



Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**FEUP**



Sandra Conceição Barbosa Nunes

# **BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL: TECNOLOGIA E PROPRIEDADES**

Porto, 2001





**FEUP** Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

# **BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL: TECNOLOGIA E PROPRIEDADES**

**Sandra Conceição Barbosa Nunes**

*Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil,  
realizada sob supervisão dos Professores Joaquim Figueiras e Joana Sousa Coutinho  
do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, com o apoio da "Fundação para a  
Ciência e Tecnologia".*

Setembro de 2001



# ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT .....	v
RÉSUMÉ .....	vii
ÍNDICE DO TEXTO .....	ix
TERMINOLOGIA.....	xiii
SIMBOLOGIA.....	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1.1
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE .....	2.1
CAPÍTULO 3 – DISCUSSÃO EM TORNO DA CONCEPÇÃO DE UM BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL ....	3.1
CAPÍTULO 4 – MÉTODO DE <i>OKAMURA ET AL</i> .....	4.1
CAPÍTULO 5 – FASE EXPERIMENTAL: ESTUDO DE COMPOSIÇÕES .....	5.1
CAPÍTULO 6 – FASE EXPERIMENTAL: VALIDAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES .....	6.1
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	7.1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	R.1



# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de expressar o meu sincero e profundo agradecimento ao Professor Joaquim Figueiras pela oportunidade de estudar e aprofundar conhecimentos acerca desta tecnologia emergente, e pelo precioso tempo despendido com a orientação do meu trabalho. Não posso deixar de mencionar o privilégio que é trabalhar com alguém de tão elevada categoria, não só profissional, mas também pessoal e humana.

Agradeço igualmente à Professora Joana Sousa Coutinho todo o interesse, empenho e dinamismo com que acompanhou este trabalho. Pude sempre contar com a sua ajuda e amizade, mesmo nas situações mais difíceis, pelo que, o seu contributo foi muito além de uma simples co-orientação.

Agradeço ao Professor Joaquim Sampaio a simpatia e a acumulada sabedoria que sempre partilhou no decorrer do trabalho.

Este trabalho contou também com o apoio da *Fundação para a Ciência e Tecnologia* mediante a atribuição de uma Bolsa de Mestrado de Apoio à Dissertação.

Todo o trabalho de investigação desenvolvido não teria sido possível sem a colaboração do pessoal técnico do *Laboratório de Ensaio de Materiais*, Sr. Rui e Sr. Fernando, e do *Laboratório de Estruturas*, Sr. Monteiro, Amândio e, em especial, a Paula. A todos o meu obrigada.

Não posso deixar de agradecer também o carinho e a disponibilidade demonstrados pela D. Vitória, D. Elvira, D. Clotilde, Sr. Manuel, Marta, Elizabete, D. Maria Teresa, D. Júlia, D. Paula e Sr. Pedro Morais funcionários da Secção de Estruturas, Secção de Materiais e Departamento de Civil.

Quero expressar também o meu agradecimento às empresas e, em especial, às pessoas com quem contactei mais directamente pelo apoio, materiais e produtos gentilmente cedidos: Engº Aníbal Leite - *Engil*; Sr. Fernando Jorge - *Comital*; Sr. Pimenta Nunes, Engº Paulo Esteves e Sr. Arnaldo Sousa - *Bettor MBT*; Engº José David, Drª Nídia Dias e Sr. Luís Guimarães - *Sika*.

Não esquecerei ainda o espírito de grupo, a amizade e a ajuda mútua entre os colegas de mestrado, em especial os do 15º Curso, e ainda a Cristina Costa, Ricardo Teixeira, Adelino Alves, Xavier Romão, Paulo Costeira, Fernando Vieira, Cristina Silva, Miguel Castro e Luís Nicolau, que me acompanharam mais de perto neste percurso dando-me sempre o apoio necessário.

Quero ainda agradecer a todos os Amigos que sempre acreditaram em mim e me incentivaram nos momentos de menor ânimo.

Por último, pretendo agradecer de uma forma muito especial aos meus pais e irmã por toda a ajuda, paciência e pela forma como sempre apoiaram as minhas decisões, ajudando-me vezes sem conta a superar as sucessivas dificuldades.

A todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a concretização deste trabalho os meus sinceros agradecimentos.

# Resumo

O betão auto-compactável (SCC) foi desenvolvido inicialmente para conseguir que as estruturas de betão, além de possuírem capacidade resistente adequada, respondessem cada vez mais às exigências de mão-de-obra especializada e de durabilidade. O SCC envolve um novo processo de produção e colocação de betão, cuja principal característica assenta na eliminação da vibração, de forma a diminuir o custo global da betonagem e aumentar a qualidade do produto final. O presente trabalho consiste no estudo e desenvolvimento experimental deste novo material, utilizando os materiais correntes em Portugal.

