

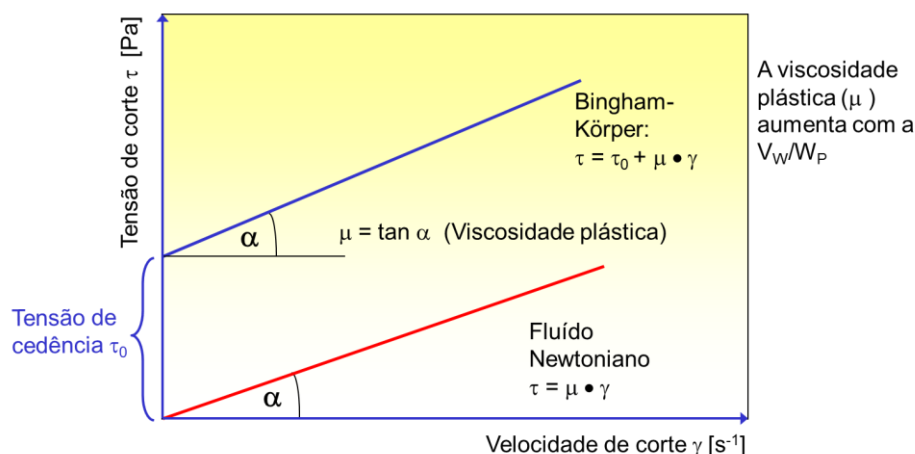


Fig. 3.1 - Modelo reológico de Bingham-Körper e o comportamento de um fluido Newtoniano

O atrito interno e a quantidade de água disponível influenciam o comportamento reológico do betão sendo que estas variáveis estão relacionadas com a tensão superficial e com a dispersão das partículas finas. A tensão superficial e a dispersão podem ser alteradas por substâncias activadoras da superfície, tais como os superplastificantes PCE, que reduzem a tensão superficial, resultando numa melhor humedificação dos grãos de cimento pelas moléculas da água, melhorando a trabalhabilidade do betão (Figura 3.2). Mais recentemente o recurso a adjuvantes modificadores de viscosidade condiciona principalmente a viscosidade plástica (Khurana, 2004).

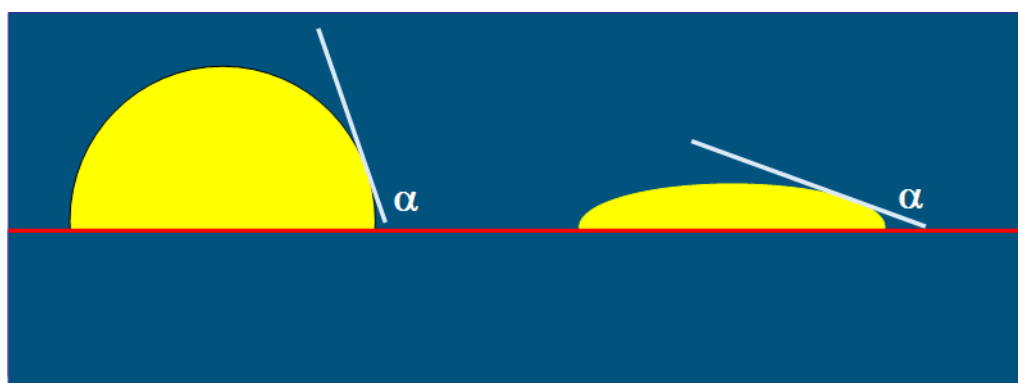


Fig. 3.2 - Tensão superficial é reduzida. Melhor trabalhabilidade do betão

Para além dos adjuvantes, genericamente, os materiais para produzir um betão auto-compactável são os mesmos que se podem utilizar para a produção de um betão tradicional vibrado. Apenas a optimização dos agregados pode ser diferente, assim como será diferente o teor de finos neste novo conceito, como se observa na Figura 3.3.

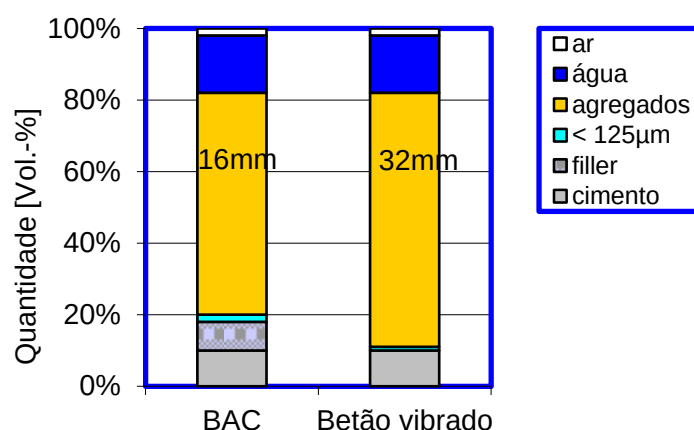


Fig. 3.3 - Comparação de um BAC com betão vibrado, [H. Grube e J. Rickert, VDZ Düsseldorf, Beton (1999)]

Não obstante, os materiais utilizados para a produção do betão auto-compactável serem materiais de uso corrente no mercado de betões, a sua escolha deve ser feita com rigoroso critério, principalmente no que respeita aos agregados finos, pois a sua qualidade é proporcional ao desempenho do betão fresco e condiciona a qualidade do betão endurecido. São materiais finos, o cimento, as adições e os agregados com dimensão equivalente à das adições, ou seja, com diâmetro inferior a 0,125mm. Contudo, os siltes e as argilas não podem em caso algum fazer parte destes constituintes, pois estes têm imensa capacidade de adsorver água por unidade de volume, sendo prejudiciais para a deformabilidade do betão e para o incremento das resistências mecânicas.

Um dos parâmetros que distingue os finos é a sua elevada superfície específica, que resulta também numa grande capacidade de adsorver água por unidade de volume. Experimentalmente, com recurso ao espalhamento da pasta no cone de Häger (Hägermanntrichter) (Figura 3.4), e após variação da razão volumétrica água/finos (V_w/V_p), verifica-se existir uma regressão linear, sendo possível obter o valor correspondente à deformação de pasta nula (β_p). Os finos adsorvem uma quantidade de água aproximadamente equivalente ao próprio volume (Okamura, 1996).

Para o betão auto-compactável, o teor em pasta obtido pela água e finos é muito importante, pois dela depende não só o preenchimento dos espaços existentes entre os agregados grossos, como evitar que eles se toquem, eliminando o efeito de engrenagem. Deverá ser também suficiente, para poder dar bom acabamento de superfície ao betão, assim como poder preencher espaços de menor dimensão e envolver com eficácia a armadura.

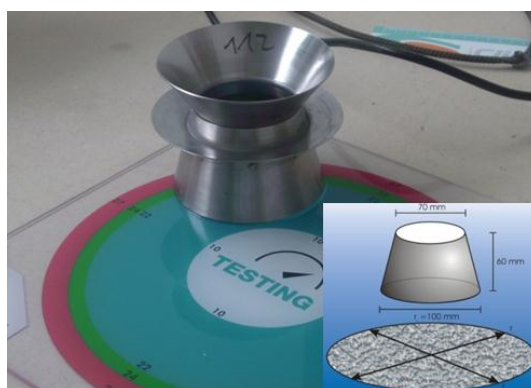


Fig. 3.4 - Cone de Häger (Hägermanntrichter)

3.2 CIMENTO

Parte importante do desempenho que o betão auto-compactável tem na sua deformabilidade, advém da hábil dispersão que o adjuvante tem junto das partículas do cimento. A qualidade e tipo de cimento usado é muito importante, a sua química, finura e água necessária têm influência directa no efeito de segregação. Os sulfatos têm influência no funcionamento do superplastificante com base em éter de policarboxilato.

O processo de hidratação do cimento desenvolve-se por fases de reacção do clínquer com a água da mistura. O cimento Portland contendo silicatos e aluminatos na presença da água, forma produtos da hidratação contendo silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Sem a adição de gesso essas reacções decorreriam segundo a reactividade das fases do clínquer, com uma rápida perda de consistência acompanhada de uma forte reacção exotérmica. Com a adição de gesso, aluminato tricálcico (C_3A) reage com o sulfato e forma-se a etringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Ficando, deste modo, a nova superfície protegida de outras reacções. Neste período inactivo “período dormente”, a etringite (ou sal de Candlot) decompõe-se e reage para formar monossulfato, a superfície é reactivada e a hidratação pode prosseguir.

A introdução de adjuvante influencia a dispersão das partículas do cimento, na reacção do clínquer com a água da mistura, parte do adjuvante é adsorvido na superfície do aluminato tricálcico (C_3A) e do aluminoferrato tetracálcico (C_4AF), outra parte é adsorvido nos restantes principais componentes do cimento, ou seja no silicato tricálcico (C_3S) e no silicato bicálcico (C_2S), uma outra parte fica livre em suspensão para poder vir a ser utilizado pela nova superfície resultante da hidratação. Esta nova superfície, resultante da hidratação com o gesso, denomina-se etringite, o teor de adsorção do adjuvante fica dependente da reacção dos aluminatos, sendo que o restante teor vai ser adsorvido pelos silicatos. A formação da etringite (Figura 3.5) traduz-se numa nova superfície com formato de agulhas. Esta nova superfície, se não for devidamente tratada pelas moléculas do adjuvante, irá promover o aumento da tensão de cedência, reduzindo a deformabilidade. Consequentemente, cimentos Portland com alto teor em aluminatos e de elevado calor de hidratação tipo CEM I, não são aconselhados para a produção de betão auto-compactável, em contraponto com os cimentos de baixo calor de hidratação como os que elevado teor de C_2S (belite) como os CEM II com cinzas volantes ou CEM III com escória de alto-forno, pois o adjuvante é melhor aproveitado, sendo que, a pasta de cimento tem menor tensão de cedência e melhor viscosidade plástica. O grau de hidratação e a distribuição granulométrica do cimento afectam a quantidade de água necessária para a formação de pasta, a água circunscrita por um cimento Portland de baixo calor de hidratação é geralmente inferior à de um cimento Portland corrente (Okamura, 1996).

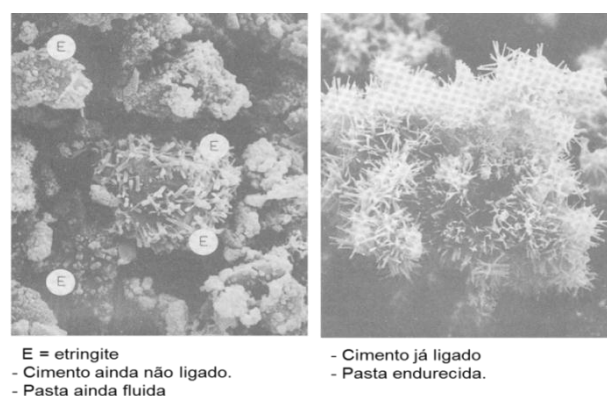


Fig. 3.5 - Formação da etringite

O cimento Portland cinzento é o mais comumente utilizado, mas também por requisitos da arquitectura, o cimento Portland branco pode ter que ser considerado para a produção de betão branco.

O cimento branco apresenta um comportamento idêntico ao dos seus homólogos cinzentos, desde que do mesmo tipo e classe de resistência. Existem, porém, algumas ligeiras diferenças que é importante ter em conta na produção de betão branco, devendo ser tomadas algumas medidas específicas. Quanto às características físicas, existem duas diferenças directamente relacionadas entre si: finura e início de presa. De facto, tendo como objectivo aumentar a brancura dos cimentos brancos, eles são, em geral, mais finos e apresentam uma maior superfície específica Blaine. Consequentemente, os cimentos brancos são mais reactivos em contacto com a água, para além disso também o gesso utilizado no seu fabrico é necessariamente branco, quase sempre já em forma desidratado, pelo que a sua eficiência como regulador de presa é inferior, agravando mais um pouco aquele comportamento.

Com uma maior finura surge uma maior resistência mecânica, nomeadamente nas idades jovens. Por outro lado, sendo o cimento constituído por partículas de menores dimensões, a quantidade de água necessária para a aquisição de uma determinada trabalhabilidade é superior, o que, caso não sejam tomadas medidas alternativas, poderá acarretar um aumento de porosidade e de retracção plástica destes betões. Simultaneamente é mais rápido o desenvolvimento do calor de hidratação, comparativamente com os cimentos cinzentos de igual teor em aluminato tricálcico. Esta situação deverá ser compensada através de medidas de protecção e cura, de modo a evitar-se que os elementos produzidos com maiores dimensões possam vir a fissurar pelos gradientes térmicos instalados.

Este trabalho de dissertação foi efectuado com recurso da utilização de um cimento corrente, do tipo cimento Portland CEM I 42,5 R (conforme a NP EN 197-1). A sua composição química, propriedades físicas e os valores médios da resistência à compressão, foram indicados a partir do controlo estatístico mensal e fornecido pela SECIL, ver Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Controlo estatístico mensal do cimento CEM I 42,5 R

Características Químicas	SiO₂	19,79 %
	Al₂O₃	4,37 %
	Fe₂O₃	3,52 %
	CaO	63,09 %
	MgO	1,67 %
	SO₃	2,82 %
	Perda ao fogo	3,01 %
	Cloretos	0,04 %
	Cal livre	1,18 %
	Resíduo insolúvel	2,03 %
Características Físicas	Massa volúmica	3,11 g/cm ³
	Superfície Blaine	4360 cm ² /g
	Tempo início de presa	124 min
	Tempo fim de presa	159 min
	Expansibilidade	0,6 mm
Características Mecânicas	Resistência à compressão 2 dias	31,9 MPa
	Resistência à compressão 7 dias	45,9 MPa
	Resistência à compressão 28 dias	58,2 MPa

3.3 FÍLER CALCÁRIO (ADIÇÃO)

Adição é um material finamente dividido, utilizada no betão com a finalidade de melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais, sendo esta a definição proposta pela NP EN 206-1:2007. A Especificação LNEC E 466:2005 Fíleres Calcários para Ligantes Hidráulicos, tendo como referência normativa a NP EN 206-1, constitui um guia para a utilização de fíleres calcários na produção de misturas de cimentos e de adições, estabelecendo as características que estes fíleres devem respeitar, como adição Tipo I.

O fíler calcário (Figura 3.6) é obtido a partir da moagem da calcite (CaCO_3), dependendo do grau de pulverização, a sua superfície específica Blaine de aproximadamente $5000\text{cm}^2/\text{g}$ podendo variar, é equivalente à superfície específica Blaine do cimento.

No betão auto-compactável a sua principal função é o de aumentar a viscosidade da pasta, estabilizar a água na matriz do betão, aumentar a tensão superficial e a coesão do betão. O recurso ao uso de fíler é também relevante, na medida em que impede significativamente o aumento de temperatura do betão, reduzindo, muito consideravelmente, a fendilhação devida aos gradientes térmicos. São parâmetros importantes na selecção do fíler: a quantidade de água necessária correspondente à deformação da pasta nula β_p , a distribuição granulométrica e superfície específica Blaine e a qualidade da superfície da partícula.



Fig. 3.6 - Fíler calcário

O fíler utilizado neste foi fornecido pela empresa PARAPEDRA-Sociedade Transformadora de Pedras, SA e é designado por Fíler A. Este fíler foi seleccionado pela sua finura, pois o fornecedor apresentou em alternativa o produto Fíler B com as mesmas características, mas com uma granulometria diferente e com maior finura. A sua composição química foi indicada pelo fornecedor pelo Quadro 3.2. Tendo sido efectuada uma análise no contador de partículas, ver Quadro 3.3.

Quadro 3.2 - Análise química do fíler A

CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
54,68	0,36	0,063	0,17	0,19	0,011	0,009	0,018	0,003

Quadro 3.3 - Análise da distribuição de partículas do Fíler A

ID: Filler A 210311	Run No: 3	Measured: 23-3-2011 16:54
File: 230311	Rec. No: 1	Analysed: 23-3-2011 16:54
Path: C:\SIZERMU\DATA\	Source: Analysed	

Sampler: Internal		Measured Beam Obscuration: 18.3 %	
Presentation: 4OHD	Analysis: Polydisperse	Residual: 0.422 %	
Modifications: None			

Conc. = 0.0090 %Vol				Density = 1.000 g/cm³				S.S.A. = 2.4011 m²/g			
Distribution: Volume				D[4, 3] = 12.09 µm				D[3, 2] = 2.50 µm			
D(v, 0.1) = 0.76 µm				D(v, 0.5) = 6.04 µm				D(v, 0.9) = 32.07 µm			
Span = 5.186E+00				Uniformity = 1.537E+00							

Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%
0.31	0.00	1.95	18.78	12.21	74.02	76.32	98.44
0.36	0.72	2.28	20.83	14.22	77.78	88.91	99.27
0.42	2.08	2.65	23.57	16.57	80.95	103.58	99.79
0.49	3.93	3.09	27.09	19.31	83.60	120.67	100.00
0.58	6.08	3.60	31.39	22.49	85.81	140.58	100.00
0.67	8.32	4.19	36.37	26.20	87.72	163.77	100.00
0.78	10.44	4.88	41.88	30.53	89.46	190.80	100.00
0.91	12.29	5.69	47.70	35.56	91.13	222.28	100.00
1.06	13.81	6.63	53.60	41.43	92.77	258.95	100.00
1.24	15.03	7.72	59.34	48.27	94.40	301.68	100.00
1.44	16.11	9.00	64.75	56.23	95.94		
1.68	17.27	10.48	69.67	65.51	97.32		

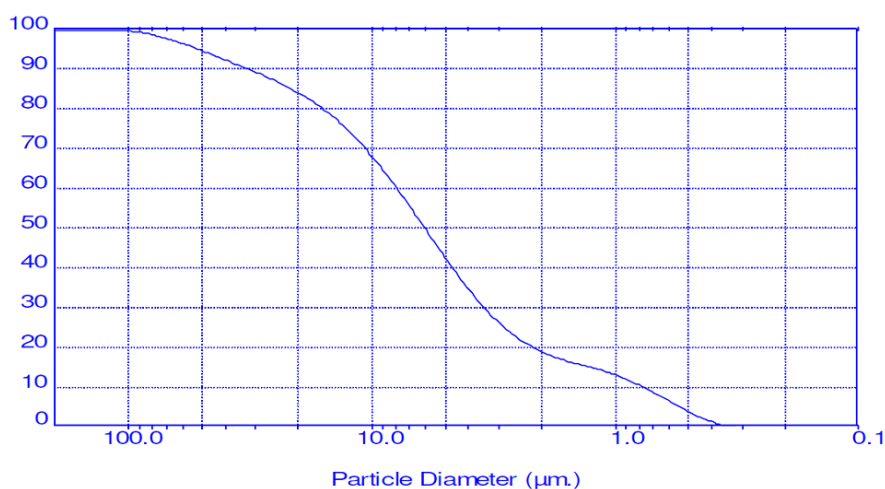


Gráfico 3.1 - Gráfico da distribuição de partículas do Fíler A

3.4 SÍLICA DE FUMO (MICROSÍLICA)

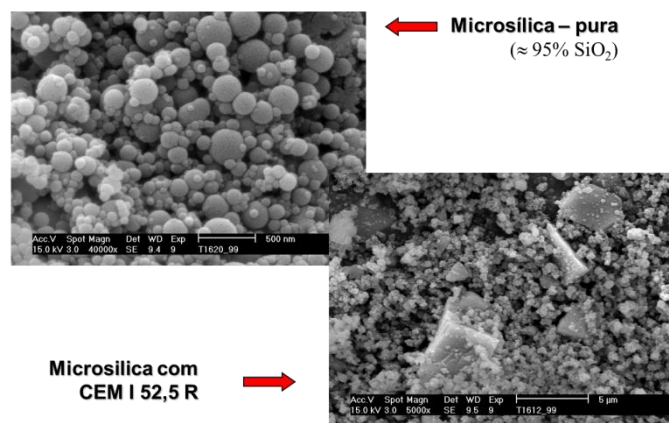
A sílica de fumo (MS) é um dos mais recentes materiais cimentícios a serem utilizados na indústria de betão sendo que antes de 1970 não era recolhida, e era simplesmente libertada para a atmosfera.

É um subproduto da fabricação de silício e ligas de ferrossilício a partir de quartzo de elevada pureza e de carvão. Num forno eléctrico a arco de eléctrodo submerso, os vapores de óxido de silício (SiO) oxidam e condensam na forma de partículas esféricas extremamente finas de dióxido de silício (SiO₂) amorfo (Figura 3.7). Quando o forno é suficientemente aquecido e eficaz, o carbono é todo queimado obtendo-se sílica de fumo isenta de carbono e com dimensões inferiores a 10⁻⁶m. Por isso é também

conhecida como microsílica e nanosílica. A sílica na forma vítrea (amorfa) é altamente reactiva e a minúscula dimensão das partículas acelera a reacção com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento Portland, ocupando o espaço entre as partículas de cimento. A sílica de fumo não é só uma pozolana de elevadíssima reactividade, sendo também benéfica noutros aspectos em relação ao betão, aumentando a sua densidade, resistência ao desgaste e ao ataque químico, o que prolonga a vida útil de estruturas.

A sua adição ao betão está limitada em Norma a 11% da massa do cimento. Ao ser adicionada ao betão de cimento Portland efectivamente melhora as suas propriedades, em particular as resistências mecânicas e de abrasão. A adição de sílica de fumo também reduz a permeabilidade do betão aos iões cloreto, atrasando a corrosão do aço, especialmente em ambientes ricos em cloretos, como são as regiões costeiras e as de estradas de determinados países com temperaturas negativas (pelo uso de sais de descongelantes). Também se verifica haver controlo das reacções alcali com a sílica dos agregados, com o uso de sílica de fumo.

Microsílica (Sílica de fumo)



Resultante da produção de silício metálico

Fig. 3.7 - Sílica de fumo vista no MEV (König, 2007)

A sílica de fumo utilizada nesta dissertação servirá para parametrizar a influência do resíduo de vidro em estudo, já que se reconhecem à sílica de fumo as excelentes propriedades pozolânicas e físicas, de entre as quais se irão desenvolver ensaios comparativos, como são o desempenho das reacções alcali-sílica, penetração de cloretos, carbonatação, resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade e absorção de água por capilaridade.

De entre as amostras seleccionadas de sílica em pó escolheu-se para ensaio a Microsílica 920D (ver anexos), que consiste numa sílica de fumo densificada e atende às exigências da norma NP EN 13263 sílica de fumo para betão. A sílica de fumo ser densificada significa que, após filtragem da sílica activa é tratada através de um processo chamado de densificação, consistindo habitualmente na dispersão por tratamento ultra-sónico moderado. O resultado são pequenos grãos (cerca de 1-2µm de diâmetro) sendo que este adensamento reduz a poeira e torna o produto muito mais fácil de manusear. A sílica de fumo não densificada é um pó solto fofo, os grãos não são muito fortes e quebram com facilidade durante a mistura.

Desde a sua introdução e neste curto período temporal, o uso de sílica de fumo e o seu contínuo desenvolvimento, fez dela uma das adições mais valiosas e versáteis do mundo para produtos de betão. Entretanto, a sílica de fumo tem sido preferencialmente utilizada na produção de betão de elevado

desempenho, de elevada resistência ou quando se pretende estabilidade (ausência de segregação e exsudação) do betão no estado fresco. Como a sílica de fumo se tornou economicamente viável, a sua utilização começou a ser pensada para outras aplicações, sendo agora também utilizada em betões comuns, aproveitando o seu largo espectro de acção, quando adicionado ao betão. Habitualmente, com a adição de sílica de fumo, é comum o recurso a adjuvantes superplastificantes, devido à necessidade de mais água e o aumento de coesão do betão, consistindo numa boa solução para as propriedades do betão fresco.

3.5 RESÍDUO DE VIDRO FINAMENTE MOÍDO (GPF)

American Society for Testing and Materials (ASTM), define o vidro como um produto inorgânico de fusão que foi arrefecido numa condição rígida sem cristalizar. A ASTM afirma ainda que o vidro é geralmente duro e quebradiço e tem uma fractura concoidal. O vidro pode ser incolor ou colorido. É transparente, mas pode ser opaco ou translúcido e apresenta uma estrutura não cristalina, isto é, a sua estrutura é amorfa (Matos, 2010).

A sílica tem sido o elemento mais utilizado na produção de vidro, dando origem aos vidros inorgânicos silicatados. O vidro é o resultado da fusão de diversas matérias-primas inorgânicas minerais, as quais após serem submetidas a um processo de arrefecimento controlado, transformam-se num material rígido, homogéneo, estável, inerte, amorfo e isotrópico. A sua principal característica é ser moldável a uma determinada temperatura, sem qualquer tipo de degradação (Ortiz, 1996).

A estrutura mais comum do vidro é a amorfa ou vítrea. Este estado de matéria define a maneira de ser que a matéria apresenta, conforme a coesão das suas moléculas, combinando a estrutura ordenada dos materiais sólidos cristalinos, com a estrutura desordenada, característica dos líquidos, os átomos, no vidro, embora apresentem um arranjo desordenado, apresentam uma posição fixa, como se pode verificar no esquema apresentado na Figura 3.8. O vidro resulta de um arrefecimento rápido de materiais que foram fundidos, tornando-se rígidos, sem, no entanto, adquirirem uma estrutura sólida cristalina. Para que ocorra vitrificação é necessário que o arrefecimento seja de tal forma rápido, que não dê tempo a haver uma reorganização da estrutura atómica dos materiais, exigida pela cristalização.

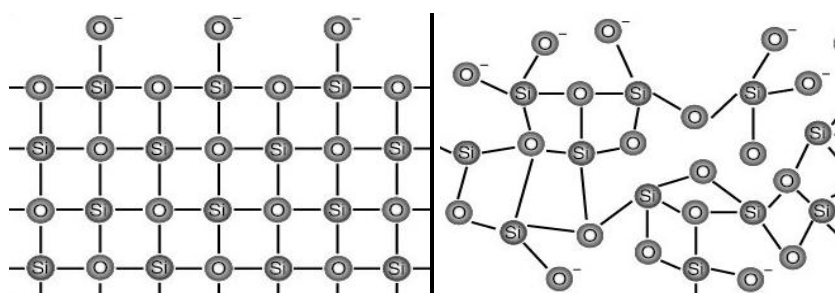


Fig. 3.8 - Sílica cristalina (esquerda), sílica amorfa (direita) (Georgia Institute of Technology)

Assim, podemos definir o vidro como uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogénea, obtida por arrefecimento de uma massa em fusão que endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez, mas sem sofrer cristalização (Marques, 2004).

Sabemos por análise química (ver Quadro 3.4) efectuada ao vidro moído utilizado neste estudo, ser constituído essencialmente por sílica e pequenas percentagens de óxido de cálcio. Assim, este vidro

contém, à partida, uma composição química com potencialidades para o desenvolvimento da reacção pozolânica. O vidro incorpora habitualmente um elevado teor de óxido de sódio (Na_2O), e na amostra ensaiada aparece como segundo componente, sendo que o teor apresentado excede em muito, o valor do admitido nos critérios de aceitação para os requisitos químicos das pozolanas, de acordo com a NP 4220 cujo valor máximo admissível para o $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$ é de 5%. Por convenção a composição de álcalis no cimento Portland é calculada a partir do óxido de sódio equivalente, através da Equação 3.1 (Hobbs, 1988 e ASTM C 1260-2007), em que o valor 0,658 na expressão, corresponde à relação das massas dos dois óxidos.

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% (\text{K}_2\text{O}) \quad (3.1)$$

Apesar de ser previsível que a abordagem aos álcalis seja feita no capítulo referente aos ensaios efectuados neste estudo, convém desde já referir e atender que no betão a elevada concentração de álcalis potencia a ocorrência de reacção alcali sílica (RAS), devido essencialmente a um maior número de iões hidróxido (OH^-) e à subida do pH do meio (ACI, 1998).

Quadro 3.4 - Análise química do vidro moído GPF

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
74,43	0,53	0,479	7,885	0,84	16,68	0,155	0,051	0,018

Desde logo, fica criada a expectativa de saber se a utilização de resíduo de vidro, na condição de vidro finamente moído (GPF) reage como constituinte pozolânico, como verificado em trabalhos de dissertação anteriores (Matos, 2010) e tentar avaliar o paradoxo de utilizar um constituinte potencialmente reactivo, sabendo contudo que o estamos a fazer, indo ao encontro das medidas preventivas para a reacção alcali-sílica, como é o uso de sílica reactiva finamente moída, poder reduzir ou eliminar essa reacção expansiva.

Para esta dissertação e por não haver no mercado vidro moído em condições de finura aceitável, foi necessário adquirir vidro em cacos numa empresa de gestão de resíduos. Pela necessidade de produzir GPF em quantidade suficiente para os ensaios *in situ* e por ser inviável a preparação dessa porção no laboratório, os cacos foram entregues ao um produtor de fíler calcário (Parapedra), para reduzir a dimensão das partículas a grandeza similar à do cimento Portland. A redução foi realizada, a seco, num moinho de bolas. Não obstante o trabalho efectuado, concluiu-se, pelas análises feitas num contador de partículas, que as dimensões obtidas não satisfaziam os critérios estabelecidos para estes ensaios, verificasse haver partículas superiores a $90\mu\text{m}$ e 50% superiores a $35\mu\text{m}$.

A procura de soluções para obviar o problema, levou a diversos contactos e diligências, tendo sido possível estabelecer com a empresa de soluções cerâmicas MOTA II, que gentilmente aceitou organizar uma produção capaz de produzir o GPF nas dimensões pretendidas.

No laboratório de ensaios da MOTA II, a partir do vidro anteriormente moído, conseguiu-se preparar o GPF através de uma produção por via húmida, habitual no tratamento das argilas para a produção cerâmica. Contudo, verificou-se logo após a produção, não ser possível manter o material no estado estável pretendido, ou seja, em suspensão na água. Se tal tivesse sido conseguido, poderia ser utilizado

pela verificação do conteúdo de sólidos da mistura, mas o que se verificou foi uma forte sedimentação do GPF e de uma consistente aglutinação das partículas após drenagem da água, como se pode verificar na Figura 3.9, tendo ficado demonstrado, em ensaios, ser inviável a sua utilização, pois ao ser adicionado na amassadura de betão, não se conseguia garantir uma dispersão adequada das suas partículas.



Fig. 3.9 - Aspecto do GPF após ser preparado em moinho com água

A consciência da realidade com a nova situação em que, apesar das energias gastas e diligências efectuadas, não se tinham atingido os objectivos pretendidos e os resultados na preparação do resíduo de vidro estavam longe de ser superados. A solução não se mostrava fácil, sendo necessário coordenar diferentes opções que validassem, convenientemente, a preparação do GPF. De entre as que melhor se apresentavam como viáveis verificadas em ensaios exploratórios, confirmou-se a possibilidade de usar um agente dispersante na preparação do GPF aglutinado, porém, não eram tangíveis (pela escassez de tempo) as implicações químicas que o uso deste produto poderia causar ao betão. Pôde-se também confirmar com a produção de argamassas e testes de pasta, que, com uma maior dosagem do adjuvante seleccionado Woerment FM 420, era possível obter uma distribuição adequada das partículas finas. Apesar disso, achou-se conveniente não optar por esta solução, pois uma sobredosagem do superplastificante poderia criar instabilidade no sistema e com isso não se produzirem amassaduras de betão robustas.