Para o efeito, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre o estado actual do conhecimento, no que diz respeito, essencialmente, aos métodos de concepção da composição, aos ensaios para avaliação das propriedades do betão no estado fresco e aos resultados que têm sido obtidos com este novo material.

Verificou-se a aplicabilidade do método proposto por *Okamura et al.* no estudo da composição de um betão auto-compactável, com diferentes conjuntos de materiais disponíveis em Portugal. Foram identificados os diferentes parâmetros da composição e foi estudada a sua influência nas propriedades mais relevantes do betão fresco. Este estudo assentou nos resultados obtidos num conjunto de ensaios que têm sido mais utilizados para caracterizar este tipo de betão, no estado fresco. Realizou-se igualmente um conjunto de ensaios de caracterização mecânica e de durabilidade do betão endurecido.

Com o objectivo de validar os aspectos evidenciados no decorrer do estudo das composições foi betonado, em laboratório, um molde de maiores dimensões, com uma geometria desfavorável, e posteriormente procedeu-se à caracterização do betão endurecido. Com a composição estudada no laboratório realizou-se um ensaio de campo que consistiu na betonagem de um muro, nas condições reais de obra. Conseguiram-se alcançar as propriedades adequadas de um SCC sem alterar significativamente os procedimentos de amassadura, transporte e colocação estabelecidos para o betão convencional. Observou-se ainda o comportamento do betão durante o tempo de espera no interior da auto-betoneira e durante a colocação.



# Abstract

Self-compacting concrete (SCC) was firstly developed to overcome the lack of skilled workers and to satisfy the durability requirements besides ensuring adequate mechanical properties. SCC involves a new production system and placing method where vibration is not needed and thus reducing the overall cost and increasing the quality of the product. The present work comprises the study and experimental development of this new material, using available raw materials in Portugal.

The state-of-the-art presented focuses mainly on the mix designing methods, the most used tests to evaluate properties of fresh concrete and on the results obtained by different authors researching this new material.

The applicability of the mix design method proposed by *Okamura et al.*, for self-compacting concrete, was appraised using Portuguese raw materials. Different parameters concerning mix design were identified and their influence on the fresh concrete properties was studied. This study was based on the results obtained from some of the tests currently used to characterize this type of concrete, in the fresh state. Mechanical characterization and durability tests were also carried out on the resulting hardened concrete.

In order to validate the aspects pinpointed during the study of the SCC mix design, a mould with larger dimensions and adverse geometry was cast in the laboratory. Later characterization of the properties of the hardened concrete was made. A full-scale test considering actual placing and casting conditions was carried out with the production of a segment of a wall made with SCC. Adequate SCC properties were obtained without significantly changing the mix proportions, transportation and the placing procedures established for conventional concrete. Behaviour of fresh concrete during the waiting period inside the truck-mixer and during the placement was also observed.



# Résumé

Le béton auto-plaçant fut développé initialement pour obtenu des structures en béton, non seulement qu'elles possèdent une capacité de résistance adéquate, mais aussi qu'elles répondent de plus en plus aux exigences d'une main d'œuvre spécialisée e de durabilité. Il s'agit d'un nouveau processus de production et mise en place du béton, pour lequel la principal caractéristique repose sur l'élimination de la vibration, de manière à diminuer le coût global du bétonnage e augmenter la qualité du produit final. Ce travail consiste à étudier le développement expérimental de ce nouveau matériau, en utilisant les matières-premières courants au Portugal.

En effet, il fut réalisé une recherche bibliographique sur le niveau actuel de connaissance, concernant essentiellement les méthodes de conception de la composition, les essais d'évaluation des propriétés du béton frais. Cette étude repose sur les résultats obtenus par une série d'essais qui sont utilisés de manière courant pour caractériser ce type de béton frais. Il fut réalisé également une série d'essais de caractérisation mécanique e de durabilité du béton obtenu.

Dans un but de valider les aspects évidenciés durant cette étude des compositions on a bétonné, en laboratoire, un moule de plus grandes dimensions, avec une géométrie défavorable, et plus tard en a procédé à la caractérisation du béton endurci. Avec la composition étudiée en laboratoire, il fut réalisé un essai en chantier qui consiste à bétonner une ouvre, dans les conditions réelles de oeuvre. On a réussi á obtenir les propriétés d'un béton auto-plaçant sans changer de manière significative les processus de malaxage, transport et mise en place établis pour un béton traditionnel. De plus, on a observé le comportement du béton pendant le temps d'attente à l'intérieur du camion malaxeur et pendant la mise en place.



# ÍNDICE DO TEXTO

## CAPÍTULO 1 – Introdução

1.1	Considerações gerais.....	1.1
1.2	Objectivos da dissertação .....	1.2
1.3	Estrutura da dissertação.....	1.3

## CAPÍTULO 2 – Estado da arte

2.1	Motivação.....	2.1
2.2	Desenvolvimento do betão auto-compactável .....	2.4
2.3	Aplicações práticas de betão auto-compactável .....	2.9
2.3.1	Japão.....	2.9
2.3.2	Suécia .....	2.16
2.3.3	Outros países.....	2.18
2.4	Vantagens económicas e técnicas do uso do betão auto-compactável.....	2.18
2.5	Situação actual e potenciais aplicações .....	2.21

## CAPÍTULO 3 – Discussão em torno da concepção de um betão auto-compactável

3.1	Conceito de betão auto-compactável.....	3.1
3.2	Efeito dos materiais constituintes .....	3.4
3.2.1	Materiais finos .....	3.4
3.2.1.1	Cimento .....	3.5
3.2.1.2	Adições .....	3.6
3.2.2	Agregados.....	3.7
3.2.3	Água .....	3.8
3.2.4	Superplastificantes.....	3.8

3.2.4.1	Interacções físicas .....	3.9
3.2.4.2	Interacções químicas.....	3.11
3.2.5	Agentes de viscosidade .....	3.12
3.2.6	Ar .....	3.14
<b>3.3</b>	<b>Formas de atingir a auto-compactabilidade .....</b>	<b>3.14</b>
3.3.1	Capacidade de enchimento .....	3.14
3.3.2	Resistência à ocorrência de segregação.....	3.16
3.3.3	Capacidade de passar entre espaços estreitos.....	3.17
<b>3.4</b>	<b>Classificação geral para o betão auto-compactável .....</b>	<b>3.19</b>
3.4.1	Betão auto-compactável do tipo finos .....	3.19
3.4.2	Betão auto-compactável do tipo agente de viscosidade .....	3.20
3.4.3	Betão auto-compactável do tipo combinação .....	3.20
<b>3.5</b>	<b>Métodos de concepção da composição de um betão auto-compactável... ..</b>	<b>3.21</b>
3.5.1	Método proposto pela JSCE .....	3.21
3.5.2	Método proposto por <i>Okamura et al.</i> .....	3.25
3.5.3	Método proposto pelo CBI .....	3.27
3.5.4	Outros métodos.....	3.30

## **CAPÍTULO 4 – Método de *Okamura et al***

<b>4.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>4.1</b>
<b>4.2</b>	<b>Descrição do método.....</b>	<b>4.2</b>
4.2.1	Caracterização dos materiais finos.....	4.9
4.2.2	Avaliação do efeito da razão água/finos e da dosagem de superplastificante nas propriedades da argamassa .....	4.9
<b>4.3</b>	<b>Avaliação das propriedades do betão fresco, em laboratório e “in-situ” ...</b>	<b>4.13</b>
4.3.1	Propriedades relevantes do betão auto-compactável fresco .....	4.13
4.3.2	A necessidade de utilizar ensaios não-normalizados.....	4.14
4.3.3	Métodos de avaliar as propriedades do betão auto-compactável fresco .....	4.15

## **CAPÍTULO 5 – Fase experimental: estudo de composições**

<b>5.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>5.1</b>
<b>5.2</b>	<b>Materiais constituintes e preparação das amostras .....</b>	<b>5.2</b>

5.2.1	Materiais.....	5.2
5.2.1.1	Cimento .....	5.2
5.2.1.2	Fíler calcário .....	5.3
5.2.1.3	Cinzas volantes .....	5.4
5.2.1.4	Agregados .....	5.5
	<i>Agregados de Valongo</i> .....	5.5
	<i>Agregados de Penacova</i> .....	5.6
5.2.1.5	Adjuvantes .....	5.8
5.2.2	Procedimentos de amassadura .....	5.9
5.2.2.1	Sequência de amassadura para as pastas .....	5.9
5.2.2.2	Sequência de amassadura para as argamassas .....	5.10
5.2.2.3	Sequência de amassadura para os betões.....	5.11
	<i>Sequência A</i> .....	5.12
	<i>Sequência B</i> .....	5.12
	<i>Sequência C</i> .....	5.12
<b>5.3</b>	<b>  Descrição do procedimento dos ensaios realizados.....</b>	<b>5.13</b>
5.3.1	Ensaio de espalhamento.....	5.13
5.3.1.1	Ensaio de espalhamento do betão.....	5.13
5.3.1.2	Ensaio de espalhamento da argamassa (ou pasta).....	5.14
5.3.2	Ensaio de fluidez .....	5.15
5.3.2.1	Ensaio de fluidez do betão .....	5.15
5.3.2.2	Ensaio de fluidez da argamassa .....	5.16
5.3.3	Ensaio de auto-compactabilidade.....	5.17
5.3.3.1	Ensaio da caixa-L .....	5.17
5.3.3.2	Ensaio da caixa .....	5.20
<b>5.4</b>	<b>  Aplicação do método de <i>Okamura et al.</i> .....</b>	<b>5.22</b>
5.4.1	Metodologia adoptada .....	5.22
5.4.2	Resultados obtidos com os materiais de Penacova 1 .....	5.29
5.4.2.1	Ensaio com as pastas.....	5.29
5.4.2.2	Ensaio com as argamassas.....	5.30
5.4.2.3	Ensaio com o betão .....	5.31
5.4.3	Resultados obtidos com os materiais de Valongo.....	5.33
5.4.3.1	Ensaio com as pastas.....	5.33
5.4.3.2	Ensaio com as argamassas.....	5.35
5.4.3.3	Ensaio com o betão .....	5.40
5.4.4	Resultados obtidos com os materiais de Penacova 2.....	5.46
5.4.4.1	Ensaio com as argamassas.....	5.46