A resolução desta dificuldade recaiu numa opção que apesar de mais trabalhosa e demorada, não apresentava resultados dúbios, pelo que não se hesitou na sua escolha, tendo sido aproveitado o equipamento do LEMC-Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (FEUP). Todo o GPF a ser utilizado foi colocado em porções de aproximadamente 12 kg, em tabuleiros e colocado na estufa ($\pm 105^{\circ}\text{C}$) até se conseguir massa constante pela evaporação da água, Figura 3.10. Após arrefecimento o conteúdo de dois tabuleiros era colocado na Máquina Los Angeles (resistência à fragmentação), tendo sido utilizadas todas as esferas existentes como carga abrasiva, incluindo esferas cerâmicas de outro equipamento e foi verificado haver necessidade de fazer a máquina rodar 7000 voltas, a uma velocidade constante próxima de 32 r/min como se pode ver pela sucessão de imagens na Figura 3.11. Sempre que se repetia a operação, tinha de haver o cuidado de selar completamente o tambor, para evitar que o GPF fosse libertado para a envolvente, por ser um produto potencialmente causador de Pneumoconiose, tanto por ser uma sílica (causadora de doenças pulmonares como a silicose) como por ser um pó muito fino, visível na Figura 3.12.

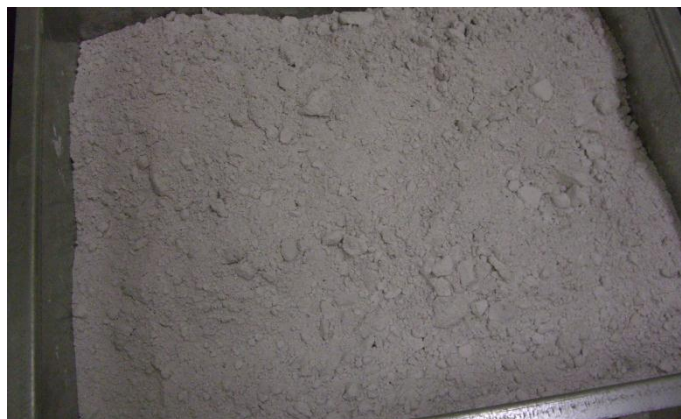


Fig. 3.10 - Aspecto do GPF após secagem em estufa



Fig. 3.11 - Preparação do GPF na máquina Los Angeles



Fig. 3.12 - Tambor da máquina Los Angeles calafetado

Decorrido o tempo previsto para fragmentação/dispersão das partículas, o GPF, foi transferido e armazenado num depósito, tendo tido sempre o cuidado de recolher todas as esferas que se encontravam no interior do tambor antes de iniciar a transferência. Mais uma vez por se tratar de sílica e por questões de segurança, foi sempre utilizado no manuseamento do GPF, máscara com filtro especial para sílica e materiais polvorentos assim como óculos com protecção integral, ver Figura 3.13.



Fig. 3.13 - Recolha do GPF para armazenamento em depósito

Durante o processo de preparação do GPF, foi-se verificando, através do contador de partículas (CILAS) se as amostras recolhidas confirmavam o pretendido de forma a garantir que o processo de preparação mantinha resultados estáveis e com finura adequada para os testes que se pretendiam levar a cabo (Gráfico 3.2). Efectivamente, foi possível obter uma produção com resultados muito homogêneos. Verificou--se que permitiu obter um GFP com 90% de passados a 31 μm , sendo que, também 50% do GPF era inferior a 9 μm , indo ao encontro das expectativas, como se pode ver no gráfico do Quadro 3.5. Para estes ensaios foram utilizados dois modelos de contador de partículas, o CILAS do LEMC e o MASTERSIZER do laboratório da Euromodal. Ambos os equipamentos mostravam resultados em tudo similares, garantindo não só a eficácia da preparação do GPF, como também se pôde comprovar pela paridade obtida, que os equipamentos calibram.

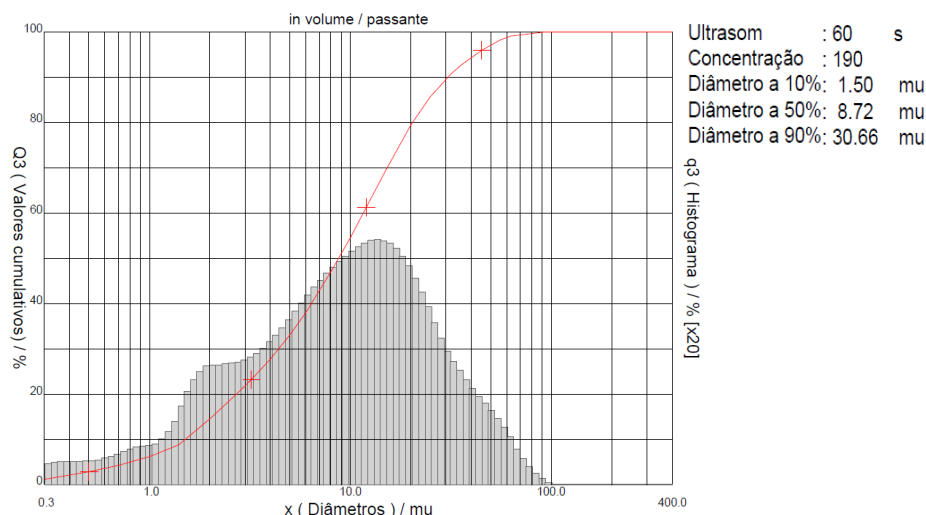


Gráfico 3.2 - Resultado da amostra de GPF, no contador de partículas CILAS

Concluída a manipulação do GPF, pôde-se dar início à preparação das composições de betão para testar a sua aptidão de substituto parcial do cimento Portland, como adição Tipo II.

3.6 ÁGUA

A água de amassadura para betão tem como principal função a hidratação do cimento e para além desse efeito a água serve para alterar a deformabilidade e a viscosidade do betão. O aumento do teor em água tem uma relação linear com o aumento do espalhamento, ver “Ensaio de espalhamento da pasta”. Também no “Ensaio de fluidez da pasta” se verifica um aumento da velocidade de escoamento, sendo esta proporcional à razão água/pó em volume. Nesse sentido, aumentando a fluidez, diminui-se a viscosidade da argamassa, conforme estipulado por Okamura. O excesso de água ou a inadequada estabilidade pode, facilmente, provocar a segregação e exsudação.

A qualidade da água de amassadura para o fabrico de betão, pode influenciar os tempos de presa, o desenvolvimento da resistência do betão e a protecção da armadura contra a corrosão. Ao avaliar a aptidão, para a produção de betão, de água de qualidade desconhecida, convém que seja considerada tanto a composição da água como a avaliação do seu desempenho no betão, que com ela vai ser produzido. A água reciclada nos processos da indústria de betão, sendo comumente utilizada, deve ser constantemente avaliada de acordo com a norma NP EN 1008, e deve ser-se mais restritivo no que respeita à matéria sólida em suspensão, quando utilizada em composições de BAC, com cuidada determinação e correcção da massa volúmica desta água.

3.7 AGREGADOS

Os agregados são o constituinte maioritário do betão e desempenham um papel primordial na sua qualidade. Os requisitos normalmente exigidos para o betão auto-compactável em peças estruturais são, em geral, válidos para os outros tipos de betão. As exigências da Especificação LNEC E 467:2006, que estabelece as características mínimas que os agregados não reciclados abrangidos pela norma NP EN 12620:2004 agregados para betão deverão respeitar, para poderem ser utilizados no nosso país, no fabrico de betões no âmbito da NP EN 206-1, são também aplicáveis aos betões no

âmbito da NP EN 206-9. Discriminando as propriedades que devem ser verificadas para todas as aplicações, daquelas cuja verificação adicional só é necessária em certas aplicações.

Contudo para um betão auto-compactável, a verificação da conformidade pode ser pouco exigente, no teor permitido para os finos (argilas) e para os materiais solúveis (matéria orgânica). De facto, uma areia com um teor de finos inferiores a 3% é aceitável, segundo a Especificação, mas os requisitos deste betão requerem um controlo mais apertado daquele teor.

Comprovados os requisitos, os agregados são o constituinte mais resistente e durável do betão, pois não só tem facilmente resistências à compressão superiores a 200 MPa, como a vantagem de estarem protegidos por um meio fortemente alcalino, que a argamassa lhe confere, sendo suficientemente protegidos da agressividade do meio ambiente.

A parte dos agregados finos com dimensão inferior a 0,125mm tem efeitos na fluidez da argamassa e devem ser considerados no teor de pó (*Okamura, 1996*). Também se verifica, que alguns agregados, por terem um elevado grau de absorção, não são apropriados para a produção de betão auto-compactável, por possibilitarem a libertação da água contida nos seus poros, após a colocação do betão, provocando segregação muito difícil de controlar e calcular.

Sendo que, segundo *Okamura*, a percentagem em volume de agregados grossos, deva ser equivalente à dos agregados finos, a eventualidade de a mistura ter um volume de agregados grossos elevado, irá provocar o contacto entre as partículas, criando um efeito de engrenagem. Havendo possibilidade de seleccionar, os agregados grossos deverão ter forma esférica, tanto quanto possível, a exemplo do godo rolado e a sua dimensão não deverá ser superior a 16mm ($D_{max}=16$).

Para este estudo os agregados foram disponibilizados pelo laboratório de materiais da empresa EUROMODAL, decorrentes de estudos em composições de betão na empresa de prefabricação Concremat, onde se pretendia vir a testar o betão investigado nesta dissertação. Confirmou-se por ensaios realizados neste laboratório, em especial a sua caracterização granulométrica Quadro 3.5, Gráficos 3.3, 3.4 e 3.5 os agregados seleccionados são uma areia de duna e dois agregados britados de origem calcária.

Quadro 3.5 - Caracterização dos agregados

Designação	Areia de duna	Bago de arroz	Gravilha 1
Grupo granulométrico	0/1	2/5	5/16
Módulo de finura	1,09	4,49	5,71
Massa volúmica (Mg/m ³)	2,61	2,62	2,62
Absorção (%)	0,11	0,90	1,20
Baridade compactada (Mg/m ³)	1,67	1,64	1,51

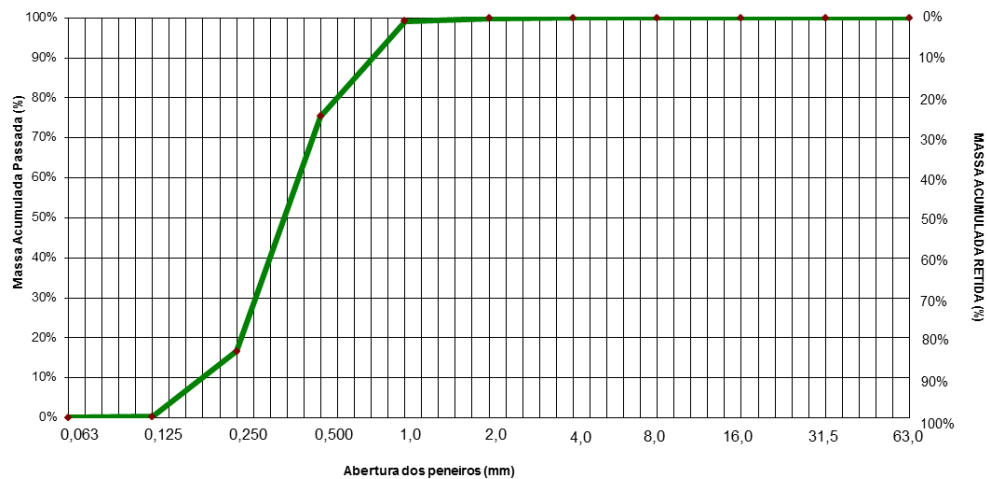


Gráfico 3.3 - Curva granulométrica da areia fina de duna

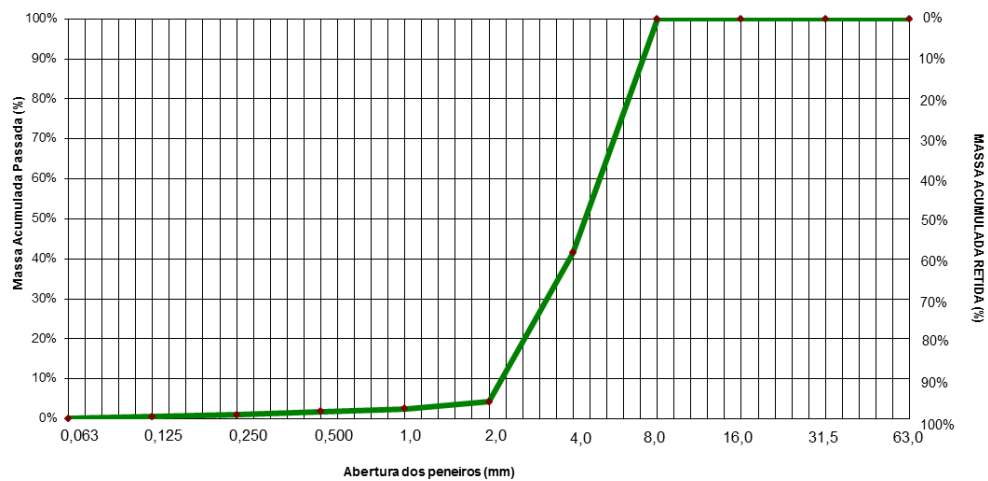


Gráfico 3.4 - Curva granulométrica do bago de arroz

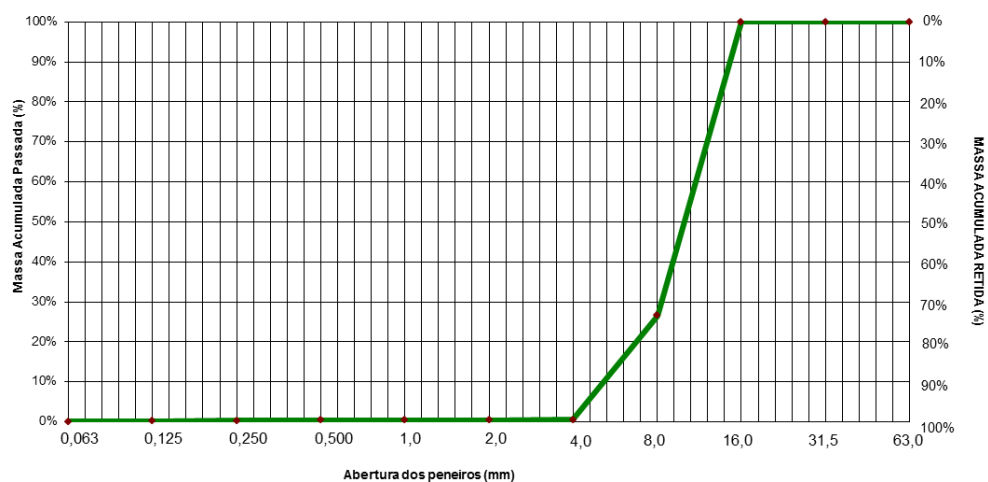


Gráfico 3.5 - Curva granulométrica da gravilha 1

3.8 ADJUVANTES

A definição proposta pela norma NP EN 206-1:2007 determina que, adjuvante é o material adicionado durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa do cimento, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido. A quantidade total de adjuvantes, se utilizados, não deve exceder a dosagem máxima recomendada pelo produtor nem ultrapassar 50 g de adjuvantes (como fornecidos) por kg de cimento, a menos que a influência de uma maior dosagem no desempenho e na durabilidade do betão se encontre estabelecida. O uso de adjuvantes em quantidades inferiores a 2 g/kg de cimento só é permitido se estes forem dispersos numa parte da água de amassadura. Se a quantidade total de adjuvantes líquidos exceder 3 l/m³ de betão, o seu teor de água deve ser considerado no cálculo da razão água/cimento. Quando for usado mais do que um adjuvante, a sua compatibilidade deve ser verificada quando da realização dos ensaios iniciais. Os betões com consistência $\geq$ S4, V4, C3 ou $\geq$ F4 deverão ser fabricados com recurso a adjuvantes superplastificantes.

3.8.1 HISTÓRIA

Na Roma antiga 50 anos a.C., Vitruvius descreveu a aplicação de óleo para melhorar a resistência ao gelo/degelo em pavimentos de betão. Sangue de vaca foi utilizado para melhorar a funcionalidade/trabalhabilidade da argamassa. Na Idade Média recorreu-se à utilização de proteína animal (leite, sangue) para melhorar a trabalhabilidade das argamassas e torná-las impermeáveis. A partir de 1850 o uso de gesso como retardador no clínquer do cimento Portland foi introduzido na produção corrente do cimento. No início do século XX foi descoberto o efeito plastificante dos lignosulfonatos e deu-se início à utilização de naftaleno sulfonado para dispersar as partículas de cimento. Nos anos 60 introduziram-se os adjuvantes com base em melamina sulfonada que, após fortes campanhas de marketing para o desenvolvimento de betões com maior fluidez, permitiu a introdução destes adjuvantes em larga escala na tecnologia do betão. A partir de 1990 com o desenvolvimento de novos polímeros pelas empresas de referência, produtoras de produtos químicos e na tentativa de acompanhar a solicitação do mercado da construção, surgiram os adjuvantes de 3ª Geração, com base em éter de policarboxilato, os quais têm vindo a ser constantemente actualizados, tornando a técnica de produção de betão de elevada consistência e em particular o betão auto-compactável, acessível a todos.

3.8.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os adjuvantes plastificantes/redutores de água actuam no betão de modo que, sem afectar a consistência, permitem a redução do teor de água de uma dada combinação de mistura de betão, ou que, sem afectar o conteúdo da água aumenta o abaixamento/espalhamento (consistência) ou produzem ambos os efeitos em simultâneo. Os superplastificantes diferem destes, essencialmente pelas consideráveis melhorias nos resultados. Os superplastificantes em dosagens baixas podem eventualmente ser utilizados como plastificantes.

Os adjuvantes utilizados no betão auto-compactável, são essencialmente os superplastificantes com base em éter de policarboxilato e os adjuvantes retentores de água ou estabilizadores, podem também ser considerados como modificadores de viscosidade, se tiverem essa propriedade. Em algumas situações, quando requerido pela classe de exposição ambiental, como é o caso das classes XF (ataque pelo gelo/degelo), poder-se-ão utilizar introdutores de ar, sendo que devem ser sintéticos e a sua compatibilidade com o PCE, deve ser verificada, pois o efeito redutor de ar que o PCE tem na matriz

do betão, pode levar à destruição dos microporos ($< 300\mu\text{m}$) e, assim, condicionar o efeito do introdutor de ar.

A possibilidade de ser química e comercialmente viável desenvolver polímeros de nova geração com base em éter de policarboxilato, de acordo com as necessidades dos clientes, permite com a tecnologia existente, controlar à medida do especificador do betão, o desenvolvimento de resistências ou controlar o início e fim de presa do cimento.

3.8.3 MECANISMO DE ACÇÃO DOS SUPERPLASTIFICANTES PCE

As forças que se estabelecem entre os grãos de cimento são de atracção, levando à floculação dessas partículas e a precipitação dos flocos pode-se verificar com forte aglutinação e com dimensão considerável sendo capazes de conservar a água não permitindo que esta fique disponível para melhorar a fluidez do betão, inibindo uma distribuição homogênea das partículas finas. A estrutura molecular das substâncias poliméricas leva à polarização da cadeia do polímero verificando-se a adsorção das moléculas de superplastificante na superfície das partículas de cimento, impedindo a sua floculação devido à geração de forças repulsivas, cuja origem pode ser electrostática e/ou de repulsão estérica. O resultado é uma distribuição mais homogênea das partículas, reduzindo-se o teor de água necessário para que os grãos de cimento fiquem dispersos, com inevitável aumento da deformabilidade do betão por diminuição da tensão de cedência com visível aumento de fluidez, ver figura 3.14 (Schrimpf et al., 2001).

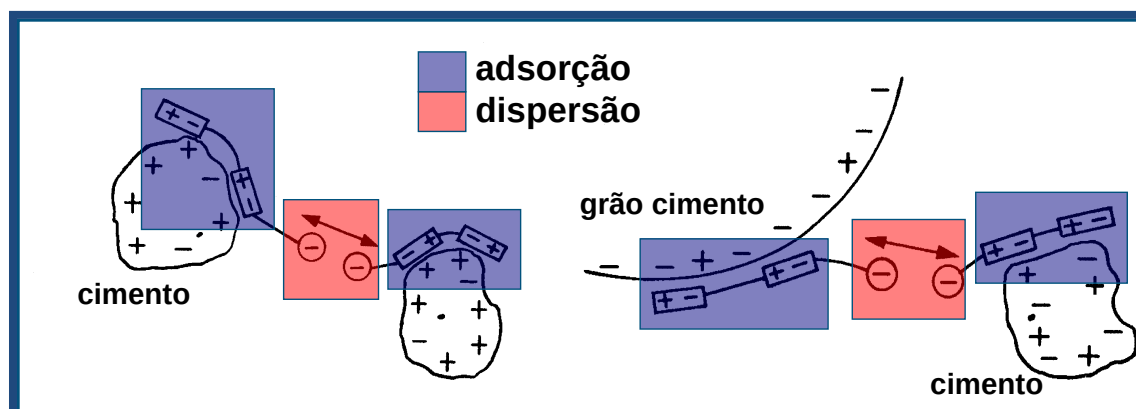


Fig. 3.14 - Adsorção dispersão das partículas de cimento (Schrimpf, 2001).

O superplastificante é inicialmente adsorvido na superfície dos aluminatos e só posteriormente nos silicatos. Os sulfatos têm influência no funcionamento do superplastificante com base em éter de policarboxilato, a quantidade de adjuvante adsorvido é proporcional à quantidade de sulfato existente, reduzindo a adsorção dos aluminatos em seu favor. Esta realidade pode alterar a capacidade do PCE (figura 3.15).

Existem várias teorias, sobre o momento ideal para adicionar o PCE à mistura de betão, de modo a maximizar o seu efeito. O momento da adição do adjuvante na mistura depende do tipo de polímero, do comprimento da sua cadeia central e do comprimento e número das suas cadeias laterais. Contudo, quando a opção for de adicionar juntamente com os agregados, estes devem estar saturados para não permitirem a absorção do polímero. Muitas vezes observa-se que a adição nesta fase aumenta a dosagem necessária (Fleig, 2002).

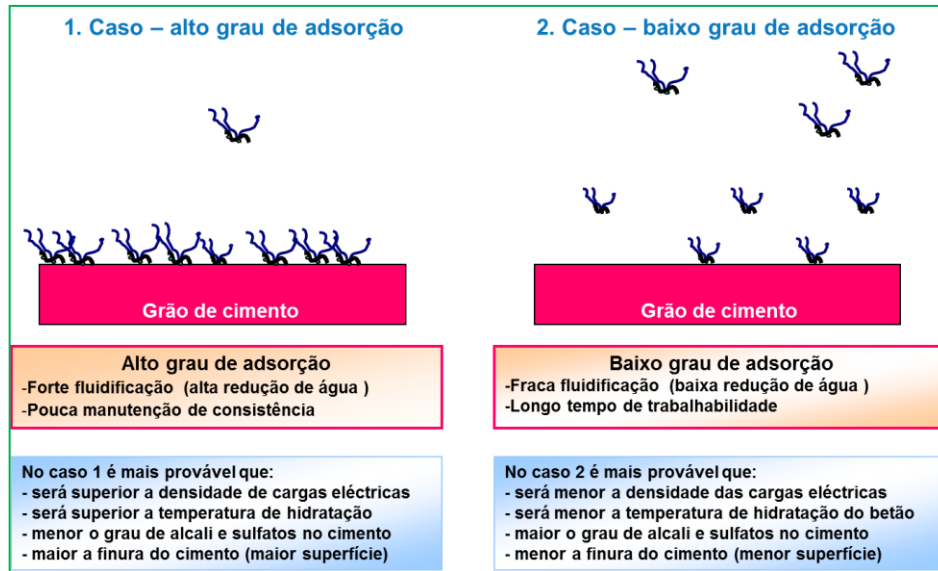


Fig. 3.15 - Grau de adsorção (Hauck, 1999)

Os superplastificantes com base em éter de policarboxilato possuem uma estrutura química, com uma cadeia central à qual estão ligadas as cadeias laterais. A cadeia central pode variar de comprimento e ter cargas eléctricas variadas sendo esta cadeia responsável pela adsorção do polímero nos grãos de cimento enquanto as cadeias laterais que podem variar de número e de comprimento são responsáveis pelo bloqueio espacial (steric hindrance), ver figura 3.16.

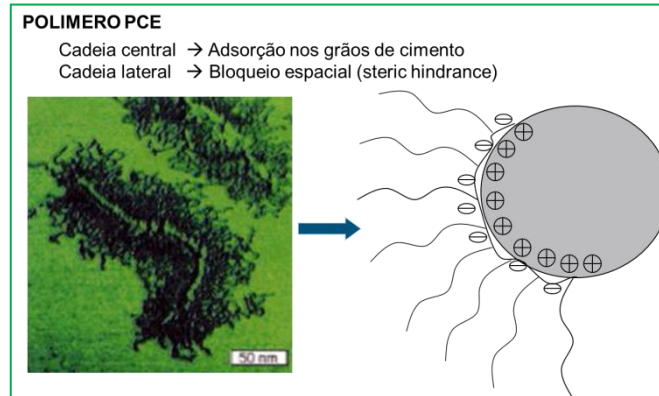


Fig. 3.16 - Polímero éter de policarboxilato, adsorção pelo cimento, (König, 2001)

Através da nanotecnologia é possível influenciar a estrutura do polímero e a sua interacção com os grãos do cimento. Desenvolvidos mais recentemente, alguns polímeros mais robustos apresentam, ligados à cadeia central, monómeros funcionais livres que controlam a retenção de trabalhabilidade do betão, ver figura 3.17. A vantagem deste polímero é o de se poder alterar a sua química e ser feito à medida do requerido pelo produtor de betão.

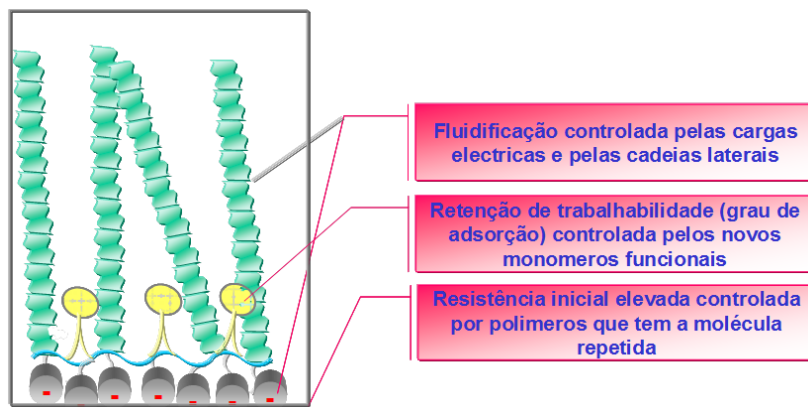


Fig. 3.17 - Cadeia de polímero PCE, (König, 2001)

Fica estabelecido, que o efeito de dispersão devido ao superplastificante melhora a trabalhabilidade do betão, o bloqueio espacial majora as forças repulsivas impedindo que as partículas de cimento se aproximem, evitando que se precipitem e floculem, com aumento da capacidade de fluir pelo seu próprio peso e desde logo a quantidade de movimento requerida, ver figura 3.18. Outra propriedade dos adjuvantes de nova geração, é a possibilidade de afectar o início de presa e poder interferir na velocidade requerida para a melhoria de consistência e retenção da fluidez, ficando estas dependentes do desenho do polímero. A competência do superplastificante em reduzir a quantidade de água da amassadura, sem abandonar a necessidade de melhorar a trabalhabilidade, beneficia consideravelmente as propriedades mecânicas, densidade, impermeabilidade e durabilidade do betão endurecido (Hauck, 1999).

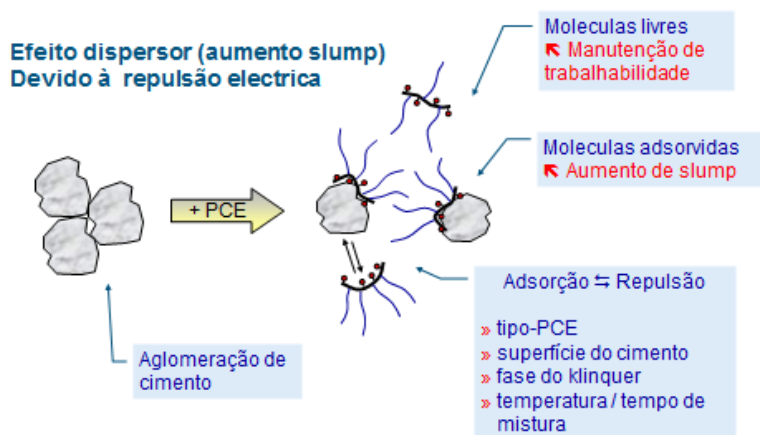


Fig. 3.18 - Mecanismo de acção dos superplastificantes PCE, (König, 2001)

Como observado, verifica-se a predominância das combinações, repulsão electrostática e a repulsão estérica para a dispersão das partículas de cimento. Os superplastificantes tradicionais com base em melamina ou naftalenos, têm como principal acção a repulsão electrostática, em que as suas moléculas são adsorvidas muito rapidamente na superfície das partículas de cimento, formando-se uma camada carregada electricamente e designada por “Stern” a qual, serve para reduzir a tensão superficial, aumentando a fluidez. Este fenómeno traduz-se, também, num mecanismo de dispersão, pois as partículas de cimento ficam no seu exterior com a mesma carga eléctrica. Nos adjuvantes com base em éter de policarboxilato, a adsorção das suas moléculas pelo cimento, tem funcionamento similar aos dos outros polímeros. A cadeia central carboxílica é adsorvida pelas partículas do cimento, enquanto

as suas cadeias laterais de óxido etileno desenvolvem um efeito de repulsão estérica, que estabiliza a capacidade de dispersar e de evitar o aglomerar das partículas de cimento, também o óxido de etileno tem grande capacidade de reter a água, aumentando a viscosidade da matriz. Os polímeros de última geração são ainda mais robustos, pois permitem controlar melhor a consistência do betão, evitarem a segregação devida a sobredosagem, pois são constituídos por moléculas de polímeros com diferentes propriedades, sendo que algumas delas não vão ser logo adsorvidas quando em contacto com o cimento, mas vão ficar disponíveis, para posteriormente tratar a nova superfície do cimento aquando do desenvolvimento da hidratação, melhorando a manutenção da consistência (Figura 3.19).

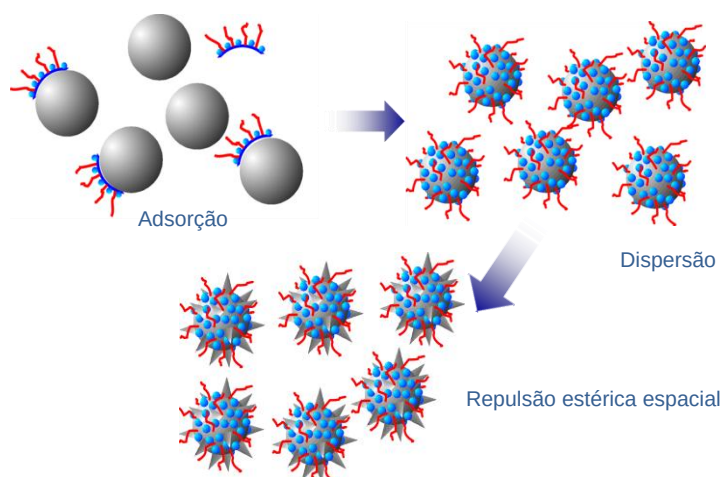


Fig. 3.19 - Mecanismo de acção dos superplastificante PCE, com alto desempenho, (Euromodal 2001)

3.8.4 MECANISMO DE ACÇÃO DOS MODIFICADORES DE VISCOSIDADE

Os agentes modificadores de viscosidade concedem ao betão mecanismos de resistência à segregação. Estes mecanismos podem ser de duas ordens: os que actuam sobre as partículas dos finos, ou os que actuam sobre as moléculas da água. Normalmente os agentes modificadores de viscosidade ou os estabilizadores, fazem diminuir a consistência do betão. De facto, os agentes que são adsorvidos pelas partículas dos finos, nomeadamente as do cimento, fazendo com que as moléculas do PCE sejam adsorvidas em menor número, pelo que o seu efeito destas é também menor. Os polímeros modificadores de viscosidade mais recentes (copolímero) são, constituídos por uma cadeia central “Polymer Backbone” à qual estão ligados grupos aniônicos e cadeias laterais hidrofílicas.

O desempenho do estabilizador deve assegurar robustez ao betão, verificada por não haver segregação nem exsudação, não afectando a fluidez e a presa inicial, assim como, o desenvolvimento das resistências mecânicas. A cadeia lateral hidrofílica atrai as moléculas da água, formando uma cela designada por “water envelope”, possibilitando que a matriz de betão se reorganize, aumentando a viscosidade da pasta. Uma cadeia de celas é formada de modo a estabilizar o betão, ver figura 3.20, na realidade parece uma matriz (mãe-d`água).

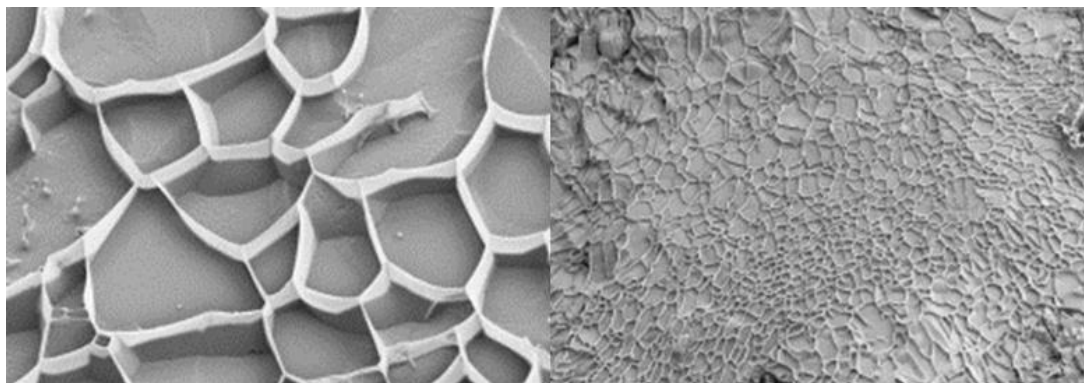


Fig. 3.20 - Water envelope, (Euromodal, 2007)

Os mais recentes modificadores de viscosidade, graças ao seu modo adaptado de acção no betão, transmitem um nível de viscosidade no interior de mistura, permitindo o equilíbrio certo da fluidez e da viscosidade, obtendo resistência à segregação. Este equilíbrio acontece, quando o aumento de fluidez do betão é obtido por adição de água. Por outro lado, os agentes de viscosidade que não são adsorvidos, não competem com o superplastificante pelos locais de adsorção na superfície das partículas e, por esta razão, para este tipo de agentes de viscosidade, a fluidez mantém-se com o aumento da viscosidade. Desta forma, os agentes que não são adsorvidos facilitam a obtenção de uma argamassa com adequada fluidez e viscosidade suficiente.

O betão contendo modificador de viscosidade (VMA) exibe comportamento em que a viscosidade aparente diminui com o aumento da velocidade de corte. Estes betões são tipicamente tixotrópicos, onde o aumento de viscosidade é promovido devido à associação e entrelaçamento das cadeias do polímero do VMA a uma baixa tensão de corte, podendo ainda inibir a fluidez e aumentar a viscosidade. A propriedade tixotrópica aumenta a estabilidade do betão e reduz o risco de segregação após moldado (Lachemi, 2004).

Os agentes modificadores de viscosidade que actuam sobre as partículas de cimento, incluem os polímeros à base de celulose e acrílico. Estes são adsorvidos à superfície das partículas de cimento e formam estruturas de ligação entre as partículas, conferindo viscosidade à pasta. Por outro lado, os polímeros solúveis em água, não são adsorvidos à superfície do cimento, mas o aumento da viscosidade fica a dever-se à ligação das moléculas entre si. Os biopolímeros e os agentes de viscosidade inorgânicos não se dissolvem na água, mas estes polímeros absorvem a água e incham, confinando a água de forma semelhante aos materiais finos. Isto reduz a quantidade de água livre aumentando desta forma a viscosidade. Em geral, existe afinidade entre os agentes de viscosidade e os superplastificantes, embora o mecanismo entre eles ainda não seja muito claro. Se não existir afinidade ocorre uma perda notável de trabalhabilidade do betão e a deformabilidade degrada-se (Euromodal, 2007).

No presente trabalho foram utilizados adjuvantes do mercado, cedidos pela empresa EUROMODAL, distribuidora em Portugal da marca (Woermann/BASF). Estes adjuvantes têm a designação comercial de Woerment FM 420 como superplastificante com base no mais recente éter de policarboxilato e o SR100 como agente modificador de viscosidade (VMA) de elevada performance para betões fluidos. Os dados técnicos fornecidos disponibilizados pelo fornecedor apresentam-se no Quadro 3.6.

O departamento técnico da Euromodal, aconselhou a utilização destes adjuvantes pela sua versatilidade de poderem ser usados tanto na produção do Betão Pronto como na pré-fabricação. O Woerment FM 420, apesar de proporcionar elevadas resistências iniciais, demonstra boa capacidade

na manutenção da consistência. Havia a possibilidade de utilizar o mesmo polímero com 30% conteúdo de sólidos (Woerment FM 430), mas a escolha recaiu naquele que tem sido comercialmente mais eficiente. O SR100 é o modificador de viscosidade integrante na nova tecnologia de betões auto-compactáveis desenvolvidos e comumente designados por “Smart Dynamic Concrete”, e que vão ser abordados no Capítulo 5.

Quadro 3.6 - Dados técnicos dos adjuvantes

Designação	Woerment FM 420	SR100
Matéria-prima	Éter de policarboxilato	Polímero
Cor	Castanho claro	Castanho claro
Forma	Líquido turvo	Líquido turvo
Massa volúmica (20°C)	$1,07 \pm 2 \text{ g/cm}^3$	$1,01 \pm 1 \text{ g/cm}^3$
Teor de sólidos	20%	15%
pH (20°C)	$7,0 \pm 1,5$	$9,0 \pm 1,5$
Dosagem admissível	0,2 – 3,0 M% CEM	0,1 – 1,5 M% CEM
Teor em iões cloreto	$\leq 0,1 \text{ M\%}$	$\leq 0,1 \text{ M\%}$
Teor de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv.}}$)	$\leq 0,4 \text{ M\%}$	$\leq 0,4 \text{ M\%}$

3.9 AR

O teor de ar ocluído no betão, depende de vários factores entre os quais, a máxima dimensão do agregado, a consistência e o tipo de adjuvante utilizado.

As bolhas de ar têm uma pequena influência na prevenção dos choques entre as partículas, prevenindo algum efeito de engrenagem entre os agregados grossos e por outro lado, a sua dimensão e teor podem influenciar a resistência mecânica e a resistência a condições ambientais como os ciclos de gelo-degelo.

Um betão de granulometria e consistência média (D22, S3) poderá ter um teor de ar que varia entre 1,5% e 3%, quando a consistência aumenta, diminui o teor de ar ocluído, de tal modo que um betão auto-compactável apresenta normalmente um teor de ar de 0,8% a 1,2%, dependendo do efeito redutor de ar do superplastificante.

Para garantir resistência do betão a ciclos de gelo-degelo, é necessário introduzir ar no betão, de modo artificial, com recurso a adjuvantes introdutores de ar. Devido à variação dos materiais, condições de mistura, processos de colocação do betão e à necessidade de atingir determinados parâmetros de ar no betão, há que ter cuidados com o cálculo e com a especificação da composição, assim como, avaliar o betão nos diferentes estados da construção.

Para medir o teor de ar no betão fresco há dois métodos previstos em norma NP EN 12350-7:2002, ambos utilizando aparelhos baseados no princípio da Lei de Boyle-Mariotte. Na prática, os dois métodos são designados por método da coluna de água e por método manométrico e os aparelhos são designados por dispositivo de medida por coluna de água e dispositivo de medida por manómetro, ver figura 3.21, ambos métodos pressiométricos. Este método, dando informação do teor de ar no betão,

não permite saber a sua distribuição e dimensão das microbolhas, aspecto muito importante quando se produz um betão que se pretenda seja resistente a ciclos de gelo-degelo (classe de exposição ambiental XF). No entanto, existem outros métodos que apesar de não estarem normalizados, são cada vez mais utilizados em países onde a produção deste betão é corrente, principalmente em estradas. O “Air-Void Analyzer” permite medir o teor de ar do betão fresco, verificar o factor de espaçamento das bolhas de ar e ainda mais importante medir o seu diâmetro e quantidade, figura 3.22.



Fig. 3.21 - Aparelho para medir teor de ar (pressiométrico)



Fig. 3.22 - Aparelho “Air-Void Analyzer”

4

BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL TIPO FINOS

4.1 INTRODUÇÃO

Sendo a auto-compactabilidade, a propriedade do betão auto-compactável, esta pode ser avaliada por parâmetros funcionais: capacidade de enchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passar por espaços estreitos (*Petersson, 1999*).

A capacidade de enchimento fica demonstrada pela capacidade e pela velocidade da deformação, a necessidade de se atender a um compromisso, entre a distância a percorrer pelo betão e a velocidade a que este se move, remete para uma redução de atrito entre as partículas, de modo a obter-se, uma pasta de elevada deformabilidade. Isto passa pela dispersão das partículas dos finos, o que foi possibilitado pela nova geração de superplastificantes com elevado poder de dispersão, reduzindo não só o atrito entre os finos, mas também entre os grossos. Para se obter a auto-compactabilidade do betão, não basta aumentar a deformabilidade da pasta. É necessário aumentar a viscosidade da pasta, até se obter uma viscosidade moderada que controle a segregação e ao mesmo tempo diminuir a tensão de cedência para aumentar a fluidez. O aumento de volume de pasta e a necessária diminuição de volume de grossos, otimizando a granulometria dos agregados, acompanhando com uma boa relação em volume de água e de finos, promove uma boa deformabilidade (*Nunes, 2001*).

A resistência a qualquer tipo de segregação é fundamental, pelo que controlar e reduzir a água livre na mistura torna-se imperativo e isso pode ser obviado com a introdução dos superplastificantes e com o aumento da viscosidade da mistura.

A capacidade de passar por espaços estreitos, pode ser condicionado pela escolha do diâmetro máximo do agregado de modo a evitar a ocorrência de bloqueio pelos agregados grossos, e assim, criar um compromisso entre a dimensão destes com o espaçamento entre os varões da armadura e seu recobrimento e o da largura da cofragem (*Nunes, 2001*).

4.2 MÉTODO

O grupo de investigação liderado pelo Prof. Okamura estabeleceu um método de concepção do betão auto-compactável em que a qualidade do betão endurecido era assegurada pela auto-compactabilidade do betão fresco.

A estrutura deste método consiste num plano de princípios com o estudo da fluidez e deformação da suspensão da pasta e o recurso ao uso de um adjuvante com base em PCE. Por outro lado, é realizado

um projecto de mistura sistemático, que compreende ensaios aos agregados, teste da pasta e teste do betão.

O método proposto tem como base um betão auto-compactável do tipo finos, em que ao aumentar a quantidade de finos da pasta, a tensão de cedência e a viscosidade aumentam. A razão água/finos, em volume, é ajustada para conferir uma viscosidade adequada à pasta e assim evitar a ocorrência de segregação. O objectivo deste método é o de encontrar um compromisso entre os agregados, principalmente entre os agregados grossos e os agregados finos, de modo a atingir a sua máxima compacidade e, desse modo, poder reduzir o volume de pasta, sem comprometer a pasta necessária para preencher os espaços vazios, a distância entre os grossos, sem ocorrer o bloqueio e um bom acabamento de superfície (König, 2001).

Por não ser objecto do presente trabalho, não será feita uma exposição pormenorizada da metodologia adoptada na produção deste betão, serão somente abordados os aspectos relevantes.

Na optimização dos agregados não se pode deixar de considerar que composições diferentes podem ter o mesmo volume de vazios, mas apresentando diferentes superfícies específicas, o que também vai poder implicar maior volume de pasta para tratar maior superfície no caso de maior finura pelo que é sempre necessário averiguar, experimentalmente, o volume de vazios da fase sólida compactada. Deste modo, é possível estabelecer as proporções adequadas para cada um dos agregados. Por fim, com o estudo da pasta dos componentes finos (cimento, fíler e eventualmente outras adições), pela razão volumétrica água/finos (β_p) correspondente a deformação da pasta nula, obtida pelos ensaios de espalhamento no cone de Häger, é possível estimar-se uma composição inicial.

As misturas produzidas irão servir, para ajustar a dosagem do plastificante, sendo que, a sua avaliação poderá ser feita por diversos ensaios do betão fresco, já normalizados, como o ensaio de espalhamento NP EN 12350-8 (parte 5, Figura 4.1), o escoamento no funil V: NP EN 12350-9, escoamento na caixa L: NP EN 12350-10, resistência à segregação: NP EN 12350-11, espalhamento com anel J: NP EN 12350-12.



Fig. 4.1 - Ensaio de espalhamento NP EN 12350-5

4.3 FASE EXPERIMENTAL

4.3.1 OPTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Após se ter caracterizado as propriedades para este betão auto-compactável, a abordagem experimental iniciou-se na selecção dos materiais que, por princípio, deveriam estar disponíveis no mercado português, de modo que se pudessem estabelecer relações dos ensaios experimentais e posterior aplicação prática em produção numa pré-fabricação. Inicialmente e com a informação disponível para o cálculo da composição com esta metodologia, verifica-se que a composição definida apresenta aspectos novos em termos de consistência, não podendo ser executado por métodos tradicionalmente usados para um betão corrente, como é o caso do Método de Faury, dada a sua deficiente compacidade não satisfazer os critérios de auto-compactabilidade exigidos para esta composição.

No seguimento da metodologia adoptada, foram ensaiados os agregados seleccionados, cujas quantidades se pretende otimizar para a mistura, com a distribuição granulométrica apresentada no Quadro 4.1 e com a curva granulométrica apresentada no Gráfico 4.1.

Quadro 4.1 - Distribuição granulométrica, optimização dos agregados

Resultado da análise granulométrica - Diferentes amostras										
Grupo agregado	Tipo agregado	Resíduo passado [M.-%]								
[mm]		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
0 / 1	Areia Fina	0,3	16,6	75,3	99,2	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0
2 / 5	Bago Arroz	0,5	0,9	1,8	2,5	4,2	41,5	100,0	100,0	100,0
5 / 16	Gravilha 1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	26,6	100,0	100,0
Cálculo para determinação da curva granulométrica dos agregados										
Grupo agregado	Vol.-%	Resíduo passado [M.-%]								
[mm]		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
0 / 1	33	0,1	5,5	24,8	32,7	33,0	33,0	33,0	33,0	33,0
2 / 5	17	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	7,1	17,0	17,0	17,0
5 / 16	50	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	13,3	50,0	50,0
Total	100	0,3	5,8	25,4	33,4	33,9	40,3	63,3	100,0	100,0
Massa por compactação dos agregados					m _{10 dm³} Topf [kg]			19,2	ρ _s [g/cm³]	1,920
					Volume vazios [Vol.-%]			26,6	ρ _r [g/cm³]	2,615

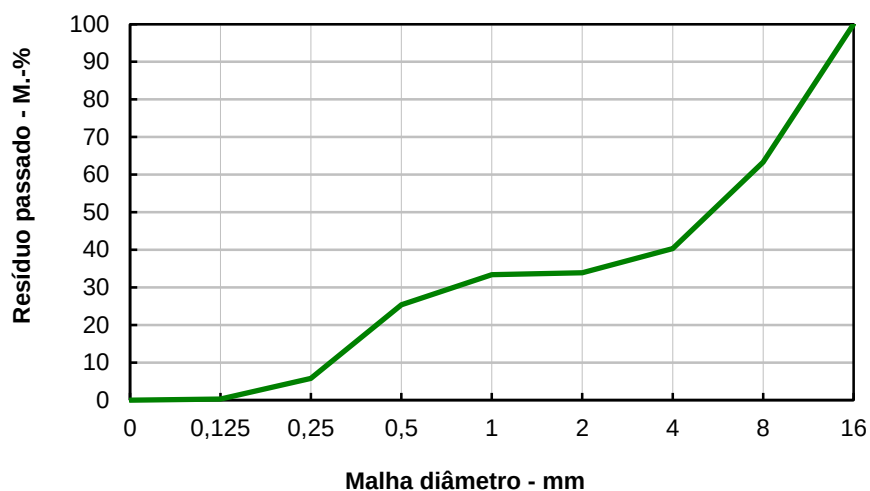


Gráfico 4.1 - Curva granulométrica da otimização dos agregados

O ensaio de baridade compactada foi obtido com recurso a um vaso de 8 lt de volume, do aparelho para medir o teor de ar no betão, Figura 4.2. Verificando diferentes amostras, obteve-se uma mistura, com a maior baridade compactada de $1,92 \text{ Mg/m}^3$. Conhecida a % em volume de cada agregado e sabendo a massa volúmica de cada um, é possível obter a massa volúmica da mistura que, neste caso, é de 2615 kg/m^3 .



Fig. 4.2 - Baridade compactada da mistura

O volume de vazios em % é obtido pela expressão:

$$V_v = \left(1 - \frac{\rho_{comp.}}{\rho_{part.}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

$\rho_{comp.}$ – é a baridade compactada

$\rho_{part.}$ – é massa volúmica média das partículas

Pelo cálculo da expressão resultou que o volume de vazios é de 26,6%, volume esse que vai ser necessário preencher com pasta, sendo que vai ser também necessário exceder o volume de vazios com pasta para reduzir o atrito entre os grossos, estabilizar o betão e obter bom acabamento de superfície. No caso em estudo a opção foi o de aumentar o teor de pasta em 40%. (pela experiência verifica-se ser razoável que este teor varie entre os 25% e os 40%), ver Quadro 4.4.

4.3.2 ENSAIOS DA PASTA (PÓ)

A avaliação que se pretende fazer com os ensaios aos quatro componentes finos da mistura, cimento, GPF, sílica de fumo e fíler, consiste num ensaio de espalhamento, utilizando o cone de Häger, como visível na figura 3.4.

Para as diferentes amassaduras utilizou-se uma misturadora VFM, que se apresenta na figura 4.3, em que para cada um dos componentes são efectuados 4 ensaios. O procedimento de mistura adoptado, teve a seguinte sequência: colocar o pó no recipiente da misturadora, iniciar a mistura com o planetário em velocidade lenta (140 rot/min) e introduzir toda a água calculada. Esta fase de mistura dura 1min 30s. Decorrido este tempo desliga-se a misturadora e aproveita-se para com o planetário, retirar toda a pasta aderente às paredes e ao fundo do recipiente e colocá-lo no meio deste. Após 30s a misturadora é colocada novamente em movimento, em velocidade lenta, durante 1 min e decorrido este tempo aumenta-se para uma velocidade rápida (285 rot/min) durante 30s e ao fim deste tempo o processo de amassadura do pó fica concluído.



Fig. 4.3 - Sequência da mistura de finos

Após a mistura, procede-se à verificação do espalhamento com a seguinte sequência: a pasta é colocada no cone de Häger, previamente humedecido; durante o enchimento do molde, manter o molde fixo contra a placa/superfície e sem compactar rasa-se a pasta com uma espátula, remover o

molde na vertical com velocidade igual para todos os ensaios, tendo-se optado por remover o molde o mais rapidamente possível de modo a garantir velocidades mais aproximadas, ver figura 4.4



Fig. 4.4 - Verificação do espalhamento

Após remover o molde é registado o valor medido em cada diâmetro d_1 e d_2 [mm] e definido o seu valor médio (d_m), que irá servir para calcular o índice de deformabilidade G_p (área de espalhamento relativa), pela expressão 4.2.

Com as diferentes amassaduras e para cada componente faz-se variar a razão volumétrica da água/pó (V_w/V_p), de modo a obter a correspondente razão para deformação de pasta nula admitindo uma regressão linear. Desse modo o β_p é calculado pela intercepção dos pontos marcados pela V_w/V_p com a ordenada do gráfico, enquanto o E_p sendo o factor de deformação, indica o declive da recta. Os resultados da mistura de BAC de controlo são apresentados no Quadro 4.2 e 4.3.

$$G_p = \left(\frac{d_m}{100} \right)^2 - 1 \quad (4.2)$$

Onde:

G_p . – área de espalhamento relativa

d_m – diâmetro médio

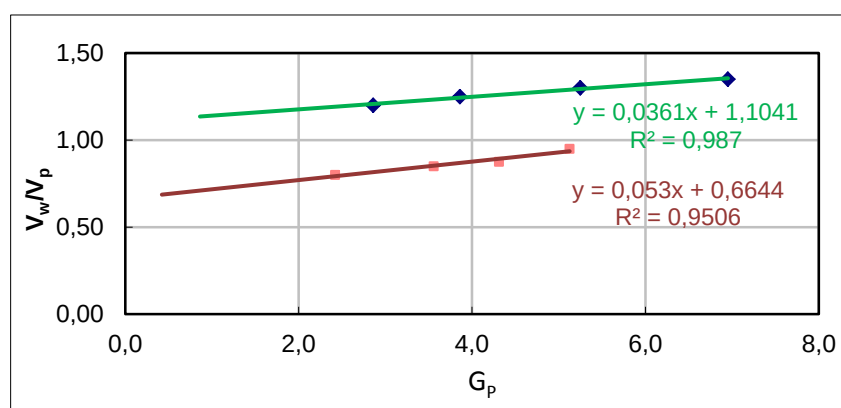
100 – diâmetro inicial (d_0)

Quadro 4.2 - medição do espalhamento da pasta

Medição dos valores β_p e E_p por componente					
	V_w/V_p [-]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d_m [mm]	G_p [-]
Cimento	1,200	196	197	197	2,861
	1,250	221	220	221	3,862
	1,300	250	250	250	5,250
	1,350	282	282	282	6,952
	V_w/V_p [-]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d_m [mm]	G_p [-]
Fíler	0,800	185	185	185	2,423
	0,850	213	214	214	3,558
	0,875	230	231	231	4,313
	0,950	247	248	248	5,126

Quadro 4.3 - Resultados da medição do espalhamento da pasta

Resultados					
	β_p	1,104		β_p	0,664
Cimento	E_p	2,07	Fíler	E_p	3,04
	R^2	0,987		R^2	0,951

Gráfico 4.2 – Representação gráfica de β_p

Definidos que estão os parâmetros dos ensaios à pasta, é agora necessário desenvolver o projecto do sistema, o qual, consiste em quantificar o volume total de pasta (V_p) definido para a composição expresso em l/m^3 , a massa total da pasta (M_p) expressa em kg/m^3 . No teor de cimento dever-se-á considerar, para além da classe de exposição requerida para o betão, a classe de resistência tendo em conta a razão w/c esperada e do tipo de cimento.

A razão volumétrica água/finos correspondente a deformação da pasta nula para todo o betão, é obtida pela seguinte expressão:

$$\beta_{Ptodo} = \frac{V_c \times \beta_{pc} + V_f \times \beta_{pf}}{V_p - V_w} \quad (4.3)$$

Onde:

V_c - é o volume de cimento

β_{pc} - é a razão volumétrica da água/pasta de cimento correspondente a deformação da pasta nula

V_f - é o volume de finos da adição

β_{pf} - é a razão volumétrica da água/pasta de adição correspondente a deformação da pasta nula

V_p - é o volume da pasta (adição + cimento)

V_w - é o volume de água.

A água total da amassadura será então obtida pela expressão:

$$W = 0,95 \times \beta_{Ptodo} \times (V_p - V_w) \quad (4.4)$$

Onde:

V_p - é o volume da pasta (adição + cimento)

V_w - é o volume de água.

Os resultados do projecto do sistema da pasta, com efeito na composição do betão, são apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Projecto do sistema da pasta

Projecto do sistema da pasta						
Qual a quantidade de pasta (25%-40%) a exceder o volume de vazios?						40
a escolher	Pasta total c+f+w	[l/m³] [kg/m³]	372,1 761,4	Processo interactivo (=) !!!	Filer	
	Cimento	[l/m³] [kg/m³]	104,8 330,0		[l/m³] [kg/m³]	96,5 260,6
	Água estimada	[l/m³]	170,8		$\beta_{p, todo}$ w sem $\beta_{p, todo}$	0,893 170,8

4.3.3 COMPOSIÇÃO DO BETÃO

Estando quantificados os teores de cimento, de fíler e de água a utilizar na composição, é necessário calcular a composição do betão auto-compactável. Esta é conseguida pela soma do volume da pasta com o somatório da volumetria dos agregados, cuja proporção de cada um foi anteriormente estabelecida, estando os resultados apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Cálculo da composição do betão auto-compactável

Cálculo de volumetria dos materiais						
Composição do betão	M.-% peso cim.	Unidade	M - Peso	M. volúmica kg/dm ³	C. Sólido M.-%	Volume mat. dm ³ /m ³
Água		kg/m ³	171	1,00		171
Cimento		kg/m ³	330,0	3,15		105
Fíler - Lime stone		kg/m ³	262,4	2,70		97
Woerment FM 420	1,31	kg/m ³	4,32	1,05	22	4
Teor de ar		Vol.-%	1,0			10
Areia Fina - duna		kg/m ³	528	2,61		202
Gravilha – bago de arroz		kg/m ³	273	2,62		104
Gravilha 1		kg/m ³	803	2,62		306
(água+adjuvante)/(cem+fíler) (LNEC E464)			0,36	Total		1000
(água+adjuvante)/(cem+sílica fumo)			0,52			
(água+adjuvante)/cem			0,52			
Materiais	Composição para 1 m ³			Composição para 1,000 m ³		
Agregados	Vol.-%	Volume dm ³ /m ³	M.-%	Humidade do agregado M.-%		Peso húmido kg/m ³
0 / 2	33	202	33	0,0		527,72
0 / 4	17	104	17	0,0		272,90
5 / 16	50	306	50	0,0		802,64
Total	100	613	100	Total		1603,26
						Água adicionada
						167,84
						Cimento
						330,00
						Fíler
						262,41
						Woerment FM 420
						4,32
						Massa volúmica do betão fresco
						2367,83
Qty. Finos	330	Cimento +	4,6	Agregado <0,125mm +	262,4	Fíler 1
						597,0 kg/m ³
Finos + Areia fina	330	Cimento +	92,7	Agregado <0,250mm +	262,4	Fíler 1
						685,1 kg/m ³

4.3.4 AMASSADURA DO BETÃO

A amassadura do betão foi efectuada numa misturadora de eixo vertical de satélite, com capacidade para produzir 40 lt de betão, não permitindo variar a velocidade. A sequência utilizada para as amassaduras foi a proposta pelo Prof. Fleig da Universidade de Weimar (1998) que consiste em: colocar no tambor da misturadora todos os agregados e iniciar o movimento de mistura; depois de algumas rotações ($\pm 15s$) parar a misturadora e com uma colher de pedreiro garantir que não há agregado fino retido no bordo da base do tambor; colocar novamente em movimento e adicionar 20% da água da amassadura; após 30s parar a misturadora, voltando a homogeneizar os agregados agora humedecidos; colocar o cimento e o fíler e reiniciar o movimento, após algumas rotações (+ 15s) iniciar a contagem do tempo com a colocação da restante água. O adjuvante entra também nesta fase, em paralelo com a água; decorridos 2min 30s parar a misturadora e homogeneizar o betão garantindo

que não há materiais não misturados retidos no bordo da base do tambor, devendo-se aproveitar esta fase para inspeccionar visualmente o comportamento do betão, esperar 30s e iniciar o movimento de mistura durante mais 1min. Findo o tempo segue-se o processo de ensaios ao betão fresco. Figura 4.5.



Fig. 4.5 - Sequência da amassadura do betão

4.3.5 ENSAIOS REALIZADOS E PROCEDIMENTOS

Tendo como interesse avaliar as propriedades do betão auto-compactável no estado fresco, foram efectuados alguns ensaios recorrendo aos equipamentos disponíveis no laboratório de materiais da EUROMODAL, alguns deles repetidos em amassadura realizada no LEMC. Esses ensaios consistiram no espalhamento na mesa de espalhamento, mas sem recorrer às 15 quedas previstas na NP EN 12350-5; foi efectuado o espalhamento utilizando o cone de Abrams de acordo com a NP EN 12350-8; o espalhamento com anel J de 16 varões de acordo com a NP EN 12350-12 e efectuaram-se os ensaios por escoamento no funil V de acordo com a NP EN 12350-9.

4.3.5.1 Ensaio na mesa de espalhamento, segundo NP EN 12350-5 (modificado)

Este ensaio sem recorrer às 15 quedas previstas na norma, não sendo standard permite pelo volume de betão no troncocone, admitir uma boa relação com a auto-compactabilidade se o espalhamento for superior a 600 mm. Este ensaio é sustentado pela experiência do autor e conhecimento adquiridos, em inúmeros projectos de produção de BAC.

A mesa é colocada numa superfície horizontal plana, não sujeita a vibrações externas ou choques sendo a mesa limpa e humedecida antes dos ensaios, sem molhar excessivamente. O molde é cheio em duas camadas, em cada camada o betão é ajustado com 10 pancadas, com a barra de compactação. Usando a barra de compactação, rasa-se a parte superior do molde e limpa-se o tabuleiro da mesa, do betão em excesso. Após 30 s de ter sido colocado o betão, levanta-se o molde na vertical com as duas mãos durante um período de 3 a 6 s. Verifica-se se o espalhamento originou segregação do betão: A pasta de cimento pode ser segregada do agregado grosso e formar um anel de pasta estendendo-se vários milímetros à volta do agregado. Neste caso regista-se que a segregação ocorreu sendo o ensaio, consequentemente insatisfatório, tendo de ser repetido após ajustar a dosagem do adjuvante, evitando-se assim prosseguir para os restantes ensaios. Não havendo segregação o resultado é validado e é determinado pelo valor do espalhamento. Após obtenção da média dos dois diâmetros, o valor é registado com aproximação aos 10mm. Ver figura. 4.6.