5.4.4.2	Ensaio com o betão .....	5.47
---------	--------------------------	------

## **CAPÍTULO 6 – Fase experimental: validação das composições**

<b>6.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>6.1</b>
<b>6.2</b>	<b>Ensaio sobre elemento em U – Agregados 1 .....</b>	<b>6.3</b>
6.2.1	Caracterização do betão no estado fresco .....	6.3
6.2.2	Caracterização do betão no estado endurecido .....	6.6
6.2.2.1	Resistência superficial .....	6.7
6.2.2.2	Resistência à compressão .....	6.10
6.2.2.3	Módulo de elasticidade .....	6.15
6.2.2.4	Absorção por capilaridade .....	6.15
6.2.2.5	Resistência à penetração dos cloretos .....	6.20
<b>6.3</b>	<b>Ensaio sobre elemento em U - Agregados 2.....</b>	<b>6.25</b>
6.3.1	Caracterização do betão no estado fresco .....	6.26
6.3.2	Caracterização do betão no estado endurecido .....	6.29
6.3.2.1	Resistência à compressão .....	6.30
6.3.2.2	Absorção por capilaridade .....	6.32
6.3.2.3	Acabamento da superfície .....	6.34
<b>6.4</b>	<b>Experiência-piloto .....</b>	<b>6.36</b>

## **CAPÍTULO 7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros**

<b>7.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>7.1</b>
<b>7.2</b>	<b>Desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>7.2</b>

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....R.1**

# Terminologia

<b>acrylic-based water-soluble polymers</b>	polímeros à base de acrílico solúveis em água
<b>belite-rich portland cement</b>	cimento portland rico em silicato bicálcio
<b>binder</b>	ligante
<b>bio-polymers</b>	bio-polímeros
<b>bleeding</b>	exsudação
<b>blocking resistance</b>	resistência ao bloqueio
<b>box-test</b>	ensaio da caixa
<b>cellulose-based water-soluble polymers</b>	polímeros à base de celulose solúveis em água
<b>deformability</b>	deformabilidade
<b>filling ability</b>	capacidade de enchimento
<b>fly ash</b>	cinzas volantes
<b>glycol-based water soluble polymers</b>	polímeros à base de glicol solúveis em água
<b>high-performance concrete</b>	betão de elevado desempenho
<b>J-ring test</b>	ensaio do anel japonês
<b>L-box test</b>	ensaio da caixa-L
<b>limestone powder</b>	fíler calcário
<b>mortar-flow test</b>	ensaio de espalhamento da argamassa
<b>mortar-funnel test</b>	ensaio de fluidez da argamassa
<b>paste-flow test</b>	ensaio de espalhamento da pasta
<b>Orimet-test</b>	ensaio do “Orimet”
<b>powder</b>	finos
<b>segregation resistance</b>	resistência à ocorrência de segregação
<b>self-compactability</b>	auto-compactabilidade
<b>self-compacting concrete</b>	betão auto-compactável
<b>slump-flow test</b>	ensaio de espalhamento do betão
<b>sorptivity</b>	coeficiente de absorção
<b>superplasticizer</b>	superplastificante
<b>U-box test</b>	ensaio da caixa-U
<b>V-funnel test</b>	ensaio de fluidez do betão
<b>viscosity</b>	viscosidade

**viscosity agent**

agente de viscosidade

**water retaining ratio**

razão volumétrica água/finos correspondente a  
deformação nula da pasta

**workability**

trabalhabilidade

**yield value**

tensão de cedência

# Simbologia

$\alpha$	factor de majoração da razão volumétrica água/finos, determinada através dos ensaios com a argamassa
$\beta_p$	razão volumétrica água/finos correspondente a deformação da pasta nula
<b>D<sub>ns</sub></b>	coeficiente de difusão aparente
<b>E<sub>p</sub></b>	factor de deformação
<b>f</b>	percentagem de substituição de cimento por filler
<b>f<sub>c</sub></b>	resistência do betão à compressão
<b>G<sub>p</sub></b>	área de espalhamento relativa para as pastas
<b>G<sub>m</sub></b>	área de espalhamento relativa para as argamassas
<b>H2/H1</b>	razão entre as alturas atingidas pelo betão, no final do ensaio da caixa-L, na parte da frente e parte de trás da caixa
<b>ksf<sub>i</sub></b>	percentagem de partículas consideradas como finos na areia $i$
<b>R<sub>m</sub></b>	tempo de escoamento relativo para argamassas
<b>R<sub>c</sub></b>	tempo de escoamento relativo para betão
<b>S</b>	percentagem do volume de argamassa correspondente ao agregado fino
<b>si</b>	percentagem volumétrica da areia $i$ na composição do agregado fino
<b>S<sub>p/p</sub></b>	dosagem de superplastificante relativamente à massa de finos
<b>T50</b>	tempo que o betão demora a alcançar o diâmetro de 50cm, no ensaio de espalhamento do betão
<b>T20</b>	tempo que o betão demora a alcançar a marca dos 20cm, no ensaio da caixa-L
<b>T40</b>	tempo que o betão demora a alcançar a marca dos 40cm, no ensaio da caixa-L
<b>V<sub>a</sub></b>	volume de ar
<b>V<sub>ap</sub></b>	volume aparente de agregado grosso
<b>V<sub>g</sub></b>	volume de agregado grosso

<b><math>V_{g,lim}</math></b>	volume de agregado grosso correspondente a um volume aparente de $1m^3$ , no estado compactado
<b><math>V_p</math></b>	volume de finos
<b><math>V_s</math></b>	volume de agregado fino
<b><math>V_w</math></b>	volume de água
<b><math>V_w/V_p</math></b>	razão volumétrica água/finos
<b><math>w/c</math></b>	razão entre a massa de água e a massa de cimento
<b><math>w/p</math></b>	razão entre a massa de água e a massa de finos

# Capítulo 1

## Introdução

---

### 1.1 Considerações gerais

Durante os últimos 20 anos, os trabalhos de investigação relacionados com o material betão estrutural têm incidido na melhoria de algumas características importantes de forma a produzir variedades de betão que exibam propriedades mecânicas e físicas superiores às definidas nas normas e regulamentos. São os designados betões de elevado desempenho. Inicialmente, o objectivo principal destes betões consistia em melhorar as características mecânicas, em especial a resistência à compressão (com o “Reactive Powder Concrete” já se atingiram resistências superiores a 200MPa [Walraven, 2000]). As questões relacionadas com a durabilidade têm constituído, mais recentemente, motivo de grande interesse por parte da comunidade científica em virtude dos custos astronómicos de reparação e reabilitação das estruturas de betão armado e pré-esforçado. Como consequência, sabe-se hoje que a resistência à penetração dos cloretos, resistência à acção de gelo e degelo, ou o aumento da resistência ao ataque químico são conseguidas à custa de uma densidade elevada do betão de recobrimento. Porém, a durabilidade das estruturas de betão é em grande medida o resultado da qualidade da produção. As dificuldades de colocação do betão, como é o caso da compactação em zonas

densamente armadas reflectem-se, cada vez mais, nos requisitos que se colocam ao betão correspondendo a níveis de exigência mais elevados.

Praticamente todo o betão, correntemente aplicado na construção actual, exige compactação forçada para atingir grande compacidade compatível com as resistências e durabilidade requeridas. O método de compactação privilegiado é a vibração do betão fresco com agulha, após colocação no interior das cofragens. Contudo, a vibração provoca atrasos e custos acrescidos. Além disso, poderá ser uma fonte de sérios problemas de saúde tanto para as pessoas da obra bem como da zona circundante do local de construção.

Recentemente, foi desenvolvido um novo betão sob o nome de “self-compacting concrete” (betão auto-compactável). Com este novo material a necessidade de vibração foi completamente eliminada, pelo que, muitas vezes é descrito como “tolerante”, porque não é sensível a variações da qualidade da mão-de-obra, e “silencioso” pela eliminação do ruído. Em certos casos de utilização deste a resistência deixa de ser utilizada como indicador da qualidade do betão passando a ser a trabalhabilidade. Walraven defende que o “betão de desempenho definido” será o sucessor lógico do “betão de elevado desempenho” [Walraven, 2000], ou seja, as composições deixam de ser estudadas na base da resistência, mas gradualmente alargam-se a outras exigências de desempenho, desde as propriedades no estado fresco até ao comportamento a longo prazo.

## 1.2 Objectivos da dissertação

O presente trabalho teve como objectivos principais o estudo e desenvolvimento experimental da tecnologia emergente do betão auto-compactável, recorrendo a materiais portugueses. Dado tratar-se de um assunto relativamente desconhecido em Portugal, a revisão do estado actual do conhecimento sobre SCC desenvolvido em países estrangeiros foi essencial para o avanço deste trabalho.