Fig. 4.6 - Ensaio na mesa de espalhamento

4.3.5.2 Ensaio de espalhamento, segundo NP EN 12350-8

Para realizar este ensaio, é necessário para além do cone de Abrams, um cronómetro, fita métrica e uma mesa com dimensão mínima de 900 x 900 mm², com duas circunferências centradas de 210 mm e 500mm nela marcada. A mesa é colocada numa superfície horizontal plana, não sujeita a vibrações externas ou choques, e é limpa e humedecida antes dos ensaios sem a molhar excessivamente. O molde centrado no círculo previamente marcado é cheio de uma só vez, sem ser compactado, é nivelado pela parte superior do molde através de movimentos de rolamento com o varão de compactação e o betão em excesso limpo do tabuleiro da mesa. Seguidamente e antes de decorridos 30s, levanta-se o molde na vertical, de modo contínuo, sendo que, no início deste processo se inicia a

contagem do tempo que o betão demora a atingir o círculo de 500mm (t_{500} , em s). O tempo final do espalhamento (t_{final} , em s) é medido até ao final do movimento de espalhamento do betão. Após registo dos valores obtidos no cronómetro, medem-se dois diâmetros perpendiculares entre si e considera-se que o espalhamento é a média destes dois (em mm), ver figura. 4.7.

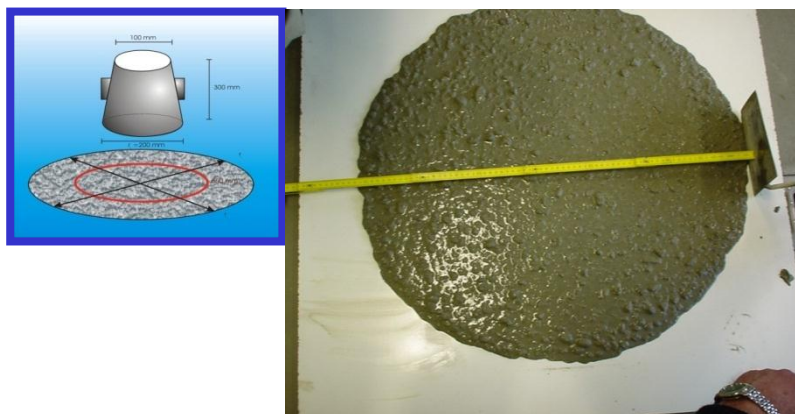


Fig. 4.7 - Medição do diâmetro de espalhamento no “Ensaio de espalhamento do betão”

4.3.5.3 Ensaio de espalhamento com anel Japonês, segundo NP EN 12350-12

O ensaio com o anel japonês, apresenta algumas vantagens e particularidades. Tendo a capacidade de distinguir as composições de BAC com diferentes deformabilidades, tentando reproduzir o movimento do betão quando da sua colocação em obra. O anel J (anel Japonês) tem vindo a ser utilizado por permitir ajustar as condições de bloqueio e para simular as condições reais do betão a envolver a armadura, sendo um ensaio polivalente e fácil de executar. É constituído por um anel de 300mm de diâmetro ligado a varões verticais de diâmetro e espaçamento fixo, podendo variar o número de varões já que existe o anel de 12 varões e o anel de 16 varões.

É utilizado conjuntamente com o “Ensaio de espalhamento do betão” e pode, também, obter-se o valor do t_{500j} . Ver figura 4.8.

Pelas condições previstas neste trabalho dissertação, este ensaio com o anel de 16 varões só será utilizado no BAC tipo finos, simulando a colocação do betão em zonas de grande densidade de armadura do tipo R1. Este ensaio não é apto para o betão tipo modificador de viscosidade, previsto para este estudo, pois esse betão está condicionado a estruturas com densidade de armadura do tipo R3 (com armadura $< 100 \text{ kg/m}^3$ ou distância entre varões superior a 200 mm, recomendação da JSCE - Japan Society of Civil Engineers), sendo previsível o aparecimento de bloqueio, como ficou provado pelos testes de demonstração efectuados no LEMC.



Fig. 4.8 - Anel japonês

4.3.5.4 Ensaio de escoamento no funil V, segundo NP EN 12350-9

Este ensaio serve sobretudo para avaliar a viscosidade e o nível de fluidez do betão, fornecendo também alguma informação sobre a capacidade de o betão passar por espaços apertados e por isso a sua forma rectangular e não circular forma habitual dos funis, pois o betão ao passar pelas armaduras deforma-se de uma forma bidimensional (*Schrimpf et al., 2001*). Este funil de dimensões adequadas para o betão, ver figura 4.9, tem uma comporta na sua parte inferior. O funil é cheio com betão e depois de abrir a comporta inferior mede-se o tempo que dura o escoamento.

Este ensaio permite, assim, fazer variar a fluidez do betão para os valores pretendidos, pois reduzindo a água ou aumentando a dosagem do adjuvante o betão fica com maior viscosidade. Por outro lado, diminuindo a dosagem do adjuvante ou aumentando o teor de água, o betão fica menos viscoso, o que pode em alguns casos ser interessante pois perderá o efeito de cola, o qual, por exemplo, compromete o acabamento por talocha, em elementos pré-fabricados com grandes superfícies para acabamento.

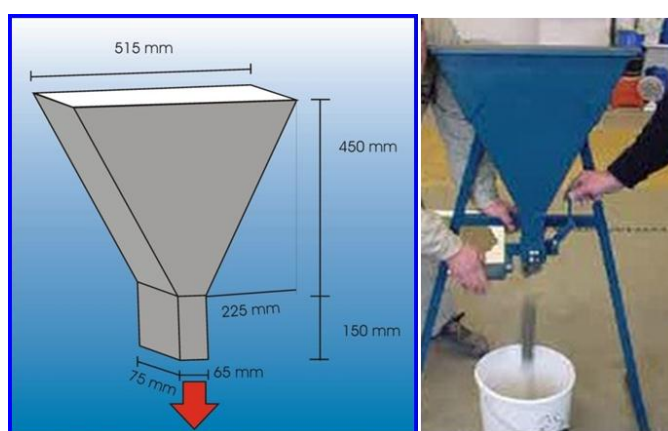


Fig. 4.9 - Ensaio por escoamento no funil V

4.3.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

O pressuposto para esta dissertação tinha como tema a preparação de betões auto-compactáveis eco-eficientes. Para isso, estudou-se a preparação de dois tipos de BAC (tipo finos e tipo modificador de viscosidade), em que cada tipo previa a substituição parcial do cimento Portland. Para dar cumprimento ao estabelecido, foram estudadas e produzidas quatro composições por tipo de BAC, sempre com o mesmo teor de ligante (330kg/m^3), sendo que se entende como ligante o cimento Portland ou o cimento Portland mais adições (GPF ou MS). De cada composição e em conformidade com a NP EN 206-1 foram produzidas três amassaduras para testes iniciais

As composições calculadas determinaram um betão de controlo (BAC-F CTL) só com cimento Portland, um betão com substituição em 10% do cimento por GPF (BAC-F 10%GPF), um betão com substituição em 20% do cimento por GPF (BAC-F 20%GPF) e um betão com substituição em 10% do cimento por sílica de fumo (BAC-F 10%MS), tendo sido realizados os ajustes por diferença nas massas volúmicas.

Para além do teor fixo de ligante, também se fixou o teor em água da amassadura, para que se pudesse compreender que os resultados que se viessem a verificar, não estavam dependentes da razão água/ligante, mas sim da substituição do cimento Portland e assim poder melhor avaliar o efeito da adição.

Pelos ensaios à pasta dos novos ligantes confirmou-se haver necessidade de aumentar o teor em água para igual consistência. Assim, partindo da composição BAC CTL foram ajustadas as dosagens do superplastificante Woerment FM 420.

Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, não tendo havido necessidade de ajustes ou correcções, nem mesmo à dosagem do adjuvante, dado o bom conhecimento que havia deste polímero, sustentado em experiências anteriores. Assim, em cada amassadura produziu-se uma amostra de betão com um volume de 25 litros, de acordo com os procedimentos e critérios estabelecidos neste Capítulo. Em nenhuma das amassaduras foi detectada segregação na mistura.

Os resultados dos ensaios com o betão fresco e o valor médio das resistências à compressão de provetes cúbicos (150x150x150mm³) a diferentes idades, são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Resultados das amassaduras do BAC-F

Ensaio		BAC-F CTL	BAC-F 10%GPF	BAC-F 20%GPF	BAC-F 10%MS
Betão no estado fresco	Mesa de espalhamento (mm)	620	610	630	630
	Espalhamento (mm) - SF3	770	790	790	800
	Tempo t ₅₀₀ (s) - VS2	3,0	3,0	3,5	4,0
	Capacidade passagem anel J (mm) - PJ2	8	9	8	8
	Escoamento funil V (s) - VF2	14	14	15	17
	Dosagem do Woerment FM 420 (%)	1,31	1,35	1,37	1,40
Betão no estado endurecido	Resistência à comp., 2 dias (MPa)	46,5	40,0	39,0	44,0
	Resistência à comp., 7 dias (MPa)	55,5	47,0	47,0	58,0
	Resistência à comp., 28 dias (MPa)	65,0	60,5	55,5	76,5

5

**BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL TIPO
MODIFICADOR DE VISCOSIDADE****5.1 INTRODUÇÃO**

Reconhecidas as propriedades do betão auto-compactável era necessário tornar este betão um betão de aplicação corrente visando as necessidades da indústria do Betão Pronto onde mais de 95% do betão é produzido com níveis de resistência à compressão de 35 MPa ou menos.

O objectivo é o de desenvolver misturas do betão auto-compactável com “alto” teor de finos (material passado no peneiro de 0,125mm) de 350-380 kg/m³ e, eventualmente reduzir o teor de finos para 300 kg/m³, de modo a poder ser usado num betão pronto corrente, com níveis de resistência à compressão 25-35 MPa e classes de consistência superiores a F5 (segundo a NP EN 206-1). A necessidade de fíler extra (100 a 150 kg/m³) é eliminada ou reduzida, bem como o seu custo.

5.2 MÉTODO E ENSAIOS

Desde cedo se verificou a necessidade da introdução de um modificador de viscosidade, cujo desempenho foi convenientemente abordado no Capítulo 3. O Adjuvante Modificador de Viscosidade deve manter a homogeneidade do betão auto-compactável e aumentar a sua robustez, sem afectar a fluidez (consistência) significativamente (baixo valor de produção) e ao mesmo tempo melhorar a viscosidade plástica.

O conteúdo de cimento na amassadura é determinado pela classe de resistência ou pelos requisitos de durabilidade relativo ao mínimo conteúdo de cimento e razão w/c. Os restantes finos são obtidos por um fíler (se necessário).

A auto-compactabilidade está classificada em três categorias correspondendo aos requisitos estruturais da quantidade de armadura e espaçamento, segundo as recomendações da JSCE (Japan Society of Civil Engineers) estas são:

- R1 - Estruturas com armadura superior a 350 kg/m³ ou espaçamento entre armaduras inferior a 60mm;
- R2 - Estruturas com armadura de 100 a 350 kg/m³ ou espaçamento entre armaduras de 60 a 200mm;
- R3 - Estruturas com armadura inferior a 100 kg/m³ ou espaçamento entre armaduras superior a 200mm.

De acordo com o desenvolvimento que foi efectuado para o BAC-MV, classifica-se como de classe R3.

Robustez e estabilidade do BAC-MV são propriedades importantes que têm de ser consideradas na concepção da mistura. Podemos examinar estas propriedades, pois são estes os factores que afectam a estabilidade do betão auto-compactável, nomeadamente a sua robustez e estabilidade estática.

Estabilidade refere-se à capacidade que a mistura (em fresco) tem, de manter as suas propriedades previstas na composição, durante e depois da colocação do betão de uma ou de sucessivas amassaduras. A estabilidade melhora ao aumentar a viscosidade. A selecção do material, aumentando a densidade da matriz, e diminuindo o tamanho máximo dos agregados.

A robustez provém da capacidade da mistura fresca manter o mesmo nível de taxa de endurecimento e de resistir a mudanças de composição, especialmente as de pequenas variações que possam ocorrer, no conteúdo dos ingredientes em amassaduras sucessivas. O principal factor é a variação do conteúdo de humidade na areia da mistura, que pode levar a pequenos aumentos na fluidez (que significa maior robustez a mudanças no conteúdo de água), ver gráfico 5.1. Maior fluidez tende a aumentar o risco de segregação.

Esta é uma definição mais ampla uma vez que inclui a capacidade do BAC para resistir às mudanças de propriedades dos materiais e proporções da mistura, devido a imprecisões nos doseamentos, mas também a capacidade de resistir a mudanças durante o transporte e colocação (estabilidade dinâmica) e pós-colocação (estabilidade estática) (Nunes, 2008)

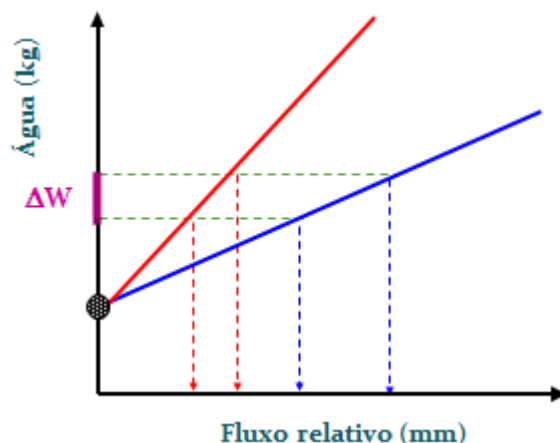


Gráfico 5.1 - Um determinado Δw promove variação de fluidez

A reologia deve resistir à segregação das partículas sob condições estáticas. A resistência de segregação sob condições estáticas depende da quantidade produzida e da densidade da matriz (Khurana, 2007).

Neste betão, a avaliação da estabilidade estática não pode ser efectuada por inspecção visual do espalhamento ou pelo recurso aos ensaios habituais para o betão auto-compactável, e que foram descritos nos Capítulos anteriores. Houve então a necessidade de desenvolver um ensaio, que fosse capaz de avaliar facilmente a estabilidade estática. Um grupo de trabalho chefiado pelo Prof. Khurana (2007), desenvolveu um teste que ficou designado pelo Método da Sonda, ver figura 5.1. Este teste poderá também ser efectuado em conjunto com o ensaio da resistência à segregação previsto na NP EN 12350-11.

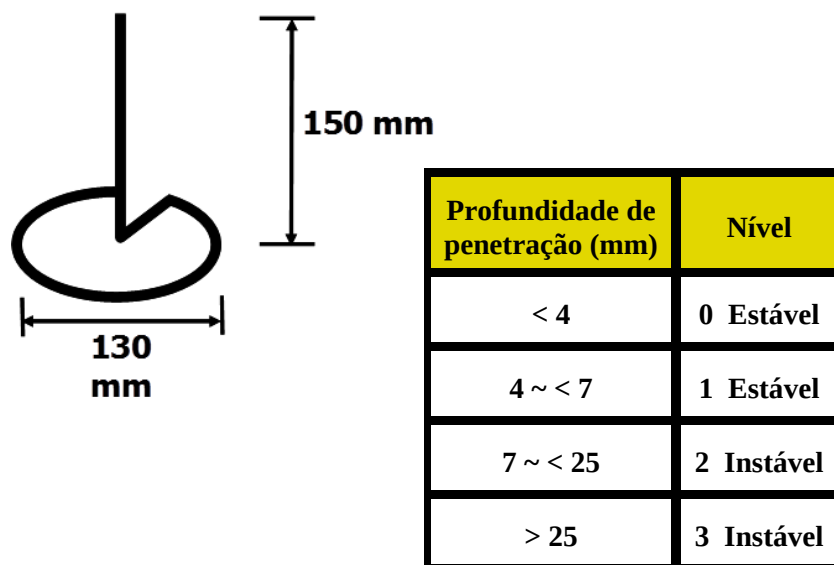


Fig. 5.1 - Método da sonda (o arame de ferro tem um diâmetro de 1.6 mm)

O método consiste em após recolher uma amostra de betão, colocar a sonda na superfície do betão e sem recurso a qualquer esforço, deixá-la penetrar na matriz de betão, medindo somente a profundidade de penetração e fazendo a análise do nível de estabilidade estática pelo quadro apresentado na figura 5.2.



Fig. 5.2 - Ensaio de estabilidade estática

Pelos ensaios efectuados em laboratório incluindo outros materiais que não o betão, verificou-se que a melhor estabilidade estática e a resistência à segregação, é obtida para um betão com valores de viscosidade plástica entre os 30 e 60 Pa.s. Para a resistência à segregação pode-se utilizar um outro método de ensaio previsto na NP EN 12350-11 Ensaio de segregação no peneiro, ver figura 5.3, e o valor sugerido da resistência de segregação é de SR1 < 20%.



Fig. 5.3 - Ensaio da resistência à segregação no peneiro

Orientações da ERNARC/EFCA/ERMCO, atribui as seguintes propriedades às diferentes combinações do betão auto-compactável:

- Propriedades de fluido medidas pelo espalhamento
- Adequada viscosidade plástica medida por “ T_{500} ” e “V-Funnel”
- Capacidade de passagem medida pelas “L-Box” and “U-Box”
- Capacidade de enchimento medida pela “Kajima fill box”
- Resistência de segregação medida pelo “sieve segregation test”

As orientações Europeias, para o betão auto-compactável – especificação, produção e aplicação” recomenda os valores descritos nos quadros das normas já em vigor, como constante nas tabelas do seguinte Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Especificação dos BAC no estado fresco (adaptado de [APEB, 2007])

Característica	Ensaio	Classe	Parâmetros	Análise qualitativa	Notas
Espalhamento	Espalhamento [mm] NP EN 12350-8	SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com pouca armadura; betão bombeado; secções suficientemente pequenas para prevenir escoamentos horizontais	Não aplicável a betões c/D _{máx} > 40 mm
		SF2	660 a 750	Aplicações correntes	
		SF3	760 a 850	Aplicações verticais, estruturas densamente armadas e/ou com formas complexas; melhor superfície de acabamento mas mais difícil de controlar a segregação; geralmente c/D _{máx} ≤ 16mm	
Viscosidade	Espalhamento T ₅₀₀ [s] NP EN 12350-8	VS1	≤ 2	Boa capacidade de preenchimento; capacidade de auto-nivelamento e melhor grau de acabamento; maior risco de exsudação ou segregação.	Não aplicável a betões c/D _{máx} > 22,4mm
		VS2	3 a 6	Aplicações correntes	
		VS3	>6	Casos especiais	
	Funil V [s] NP EN 12350-9	VF1	< 9	Boa capacidade de preenchimento; capacidade de auto-nivelamento e melhor grau de acabamento; maior risco de exsudação ou segregação.	
		VF2	9 a 25	Com o crescimento do tempo de espalhamento, existe maior probabilidade de ter efeitos tixotrópicos, que podem ajudar a limitar a pressão na cofragem ou a aumentar a resistência à segregação. Pode apresentar dificuldades com o acabamento superficial (chochos), com o enchimento de cantos com betão SF1 e a maior sensibilidade às paragens ou atrasos entre camadas sucessivas.	
Capacidade de passagem	Caixa L NP EN 12350-10	PL1	≥ 0.80 c/2 varões	PL1 ou PJ1 – estruturas com intervalos de 80 a 100 mm; PL2 ou PJ2 – estruturas com intervalos de 60 a 80 mm; em lajes delgadas com intervalo > 80 mm e estruturas com o intervalo > 100 mm, não é requerida a especificação da capacidade de passagem. Para intervalos < 60 mm podem ser necessários ensaios prévios em modelos.	Não aplicável a betões c/D _{máx} > 40mm
		PL2	≥ 0.80 c/3 varões		
		PJ1	≤ 10 c/12 varões		
Segregação	Anel J [mm] NP EN 12350-12	PJ2	≤ 10 c/16 mm varões	Lajes esbeltas e para aplicações verticais com uma distância de espalhamento < 5m e um intervalo de escoamento > 80 mm.	Não aplicável a betões de agregados leves ou com fibras importantes.
		SR1	≤ 20	Elementos verticais se a distância de espalhamento > 5 m, com intervalo de escoamento > 80 mm. Para situações em que a resistência e a qualidade da superfície de acabamento superficial sejam importantes.	
		SR2	≤ 15		

5.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA

O método proposto prevê um procedimento sistemático no desenvolvimento das composições para a produção do Betão auto-compactável do tipo modificador de viscosidade, o qual pretende-se simplificar com a exposição feita na figura 5.4.

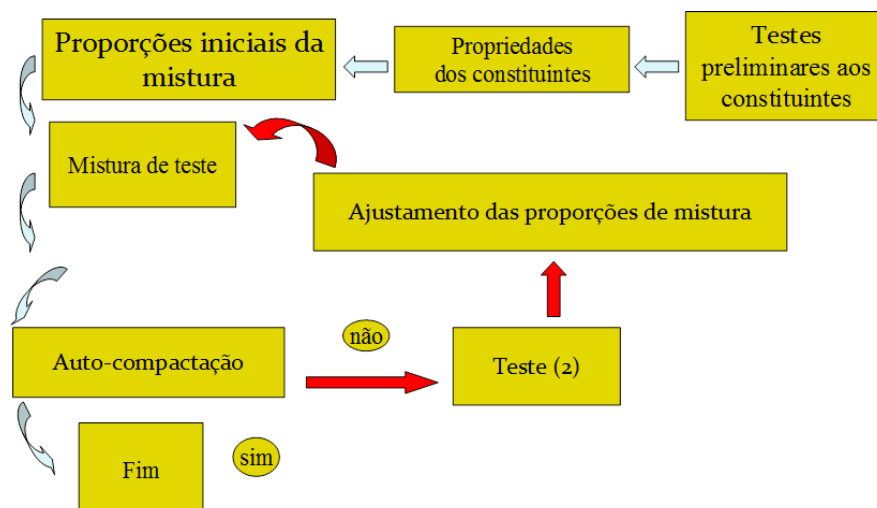


Fig. 5.4 - Procedimento de mistura do BAC-MV

Para o projecto da composição do BAC-MV há um conceito básico: em que o teor de água, cimento e agregados finos deverá ser aproximadamente 65% do volume da mistura de betão e os agregados grossos deverão ser calculados em aproximadamente 50% da sua baridade. A ideia é que sejam os agregados finos a transportar os agregados grossos, (Khurana, 2007).

Como postulado relativamente ao conteúdo de água e como verificado nos testes realizados durante este projecto, podemos afirmar que: o conteúdo de água depende do tipo de superplastificante usado; para a indústria de Betão Pronto, onde normalmente são usados adjuvantes Woerment FM estes têm polímeros com cadeias laterais em número mais elevado, mas curtas sendo que o conteúdo de água se encontra no intervalo de 185 a 195 l/m³; para a indústria de Pré-fabricação, normalmente são usados adjuvantes Woerment FM com base em polímeros com cadeias laterais em menor número e mais compridas, neste caso, o conteúdo de água encontra-se no intervalo de 175 a 185 l/m³, ver Figura 5.5, (Euromodal, 2008).

O procedimento para o desenvolvimento da mistura para produção do BAC-MV, pode ser sistematizado. Começa-se por estimar o volume do agregado grosso, que deverá ser de 50% em massa da sua baridade; Com o teor de massa obtido e recorrendo à sua massa volúmica obtém-se o volume que o agregado grosso deverá ocupar na mistura. Em seguida estima-se o conteúdo de ar. Se não for especificado para a durabilidade classe de exposição para o ataque pelo gelo/degelo, então, para um agregado 16mm, o conteúdo de ar poderá ser de aproximadamente 2% ou seja 20 litros de ar/m³. Pode-se calcular agora o volume de argamassa, que é composto por cimento, finos, areia, adjuvante ar e água. Este volume será o volume total deduzindo o volume dos agregados grossos.

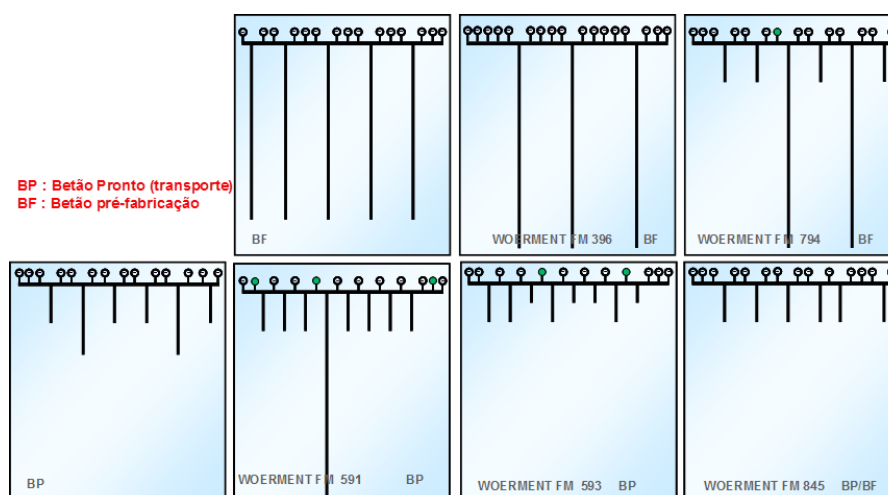


Fig. 5.5 - Esquemas de polímeros (EUROMODAL, 2008)

Das experiências efectuadas, o volume de argamassa deve ser cerca de 700 l/m^3 e a quantidade de agregado grosso deve ser limitada a 300 l/m^3 . Como a argamassa é o veículo para o transporte dos agregados grossos a sua quantidade e qualidade é de extrema importância. Também baixo conteúdo em água e altas dosagens de superplastificante, tendem a produzir uma mistura com alta viscosidade, (Khurana, 2007).

Conhecido o teor de argamassa há necessidade de estimar o conteúdo de areia. Este é, normalmente, 55% do volume de argamassa estimado o que representa cerca de 390 litros e como se conhece a sua massa volúmica obtém-se o teor em massa de areia no BAC-MV. O conteúdo de pasta (cimento e água) é estimado pela diferença de volume entre a argamassa e o volume de areia, deduzindo também o teor de ar. O teor de cimento é então considerado para fazer cumprir a classe de exposição ambiental, tanto no seu teor mínimo como na razão w/c, sendo que, como afirmado antes para a indústria de betão pronto e para a produção do BAC-MV, há necessidade de ter um teor de água que pode variar entre os 175 a 185 l/m^3 .

Tendo ficado estabelecido nesta dissertação que os betões a ensaiar, deveriam cumprir os requisitos normativos e legais, previstos na Especificação LNEC E464, para a produção de betões da classe de exposição XC4, então pela máxima dimensão do agregado o mínimo teor de ligante será de 330 kg/m^3 , como já usado no BAC-F.

5.4 FASE EXPERIMENTAL

Na preparação desta dissertação ficou estabelecido que após os ensaios experimentais, o BAC-MV seria testado em produção numa empresa de Betão Pronto. Desde logo foram estudados os materiais de uma empresa seleccionada, em que todos os constituintes eram os mesmos que a Concremat utilizava, excepção feita à substituição do agregado britado designado de Bago de Arroz por uma Areia Média de rio. Devido à dificuldade na preparação conveniente do GPF e aos inesperados atrasos daí decorrentes, após conclusão dos estudos experimentais para esta produção, houve necessidade de reconsiderar o local dos testes, ficando por isso previsto que também o BAC-MV seria produzido na Concremat. Para a nova produção foi imprescindível ajustar as composições já estudadas, verificando-se alguma dificuldade com a utilização do Bago de Arroz, pois a sua forma não esférica (britada) não ajudava o transporte dos agregados grossos.

5.4.1 OPTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Considera-se como facto reconhecido, que o BAC-MV deve ser especialmente resistente a variações na composição, principalmente as que ocorrem por desvios em amassaduras consecutivas. Certo, também, é o fundamento que são os agregados finos a transportarem os agregados grossos.

No cumprimento da metodologia para este betão e em conformidade com a informação recolhida nos testes e no campo, verifica-se que a classificação individual dos agregados não tem influência significativa nas propriedades reológicas do BAC-MV. Contudo, ter 2-5% do material (areia) a passar no peneiro de 0,125mm, ajuda. Muito frequentemente observam-se desempenhos melhorados no betão fresco se as proporções da mistura dão uma curva de classificação (optimização) com “patamar”, pelo que este parâmetro foi considerado no cálculo da composição, ver Quadro 5.2 e Gráfico 5.2.

Quadro 5.2 - Distribuição granulométrica, optimização dos agregados

Resultado da análise granulométrica - Diferentes amostras											
Grupo agregado [mm]	Tipo agregado	Resíduo passado M.-%									
		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	FM
0 / 1	Areia Fina	0,3	16,6	75,3	99,2	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	1,09
2 / 5	Bago Arroz	0,5	0,9	1,8	2,5	4,2	41,5	100,0	100,0	100,0	4,49
5 / 16	Gravilha 1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	26,6	100,0	100,0	5,71
Cálculo para determinação da curva granulométrica dos agregados											
Grupo agregado [mm]	Vol.-%	Resíduo passado M.-%									
		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	
0 / 1	36	0,1	6,0	27,1	35,7	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	
2 / 5	23	0,1	0,2	0,4	0,6	1,0	9,5	23,0	23,0	23,0	
5 / 16	41	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	10,9	41,0	41,0	
Soma	100	1,6	5,6	20,2	32,3	41,6	48,3	81,0	100,0	100,0	3,71
Curva actual		0	6	28	36	37	46	70	100	100	3,77

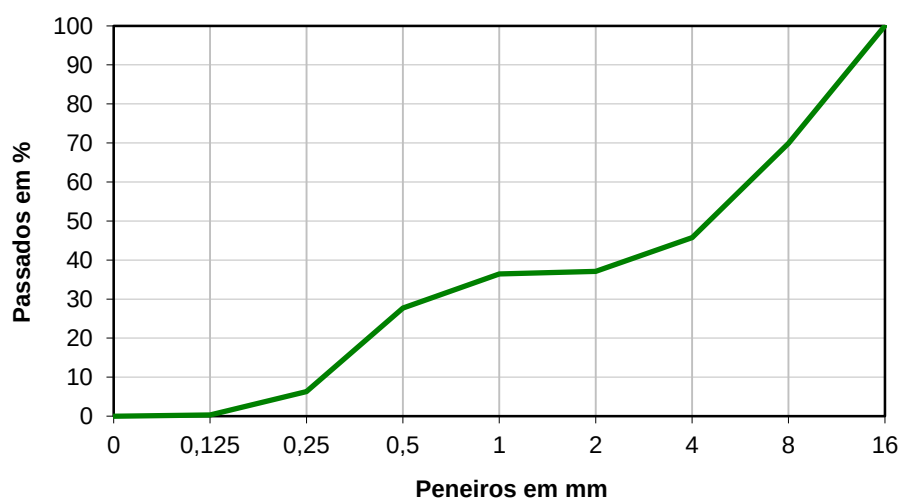


Gráfico 5.2 - Curva granulométrica da optimização dos agregados

5.4.2 PROPORÇÃO DE MISTURA

Tendo ficado definido, para benefício da apreciação final a este estudo comparativo, que todos os componentes utilizados seriam os mesmos para todos os ensaios, interessa então proceder à análise da proporção de mistura que, de acordo com os critérios inicialmente definidos para este método, são o de produzir um betão com requisitos de durabilidade para a classe XC4, segundo a Especificação LNEC E464, com classe de resistência C30/37.

A classe de betão prevista tem uma resistência característica ($f_{ck,28}$) de 37 MPa e foi considerada uma resistência média de 42 MPa (f_{cm}), os requisitos de durabilidade XC4 para betão armado e pré-esforçado, com superfícies expostas a ambientes com ciclos húmido e seco. Tendo em conta o tipo de cimento utilizado e de modo a respeitar os critérios de durabilidade, a razão w/c a utilizar será $< 0,60$.