No que respeita à parte experimental, os objectivos fundamentais foram a definição da composição utilizando materiais portugueses, a avaliação das propriedades do SCC fresco, identificação dos ensaios existentes e realização de alguns deles, e finalmente a caracterização do betão endurecido resultante. Outro objectivo importante deste trabalho foi, no final, a realização de uma aplicação prática, em obra, utilizando uma das composições estudadas.

Em síntese, a satisfação dos objectivos fundamentais acima referidos é visada através do cumprimento do seguinte conjunto de objectivos parcelares:

- 1 - Elaboração de uma pesquisa bibliográfica sobre o estado actual do conhecimento no que respeita a este novo material.
- 2 - Estudo dos métodos de definição da composição e, simultaneamente, identificação dos diversos ensaios existentes para o betão fresco.
- 3 - Avaliação dos resultados obtidos com o estudo das composições e validação das mesmas recorrendo a ensaios à escala real levados a cabo, inicialmente, no laboratório e depois em obra. Estes ensaios incluem o betão fresco e endurecido.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada da seguinte forma.

O CAPÍTULO 1 está reservado à descrição dos objectivos e da estrutura que constituem o presente trabalho.

No CAPÍTULO 2 apresenta-se a evolução do conhecimento sobre betão auto-compactável até ao seu estado actual, referindo as principais motivações e grupos de investigação responsáveis pelo seu desenvolvimento. Inclui-se ainda, uma descrição de algumas aplicações práticas de maior relevância.

No CAPÍTULO 3 discute-se a concepção da composição de um betão auto-compactável, incluindo a influência de cada um dos seus materiais constituintes e, mais especificamente, os métodos propostos por diferentes autores.

No CAPÍTULO 4 apresenta-se com maior detalhe um dos métodos referidos no CAPÍTULO 3, o método proposto por *Okamura et al.*, e os diferentes ensaios para a avaliação das propriedades do betão fresco.

No CAPÍTULO 5 descreve-se a metodologia adoptada na parte experimental relativa ao estudo de composições e apresentam-se os resultados obtidos, por aplicação do método de *Okamura et al.*

No CAPÍTULO 6 descrevem-se as experiências realizadas, em laboratório e em obra, com o objectivo de validar as composições finais resultantes do estudo apresentado no CAPÍTULO 5.

No CAPÍTULO 7 apresentam-se as conclusões retiradas no âmbito do presente trabalho e algumas questões de maior interesse para abordar em desenvolvimentos futuros.

## Capítulo 2

### Estado da arte

---

#### 2.1 Motivação

O betão aplicado correntemente nas estruturas depende directamente de uma compactação eficiente, durante a colocação, para atingir a resistência e durabilidade exigidas. Uma compactação insuficiente tem como consequência uma redução drástica do desempenho estrutural, independentemente da qualidade da produção e da própria composição do material. Habitualmente, o betão é compactado por vibradores operados por trabalhadores sem qualquer formação específica, sendo também difícil a supervisão deste processo, como se pode observar na Figura 2.1. Em resultado, são visíveis com frequência na superfície do betão zonas de compactação incompleta ou os designados “ninhos de brita” exigindo posteriormente trabalhos de reparação, estes também de difícil execução e dispendiosos. As zonas ainda mais críticas são as que se formam no interior da massa de betão e escapam à observação visual. Um exemplo de situação favorável à formação destas zonas refere-se às regiões com elevada densidade de armadura que dificulta o acesso e vibração eficaz, e para as quais o betão convencional tem

dificuldade em encontrar um caminho por entre a armadura para preencher todos os espaços vazios.



Figura 2.1 – Aspecto geral de uma betonagem com betão convencional

Deste modo, os métodos normalizados para verificação da resistência do betão obtida à custa do ensaio de provetes moldados separadamente, e devidamente compactados, não podem ser representativos do betão insuficientemente compactado colocado “in-situ”. Muitas vezes, esta situação é confirmada pelos testes realizados em carotes extraídas das obras, evidenciando diferenças cuja justificação não pode ficar a dever-se exclusivamente ao processo de cura.

As consequências da utilização dos vibradores de betão são igualmente prejudiciais para os seus operadores. Um dos malefícios é a própria vibração transmitida aos operadores dos vibradores de agulha responsável por perturbações na circulação sanguínea, uma doença designada “white finger syndrome”. Por outro lado, o ruído no local da construção e na zona circundante é incomodativo e prejudicial para as pessoas que ocupam esses espaços sendo a vibração identificada como uma das suas causas principais, quer esta seja levada a cabo por vibradores de agulha, vibradores acoplados à cofragem ou mesas vibratórias. Adicionalmente, o esforço físico exigido aos trabalhadores na movimentação das mangueiras da bombagem, equipamento do vibrador, etc., é também bastante significativo. Além disto, é provável que o desenvolvimento do betão auto-compactável torne a construção em betão mais atractiva, em substituição de outros materiais de construção, aumentando assim as possibilidades de recrutamento de pessoal [Bartos, 2000].

Do exposto anteriormente pode concluir-se que os principais motivos para a eliminação da necessidade de vibração do processo construtivo são do conhecimento geral desde há bastante

tempo atrás. No início dos anos 80, no Japão, surgiu uma preocupação séria com a falta de homogeneidade do betão e a consequente falta de durabilidade, observada em algumas das estruturas existentes. A causa essencial para as deficiências observadas foi atribuída às técnicas correntes de colocação e compactação. De notar que neste país as dificuldades de compactação são agravadas pelo uso de um acréscimo de armadura devido a requisitos relacionados com uma forte acção sísmica. A par disto, na indústria da construção japonesa, verificou-se uma redução gradual de mão-de-obra especializada conduzindo igualmente a uma redução da qualidade da construção. Ao mesmo tempo, foram também tidas em consideração as questões ligadas à saúde, segurança e meio ambiente, discutidas anteriormente. Desta forma, no Japão, os procedimentos habituais de colocação do betão foram, cada vez mais, considerados dispendiosos, ineficientes, ultrapassados e inadequados para zonas urbanas com elevada densidade populacional [Okamura, 1997]. Como resposta a este conjunto de preocupações foi desenvolvido o betão auto-compactável (SCC – “self-compacting concrete”) , ver Figura 2.2. Em termos gerais, este novo material teria que satisfazer às seguintes exigências:

- eliminar, por completo, a necessidade de vibração;
- permitir que fosse simplesmente vazado para o interior da cofragem ou bombado;
- reduzir o número de trabalhadores durante o processo de colocação;
- melhorar a qualidade global das estruturas que “sairiam bem à primeira”;
- representar um grande passo para a racionalização e um primeiro passo para a industrialização da construção em betão;
- ser mais económico, o que constituiria uma condição essencial para a aceitação de qualquer inovação, melhorando a competitividade das empresas que optassem pelo seu emprego.

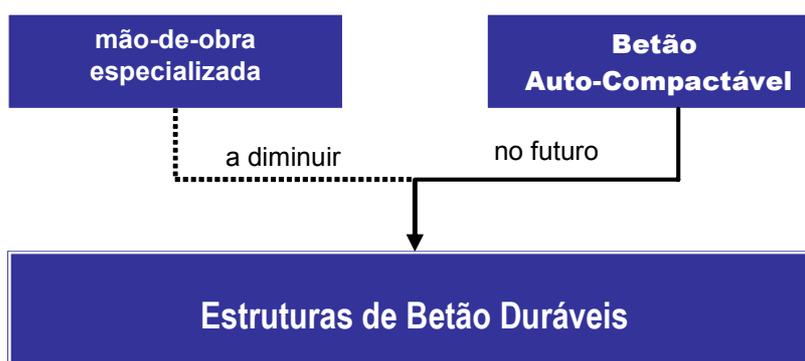


Figura 2.2 – Motivação para o desenvolvimento do SCC

Num estudo económico desenvolvido em 1993 sobre as possíveis reduções de custos concluiu-se que com o SCC seria possível poupar 10% em mão-de-obra, quando utilizado convencionalmente, e até 50% quando utilizado em conjunto com um sistema construtivo

moderno semi-industrializado [Gibbs, xxxx]. Deste modo, não é de surpreender que o grande impulso para o desenvolvimento desta tecnologia tenha vindo da parte de grandes empreiteiros japoneses como *Maeda, Taisei e Kajima Corporations*.

## 2.2 Desenvolvimento do betão auto-compactável

Mesmo antes do advento dos superplastificantes e outros adjuvantes surgiram situações nas quais o betão foi colocado em condições que tornavam a compactação impraticável. As betonagens submersas, a betonagem de estacas e o preenchimento de espaços inacessíveis exigiam das composições um comportamento adequado, no estado fresco, sem necessitarem de ser compactadas. Betonagens deste tipo foram já realizadas com sucesso, mas frequentemente na ausência de armadura e recorrendo a procedimentos de colocação muito mais exigentes e, por isso, dispendiosos. A quantidade de cimento destas misturas excedeu muitas vezes os  $450\text{kg/m}^3$  e os seus efeitos secundários combinados com custos elevados restringiram a aplicação destes primeiros SCC's, apenas, em projectos especiais. A introdução dos superplastificantes permitiu a produção de composições mais fluidas no estado fresco, atingindo elevadas resistências sem exigir conteúdos excessivos em cimento. Contudo, a elevada trabalhabilidade foi conseguida à custa de uma resistência à segregação e exsudação muito mais reduzida, e isto, mais uma vez, restringiu a gama de aplicações práticas. A falta de estabilidade de alguns betões fluidos enfraquece a interface entre os agregados e a pasta de cimento, o que aumenta a tendência para desenvolver microfendilhação, aumentando a permeabilidade e reduzindo as propriedades mecânicas. Em diversos países, os adjuvantes aumentaram a trabalhabilidade do betão para valores do abaixamento de 120-150mm, mesmo assim necessitando de uma certa compactação [Bartos e Grauers, 1999].