A mistura tem como característica a produção de uma composição para Betão Pronto, pelo que a manutenção de consistência deverá ser de pelo menos 90 minutos.

Estando quantificados os teores de cimento e de água a utilizar na composição, é necessário calcular a composição do betão auto-compactável. Esta, é conseguida pela soma do volume da pasta com o somatório da volumetria dos agregados, cuja proporção de cada um foi anteriormente estabelecida, estando os resultados apresentados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Cálculo da composição do BAC-MV

Cálculo de volumetria dos materiais								
Composição do betão		M.-% peso cimento	Unidade	Massa	M. volúmica em kg/dm³	C. Sólido em M.-%	Volume materiais em dm³/m³	
Água na mistura			kg/m³	188	1,00		188	
Cimento			kg/m³	330	3,15		107	
Woerment FM 420		0,80	kg/m³	2,64	1,05	22	2,5	
SR100		0,21	kg/m³	0,69	1,08	16	0,7	
Teor de ar			Vol.-%	1,2			12	
Areia Fina - duna			kg/m³	237	2,61		248	
Grav. – bago de arroz			kg/m³	676	2,62		159	
Gravilha 1			kg/m³	917	2,62		283	
Razão água/ligante (Especificação LNEC E464)				0,58	Total			1000
Agregados		Composição para 1 m³			Composição para		1000	LITROS
Agregados	Vol.-%	Volume dm³/m³	M.-%	Agregado Seco kg/m³	Agregado Seco kg	Humidade de superfície M.-%	kg	Agregado Húmido kg
0 / 1	36	249	36	648	Areia Fina - duna G. bago de arroz Gravilha1 Total Água adicionada Cimento Woerment FM 420 SR100 Massa do betão fresco	0,0	0,000	648
2 / 5	23	159	23	414		0,0	0,000	414
5 /16	41	283	41	741		0,0	0,000	741
Soma:	100	690	100	1803				1803
				188				188
				330				330
				2,64				2,64
				0,69				0,69
Massa do betão fresco				2324				2324
Quantidade de finos	330	Cimento +	5,5	Agregado < 0,125 mm +	0	Adições		335 kg/m³
Finos + Areia fina	330	Cimento +	113,7	Agregado < 0,25 mm +	0	Adições		444 kg/m³

5.4.3 AMASSADURA DO BETÃO

A amassadura do betão foi efectuada numa misturadora de eixo vertical com satélite, com capacidade para produzir 40 lt de betão, não permitindo variar a velocidade e a sequência utilizada foi a mesma descrita em 4.3.4, ver figura 5.6.



Fig. 5.6 - Misturadora de eixo vertical

5.4.4 ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS

As composições calculadas determinaram um betão de controlo (BAC-MV CTL) só com cimento Portland, um betão com substituição em 10% do cimento por GPF (BAC-MV 10%GPF), um betão com substituição em 20% do cimento por GPF (BAC-MV 20%GPF) e um betão com substituição em 10% do cimento por sílica de fumo (BAC-MV 10%MS), tendo sido realizados os ajustes por diferença nas massas volúmicas.

Foram produzidas três amassaduras para cada composição, em conformidade com a NP EN 206-1 para testes iniciais, tendo havido necessidade de corrigir a composição com rectificação na dosagem do modificador de viscosidade, para ser atingida a viscosidade requerida e, assim, definir melhor a estabilidade estática. Para cada amassadura produziu-se uma amostra de betão com um volume de 25 litros, de acordo com os procedimentos e critérios estabelecidos neste Capítulo.

Cumprindo o princípio estabelecido para os testes desta dissertação, também estes betões tinham um teor de ligante fixo de 330kg/m^3 , sendo que, também agora, se entende como ligante o cimento Portland ou o cimento Portland mais adições (GPF ou MS). Para além do teor fixo de ligante, do mesmo modo se fixou o teor em água da amassadura, para que se pudesse avaliar que os resultados verificados, não estavam dependentes da razão água/ligante, mas sim da substituição do cimento Portland e assim poder melhor compreender o efeito da adição.

Os resultados dos ensaios com o betão fresco e o valor médio das resistências à compressão de provetes cúbicos ($150\times150\times150\text{mm}^3$) a diferentes idades, são apresentados no Quadro 5.4.



Fig. 5.7 - Ensaio de espalhamento e de penetração por método da sonda

Quadro 5.4 - Resultados das amassaduras do BAC-MV

Ensaio		BAC-MV CTL	BAC-MV 10%GPF	BAC-MV 20%GPF	BAC-MV 10%MS
Betão no estado fresco	Mesa de espalhamento (mm)	610	620	630	630
	Espalhamento (mm) – SF2	680	660	680	690
	Tempo t_{500} (s) - VS2	3,0	2,5	2,5	3,5
	Método sonda (mm)	5	4	5	5
	Dosagem do SR100 (%)	0,21	0,20	0,18	0,16
Betão no estado endurecido	Resistência à comp., 2 dias (MPa)	26,5	23,0	16,5	23,0
	Resistência à comp., 7 dias (MPa)	36,5	30,0	22,0	32,0
	Resistência à comp., 28 dias (MPa)	45,0	36,5	28,0	44,5

6

VALIDAÇÃO DO DESEMPENHO DAS COMPOSIÇÕES EM PRODUÇÃO REAL

6.1 INTRODUÇÃO

Dando cumprimento ao inicialmente estabelecido para a elaboração deste estudo, e com a disponibilidade da empresa de pré-fabricação CONCREMAT, SA, foi possível validar os aspectos da auto-compactabilidade e consistências, evidenciados por este betão durante os ensaios, sendo possível com esta oportunidade, visualizar mais facilmente o comportamento do betão auto-compactável, valorizando assim este estudo.

Aproveitando a produção da Concremat, decidiu-se utilizar as oito composições de BAC para produzir peças conhecidos como “elementos de Lego” como os da Figura 6.1, peças que têm um volume de 700lt, e que permitem fazer vários tipos de construção, sendo comum o seu uso em paredes de armazenagem de agregados ou outros produtos a granel. Também em cada composição foram moldadas peças de $500 \times 500 \times 250 \text{ mm}^3$ (ver Figura 6.2), que seriam depois transportadas para o LEMC para posterior caroteamento de provetes e testes em diferentes ensaios. Para os ensaios de resistência à compressão a diferentes idades foram produzidos seis provetes cúbicos ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) em cada BAC, (ver Figura 6.2).



Fig. 6.1 - Peças Lego



Fig. 6.2 - Moldes dos provetes para ensaio no LEMC

Antecipadamente, foram transportados para a Concremat todas as adições (GPF e MS) necessárias aos ensaios que se pretendiam efectuar, tendo sido previamente preparados os seus teores, convenientemente separados em embalagens definidas para cada composição, assim como, os moldes cúbicos pertencentes ao LEMC, ver Figura 6.3, sendo os outros componentes os de produção.

Houve necessidade de efectuar as devidas correcções volumétricas às composições, já que a substituição parcial em massa do cimento Portland por adições com massas volúmicas diferentes, justificavam esse ajuste.



Fig. 6.3 - Transporte das adições e moldes

A central de betão da Concremat é do tipo estrela, em que os agregados são entregues no sistema de dosagem em massa e transportados para a misturadora por meio de uma dragalina. O cimento Portland e o fíler calcário estão estocados em silos, sendo a sua dosagem em massa feita em balança própria. A água e os adjuvantes também são colocados na misturadora depois de pesados os seus teores, sendo possível avaliar instantaneamente, no sistema de controlo e automatização do equipamento, se os desvios estão dentro do aceitável e conforme os requisitos da NP EN 206-1.

A misturadora é do tipo vertical com satélites, com capacidade para ciclos de produção de 1m^3 . Este tipo de misturadora é muito comum na pré-fabricação, sendo favorável para a produção de betões densos, já que não têm tendência para introduzir ar.

A escolha da Concremat para os testes *in situ*, deveu-se não só à disponibilidade da gerência em apoiar projectos de investigação, mas também por ser uma empresa com controlo de produção certificado, cumprindo o estabelecido no Decreto-Lei nº 301/2007, de 23 de Agosto que torna obrigatório o cumprimento da NP EN 206-1 (para a especificação, produção e conformidade do betão) e da NP EN 13670-1 (para a execução das estruturas de betão). Este Decreto-Lei estabelece as condições a que deve obedecer a colocação no mercado dos betões de ligantes hidráulicos, assim como as disposições relativas à execução de estruturas de betão, de forma a contribuir para garantir a segurança destas estruturas, das pessoas e seus bens.

Assegurando o rigoroso controlo da produção, houve necessidade de colocar as adições previamente pesadas, na dragalina, juntamente com os agregados, ver a sucessão de imagens da Figura 6.4.



Fig. 6.4 - Central de betão

6.2 PRODUÇÃO E RESULTADOS *IN SITU*

6.2.1 PRODUÇÃO E BETONAGEM

Em produção e porque as condições são diferentes das existentes em laboratório, houve necessidade de analisar o teor de humidade superficial dos agregados que, apesar de ser verificado automaticamente pelo equipamento existente na central de betão, achou-se conveniente confirmar experimentalmente. Sabendo o teor de humidade, foi possível fazer o correspondente ajuste da água adicionada, mantendo-se assim o teor de água total na amassadura.

Da experiência obtida pelas amassaduras efectuadas em laboratório, foi possível estabelecer critérios para uma inspecção visual usados durante a produção deste betão, tendo sido posteriormente confirmada pelos ensaios de consistência ao betão, obtidos no ensaio de espalhamento.

Não obstante ser feita uma inspecção visual, sempre se garantiu que o teor de ligante e a razão w/c eram constantes, independentemente dos ajustes às composições que tiveram de ser feitos, motivados pelas variações das massas volúmicas das adições.

O betão depois de ter sido produzido na misturadora da central de betão, era transportado por meio de tapetes rolantes que o colocavam num balde, sendo em seguida e com recurso a uma ponte rolante, levado para os ensaios de consistência e enchimento dos moldes para ensaios, ver Figura 6.5.



Fig. 6.5 - Produção, transporte e colocação do BAC nos moldes

Tendo em consideração que cada amassadura correspondia a um tipo diferente de BAC, foram adoptados os mesmos procedimentos para cada amassadura, já que pelo volume produzido, não havia possibilidade de rectificar as pesagens em ciclos contínuos.

Em todas as amassaduras e após doseamento em massa, os componentes eram colocados na misturadora e adoptou-se a produção em automático, garantindo que a sequência de entrada dos componentes, os tempos de mistura e a inspecção visual, eram os mesmos.

Os agregados e as adições entravam na misturadora e eram saturados com 20% da água da amassadura, procedimento que durava 15s contados após entrada da água. Decorrido esse tempo o adjuvante WOERMENT FM 420 era colocado misturando durante mais 15s, finalizado este período os finos (cimento ou cimento e fíler) previstos para a amassadura, eram adicionados à mistura em conjunto com o volume restante da água. O equipamento continuava a homogeneizar o betão durante

2,5min contados após finalizada a entrada dos finos. No caso do BAC-MV o adjuvante SR100 era adicionado 1min após entrada dos finos e da água.

No último período da mistura era feita a inspecção visual à consistência do betão e confirmava-se que as tolerâncias no doseamento dos materiais constituintes não tinham excedido os limites estabelecidos pela NP EN 206-1. Efectivamente, o equipamento informa automaticamente por alarme, caso a tolerância fosse ultrapassada. Em todas as amassaduras verificou-se conformidade no doseamento.

Foi possível pela inspecção visual às diferentes amassaduras, estabelecer o paralelismo pretendido com a consistência estimada e posteriormente verificada, tendo sobretudo legitimado o bom desempenho do BAC-F. No caso do BAC-MV eram já conhecidas e identificadas algumas dificuldades pela utilização do agregado fino britado, pois estava prevista a utilização de uma areia média (0/4) rolada de rio, que, por condições da produção não pode ser viabilizada. Essa dificuldade traduziu-se numa deficiente consistência ou seja, aquém do pretendido, ver Quadro 6.1.

Apesar de habitualmente estes elementos “tipo Lego”, serem produzidos com betão vibrado e não requererem acabamentos de particular relevo, houve para este estudo o cuidado de preparar convenientemente o molde, colmatando as juntas para evitar eventuais perdas de argamassa, o que, na generalidade foi conseguido, e recorreu-se a um desmoldante apropriado para este betão, já que é uma emulsão de agente separador isenta de óleo mineral com base em matérias-primas regenerativas, rapidamente biodegradável só, para betão à vista isento de cavidades e poros, ver Figura 6.6.



Fig. 6.6 - Molde para peça Lego

Após confirmada a consistência pelo ensaio do espalhamento, o betão era colocado no molde previamente preparado, tendo havido o cuidado de o betão não cair livremente no molde, mas sim, que deslissasse por uma rampa preparada para o efeito, evitando que se introduzisse ar acidentalmente, como se pode ver na Figura 6.7. Pretendeu-se também que a velocidade de betonagem fosse dentro do possível, coordenada com a capacidade auto-nivelante do BAC.



Fig. 6.7 - Betonagem do molde para peça Lego

Apesar de serem ensaios pioneiros nesta unidade, a produção não teve atrasos, confirmando-se em todas as amassaduras a capacidade auto-compactável do betão no seu estado fresco, mesmo na do BAC-MV em que o espalhamento se limitou aos 600mm, não apresentando, em nenhum dos casos, segregação a assinalar.

Os moldes para os elementos produzidos, puderam ser cheios por auto-nivelamento do BAC e os agregados grossos apresentavam, em todas as amassaduras, conveniente distribuição na matriz do BAC, assim como eram bem visíveis à superfície, indicando uma adequada viscosidade e coesão. Também se pôde confirmar que o BAC não apresentava o comum efeito cola por excesso de viscosidade, comprovando um adequado teor de água e de superplastificante, tendo sido demonstrado pela facilidade no talochamento para acabamento superficial do elemento, tendo sido feito logo a seguir à betonagem.

Os elementos produzidos, tanto os que seriam encaminhados para caroteamento como as peças do “tipo Lego”, apresentaram excelente acabamento de superfície, sem vazios nem poros, como é bem visível na Figura 6.8. De realçar os que tinham as adições principalmente os MS e os 20%GPF que mostravam ao tato uma superfície aveludada.



Fig. 6.8 - Superfície do BAC-F 20%GPF

6.2.2 ENSAIOS *IN SITU*

Após os intensos ensaios em laboratório para a definição das composições a serem testadas em produção, considerou-se que, na pré-fabricação, os ensaios do betão fresco iriam estar limitados ao ensaio de espalhamento. Este método de ensaio permite simultaneamente a avaliação da deformabilidade do BAC fresco a partir da observação da velocidade de deformação e diâmetro de espalhamento de uma amostra deformada, por acção do peso próprio, (Nunes, 2001).

Desse modo, procedeu-se após cada amassadura à verificação do espalhamento SF e do tempo t_{500} como definido na NP EN 12350-8 aproveitando-se também para verificar a eventual existência de segregação, como mencionado anteriormente, não se tendo confirmado situações de segregação. A sequência dos ensaios pode ser verificada pelas imagens da Figura 6.9 e os resultados dos ensaios são apresentados no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 - Resultados das amassaduras do BAC

ENSAIO	BAC-F CTL	BAC-F 10%GPF	BAC-F 20%GPF	BAC-F 10%MS	BAC-MV CTL	BAC-MV 10%GPF	BAC-MV 20%GPF	BAC-MV 10%MS
Espalhamento (mm) - SF	730	740	730	740	630	570	580	590
Tempo t_{500} (s) - VS	5,0	5,5	6,0	4,0	3,0	3,5	3,5	2,5

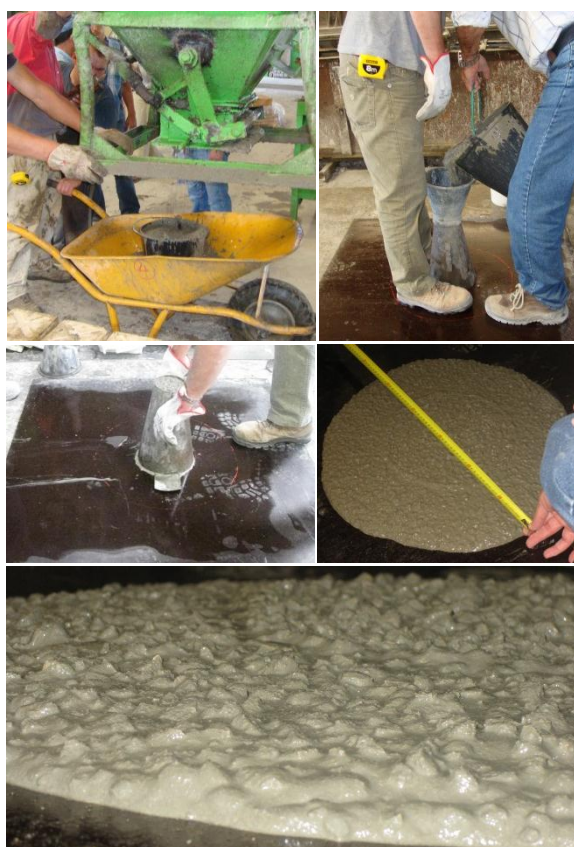


Fig. 6.9 - Ensaio de espalhamento no BAC-MV 20%GPF

Apesar de o espalhamento no BAC-MV ter ficado aquém dos esperados 660mm, a betonagem do elemento não levantou qualquer problema, pois a consistência verificada era ainda adequada já que o elemento tinha pouca armadura e a secção era suficientemente pequena para os escoamentos horizontais.

Tendo em vista os ensaios no LEMC, principalmente os de resistência à compressão aos dois dias de idade, todos os provetes foram recolhidos no dia imediatamente a seguir aos ensaios, tendo havido sempre o cuidado de garantir na pré-fabricação e no transporte, uma cura e protecção adequada, como as previstas na NP EN 12390-2.

6.3 ENSAIOS NO LEMC

Os provetes recolhidos para ensaios foram produzidos tendo como motivação que todos os ensaios fossem efectuados em carotes extraídas das peças especificamente moldadas para o efeito. A excepção foi a resistência à compressão a diferentes idades em que, para além dos ensaios nas carotes aos 28 dias de idade recolheram-se provetes cúbicos. Os ensaios de determinação da reactividade potencial com os álcalis foram efectuados em argamassas preparadas para o efeito. De realçar que ao todo foram caroteados mais de 25m de betão.

Dando continuidade a estudos anteriormente realizados, nomeadamente a Dissertação de Ana Mafalda e de outros trabalhos em betão auto-compactável, contendo pó de vidro como adição, onde se comparou também o efeito de duas cofragens distintas (tradicional de contraplacado marítimo e Cofragem de permeabilidade controlada – CPF) orientado pela Professora Doutora Sandra Nunes, estabeleceu-se que seriam efectuados os seguintes ensaios a cada tipo de BAC:

- Resistência à compressão segundo a NP EN 12390-3:2009, 6 provetes cúbicos com 150mm de aresta, para resistências R2, R7, R28, R90 (3 aos 28 dias).
- Resistência à compressão segundo a NP EN 12390-3:2009, 3 provetes cilíndricos caroteados, com 100mm de diâmetro e 100mm de altura, para R28.
- Resistência à tracção por compressão de provetes segundo a NP EN 12390-6:2009, 1 provete cúbico com 150mm de aresta, aos 28 dias de idade.
- Determinação do módulo de elasticidade em compressão segundo a Especificação LNEC E397:1993, 3 provetes cilíndricos caroteados, aos 28 dias de idade.
- Determinação da absorção de água por capilaridade com base na Especificação LNEC E393:1993, 3 provetes cilíndricos caroteados, com 150mm de diâmetro.
- Determinação da resistência à carbonatação segundo a Especificação LNEC E391:1993, 3 provetes cilíndricos caroteados, com 100mm de diâmetro e 200mm de altura.
- Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário segundo a Especificação LNEC E463:2004, 6 provetes cilíndricos caroteados, com 100mm de diâmetro e 50mm de altura, para ensaio os 28 e 90 dias.
- Barras para ensaio acelerado RAS segundo ASTM C1260:2007

Mantendo as condições de cura previstas para os provetes, todas as carotes foram retiradas aos 14 dias de idade, ver Figura 6.10, seguindo o programa indicado para cada um dos ensaios, sendo que, quando houve necessidade de rectificar as faces das carotes este trabalho foi efectuado no dia do ensaio.

Os ensaios e seus resultados são apresentados em subcapítulos.



Fig. 6.10 - Extração das carotes

6.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SEGUNDO NP EN 12390-3:2009

Como já mencionado anteriormente, foram preparados provetes cúbicos e cilíndricos, sempre com razão unitária de secção/altura, para ensaios de resistência à compressão. Os provetes cúbicos foram produzidos de acordo com a NP EN 12390-2:2009, mas por se tratar de um BAC não foram compactados, tendo sido somente batidos levemente com o maço de borracha nos lados do molde até nivelamento, os provetes cilíndricos foram caroteados e rectificados para obter razão unitária de altura/secção.

Este ensaio sendo comum na classificação dos betões, é muito importante para este estudo, já que se pretende compreender não só a influência das adições nesta resistência mecânica, como também legitimar o inicialmente expectável para os dois BAC.

A escolha dos provetes com razão unitária de altura/secção evitam os eventuais problemas de esbelteza em razões superiores, não prejudicando a validade dos resultados relacionados com o atrito nas superfícies de contacto com a máquina de ensaio e permite comparar os resultados com as resistências dos provetes cúbicos, segundo a NP EN 12504-1:2009 ensaio do betão nas estruturas, ver Figura 6.11. O atrito gera tensões tangenciais na superfície de contacto do provete com os pratos da máquina de ensaio, impedindo o movimento do provete situados nesta superfície, e provocando a alteração do seu formato original durante o ensaio, enquanto as zonas do provete mais afastadas da superfície de contacto tendem a manar radialmente para fora, numa taxa proporcional à sua distância ao centro do provete.

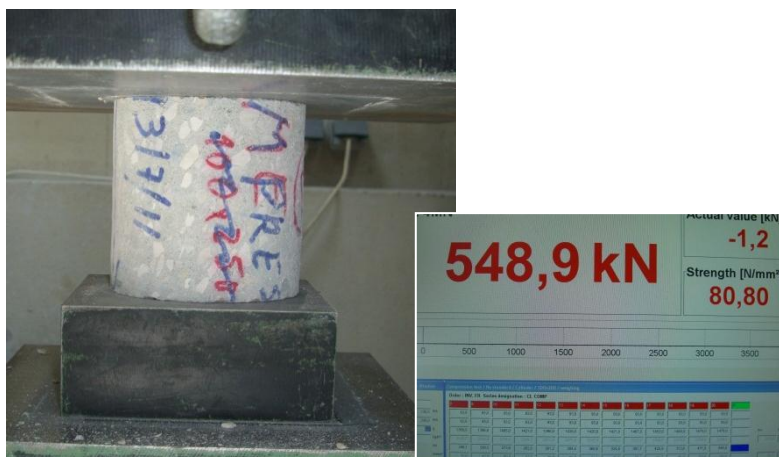


Fig. 6.11 - Ensaio de resistência à compressão na prensa do LEMC

Os provetes moldados em betão na forma de cubos, com 150mm de aresta, encontravam-se todos conforme as dimensões e tolerâncias previstas na NP EN 12390-1:2010. Os provetes preparados por caroteamento como o da Figura 6.11, tendo sido recolhidos com a mesma broca de coroa, obtiveram-se diâmetros semelhantes e muito próximos de 93mm. Admitiu-se este valor para todos os provetes, mantendo-se a conformidade das tolerâncias previstas em norma.

Como já tinham sido efectuados os ensaios iniciais, cujos resultados foram já revelados em Capítulos anteriores, adoptou-se para controlo de conformidade os critérios de identidade para a resistência à compressão previstos na NP EN 206-1:2007 EMENDA 1 2008, já que a amostragem foi feita em produção, pelo produtor a pedido e sob controlo do utilizador e os ensaios realizados no LEMC.

Para facilitar a apresentação dos resultados, optou-se por referenciar os valores médios de tensão obtidos, ou na impossibilidade, os valores individuais dos provetes, garantido que estava, não ter havido em qualquer provete um resultado com desvio superior a 15% da média da população. Os resultados estão indicados no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 - Resultados da resistência à compressão do BAC a diferentes idades (N/mm²)

Tipo de Betão	Massa volúmica (kg/m ³)	2 dias	7 dias	28 dias	90 dias	f _{cm,2} /f _{cm,28}
BAC-F CTL	2378	46,5	54,0	69,0	69,5	0,67
BAC-F 10%GPF	2336	41,5	48,5	59,5	65,5	0,70
BAC-F 20%GPF	2301	37,5	48,0	54,0	65,0	0,69
BAC-F 10%MS	2349	42,5	56,5	78,0	79,5	0,54
BAC-MV CTL	2254	24,0	30,0	42,5	43,5	0,56
BAC-MV 10%GPF	2198	21,0	25,5	31,0	38,5	0,68
BAC-MV 20%GPF	2158	15,0	19,0	27,5	37,5	0,55
BAC-MV 10%MS	2236	21,5	28,5	45,5	46,5	0,47

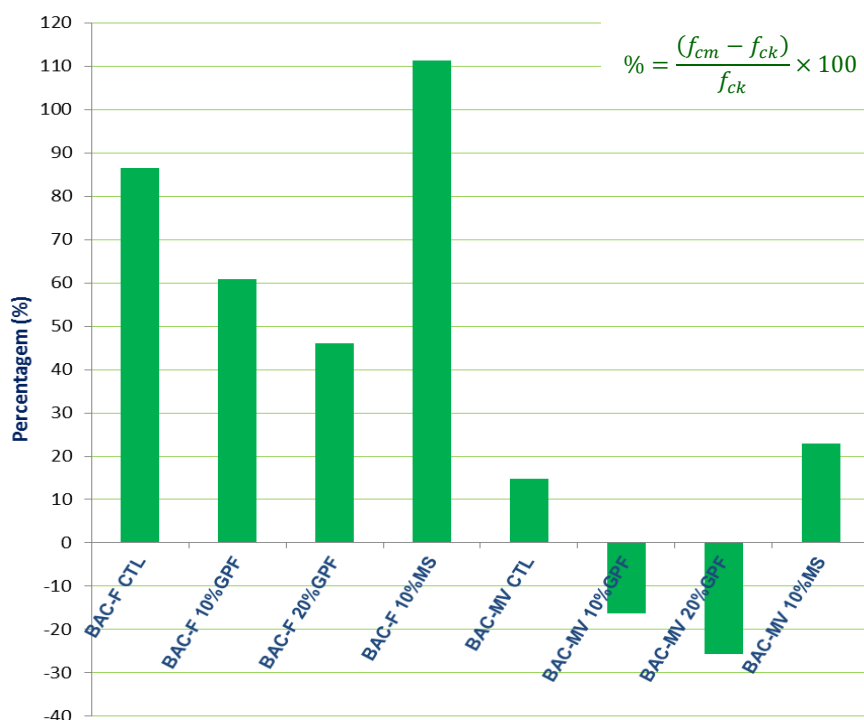


Gráfico 6.1 - Resistência à compressão dos BAC aos 28 dias de idade, relativa ao f_{ck} (37 MPa)

Da avaliação feita aos resultados da resistência à compressão, pode-se verificar haver redução desta resistência quando se utiliza o GPF, sendo tanto maior a redução quanto maior a percentagem de GPF utilizada (Gráfico 6.1).

Tendo em conta que o teor de ligante é o mesmo em todas as composições, as amassaduras onde foi utilizado o GPF não apresentam resultados mínimos que validem a resistência pretendida para os critérios de conformidade de resultados individuais do ensaio [$f_{ci} \geq f_{ck} - 4$ (N/mm²)], excepto na amassadura com GPF-F 10%. De realçar é o não cumprimento das amassaduras com GPF do BAC-MV, em que não foi obtida a resistência mínima para poder confirmar a classe de exposição ambiental XC4.

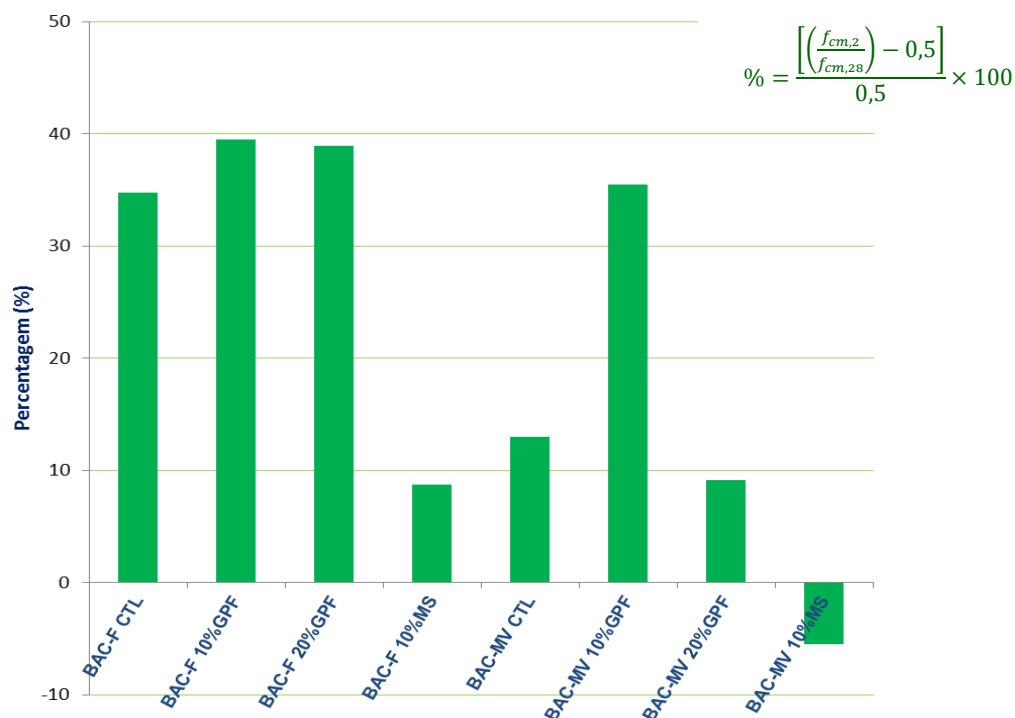


Gráfico 6.2 - Desenvolvimento da resistência à compressão do BAC, relativa a $f_{cm,2}/f_{cm,28}$ [0,50 (rápido)]

Ao avaliar o desempenho das amassaduras no que respeita ao indicador do desenvolvimento das resistências (Gráfico 6.2), conclui-se que as amassaduras utilizando MS com reacção tipicamente pozolânica, apresentam desenvolvimento de resistências média e rápido, mas sempre próximo de 0,50. O mesmo seria de esperar das amassaduras com GPF, mas efectivamente o desenvolvimento foi sempre rápido e tendencialmente superior ao do cimento Portland que as constituía, mesmo quando comparado com o BAC de controlo.

Muitas vezes verifica-se que adições pozolânicas exibem no betão redução em algumas resistências mecânicas, acompanhadas até por um processo de endurecimento acelerado, tipicamente se as partículas forem muito finas (inferiores a $5\mu\text{m}$) a reactividade é muito elevada enquanto as de maior dimensão podem ser, numa fase inicial, consideradas como “microagregado”, melhorando a densidade da pasta de cimento hidratada, de modo similar a remanescentes partículas de cimento não hidratado. Isto é benéfico em termos de resistência a longo prazo, resistência à propagação de fendas e rigidez. O sistema resultante de poros capilares é mais eficiente a reter água que irá ficar disponível para hidratação a longo prazo, (Idorn, 1997).

É já reconhecido que betões com pozolanas possam apresentar um desenvolvimento de resistências típico. Em muitas situações pode mesmo não se caracterizar a classe de resistência do betão aos 28 dias de idade, mas sim a idades mais avançadas, como seja aos 90 dias.

Tendo sido possível em tempo útil ensaiar os provetes aos 90 dias de idade, os seus resultados vêm confirmar uma proximidade dos valores de tensão de rotura entre os betões com GPF e os betões de CTL. Estes resultados aos 90 dias de idade confirmam também total conformidade com o requerido para a classe de exposição ambiental e, desse modo, validando todas as composições.

Apesar de o crescimento desta resistência até aos 28 dias de idade ser rápido, nos betões com GPF verifica-se que o aumento de tensão não abrandou tanto como nos betões de CTL, havendo, por isso, todo o interesse em avaliar ainda a outras idades, como seja aos 180 dias.

6.3.2 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DE PROVETES SEGUNDO NP EN 12390-6:2009

Habitualmente este ensaio é realizado num provete cilíndrico moldado de 150mm de diâmetro e 300mm de comprimento, contudo a norma permite o ensaio em provete de forma cubica e para o efeito, foram moldados provetes com 150mm de aresta.

Este ensaio, também conhecido em todo o mundo como o “ensaio brasileiro” por ter sido inventado em 1943, pelo Prof. Lobo Carneiro do Instituto Nacional de Tecnologia, no Brasil, quando pretendia estudar o comportamento de rolos de betão no transporte de construções sobre rolos. Sendo já conhecido o processo de transporte usando rolos de aço, calculado através da fórmula de Hertz (cálculo de tensões de corpos em contacto), o Prof. Lobo Carneiro verificou que o rolo de betão colocado na prensa em esforço diametral, rompia de uma maneira completamente diferente dos de aço, dando-se a rotura por uma fissura vertical, abrindo-se em dois, como visível na Figura 6.12, (IME, 2000)

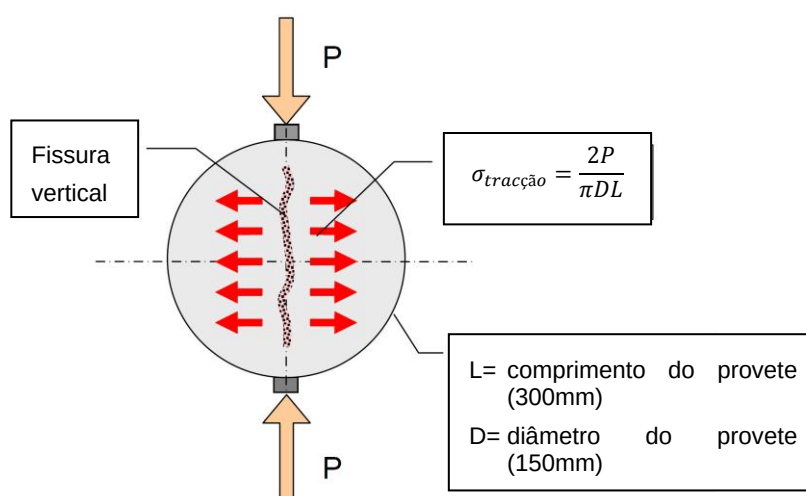


Fig. 6.12 - Ensaio de tracção por compressão diametral “ensaio brasileiro”

Como a aplicação das forças (P) são dirigidas ao longo da geratriz, então o provete fica sujeito a uma tensão de compressão vertical de:

$$\frac{2P}{\pi LD} \left[\frac{D^2}{r(D-r)} - 1 \right] \quad (6.1)$$

E uma tensão de tracção horizontal de:

$$\frac{2P}{\pi LD} \quad (6.2)$$

Onde:

- P - força de compressão no cilindro
- L - comprimento do cilindro

- D - diâmetro do cilindro
 $r ; (D - r)$ - distâncias de um ponto do provete aos pratos de contacto da prensa

Apesar de os provetes ensaiados terem a forma de cubo, a equação para calcular a tensão de tracção é a mesma, substituindo LD por a^2 , sendo a a dimensão da aresta, isto significa que, apenas se considera o betão dentro de um cilindro inscrito no cubo a resistir à carga aplicada.

Uma das vantagens deste teste é que num só ensaio é possível obter a resistência do betão à compressão e à tracção e isso no mesmo provete, os resultados são indicados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 - Resultados da resistência à tracção por compressão do BAC aos 28 dias de idade (N/mm²)

	BAC-F CTL	BAC-F 10%GPF	BAC-F 20%GPF	BAC-F 10%MS	BAC-MV CTL	BAC-MV 10%GPF	BAC-MV 20%GPF	BAC-MV 10%MS
Força de rotura (kN)	118,1	107,4	96,3	140,5	85,1	79,1	75,3	96,9
Tensão de rotura à tracção (MPa)	3,34	3,04	2,73	3,98	2,41	2,24	2,13	2,74

A opção de não apresentar neste quadro os resultados calculados para a resistência à compressão, estão relacionados com a divergência nos resultados, por não ser habitual este ensaio para a verificação desta resistência e por não haver suficientes provetes que verificassem eventuais desvios.

De facto a realização deste ensaio de tracção em compressão, quando proposto tinha como fundamento estudos futuros, assim como um melhor entendimento do comportamento destas amassaduras.

6.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE EM COMPRESSÃO SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E397:1993

O módulo de elasticidade tem uma importância muito significativa no cálculo de estruturas, em particular as estruturas de betão.

O módulo de Young ou módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico, baseado na Lei de Hooke, e descreve a força restauradora que existe em diversos sistemas quando comprimidos ou distendidos. Sendo a relação linear entre tensão e deformação expressa por $\sigma = \epsilon E$; onde E é uma constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade, desse modo, é o coeficiente angular da parte linear do diagrama tensões/extensões e varia de material para material, exemplo do ensaio visível no Gráfico 6.3.

O betão é um material frágil que se rompe facilmente ainda na fase elástica. Para este material o domínio plástico é praticamente inexistente, indicando a sua pouca capacidade de absorver deformações permanentes. Nestas condições e como previsto na Especificação, a tensão máxima a aplicar no provete será de 33,3% de 0,8 da tensão média verificada na rotura por compressão, garantindo assim que o betão sob tensão se encontra numa fase elástica.

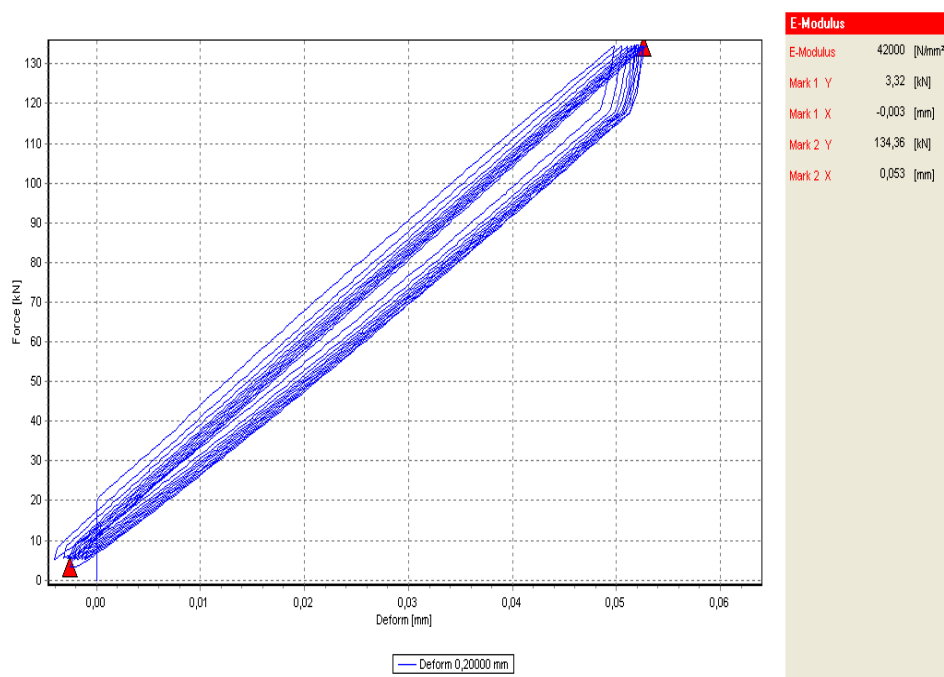


Gráfico 6.3 - Determinação do módulo de elasticidade por compressão

Determinadas as forças a aplicar, foram usados extensómetros com uma base de medida de 120mm, como se pode verificar na Figura 6.13, com 10 ciclos de carga, sendo os resultados apresentados no Quadro 6.4.



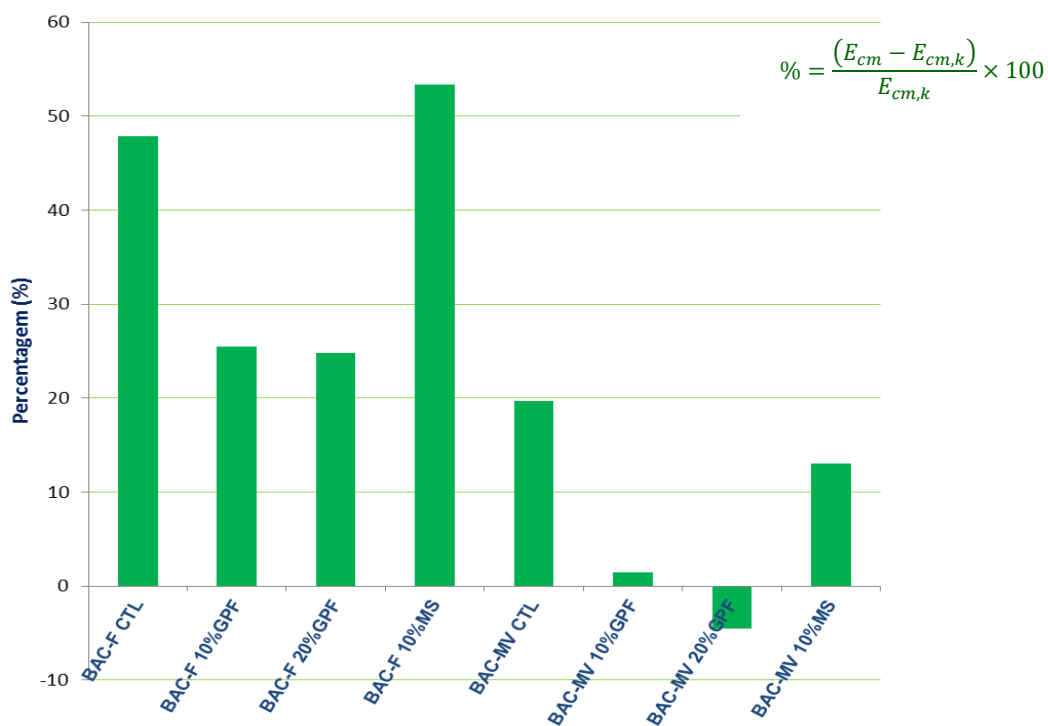
Fig. 6.13 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade por compressão

Quadro 6.4 - Resultados do módulo de elasticidade por compressão do BAC aos 28 dias de idade

	BAC-F CTL	BAC-F 10%GPF	BAC-F 20%GPF	BAC-F 10%MS	BAC-MV CTL	BAC-MV 10%GPF	BAC-MV 20%GPF	BAC-MV 10%MS
Tensão mínima (MPa)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tensão máxima (MPa)	18,4	15,9	14,4	20,8	11,3	8,3	7,3	12,1
Módulo de elasticidade (GPa)	48,8	41,4	41,2	50,6	39,5	33,5	31,5	37,3

Os resultados obtidos nas diferentes amassaduras comprovam que o módulo de elasticidade nestes betões auto-compactáveis é similar ao de um betão convencional, como se pode ver pelo Gráfico 6.4, considerando a relação com o valor indicativo previsto na EN 1992-1-1 (EC2) para um betão da classe C30/37.

Parece não haver dúvidas de que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da resistência à compressão do betão, apesar de não haver consenso da forma precisa de o relacionar. De facto o módulo de elasticidade também é, entre outras variáveis, afectado pelo módulo de elasticidade dos agregados e da proporção volumétrica destes no betão, parecendo aceitável usar a expressão analítica prevista no EC2, para obter o módulo de elasticidade médio num BAC.

Gráfico 6.4 - Relação dos E_{cm} obtidos e o $E_{cm,k}$ característico para C30/37 (segundo EC2)

6.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE BASEADO NA ESPECIFICAÇÃO LNEC E393:1993

Um betão auto-compactável é tendencialmente um betão em que, após moldado deverá apresentar uma superfície isenta de poros ou vazios. Não obstante, poderá não estar livre de poros capilares, estando estes essencialmente relacionados com a razão água/cimento e sendo de admitir, que em razões de água/cimento inferiores a 0,40 o betão não exiba poros capilares, pois todos os espaços estão preenchidos por poros gel (Bethge, 2004).

Com este entendimento, pode-se definir que os poros capilares são a parte da matriz que não foi preenchida por produtos resultantes da hidratação do cimento, ou seja, são os espaços residuais que estavam cheios de água durante o estado fresco da pasta, e têm dimensão de 1µm ou até de ordem inferior.

A absorção de água por capilaridade pode ser entendida como a capacidade que os materiais porosos têm de captar água acima do nível que apresenta a superfície líquida em contacto com eles.

No betão a absorção de água por capilaridade é muito facilitada pela boa afinidade entre o betão e a água, ou seja, pela tendência de se unirem. A água quando em contacto com o betão molha a zona de influência formando um menisco. Na presença de poros capilares a água tem propensão de subir pelo capilar, resultando num aumento de massa e de volume.

Os problemas relacionados com a capacidade de absorção de água no betão pela existência de poros capilares estão já bem identificados, sendo de realçar que os poros capilares não aparecem isolados, mas sim interligados. Esta característica e seu volume irão determinar a capacidade de introdução de produtos agressivos do ambiente para o interior do betão, podendo estes ser agressivos para o betão, para a armadura ou para ambos. A interligação dos poros capilares é a principal responsável pela permeabilidade do betão endurecido e pelas patologias decorrentes em ciclos gelo/degelo.

Para a realização do ensaio colocaram-se os provetes com 28 dias de idade, a secar numa estufa ventilada a $40 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 14 dias e após arrefecimento à temperatura ambiente, foi registada a sua massa e colocados num recipiente com a face a ser estudada submersa 5mm, como visível na Fig. 6.14. O ensaio continuou durante 24 horas e a massa dos provetes foi registada em intervalos de tempo crescentes e previamente definidos baseados nos tempos indicados no RILEM TC 116-PCD: Abril 1999. Antes de cada pesagem houve o cuidado de retirar o excesso de água na superfície do provete recorrendo a um pano húmido.



Fig. 6.14 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade será a diferença entre a massa do provete de betão endurecido que esteve com uma das faces em contacto com a água durante um determinado tempo e a massa do provete seco por unidade de área da superfície do provete em contacto com a água, registando-se a variação de massa nos intervalos de tempo predefinidos, os resultados médios são apresentados no Quadro 6.5. Como a curva de absorção é quase linear nas primeiras horas de ensaio foram consideradas as primeiras 4h30m, ver o gráfico 6.5. O resultado será calculado pela análise da variação de massa por unidade de superfície na raiz quadrada do tempo. Foi já demonstrado haver uma relação da absorção por capilaridade com a seguinte equação (Hall, 1989):

$$A = a_0 + S \cdot t^{0,5} \quad (6.3)$$

Onde:

- A - aumento em massa por unidade de área transversal em contacto com a água, dividida pela massa volúmica da água. No sistema métrico A pode ser expresso em mm
- a_0 - água absorvida inicialmente pelos poros na superfície de contacto (mg/mm^2)
- t - tempo, medido em minutos, na altura em que a massa foi determinada
- S - coeficiente de absorção em $\text{mm}/\text{min}^{0,5}$

Quadro 6.5 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade ($\text{mm}/\text{min}^{0,5}$)

	BAC-F CTL	BAC-F 10%GPF	BAC-F 20%GPF	BAC-F 10%MS	BAC-MV CTL	BAC-MV 10%GPF	BAC-MV 20%GPF	BAC-MV 10%MS
Coeficiente de absorção	0,0370	0,0424	0,0506	0,0360	0,0913	0,0973	0,1040	0,1076

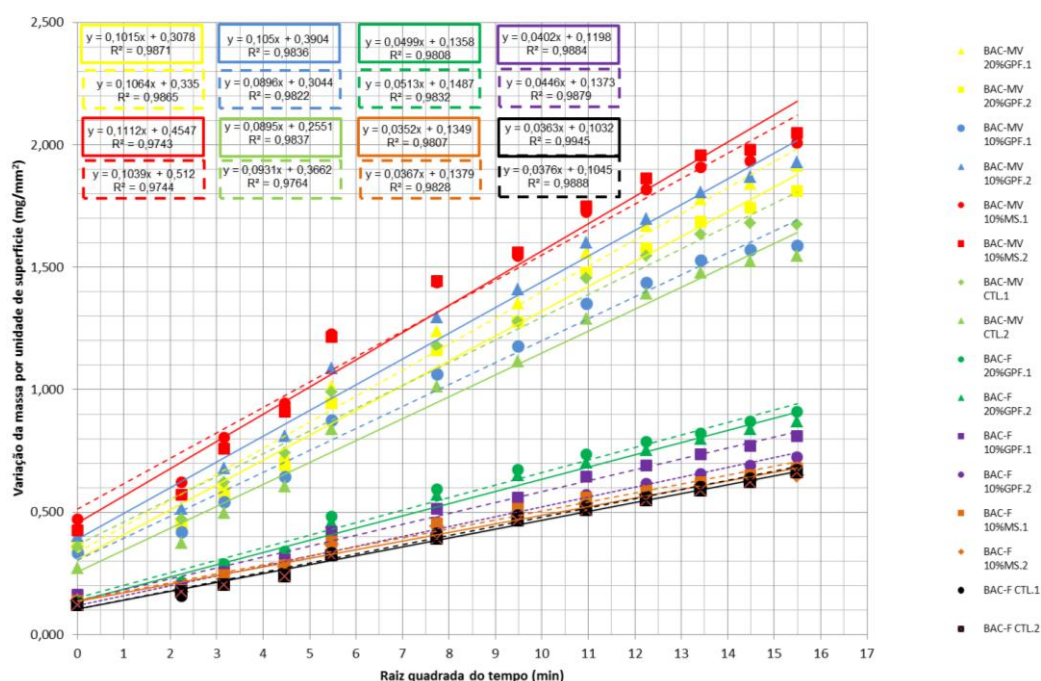


Gráfico 6.5 - Rectas de absorção-tempo (4h30m)

Tendo como finalidade poder melhor ilustrar os resultados obtidos, fez-se um tratamento gráfico dos coeficientes de absorção, em que, se relacionam esses coeficientes com o da amassadura que aqui consideramos padrão BAC-MV CTL, ver o Gráfico 6.6.

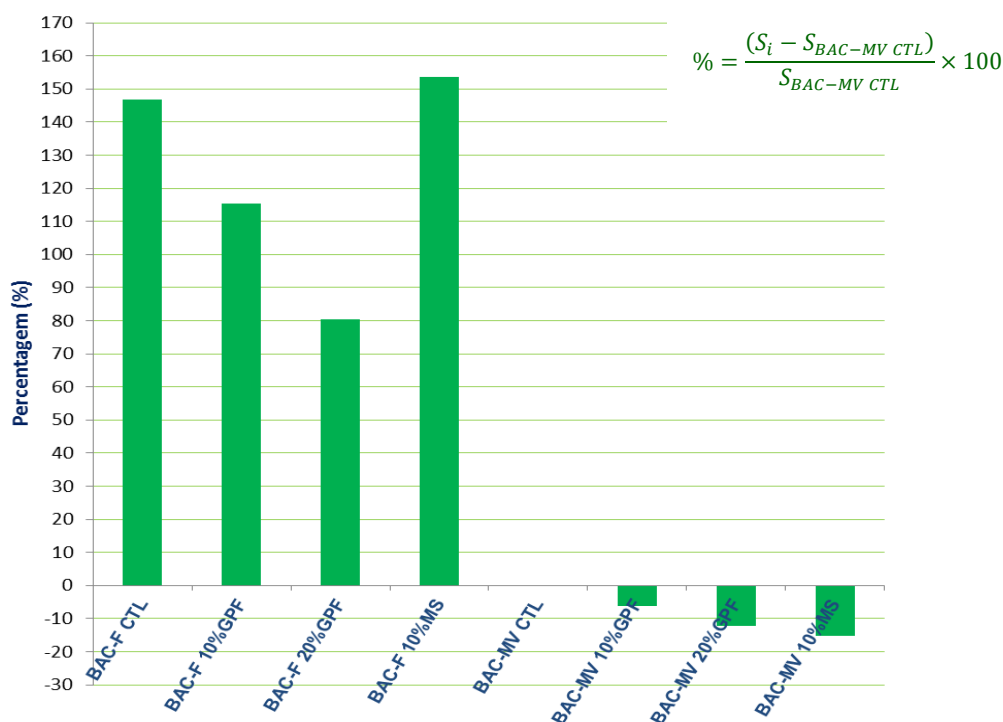


Gráfico 6.6 - Relação dos coeficientes de absorção de água dos BAC com o BAC-MV CTL

Pelo gráfico anterior pode-se entender que a introdução das adições não melhoraram para esta idade as condições de absorção por capilaridade dos betões, tendo sempre coeficientes superiores aos das amassaduras de controlo só com CEM I, excepção feita à mistura com sílica de fumo no BAC-F.

Estes resultados podem estar relacionados com o entendimento, já expresso, de poder haver com as adições menor quantidade de produtos resultantes da hidratação do cimento à idade do ensaio e por isso, menor preenchimento dos espaços anteriormente preenchidos por água durante o estado fresco.

Apesar de este gráfico mostrar uma dispersão acentuada, de facto, os coeficientes de absorção apresentam alguma paridade entre as amassaduras de cada tipo de BAC, como se pode verificar no Gráfico 6.7. Esta semelhança de resultados entre BAC do mesmo tipo, confirma haver relação do teor de poros capilares com a razão de água/cimento. Efectivamente os BAC-F têm uma razão w/c de 0,36 enquanto o BAC-MV têm uma razão w/c de 0,58.

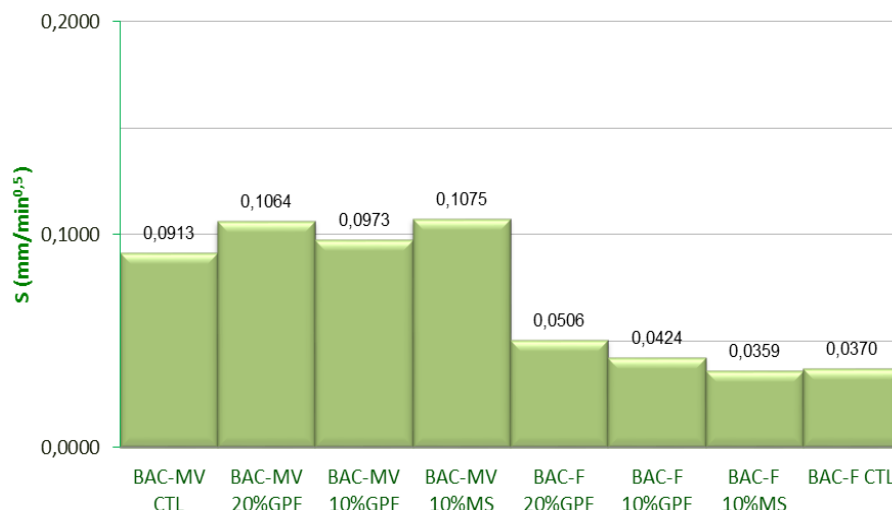


Gráfico 6.7 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade dos BAC

Apesar de não haver valores característicos e regulamentados para os coeficientes de absorção de água por capilaridade, existem alguns valores tipificados que servem de exemplo quanto a este coeficiente (Röhling, 2000):

- $> 0,08 \text{ mm/min}^{0,5}$ para betões com uma razão w/c de 0,40
- $> 0,15 \text{ mm/min}^{0,5}$ para betões com uma razão w/c de 0,60

Considerando estes valores exemplificativos, conclui-se que os resultados obtidos estão em conformidade com a análise feita e, por isso, dentro de registos aceitáveis.

6.3.5 RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E391:1993

A carbonatação consiste essencialmente na penetração de CO_2 do meio ambiente para o interior do betão. Efectivamente, o CO_2 está disponível em todo o ambiente que nos rodeia, quer seja na atmosfera sob a forma de gás ou dissolvido na água sob a forma de carbonato dando origem a ácido carbónico (H_2CO_3).

Apesar de a carbonatação ser uma das maiores preocupações nas patologias no betão, ela não é a responsável directa por essas anomalias, mas é a principal responsável pela diminuição do pH do betão e consequentemente pela despassivação das armaduras, que em condições de humidade e catódicas propícias, permite o desenvolvimento da corrosão nas armaduras provocando eventuais destacamentos no betão. Para o betão, a carbonatação pode ser considerada benéfica já que, tende a aumentar a densidade da matriz, colmatando os poros capilares devido à transformação de hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio que sendo um produto com baixa solubilidade, faz com que a porosidade do betão em questão diminua.

O mecanismo da carbonatação ocorre lentamente devido às baixas concentrações de CO_2 na atmosfera e também devido ao betão possuir elevados teores de hidróxido de cálcio. Quando o betão tem baixa permeabilidade, verifica-se uma elevada resistência à penetração de CO_2 .

São muitos os factores que influenciam a carbonatação, tais como o sistema de poros na pasta de cimento do betão endurecido, a razão w/c e o grau de humidade, contudo, reconhece-se o efeito considerável da cura do betão na carbonatação, pela redução da porosidade. Nos provetes ensaiados,

por serem carotes, o betão testado corresponde a uma parte interior da amostra e por isso menos dependente das condições de cura e da habitual protecção da pasta na superfície exterior de um betão moldado.

O método escolhido para estabelecer a profundidade de carbonatação, consiste em aplicar solução de fenolftaleína diluída em álcool numa superfície recém quebrada de betão previamente exposto a carbonatação acelerada durante 28 dias. No ensaio foram abertos provetes cilíndricos por compressão diametral. Este tratamento é acompanhado por uma alteração de cor para vermelho escarlate na superfície onde permanece o hidróxido de cálcio, enquanto a zona já carbonatada conserva a cor, permitindo medir a extensão da carbonatação, como se pode ver nas figuras 6.15 e 6.16.

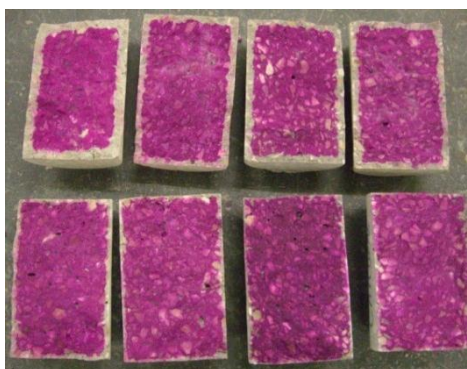


Fig. 6.15 - Provetes pulverizados com fenolftaleína



Fig. 6.16 - Medição da penetração da carbonatação

Como a carbonatação é determinada por um processo de difusão do CO_2 , pode-se modelar a respectiva profundidade recorrendo à 1ª Lei de Fick (COSTA, 1999). A difusão consiste no transporte de matéria sob um determinado gradiente de concentração. Neste caso o CO_2 que se encontra presente na atmosfera é consumido na reacção com o hidróxido de cálcio da solução dos poros, obtendo-se assim carbonato de cálcio e permitindo a difusão de CO_2 para o interior do betão.

É consensual a teoria de que, a partir da 1ª Lei de Fick se pode admitir para determinar o coeficiente de carbonatação que a profundidade de carbonatação é proporcional à raiz quadrada do tempo, pela seguinte expressão:

$$D = Kt^{0,5} \quad (6.4)$$

Onde:

- D - profundidade de carbonatação (mm)
- K - coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0,5})
- t - tempo de exposição ao agente agressivo (ano)

Contudo, Neville (1982) alerta para cuidados a ter com a extrapolação dos resultados obtidos, principalmente nos ensaios de carbonatação acelerada, pois o dióxido de carbono, quando usado em altas concentrações poder distorcer os fenómenos dos ensaios acelerados. De facto os estudos em condições aceleradas de carbonatação são testes que envolvem o uso de elevada concentração de reagentes, temperatura, humidade e outros parâmetros que podem influenciar na aceleração da degradação do betão armado.

Estes testes quando devidamente concebidos, executados e interpretados podem fornecer uma base sólida para a previsão do desempenho do betão armado durante o seu período de vida útil. Não obstante poder ser importante para a análise final dos resultados, não se considerou a carbonatação inicial, natural, ou seja, a carbonatação que possa ter acontecido antes da entrada dos provetes na câmara de carbonatação acelerada.

Como os BAC produzidos deveriam estar aptos para a exposição a ambientes agressivos do tipo XC4, então, é conveniente após avaliar os resultados obtidos na câmara de carbonatação acelerada, apresentar também os coeficientes de carbonatação em condições reais.

Em 1988, Ho e Lewis através de várias pesquisas, chegaram à conclusão que é possível relacionar os resultados da carbonatação acelerada em câmara, com 5% ± 1% de CO₂ e 65% ± 5% de humidade relativa à temperatura de 22°C ± 2°C com os resultados da exposição real, assumindo um valor conservativo 1/11 na relação dos coeficientes de carbonatação. Também se recorreu a outro modelo de previsão proposto por Coutinho (2011), partindo da relação de concentração de CO₂ da câmara de carbonatação acelerada (5%) com a concentração comum na atmosfera (0,033%) de onde se obtém uma razão de 152. Pela expressão 6.5 calcula-se o coeficiente de carbonatação para exposição real (K^*) que servirá para avaliar a previsão da profundidade de carbonatação a outras idades em condições de ambiente natural, recorrendo à expressão 6.4 e substituindo K^* por K .

$$D = K^* \sqrt{152 \times t} \quad (6.5)$$

Onde:

- D - profundidade de carbonatação acelerada (mm)
- K^* - coeficiente de carbonatação para exposição real (mm/ano^{0,5})
- t - tempo de exposição ao agente agressivo na câmara de carbonatação acelerada (ano)

Resultados são expressos no Quadro 6.6.

Quadro 6.6 - Resultados da carbonatação

	BAC-F CTL	BAC-F 10%GPF	BAC-F 20%GPF	BAC-F 10%MS	BAC-MV CTL	BAC-MV 10%GPF	BAC-MV 20%GPF	BAC-MV 10%MS
Profundidade carbonatação 28 dias (mm)	1,35	2,73	3,16	1,08	3,98	6,06	7,61	4,01
Coefficiente carbonatação exposição acelerada (mm/ano ^{0,5})	4,87	9,85	11,41	3,90	14,37	21,88	27,47	14,41
Coefficiente carbonatação exposição real (mm/ano ^{0,5})	0,44	0,90	1,03	0,35	1,31	1,99	2,50	1,32
Previsão da profundidade carbonatação aos 50 anos (mm) (Lewis)	3,1	6,3	7,3	2,5	9,2	14,1	17,7	9,3
Previsão da profundidade carbonatação aos 50 anos (mm) (FEUP)	2,8	5,7	6,5	2,2	8,2	12,5	15,8	8,3

Dos resultados pode-se confirmar haver relação dos coeficientes de carbonatação com as resistências mecânicas verificadas para estes BAC, já que também os factores que influenciam a carbonatação são os mesmos que influenciam as resistências à compressão.

Também se reconhece que os BAC com mistura de adições GPF apresentam coeficientes de carbonatação consideravelmente superiores aos de controlo, sustentando que estes ligantes levam a um menor teor de hidróxido de cálcio na pasta de cimento hidratada, o que conduz a uma menor necessidade de CO₂ para remover o Ca(OH)₂, promovendo o maior incremento na profundidade de carbonatação com o decorrer do tempo.

O desempenho das misturas com sílica de fumo está, com certeza, relacionado com a reconhecida estrutura mais densa da pasta de cimento hidratada de modo que, reduzindo a difusibilidade abranda a carbonatação.

Nos casos em estudo confirma-se que a introdução do GPF não beneficia o controlo da carbonatação, podendo-se mesmo afirmar que a penetração é tendencialmente o dobro das do betão de controlo.

Na legislação em vigor e segundo a metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 anos, face às condições ambientais, a classe de exposição XC4 requer um recobrimento mínimo nominal de 40mm. Em todos os BAC ensaiados e pelas previsões obtidas pode-se admitir que estes betões teriam um bom comportamento no que respeita ao risco de corrosão induzida por carbonatação.

Convém tornar claro que, os betões que apresentam uma previsão na profundidade de carbonatação, inferior às estipuladas para o recobrimento nominal mínimo, não implicam por si só haver corrosão das armaduras. Esses valores indicam que eventualmente o pH do betão possa ter baixado para valores críticos e potencializadores de ocorrência de despassivação das armaduras. Para haver corrosão teria de haver condições favoráveis e que permitissem o seu desenvolvimento, como é a humidade e oxigénio, zonas catódicas e anódicas e espaço suficiente para acolher o aumento de volume dos

componentes resultantes da oxidação, ou que o betão não seja suficientemente resistente para neutralizar as tensões internas criadas por esse aumento de volume.

6.3.6 COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E463:2004

O ataque de cloretos tem como principal consequência a corrosão da armadura do mesmo modo que a carbonatação. Em consequência da corrosão, o recobrimento envolvente do betão pode ser destruído, dinamizando o processo de deterioração da armadura, pela abundância de cloretos, água e oxigénio.

A penetração de cloretos no betão pode ocorrer por difusão devido a diferenças de concentração de cloretos, por absorção de água com cloretos ou por permeação por diferenças de pressão. O fenómeno de difusão é preponderante no caso de um betão muito compacto e sem fissuras, enquanto para um betão mais poroso e com fissuras, a absorção é o mecanismo mais importante (Coutinho, 1998).

A verificação da difusão de cloretos é essencialmente feita pela determinação da condutância eléctrica, a qual é expressa pela carga eléctrica total carregada pela corrente de 1 ampere durante 1 segundo em coulombs, que passa durante um determinado intervalo de tempo através de um provete de betão. O provete de betão é colocado entre as soluções de cloreto de sódio (NaCl) e de hidróxido de sódio (NaOH) mantendo uma diferença de potencial constante máxima de 60V DC. Os iões cloretos são forçados a migrar de uma solução de NaCl em contacto com uma das faces do provete e sujeita a uma carga negativa, para o interior do betão até à outra face onde se encontra uma solução de NaOH carregada positivamente (Coutinho, 2001).

Neste ensaio foi adoptada a metodologia proposta pela Nordtest Method NT Build 492 na qual se baseia a Especificação, sendo que, antes de ser colocado nas células o provete de betão é previamente impregnado numa solução saturada de Ca(OH)_2 , ver Figura 6.17. A duração do teste depende da medição de corrente inicial pela aplicação de um potencial eléctrico de 30V DC.



Fig. 6.17 - Preparação dos provetes por saturação de Ca(OH)_2

Este ensaio permite determinar o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário, D_{ns} , assim como a resistividade eléctrica. Para calcular o coeficiente D_{ns} , é necessário, após o período determinado para o ensaio, dividir o provete por compressão diametral, pulverizar sobre as faces de rotura uma solução de nitrato de prata e medir a profundidade de penetração de cloretos pela

precipitação de cloreto de prata. O cálculo do coeficiente de difusão aparente (D_{ns}) é determinado a partir da profundidade de penetração de cloretos e baseada numa relação teórica entre os fenómenos de difusão e migração (Neville, 1982), podendo ser obtida pela expressão 6.6.

$$D_{ns} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (6.6)$$

Onde:

- D_{ns} - coeficiente de difusão no estado não estacionário ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
- T - valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica ($^{\circ}\text{C}$)
- L - espessura do provete (mm)
- U - valor absoluto da voltagem aplicada (V)
- t - duração do ensaio (horas)
- x_d - valor médio da profundidade de penetração (mm)

Os resultados médios são apresentados no Quadro 6.7.

Quadro 6.7 - Resultados difusão de cloretos no BAC aos 28 e 90 dias de idade

	BAC-F CTL	BAC-F 10%GPF	BAC-F 20%GPF	BAC-F 10%MS	BAC-MV CTL	BAC-MV 10%GPF	BAC-MV 20%GPF	BAC-MV 10%MS
Coeficiente D_{nsm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) (28 dias)	24,06	19,61	15,35	5,86	34,42	32,13	30,98	14,39
Coeficiente D_{nsm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) (90 dias)	17,73	14,14	8,34	6,51	-	18,82	14,46	10,19
Melhoria $\left(1 - \frac{D_{ns,28}}{D_{ns,90}} \right) \times 100$	26%	28%	46%	-11%	-	41%	53%	29%

Os resultados da resistividade não estão apresentados, por se ter verificado uma quebra na corrente eléctrica durante os ensaios e se terem perdido esses dados. Contudo, é de admitir que num betão com determinado teor de humidade, a difusão de cloretos está intrinsecamente relacionada com a sua resistividade. Quanto menor a resistência eléctrica do betão mais rapidamente a corrente passa sendo maior a hipótese de corrosão.

Não foi possível considerar o Coeficiente D_{nsm} para o BAC-MV CTL aos 90 dias de idade, por perda de informação no registador de dados (data logger da *dataTaker*). Por se reconhecer importância a este dado, diligenciou-se novo ensaio, contudo, a proximidade com a apresentação desta dissertação não o viabilizou.

O interesse na realização deste ensaio não tem a ver com a especificação destes betões, já que só era previsto cumprirem a classe de exposição ambiental XC4, mas sim, o de reflectir sobre a variação da resistência à penetração de cloretos relacionada com as diferenças dos ligantes usados nas diferentes composições. Para melhor apreciação, considerou-se a relação com o BAC-MV CTL a qual é apresentada no Gráfico 6.8, sabendo que, quanto menor for o coeficiente D_{ns} maior é a resistência à penetração de cloretos.

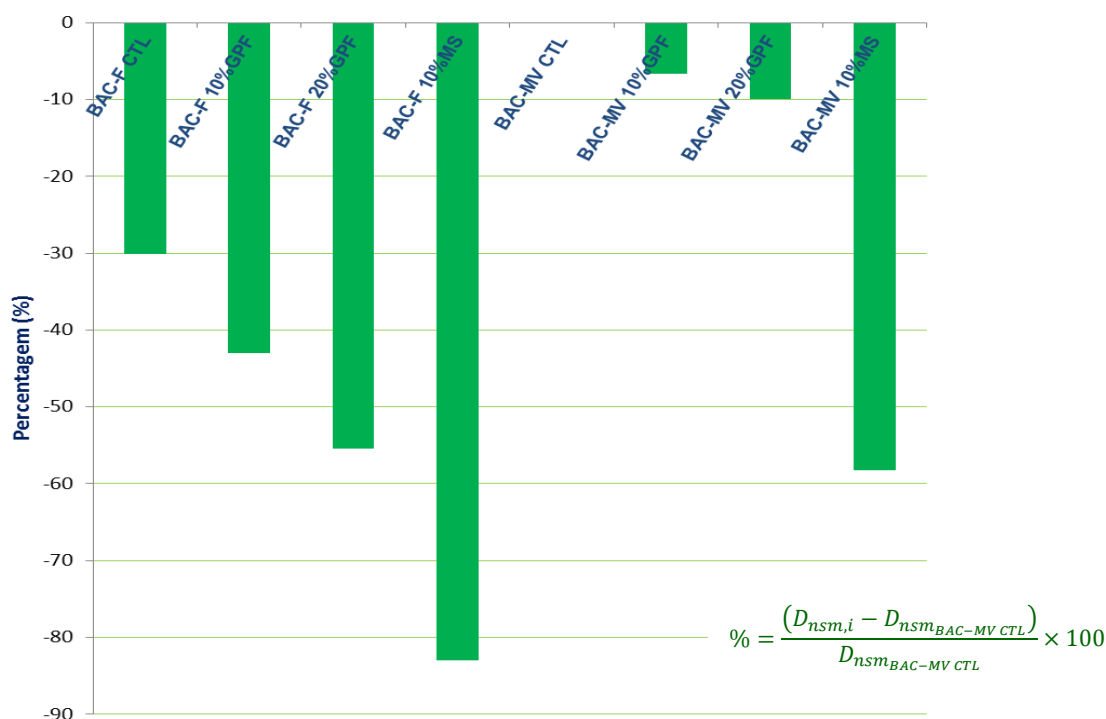


Gráfico 6.8 - Relação dos coeficientes D_{nsm}

Como é facilmente interpretado pelo Gráfico 6.8, existe um melhor desempenho relativamente à difusão dos cloretos em betão com a introdução de adições. Sendo já previsível a capacidade da sílica de fumo em melhorar as condições de resistência do betão a esta agressão, já os resultados obtidos com a utilização do GPF foi uma confirmação das expectativas e até mesmo de confirmação de resultados de trabalhos anteriores.

De particular significado foram os resultados obtidos aos 90 dias de idade, já que puderam confirmar as melhorias na resistência à difusão de cloretos.

De modo muito relevante foram as melhorias verificadas nas composições que utilizam GPF, podendo agora ser classificadas como moderada no que respeita à classe de resistência à penetração de cloretos, excepto a composição do BAC-MV 10%GPF que apesar da melhoria de 41% manteve ainda a classificação de baixa resistência à penetração de cloretos.

6.3.7 ENSAIO ACELERADO DA REACÇÃO ALCALI SÍLICA SEGUNDO A ASTM C1260:2007

A reacção alcali sílica tem início com o ataque aos constituintes siliciosos do betão, sendo de maior relevância a sílica dos agregados. A agressão é feita pelos hidróxidos alcalinos contidos na água dos

poros, resultantes dos álcalis do cimento. De facto trata-se de uma resposta dos agregados siliciosos às novas condições do meio que passaram a estar inseridos, em particular ao elevado pH.

Da reacção resulta a formação de um gel sílico-alcálico hidratado nos poros ou na superfície dos agregados, o que pode destruir a ligação entre o agregado e a pasta de cimento hidratado. O gel, em condições de humidade, absorve a água e aumenta de volume de forma ilimitada. Esta expansão provoca tensões internas que podem levar à fendilhação e rotura da pasta de cimento hidratada, facilmente visível na superfície das estruturas com este tipo de reacção. De realçar a importância da temperatura, já que, geralmente, as temperaturas elevadas aceleram o progresso da reacção alcali-sílica, mas, contudo, não induz incremento na expansão, (*“E-Schein”-Lehrgang, 2004*).

Relevante para este trabalho de pesquisa, é a incorporação do GPF tendo em vista o eventual controlo da reacção expansiva alcali-sílica.

Para além do já abordado no Capítulo 3 quando se descreveu a influência dos constituintes, fica claro que o desenvolvimento desta reacção e suas consequências, está relacionado com a debilidade em algumas ligações alcali-oxigénio provocada pelos iões hidróxido (OH^-) nas partículas de sílica e pela migração dos iões sódio (Na^+) e potássio (K^+), que estabilizam o sistema eléctrico formando o gel silicato-alcálico hidratado.

Será de esperar que, quanto maior for o teor de sílica reactiva maior seja a reacção alcali-sílica, mas o que é comum verificar é que não há relação linear nessa proporcionalidade, efectivamente, em elevados teores de sílica a expansão é menor. Assim como se pode verificar que, como medida preventiva se possa introduzir na mistura, sílica reactiva, finamente moída em pó, para reduzir ou até mesmo suprimir esta reacção.

Um dos pressupostos será o de verificar se a substituição parcial do cimento Portland por GPF, inibirá ou não esta reacção expansiva. Para isso foram admitidos testes em ensaio acelerado, que possam confirmar esse desempenho.

O procedimento de teste foi o determinado pela ASTM C1260, tendo sido produzidas barras de argamassa para identificar o comportamento de potencial reactividade alcali, em quatro misturas diferentes, como se pode ver pela Figura 6.18;

- Uma das argamassas foi produzida com uma areia normalizada (CEN) habitualmente usada para a determinação das resistências mecânicas do cimento e que já se sabia ser reactiva. Esta areia neste teste de controlo foi usada com o cimento Portland usado no BAC, e será identificada como CEN-CEM
- Uma segunda argamassa com a mesma areia (CEN), foi produzida com substituição de 10 % em massa do cimento Portland por GPF, pretendendo-se demonstrar o desempenho do GPF no controlo ou eliminação da reacção expansiva alcali-sílica, tendo sido identificada como CEN-GPF,
- Uma terceira argamassa foi produzida com a areia fina já usada na produção do BAC e que se sabia não ser reactiva. Esta areia, neste teste de controlo, foi usada com o cimento Portland usado no BAC, e será identificada como AF-CEM,
- Uma quarta argamassa com a mesma areia fina, foi produzida com substituição de 10% em massa do cimento Portland por GPF, pretendendo-se demonstrar o efeito do GPF. Esta argamassa foi identificada como AF-GPF.



Fig. 6.18 - Barras para ensaio RAS

A interpretação dos resultados quanto à verificação da reactividade, sendo feita como indicado na norma ASTM C1260, verifica os seguintes limites:

- expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias após a produção da argamassa, são indicativos de comportamento inócuo na maioria dos casos,
- expansões superiores a 0,20% aos 16 dias após a produção da argamassa, são indicativos de expansão potencialmente deletéria,
- expansões entre 0,10 e 0,20% aos 16 dias após a produção da argamassa, incluem agregados que podem ser inócuos ou nocivos. Sendo particularmente importante desenvolver informações suplementares, também pode ser útil para fazer leituras de comparação, aos 28 dias.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 6.8.

Quadro 6.8 - Resultados da expansão média em ensaio acelerado da reacção alcali-silica (%)

Dias	CEN-CEM	CEN-GPF	AF-CEM	AF-GPF
2 (leitura 0)	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,03	0,02	0,02	0,03
8	0,08	0,06	0,04	0,05
12	0,15	0,07	0,08	0,07
16	0,21	0,10	0,12	0,09

Da análise dos resultados, comprova-se o potencial reactivo da areia CEN e ainda alguma indicação de reactividade na areia fina usado na produção do BAC, que não se estava à espera considerando ensaios anteriores e até mesmo pela documentação entregue pelo fornecedor. De relevante é a confirmação da redução da expansão em pelo menos 25%, quando se utilizou o ligante com mistura de GPF,

resultando em poder avaliar ambas as argamassas como de comportamento inócuo, ou seja, não reactiva.

A adição do GPF como pozolana pôde prevenir com eficácia a expansão resultante da reacção alcali-sílica, apesar de o teor em alcalis ser bastante superior ao máximo admissível (5%) em norma para as pozolanas. Para além disso, reconhece-se que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formado por actividade pozolânica incorpora uma certa quantidade de álcalis diminuindo assim o valor de pH. Também é de salientar que a fina estrutura dos grãos de GPF evidenciando uma elevada superfície específica, promove que a reacção se confina a esta superfície, tendo como resultado natural uma reacção sem expansão.

6.4 OUTROS ENSAIOS *IN SITU*

Da leitura de trabalhos anteriores e da observação de amassaduras experimentais efectuadas no Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural – LABEST, da responsabilidade da Professora Doutora Sandra Nunes, desde muito cedo se verificou um forte interesse em analisar o desempenho do GPF no betão, como adição.

Efectivamente, também os ensaios iniciais que promoveram a aptidão destas composições, foram bastante conclusivos quanto à estabilidade e coesão dos betões produzidos com esta adição, sendo de assinalar a melhoria na robustez às variações de água.

Com a produção dos elementos previstos para esta dissertação, houve a disposição de preparar outros ensaios, tanto na prefabricação como no Betão Pronto. Estes ensaios deveriam corrigir algumas anomalias verificadas e melhorar os aspectos de resistências e de desempenho das composições com GPF. Para esta dissertação interessava conhecer as diferenças, mas agora interessa reduzir ou até mesmo eliminar as imparidades nas amassaduras com GPF, ou seja, sempre que os resultados não apresentavam o nível desejado ou da tendência das amassaduras de controlo.

Estes ensaios em produção contínua, servirão também para melhorar o conhecimento sobre a utilização do GPF como adição nestes betões auto-compactáveis e eco-eficientes. Com o factual entendimento dos testes poder ajustar metodologias na preparação das composições e, acima de tudo, garantir informação para memória futura.

6.4.1 ENSAIOS NA PREFABRICAÇÃO

Para estes ensaios recorreu-se novamente às instalações da Concremat, não só pela disponibilidade sempre demonstrada, mas também pelo bom conhecimento da produção e do centro de produção, sendo que, objectivamente, os componentes do betão eram do mesmo tipo e origem dos que foram utilizados nos ensaios para esta dissertação.

Optou-se por, na prefabricação, se produzir só o betão auto-compactável do tipo finos com amassaduras de controlo (BAC-F CTL) e amassaduras com substituição de 20% em massa do cimento Portland por GPF. Genericamente foram usados os mesmos procedimentos, tendo havido algumas alterações na composição com GPF, em particular a redução do teor de água da amassadura com o aumento de dosagem do superplastificante WOERMENT FM 420, em diferentes quantidades, tendo em conta o elemento a produzir e o espalhamento requerido garantindo sempre um máximo de razão w/c de 0,33.

O betão foi assim colocado nos moldes já preparados para esse dia de produção de elementos pré-fabricados. São três tipos de moldes, com dimensões e geometrias bastante superiores às dos anteriormente usados e, por isso, implicando um maior volume de betão, tendo havido necessidade de,

apesar da grande capacidade da misturadora, efectuar betonagens do mesmo elemento com diferentes amassaduras.

A maior quantidade de betão produzido destinou-se a elementos de parede, com uma face à vista, onde se requer excelente acabamento de superfície, eliminando a necessidade de cosmética para defeitos existentes. Estes elementos são colocados em mesas de chapa de aço e betonados em posição horizontal, sendo que a altura do molde tem aproximadamente 150 mm e uma densidade de malha de aproximadamente 150 kg/m³, ver figura 6.19.



Fig. 6.19 - Aspecto da mesa preparada para receber o BAC, para elemento parede

Foi colocado à disposição um outro molde para construir elementos viga/pilar com bainha de pré-esforço, em que a densidade de malha era de aproximadamente 400 kg/m³ e com uma altura de 500 mm. Dada a intrincada e elevada densidade da armadura, o betão para este elemento foi ligeiramente ajustado com mais 100 ml de adjuvante WOERMENT FM 420, de modo a aumentar a velocidade de escoamento do BAC e, assim, facilitar a capacidade deste em percorrer o molde, garantindo também melhor envolvimento à armadura e preenchimento de zonas de difícil acesso. Este molde é construído à medida do elemento, em painéis de contraplacado marítimo. Este material revela-se suficientemente resistente mesmo para muitas utilizações, quando betonado com BAC, ver figura 6.20.



Fig. 6.20 - Aspecto da viga/pilar antes e após betonagem

O terceiro molde que foi possível utilizar, trata-se de um elemento pré-moldado de carril utilizado na construção da linha de eléctricos dos transportes urbanos dos STCP, em que o elemento após a sua colocação está sujeito a grandes e múltiplos esforços actuantes. Este molde pela complexidade de armadura, incluía também as linhas do carril que necessitavam de um perfeito alinhamento, principalmente no carril em arco (para construir as curvas) e tinha como base um negativo construído por cubos de granito, imitando o tradicional e designado como *pavimento com paralelo* de granito existente na cidade do Porto, ver figura 6.21.



Fig. 6.21 - Aspecto do molde e armadura, para a produção do carril

Durante todo o processo de betonagem dos diferentes elementos, foram recolhidos provetes cúbicos do BAC, para se poder, no futuro, avaliar o desenvolvimento das resistências mecânicas, principalmente para se poder agendar o pré-esforço, tendo sido, com este betão, antecipado em 3 dias daquela que era a data prevista para aplicar o pré-esforço final. A Concremat disponibilizou os resultados referentes às resistências à compressão dos provetes de betão a diferentes idades e comprovou-se não serem muito distintos dos obtidos em condições de laboratório, sendo que a média foi superior à que sustentou este estudo. Contudo o desvio padrão, foi também maior, o que é aceitável por se tratar de condições de produção reais e sendo ainda mais aceitável porque o desvio padrão obtido foi só de 2,32 MPa.

No final pode-se constatar a habilidade do betão em ser capaz de produzir estes diferentes elementos, com mais facilidade do que com um betão tradicional. A mão-de-obra requerida foi só a do operário manobrador da ponte rolante. O ambiente na fábrica foi melhorado, pois não havia o ruído dos vibradores pneumáticos. Com interesse para a empresa, foi também a possibilidade de poder retirar o elemento do molde ao fim de 8 horas, não apresentando nenhuma patologia ou defeitos de fabrico que requeressem a reparação cosmética e os moldes ficaram limpos, possibilitando o incremento da produção. Ver Figura 6.22.



Fig. 6.22 - Carril pré-fabricado e painéis parede

De realçar para estes testes, após verificação de alguns resultados já obtidos nos provetes recolhidos, haver melhorias consideráveis em muitos dos resultados nas amassaduras com GPF, sendo de realçar os aumentos de resistência à compressão, redução dos coeficientes de carbonatação e de absorção por capilaridade acompanhados por aumento de massa volúmica, como se pode verificar pelo Quadro 6.9. Apesar de não terem sido efectuados ensaios à penetração de cloretos, é expectável poder ter sido reduzida a difusibilidade e desse modo obter melhorias à migração de cloretos.

Quadro 6.9 - Resultados do BAC-F na prefabricação

	BAC-F CTL	BAC-F 20%GPF	Relação actual	Relação na dissertação
Massa volúmica (kg/m ³)	2384	2356	0,99	0,97
Tensão de rotura à compressão (MPa)	73,5	67,5	0,92	0,78
Coeficiente de absorção por capilaridade	0,0340	0,0401	1,18	1,37
Previsão da profundidade carbonatação aos 50 anos (mm)	20	33	1,65	2,36

Como já referido, a principal alteração às composições usadas na dissertação foi a de reduzir a razão água/cimento pela redução do teor de água da amassadura, devida ao aumento de dosagem do adjuvante superplastificante WOERMENT FM 420.

6.4.2 ENSAIOS NO BETÃO PRONTO

Para estes ensaios recorreu-se às instalações de betão pronto da empresa S. Pintos, ver Figura 6.23.



Fig. 6.23 - Centro de produção de betão pronto da S. Pintos

O que se pretendeu nestes ensaios foi o de verificar a adaptabilidade do BAC-MV neste tipo de produção e especificação de betão, e analisar o desempenho da substituição parcial do cimento Portland por GPF, muito em particular as resistências mecânicas e as consistências, tendo em conta que não foram convenientemente alcançadas nos testes da dissertação.

Também nesta produção seriam feitos dois tipos de BAC-MV: o de controlo (BAC-MV CTL) e um com substituição com substituição de 20% em massa do cimento Portland por GPF.

Os componentes do betão eram do mesmo tipo e origem dos que foram utilizados nos ensaios da produção na Concremat para esta dissertação, excepção feita à substituição do agregado britado designado de Bago de Arroz por uma Areia Média de rio, inicialmente prevista para este betão.

Objectivamente, as composições tiveram de ser novamente estruturadas, não só pela substituição do agregado, mas também pela necessidade de procurar melhor desempenho nas composições com GPF. Para além das adaptações à optimização dos agregados, mantiveram-se, como previsto, os teores de ligantes e fez-se reduzir a razão água/cimento e aumentar o espalhamento, com a redução do teor de água pelo aumento na dosagem do superplastificante e redução do modificador de viscosidade.

O betão depois de ter sido produzido na misturadora da central de betão, era transportado por autobetoneira até à obra, cumprindo-se sempre o tempo previsto para a colocação do betão de modo a garantir a manutenção de consistência. Durante o processo de produção e entrega, confirmou-se o verificado em laboratório, pois não houve qualquer perda de consistência nem refluidificação, ver Figura 6.24.



Fig. 6.24 - Bombagem do BAC-MV 20%GPF

Os ensaios de campo consistiram na construção de uma laje aligeirada de vigota com enchimento de vigas e paredes, com betão colocado por bombagem. Houve também a oportunidade de construir uma laje maciça de grande betonagem, com descarga directa da autobetoneira. Na ocasião foi possível construir um pavimento de um pavilhão por módulos com betonagem no local e em moldes pré-fabricados.

Com a construção da laje aligeirada verificou-se a facilidade que o betão tem em percorrer e preencher os espaços. Esta capacidade traduziu-se em não ter sido necessária mão-de-obra para a colocação do betão, sendo que a sua capacidade auto-nivelante conseguiu garantir a altura da lâmina de compressão, de acordo com o especificado pelo projectista. A estabilidade do betão e a viscosidade adequada promoveu a sua aptidão para ser bombado com muita facilidade, sem se notar qualquer esforço no equipamento, podendo mesmo ser reduzida a pressão de bombagem, para mangueira com secção cheia, ver figuras 6.25 e 6.26. Nesta obra foi verificado o desenvolvimento da resistência mecânica do betão, por provetes recolhidos em obra, tendo sido também analisados os resultados da resistência à compressão aos 28 dias de idade para controlo de identidade.



Fig. 6.25 - Betonagem de laje maciça



Fig. 6.26 - Betonagem de laje aligeirada

As paredes construídas nesta estrutura foram minuciosamente controladas logo após a retirada do molde, tendo-se verificado o perfeito alinhamento, não sendo notadas excentricidades ou visível qualquer existência de poros na superfície. Esta apresentava-se homogênea não havendo em toda a sua superfície qualquer imperfeição. Pelo facto, foi aprovada pelo arquitecto responsável pelo projecto, para betão com superfície à vista. A estabilidade das paredes, deveu-se essencialmente a não ter sido usada qualquer energia de vibração, não se tendo instalado tensões adicionais. A laje apresenta-se também completamente preenchida não mostrando qualquer falha no recobrimento da armadura inferior.

A construção da laje maciça, por descarga directa da autobetoneira, conseguiu demonstrar inequivocamente as potencialidades deste betão auto-compactável, pois somente o operário manobrador da autobetoneira teve intervenção na colocação e distribuição do betão. Também é de salientar que os tempos de descarga do volume de betão transportado pela autobetoneira eram a todos os títulos impressionantes, pois o limite para a descarga era só condicionado pela capacidade de descarga do equipamento, ver figura 6.27, sendo que, o betão com GPF, apesar de manter consistência idêntica à do betão de controlo, apresentava parâmetros de robustez e coesão superiores.



Fig. 6.27 - Betonagem de laje maciça por descarga directa da autobetoneira (EUROMODAL)

A construção do pavimento para o pavilhão foi relevante, por possibilitar que o mesmo betão fosse utilizado para ser colocado directamente no solo do pavilhão e simultaneamente em elementos pré-fabricados. Em obra tratou-se de descargas directas a partir da autobetoneira e em fábrica por descarga da autobetoneira no balde, que posteriormente o colocava na mesa que lhe servia de molde.

A experiência de betonar no solo, apesar de a área estar confinada, foi muito similar à da betonagem da laje maciça, contudo, como houve necessidade de proceder a acabamento de superfície e de melhorar o nivelamento, recorreu-se a um processo muito simples, que consistiu em acomodar o betão em toda a sua extensão.

Em paralelo ao betão colocado directamente no solo do pavilhão, foram construídas lajes em fábrica. Também aqui o BAC-MV se mostrou muito estável e robusto, não havendo qualquer segregação, sendo o molde completamente preenchido até ao nivelamento e a cadência de betonagem foi por isso incrementada quando comparada com um betão convencional, por não haver necessidade de vibração ou até mesmo quando comparada com um betão auto-compactável do tipo finos, pois fluía com muito maior velocidade.

Posteriormente, o dono de obra optou por escolher para construir o pavimento, os elementos em betão produzidos na prefabricação, pois tinha como imperativo a necessidade de um excepcional acabamento de superfície. Com a laje pré-fabricada, o empreiteiro podia inverter a face do elemento, o betão negativo da mesa, era perfeito e isento de poros ou deficiências provocadas pela interferência de um operário, para dar o acabamento final.

O pavimento do pavilhão apresentou-se, no final, muito homogéneo e livre de imperfeições. De realçar que as lajes foram também assentes e coladas a uma base de BAC-MV, que lhes serviu de leito e que permitiu um fácil nivelamento.

A S. Pintos, SA, foi sempre recolhendo amostras de todo o betão produzido para controlo estatístico da sua produção e os resultados dos provetes produzidos com essas amostras foram, depois, ensaiados para resistência à compressão a diferentes idades, numa prensa da marca CONTROLS, modelo C54H2 de classe 0,5. Considerando os critérios de avaliação da conformidade previstos na norma NP EN 206-1, todos os resultados foram considerados válidos e coincidentes com os verificados em laboratório, sendo que o desvio padrão da produção foi de 3,01 MPa o que se pode considerar como muito aceitável, para uma produção de betão pronto.

Como o estudo feito para este betão, tinha como parâmetro a resistência à corrosão por carbonatação para uma classe XC4 e reconhecendo que as propriedades de transporte da camada do betão superficial representam um papel importante na durabilidade do betão armado, dois dos provetes recolhidos foram colocados durante 14 dias em câmara para carbonatação acelerada. No final desse tempo foi verificada a penetração do agente agressivo dióxido de carbono, com recurso à fenolftaleína como indicador de pH, em outros provetes verificou-se a absorção por capilaridade, sendo os resultados mostrados no Quadro 6.10.

Quadro 6.10 - Resultados do BAC-MV no betão pronto

	BAC-MV CTL	BAC-MV 20%GPF	Relação (1)	Relação (2)
Massa volúmica (kg/m ³)	2342	2314	0,99	0,96
Tensão de rotura à compressão (MPa)	49,5	41,5	0,84	0,65
Coeficiente de absorção por capilaridade	0,0950	0,0972	1,02	1,14
Previsão da profundidade carbonatação aos 50 anos (mm)	7,8	9,7	1,24	1,92

(1) – relação BAC-MV 20%GPF / BAC-MV CTL no Betão Pronto

(2) – relação BAC-MV 20%GPF / BAC-MV CTL na Pré-fabricação

Os resultados agora obtidos dão boas indicações para uma optimização adequadas destes betões, e reconhece-se às amassaduras com GPF, capacidade de cumprirem a prescrição, mesmo em betões auto-compactáveis com baixo teor de finos pela utilização de modificador de viscosidade, em classes de resistência correntes.

7

CONCLUSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES

Como os materiais utilizados na produção do betão auto-compactável e eco-eficiente são materiais correntes no mercado português, e os equipamentos são comuns para a produção de um betão tradicional, não havendo necessidade de qualquer requisito especial para a sua produção, a inovação que este betão apresenta, reside na facilidade de colocação por não haver necessidade de vibração e também na valorização eficaz de resíduos.

A partir de um controlo das características dos constituintes do betão, confirmou-se não haver dificuldade em repetir numa central de betão convencional, as propriedades exibidas em laboratório, qualquer que tenha sido o método utilizado, sendo que, a sua execução, transporte e colocação em obra se revelou bastante prática.

Num betão auto-compactável a selecção dos constituintes é muito importante. Se por um lado os agregados naturais (rolados) são mais favoráveis para a obtenção de auto-compactabilidade, quando comparados com os agregados britados, como ficou bem patente nos ensaios posteriores com a substituição do agregado fino britado (bago de arroz) por uma areia média rolada, também a escolha do ligante pode interferir no desempenho do adjuvante, nas resistências mecânicas e na robustez da matriz, sendo que ligantes constituídos com adições apresentam geralmente melhor desempenho.

As vantagens com maior visibilidade na utilização de um betão auto-compactável eco-eficiente, quando comparado com um betão tradicional, são desde logo, uma maior facilidade de aplicação, que culmina com um melhor acabamento da estrutura e mais durável. Se por um lado há disponibilidade de o betão percorrer com mais facilidade o molde, também a aderência aço/betão vai ser mais eficiente e por fim, a eliminação do ruído e a protecção da saúde dos operários são também factores a considerar. O recurso ao uso de constituintes com menos gastos de energia na sua produção e por isso incorporando menos emissões de CO₂, promove de facto, uma construção sustentável.

Alguns inconvenientes podem ser enumerados, como a necessidade de utilizar cofragens mais impermeáveis e as dificuldades que acompanham as variações de dosagens dos constituintes.

Comparativamente quando analisados os betões desenvolvidos pelos métodos apresentados, verificam-se vantagens no betão auto-compactável do tipo modificador de viscosidade, pois é possível reduzir consideravelmente os custos, tendo ficado demonstrado que é possível produzir um betão auto-compactável eco-eficiente, fluido e estável, com baixo teor de finos, reduzindo esse custo adicional. Sendo também a dosagem do adjuvante superplastificante similar à de um betão corrente. Isto implica muitas vantagens práticas e económicas como a redução do conteúdo em cimento e a eliminação de fíleres, traduzindo-se também numa simplificação logística, o controlo de qualidade pode ser

otimizado. Objectivamente foi notório verificar que, com este método a simplicidade de colocação do betão nos moldes, contribuiu para a redução significativa da mão-de-obra de 3 para 1, sendo que, em paralelo o tempo de colocação do betão foi reduzido para 20% do tempo normalmente necessário para a construção do mesmo elemento.

Estas vantagens traduzem-se em possibilitar uma maior vida útil para o projecto face às condições ambientais, possibilitando a aplicação de um betão auto-compactável com resistências correntes, reduzindo o tempo de construção e eventualmente utilizar componentes com menor incorporação de emissões de CO₂, muito relevantes para a construção no futuro, a que este trabalho pretendeu dar a sua contribuição.

7.2 O FUTURO

A abordagem ao tema betão, do seu futuro e do futuro da indústria de betão, terá de necessariamente ser confrontada com a fatal necessidade de avaliar os impactes ambientais decorrentes desta indústria. Para isso, deverão os técnicos responsáveis pelo desenvolvimento das composições de betão, procurar cada vez mais componentes com menor incorporação de CO₂ na sua produção, garantindo sempre o cumprimento dos quadros legais em vigor, sem nunca menosprezar a informação recolhida, já que os meios de ensaio e o conhecimento actual poderão ser suficientes para abrir novos caminhos a explorar.

Também a informação consolidada terá de fluir com mais eficácia, deverá chegar rapidamente ao técnico prescritor do betão, como são os projectistas das estruturas ou os arquitectos e até mesmo as entidades fiscalizadoras. Um melhor envolvimento de todos vai, com certeza, criar dinâmicas de inovação e de aproveitamento do que se organizou, facilitando a elaboração de documentos técnicos que estabeleçam e interpretem esses desenvolvimentos.

O conceito genérico de eco-eficiência, apresentado em 1991, pelo WBCSD – World Business Council for Sustainable Development, em The Hague (Den Haag) na Holanda, pretende definir “compromissos entre a qualidade de vida do homem e a redução contínua do seu impacte ecológico e de consumo de matérias-primas ao longo do seu ciclo de vida, até um nível compatível com a capacidade do Planeta”. Isto leva-nos a poder produzir mais, mas com restrição de recursos e necessariamente com menor produção de resíduos.

O betão é seguramente um caso de estudo, sendo o segundo material mais consumido no nosso planeta, logo a seguir à água e que ele próprio para a sua produção incorpora 15 a 20% do seu volume em água.

A procura da produção de betões eco-eficientes tem já muitos progressos, desde logo, a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas hidráulicas ou hidráulicas latentes, tem vindo a ganhar cada vez mais interesse na sua utilização, motivados pela redução de custos de produção mas também por possibilitarem aos betões uma durabilidade melhorada, relativamente ao betão de referência como é o caso dos resíduos ricos em sílica (escória de alto forno, cinza volante, sílica de fumo, cinzas casca de arroz, cinzas de lamas ou vidro reciclado).

Mais recentemente o uso de agregados reciclados, tornaram-se numa forte cooperação no sentido de um betão eco-eficiente, já que, apesar da sua limitação na incorporação como constituinte do betão, em certas situações o hidróxido de cálcio nele contido, ter sido capaz de durante a sua vida na estrutura reagir com o dióxido de carbono e, assim, fazer do betão um excelente contribuinte para o sequestro de carbono. Para além disso menos agregados naturais são usados, reduzindo os impactes ambientais negativos com a sua extracção pois são recursos não renováveis, diminuindo também os efeitos nos ecossistemas em que a exploração se insere.

Uma adequada exposição às novas tecnologias como o betão auto-compactável com baixo teor de finos, com certeza, despertará as empresas de produtos químicos a desenvolver também tecnologias que permitam fornecer activadores de pozolanicidade ou indutores de endurecimento, técnica já existente nos cristais sintéticos de C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

Em breve e como muitos autores já prevêem, o betão passará a ser avaliado pela eco-eficiência, em que sendo importante determinar a quantidade de cimento necessária para se atingir uma unidade de tensão resistente (CEM/MPa), será também importante fixar, com precisão, a quantidade de carbono requerida para alcançar a mesma tensão (CO₂/MPa).

7.3 BIBLIOGRAFIA

ASTM C1260 (2007), *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.

Bethge, W. (2004), *Beton-Herstellung nach Norm*, BetonMarketing Deutschland, Erkrath.

Bhatty, M.S.Y. (1985), *Mechanism of Pozzolan Reactions and Control of Alkali-Aggregate Expansion*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.

Coutinho, J. S. (1998), *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Coutinho, J. S. (2001), *Effect of controlled permeability formwork (CPF) on white concrete*, ACI Materials Journal, pp. 148-158.

Coutinho, J. S. (2011), *JMC'2011- 1as Jornadas de MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Coutinho, J. S. (2011), *Sebenta de aulas práticas*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

COSTA, A (1999), *Anomalias e Mecanismos de deterioração*, Módulo 2, Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Decreto-Lei nº 301/2007, de 23 de Agosto, Diário da República, Lisboa.

EN 12390-6 (2009), *Testing hardened concrete*. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.

E-Schein-Lehrgang (2004), *Arbeitsmaterial - Erweiterte betontechnologische Ausbildung*, Materialforschungs-und-prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.

Especificação LNEC E 391 (1993), *Betões. Determinação da resistência à carbonatação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Especificação LNEC E 393 (1993), *Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Especificação LNEC E 397 (1993), *Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Especificação LNEC E 463 (2004), *Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Especificação LNEC E 464 (2007), *Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Especificação LNEC E 467 (2006), *Guia para a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

EUROMODAL, (2010), *Catálogo de fichas técnicas*. Porto.

Flaig, T. (2002), *Simulation and mathematical optimization of the hydration of concrete for avoiding thermal crack*. Weimar, Germany.

Georgia Institute of Technology (2011), Atlanta, Georgia, USA. <http://www.gatech.edu/>

Hall C. (1989), *Water sorptivity of mortars and concretes: a review*, Magazine of Concrete Research, 41, No 147, pp. 51-61.

Hauck, H. (1999), *Wirkungsweisen der neuen Fließmittelgeneration, Anorganische Bindemittel*, Darmstadt, Germany.

Idorn, G. (1973), *The conflict between working for today and for the day after tomorrow: An introduction to discussions on cement and concrete research during the 1970's*, Cement and Concrete Research. Cembureau, Bruxelas.

IME (2000), *Instituto Militar de Engenharia*, Rio de Janeiro, Brasil, <http://www.ime.br/>

Japan Society of Civil Engineers (1998), *Recommendation for Construction of Self-Compacting Concrete*, International Workshop on Self-compacting Concrete, 23-26 August, Japan.

Khurana, R. (2007), *Press Conference October 23rd*, Schlangenbad, Germany.

König, R. (2001), *Mikrosilica-Baustoff aus der Zukunft*, Glothe, Germany.

Lachemi, M. (2004), *Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures*, Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Canada.

Marques, E. (2004), *Ciências da Terra e da Vida*. Lisboa.

Matos, A. (2010), *Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos*, Grau de Mestre, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Mehta, P. K. (2002), *Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development*. Concrete International, Vol. 24, No. 7, July 2002, pp. 23–28.

Mehta, P. K. (1992), *Rice husk ash – a unique supplementary cementing material*, in *Advances in Concrete Technology*, Ed. V. M. Malhotra, Energy, Mines and Resources, MSL 92-6(R) pp.407-31 (Ottawa, Canada, 1992).

Nordtest Method NT Build 492 (1999), *Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*. Nordtest, Espoo.

Neville, A. M. (1982), *Propriedades do concreto*, trad. Salvador E. Giammuss, São Paulo, Brasil.

Neville, A. M. (1995), *Properties of concrete*, Fourth edition, Longman, Edinburgh.

NP 4220 (2010), *Pozolanas para betão, argamassas e caldas*. Definições, requisitos e verificação da conformidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 206-1 (2007), *Betão*. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

- NP EN 206-1:2007/Emenda 1 (2008), *Betão*. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 206-9 (2010), *Betão*. Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC). Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 1008 (2003), *Água de amassadura para betão*. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 1992-1-1 (2010), *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão*. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-5 (2009), *Ensaio do betão fresco*. Parte 5: Ensaio da mesa de espalhamento. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-7 (2009), *Ensaio do betão fresco*. Parte 7: Determinação do teor de ar. Métodos pressiométricos. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-8 (2010), *Ensaio do betão fresco*. Parte 8: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-9 (2010), *Ensaio do betão fresco*. Parte 9: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento no funil V. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-10 (2010), *Ensaio do betão fresco*. Parte 10: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento na caixa L. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-11 (2010), *Ensaio do betão fresco*. Parte 11: Betão autocompactável. Ensaio de segregação no peneiro. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12350-12 (2010), *Ensaio do betão fresco*. Parte 12: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento no anel J. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12390-1 (2010), *Ensaio do betão endurecido*. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12390-2 (2009), *Ensaio do betão endurecido*. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12390-3 (2009), *Ensaio do betão endurecido*. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12504-1 (2009), *Ensaio do betão nas estruturas*. Parte 1: Carotes. Extracção, exame e ensaio à compressão. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12620:2002+A1 (2010), *Agregados para betão*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP ENV 13670-1:2007/Emenda 1 (2008), *Execução de estruturas em betão*. Parte 1: Regras gerais. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- Nunes, S. (2001), *Betão Auto-compactável. Tecnologias e Propriedades*. Grau de Mestre, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Nunes, S. (2008), *Performance-based design of self-compacting concrete (SCC): a contribution to enhance SCC mixtures robustness*. Grau de Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

- Ortiz, S.A. (1996), *O Vidro e as Embalagens de Vidro*. CETEA/ITAL, Campinas, Brasil.
- Petersson Ö (1999), *Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler*, First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, Sweden, pp. 333-344.
- RILEM TC 174-SCC (1997), *Self Compacting Concrete – Progress Report*. RILEM.
- RILEM, (1999), *First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, A. Skarendahl and Ö. Petersson
- Röhling, S. (2000), *Betonbau - Planung und Ausführung*. Verlag Bauwesen, Berlin.
- Sogo, S. (1985), *Properties of underwater concrete containing segregation controlling admixtures*. Marine Concrete, International Conference on Concrete in the Marine Environment, Concrete Society, London, UK.
- Skarendahl, Å. (2000), *Report 23: Self-Compacting Concrete*. State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC.
- Walraven, J. C. (2000), *How Can We Bridge The Gap Between Structural-And Material Engineers?*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 3-12
- WRI-World Resources Institute (2010), *Carbon Dioxide Capture and Storage and the UNFCCC: Recommendations for Addressing Technical Issues*. <http://www.wri.org/>.
- Zampini, D. (2009), *Future developments of concrete in the construction materials industry*. Chapter 21, pp 251-258, Vol. 1. Edtd. Thomas Telford.

ANEXOS

FICHA TÉCNICA**PROD. NO. 0420****WOERMENT FM/BV 420**

Superplastificante segundo NP EN 934-2: T 3.1/3.2

A MAIS NOVA GERAÇÃO DE SUPERPLASTIFICANTES COM BASE EM ÉTER DE POLICARBOXILATO PARA A PRODUÇÃO DE ELEMENTOS PRÉ FABRICADOS E DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL**Campo de aplicação:**

Devido à eficácia do **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** é ideal para a produção de elementos pré-fabricados incluindo betão pré-esforçado. Sendo um adjuvante altamente eficaz para a produção de betão auto-compactável, não se restringe a uma classe específica de consistência, podendo-se produzir também classes de F1 a F6. Permite o fabrico de betão com muito baixa relação água/cimento e produz betão muito durável com altas resistências iniciais e finais.

Segundo a nossa experiência o uso de **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** não é recomendado para a produção de betão com introdutor de ar.

Testes/ Certificados:

Superplastificante para betão segundo NP EN 934-2: T 3.1/3.2.

Plastificante para betão segundo NP EN 934-2: T 2

Cumprir os requisitos da DIN-V-18998.

Segundo DIN V 20000-100:2002-11, Secção 4.4, adequado para betão pré-esforçado.

Cumprir os requisitos da DIN V 20000-100:2002-11, Secção 6.

Uso em betão com agregado sensível reacção álcali DIN V 20000 - 100, 8.1.

Cumprir os requisitos da ZTV-ING e ZTV-StB 01.

Características: **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** é uma inovação no campo dos superplastificantes com base em policarboxilato de éter. A nova estrutura molecular significa que, para a hidratação das partículas de cimento, têm uma maior superfície disponível. Além disso, a adsorção das moléculas feita para as partículas de cimento é muito rápida, tendo um efeito dispersante altamente eficiente (estabilização electrostática). A soma destes efeitos resulta numa hidratação prévia. O calor resultante é utilizado de forma mais eficaz, resultando num significativo aumento das resistências iniciais.

Benefícios:

- Nova estrutura molecular com excelentes características de liquefacção.
- Melhoria das propriedades do betão.
- Significativo aumento da resistência inicial do betão.
- Aumenta a produtividade, reduz os custos.
- Reduz o tratamento térmico.
- Alto potencial de poupança de energia.
- Possível utilização de cimentos menos reactivos.

O polímero **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** foi desenvolvido para simplificar o processo de produção de produtos pré-fabricados de betão. Os custos de energia de compactação pode ser salvo, produtos e melhores condições de trabalho, a energia de aquecimento e tempos de cura pode ser significativamente reduzido.

- Dosagem:** Dosagem recomendada: 0,2 – 4,5 M% do peso do cimento.
A dosagem recomendada em casos individuais depende das propriedades requeridas para o betão e deve ser determinada com os testes iniciais.
- Aplicação:** **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** deve ser adicionado ao betão durante o último terço da água de mistura. Tempo de mistura adequado deve ser sempre assegurado.
O uso simultâneo de **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** com o retardador **LENTAN VZ 31 (VZ)** pode causar floculação no sistema de dosagem e linhas de alimentação. Recomendamos tomadas de medidas adequadas para evitar que ambos os produtos sejam misturados durante o armazenamento ou a aplicação. Se o produto for armazenado e aplicado como especificado o efeito no betão não é deteriorado.
Devem ser observados os requisitos da NP EN 206-1:2007.
- Dados técnicos:**
- | | |
|----------------------|---|
| Matéria-prima: | Policarboxílico de éter. |
| Cor: | Castanho claro. |
| Forma: | Líquido turvo. |
| Densidade (20°C) | $1,04 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ |
| pH (20°C) | $5,5 \pm 1,5$ |
| Teor em iões cloreto | $\leq 0,1 \text{ M\%}$ |
| Teor de álcalis | $\leq 0,4 \text{ M\%}$ (equivalente a Na_2O) |
- Armazenagem:** Proteger de geada e da contaminação de sujidade.
Em condições normais (selado em contentor a 20°C temperatura ambiente) **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** pode ser armazenado durante pelo menos 1 ano.
Observar os regulamentos nacionais para armazenagem de adjuvantes, instalações de armazenagem, enchimento e tratamento de água, substâncias poluentes.
- Saúde e segurança:** **WOERMENT FM 420 (FM)/BV 420 (BV)** não é substância perigosa definida pela Directiva 1999/45/EG.
- Comportamento ambiental:** Quando usado correctamente não são conhecidos efeitos prejudiciais.
Ao manusear o produto a regulamentação geral para a saúde e segurança no trabalho e de higiene deve ser observada. Se for necessário remover qualquer salpicamento, lavar roupa e pele com água.
O produto é muito fraco poluidor de água.
Poluição de águas: classe 1 (classificação do fabricante)
- Embalagem:** Granel, contentor de 1000 kg, tambor de 210 kg, vasilhas de 30 kg

Nota: A informação contida neste folheto instrução foi compilada com o melhor do nosso conhecimento e representa o estado actual dos nossos conhecimentos e experiências. No entanto, esta informação é apenas um produto descrição e sob nenhuma circunstância de uma garantia de composição ou vida útil.
O utilizador permanece vinculado a exercer as suas próprias investigações e testes a fim de assumir a responsabilidade pelo tratamento e utilização dos nossos produtos, em especial na sua área de negócio.

Esta versão do folheto substitui todas as versões anteriores.

Março, 2009 FA

FICHA TÉCNICA**PROD. NO. 0920**

ELKEM MICROSILICA 920 D

Segundo NP EN 13263-1:2005+A1:2009

**ADJUVANTE PARA BETÃO, DIOXIDO DE SILICIO AMORFO,
MICROSILICA DENSIFICADA**

**Campo de
aplicação:**

MICROSILICA 920 D é um adjuvante pozolânico ideal betões de elevada durabilidade, resistência mecânica e densos. Betões com excelente resistência aos ataques químicos são uma das principais aplicações.

A **MICROSILICA 920 D** como adjuvante para betão cumpre o estabelecido na NP EN 206-1.

Também é adequada para argamassas secas de cimento e/ou argamassas de cal, para cimentos cola ou de enchimento.

**Testes/
Certificados:**

Pó de sílica para betão de acordo com a NP EN 13263-1

Características: A **MICROSILICA 920 D** tem uma fácil dispersão e preenchimento muito eficaz, reage intensamente com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 a partir da hidratação do cimento. Devido à sua textura vítrea e elevada superfície específica (cerca de 20 m²/g) é uma sílica de fumo altamente reactiva em sistemas cimentícios. Em betão ou argamassa endurecida, ajuda a melhorar a densidade e a resistência ao ataque químico e mecânico. No betão ou argamassa fresca, melhora a coesão e retenção da água da mistura. A trabalhabilidade das argamassas é melhorada, têm melhor acabamento e são mais fáceis de limpar. Em betões ou argamassas fluidas é geralmente necessário o uso de superplastificantes para betão.

Dosagem:

Quantidade máxima permitida de adição de acordo com a NP EN 206-1: 11%M do cimento

A dosagem necessária deve ser determinada de acordo com a exigência de uma prova de aptidão.

Aplicação:

A **MICROSILICA 920 D** deve ser bem misturada ao betão. Para esse fim deve ser misturada em seco durante pelo menos 1 min. O tempo de mistura com todos os constituintes deve ser de pelo menos 3 min.

Para utilização em argamassas secas, recomenda-se que o material seja pré-misturado cerca de 1 min com os agregados grossos a seco, só então os componentes finos devem ser misturados.

A **MICROSILICA 920 D** pode ser transferida por transportadores helicoidais, convencionais para transporte e armazenamento nos silos de cimento.

Dados técnicos:	Matéria-prima: sílica amorfa. Cor: cinza. Forma: pó fino. Densidade (20°C) 0,55 – 0,65 kg/dm ³ Teor em iões cloreto ≤ 0,30 M% Teor de álcalis ≤ 1,00 M% (equivalente a Na ₂ O)
Armazenagem:	Proteger da humidade e da contaminação de sujidade. Pode ser armazenado por tempo indeterminado.
Saúde e segurança:	MICROSILICA 920 D não é substância perigosa definida pela Directiva 1999/45/EG.
Comportamento ambiental:	Quando usado correctamente não são conhecidos efeitos prejudiciais. Ao manusear o produto a regulamentação geral para a saúde e segurança no trabalho e de higiene deve ser observada. Poluição de águas: classe 1 (classificação do fabricante)
Embalagem:	Big Bag ca. de 1.000 kg, saco de 25 kg

Nota: A informação contida neste folheto instrução foi compilada com o melhor do nosso conhecimento e representa o estado actual dos nossos conhecimentos e experiências. No entanto, esta informação é apenas um produto descrição e sob nenhuma circunstância de uma garantia de composição ou vida útil.
O utilizador permanece vinculado a exercer as suas próprias investigações e testes a fim de assumir a responsabilidade pelo tratamento e utilização dos nossos produtos, em especial na sua área de negócio.

Esta versão do folheto substitui todas as versões anteriores.

Junho, 2009 FA

FICHA TÉCNICA**PROD. NO. 0100**

SR 100

**REDUTOR DE SEDIMENTAÇÃO PARA BETÃO MUITO FLUIDO OU
BETÃO AUTO-COMPATÉVEL**

**Campo de
aplicação:**

SR ® (SR) 100 é ideal para todas as aplicações onde o aumento da viscosidade do betão é vantajosa, especialmente para:

- Betão muito fluido (F5 – F6)
- Betão auto-compactável

**Testes/
Certificados:**

Aprovação técnica:

Número de autorização.: Z-3212-1957

Características: **SR ® (SR) 100** é um desenvolvimento recente de adjuvantes para betão e betão facilmente exequível. Baseado numa solução aquosa de um copolímero de elevado peso molecular sintético, através de seu espectro de actividade adaptada, permite que a viscosidade do betão seja regulada, de modo a que, se estabeleça o equilíbrio entre as propriedades aparentemente contraditórias de fluidez e de se pretender o fluxo do betão, com o ajuste da água.

Vantagens em:

- Eficiência económica: poupança nos finos (<0,125 milímetros), até cinco vezes maior produtividade do trabalho
- Ecologia: Menos ultra-finos significam menores emissões de CO₂. Aumento da durabilidade das estruturas de betão.
- Ergonomia: Não agitação - sem vibração, sem ruído. Baixa viscosidade do betão fresco.

SR ® (SR) 100 é composto por polímeros “inteligentes” solúveis em água, que se organizam independentemente, numa estrutura matricial e portanto, crucial para o equilíbrio entre a sedimentação e a capacidade de fluxo.

SR ® (SR) 100 tem um duplo efeito:

- Assegura a estabilidade do betão durante o fabrico.
- Evita a segregação quando o betão está colocado.

Dosagem:

Dosagem recomendada: 10 ml/kg do cimento.

Aplicação:

SR ® (SR) 100 é um produto pronto a usar, líquido, que é doseado na produção de betão com a adição de água. O tempo de mistura adequado deve ser sempre assegurado para homogeneização da mistura.

Dados técnicos:	Matéria-prima: Polímero sintético. Cor: Castanho claro. Forma: Líquido turvo. Densidade (20°C) $1.01 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ pH (20°C) $9,0 \pm 1,5$ Teor em iões cloreto $\leq 0,1 \text{ M\%}$ Teor de álcalis $\leq 1,0 \text{ M\%}$ (equivalente a Na_2O)
Armazenagem:	Proteger de geada e da contaminação de sujidade. Em condições normais (selado em contentor a 20°C temperatura ambiente) SR® (SR) 100 pode ser armazenado durante pelo menos 1 ano. Observar os regulamentos nacionais para armazenagem de adjuvantes (na Alemanha "Regulation on Installation for Storing, Bottling and Handling Water-Polluting Substances")
Saúde e segurança:	SR® (SR) 100 não é substância perigosa definida pela Directiva 1999/45/EG.
Comportamento ambiental:	Quando usado correctamente não são conhecidos efeitos prejudiciais. Ao manusear o produto a regulamentação geral para a saúde e segurança no trabalho e de higiene deve ser observada. Se for necessário remover qualquer salpicamento, lavar roupa e pele com água. O produto é muito fraco poluidor de água. Poluição de águas: classe 1 (classificação do fabricante)
Embalagem:	Granel, contentor de 1000 kg, tambor de 210 kg, vasilhas de 30 kg

Nota: A informação contida neste folheto instrução foi compilada com o melhor do nosso conhecimento e representa o estado actual dos nossos conhecimentos e experiências. No entanto, esta informação é apenas um produto descrição e sob nenhuma circunstância de uma garantia de composição ou vida útil.
O utilizador permanece vinculado a exercer as suas próprias investigações e testes a fim de assumir a responsabilidade pelo tratamento e utilização dos nossos produtos, em especial na sua área de negócio.

Esta versão do folheto substitui todas as versões anteriores.

Agosto, 2008 FA

FÁBRICA: SECIL - Oufão

BOLETIM Nº 12/10
DATA: 07-02-2011

REFERÊNCIA: CEM I 42,5 R
 Resultados Referentes a Dezembro/10

ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1]

IDADE	Resistência mecânica (MPa)			
	Flexão		Compressão	
	MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL
2 dias	6,2	6,1	31,1	31,9
7 dias	8,0	7,8	46,3	45,9
28 dias	9,2	8,9	59,1	58,2

ANÁLISE QUÍMICA

			MENSAL	ANUAL
Perda ao fogo	%	P.F.	2,52	3,01
Resíduo insolúvel	%	R.I.	0,57	0,89
Óxido de silício	%	SiO ₂	19,38	19,79
Óxido de alumínio	%	Al ₂ O ₃	4,35	4,37
Óxido de ferro	%	Fe ₂ O ₃	3,38	3,52
Óxido de cálcio	%	CaO	63,51	63,09
Óxido de magnésio	%	MgO	1,05	1,67
Sulfatos	%	SO ₃	2,67	2,82
Óxido de potássio	%	K ₂ O		
Óxido de sódio	%	Na ₂ O		
Cloretos	%	Cl	0,04	0,04
Cal livre	%		1,24	1,18
N/D (Não Doseado)	%			

ENSAIOS FÍSICOS

		MENSAL	ANUAL
Peso Específico (g/cm ³)		3,11	3,11
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm		
	63 µm		
	45 µm	1,8	2,0
	32 µm		
Superfície Específica de Blaine (cm ² /g) [NP EN 196-6]		4228	4360
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		28,3	28,4
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	128	124
	Fim	166	159
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		0,6	0,6
Índice de Brancura (0 a 100)			

OBSERVAÇÕES:

ANUAL - Valor médio dos últimos 12 meses.

NOTA: todos os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada].

VISTO

APROVADO


FICHA TÉCNICA DE PRODUTO: FILLER A

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Descrição do Produto: Filler A

Utilização (referências normativas): NP EN 2620 – Agregados para Betão
 NP EN 13043 – Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para Estradas, aeroportos e outras áreas de circulação
 NP EN 13139 - Agregados para argamassas

Características Técnicas do Produto

Características Técnicas do Produto



(1328)

Parapedra, Soc. Trans. de Pedras, Lda
 Casal da Fisga, Apartado 70, 2040-998 Rio Maior
 05

(1328 - CPD - 034)

Utilização		NP EN 12620	NP EN 13043	NP EN 13139
Forma das partículas	Categoria	NA	NA	NA
Dimensão	Designação	Filler	Filler	Filler
Teor de finos	Categoria	NA	NA	NA
Massa Volúmica	Valor Declarado	<3 Mg/m ³	2,75 Mg/m ³ ± 0,2 Mg/m ³	<3 Mg/m ³
Absorção de água	Valor Declarado	NA	NA	NA
Baridade	Valor Declarado	<1,5 Mg/m ³	<1,5 Mg/m ³	<1,5 Mg/m ³
Afinidade aos ligantes betuminosos	Valor Declarado	NA	NA	NA
Perc. Partículas esmagadas	Categoria	NA	NA	NA
Teor em conchas	Categoria	NA	NA	NA
Teor em água	Valor Declarado	<1 %	<1 %	<1 %
Azul-de-metileno	Valor Declarado	<10 gr./Kg	MB _{F10}	<10 gr./Kg
Equivalente de areia	Categoria	NA	NA	NA
Resistência à fragmentação	Categoria	NA	NA	NA
Resistência ao polimento	Categoria	NA	NA	NA
Resistência à abrasão	Categoria	NA	NA	NA
Resistência ao desgaste por atrito	Categoria	NA	NA	NA
Resistência à abrasão pneus pitonados	Categoria	NA	NA	NA
Teor em cloretos	Valor declarado	<0,001%	<0,001%	<0,001%
Teor em Sulfatos solúveis em ácido	Categoria/valor declarado	AS _{0,2}	<0,2 %	AS _{0,2}
Teor de enxofre total	Valor limite	<1 %	<1 %	<1 %
Constituintes do tempo de presa e resistência à compressão do betão	Resistência à compressão	Valor declarado	<20%	<20 %
	Tempo aberto	Valor declarado	<120 min.	<120 min.
Teor de Sulfato de Magnésio	Categoria	MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈
Teor de húmus	Valor Declarado	Mais claro	Mais claro	Mais claro
Retracção póe secagem	Valor Limite	NA	NA	NA
Emissão de radioactividade	Valor Limite	NA	NA	NA
Libertação de metais pesados	Valor Declarado	NA	NA	NA
Libertação de substâncias perigosas	Valor Declarado	NA	NA	NA
Resistência ao gelo-degelo	Categoria	NA	NA	NA
Reacção álcalis-silica	Valor Declarado	NA	NA	NA
Resistência ao choque térmica	Valor declarado	NA	NA	NA
Contaminantes orgânicos leves	Categoria	< 0,1%	m _{LPG} 0,1	< 0,1%
Número de betume do fíler	Categoria	NA	NA	NA
Variação da temperatura anel e bola	Categoria	NA	NA	NA

Distribuição Granulométrica

Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Máximos (%)	Limites Mínimos (%)
2	100	100	100
0,125	99,6	100	89,6
0,063	92,5	100	82,5

Data: 10/05/2011