A fase final do desenvolvimento das composições de betão auto-compactável começou com a investigação do comportamento do betão submerso, no estado fresco, levada a cabo desde meados dos anos 80 no Reino Unido (Paisley), América do Norte (Sherbrooke), Canadá e Estados Unidos (US Army Engineer Waterways Experiment Station) e Japão (Universidade de Tóquio). Esta fase conduziu a composições com elevada resistência à lavagem durante a colocação, o que constituiu uma grande vantagem resultando numa colocação submersa mais segura e económica. O exigido elevado desempenho foi conseguido à custa da adição, bem controlada, de diferentes agentes de viscosidade. O objectivo consistia em aumentar suficientemente a coesão interna do betão para alcançar a desejada resistência à lavagem sem prejudicar demasiado a trabalhabilidade; o betão deveria manter-se auto-compactável. A ideia de alargar o campo de aplicação deste tipo de composições, para além das aplicações submersas, foi sugerida pelo Prof. *Okamura* [Okamura e Ouchi, 1999] da Universidade de Tóquio, em 1986.

De início julgou-se que seria tarefa fácil uma vez que o betão submerso já era aplicado na prática. No entanto, descobriu-se que este tipo de betão não é aplicável em estruturas expostas ao ar porque a elevada viscosidade impede a libertação do ar aprisionado no interior do betão e, por outro lado, verificaram-se dificuldades na compactação de zonas muito confinadas devido à presença das armaduras. Desta forma, na Universidade de Tóquio, foram levados a cabo estudos para desenvolver o SCC, começando por um estudo fundamental sobre a trabalhabilidade do betão desenvolvido por *Ozawa e Maekawa* [Okamura e Ouchi, 1999].

O protótipo do “self-compacting concrete” foi terminado pela primeira vez em 1988, utilizando materiais já existentes no mercado. Este protótipo comportava-se satisfatoriamente no que respeita à retração, calor de hidratação, densidade após cura, e outras propriedades e foi inicialmente denominado de “high performance concrete”. Ao mesmo tempo, o Prof. *Aitcin* definiu “high performance concrete” como um betão com elevada durabilidade devido a uma razão água/cimento baixa. Desde então a designação de “high performance concrete” (betão de elevado desempenho) tem sido usada em todo o mundo para designar um betão com elevada durabilidade e/ou resistência. Assim, os autores alteraram a designação do betão proposto para “self-compacting high performance concrete”.

No ano seguinte, na Universidade de Tóquio, foi realizada uma demonstração do funcionamento deste novo material no estado fresco para a qual foram convidados a assistir uma centena de investigadores e engenheiros, especialistas na área do betão. Para o ensaio foram utilizados dois moldes de plástico transparente (semelhantes) contendo no seu interior vários tubos agrupados igualmente transparentes e com uma distância entre eles relativamente reduzida. Cada molde pretendia simular uma secção de betão armado com elevada densidade de armadura. O objectivo da experiência consistiu em encher ambos os moldes durante um período limitado de tempo, um deles com betão convencional e o outro com betão auto-compactável. Obviamente, ao contrário do betão convencional, deixou-se o SCC consolidar apenas por acção da gravidade sem beneficiar de qualquer assistência mecânica. Com o betão convencional foi possível observar diversos buracos e cavidades, denunciando uma compactação deficiente, enquanto com betão auto-compactável conseguiu-se o enchimento perfeito de todo o molde. Depois do sucesso desta demonstração pública iniciou-se investigação intensiva em diversos lugares, especialmente nos institutos de investigação de grandes companhias de construção japonesas e na Universidade de Tóquio. De referir que estas empresas estão dotadas de meios extraordinários e elevada capacidade técnica, dispendo de laboratórios próprios onde empregam centenas de investigadores, o que lhes permite desenvolver novas tecnologias de forma completamente autónoma. Assim aconteceu com o betão auto-compactável, cada empresa desenvolveu a sua própria solução (por exemplo, “SQC” da *Maeda Co.*, “Biocrete” da *Taisei Co.* ou “NV Concrete” da *Kajima Co.*), passando mesmo pelo estudo de novos adjuvantes com

características específicas adequadas a este novo material, e têm vindo a aplicar este SCC “moderno” em grandes quantidades e num número crescente de projectos [Bartos e Grauers, 1999].

Em Janeiro de 1989, *Ozawa* apresentou o primeiro artigo sobre SCC no “2<sup>nd</sup> East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2)”. Mais tarde, a apresentação de *Ozawa* no “CANMET & ACI International Conference” em Istambul, Maio de 1992, permitiu a divulgação do conceito do “self-compacting concrete” pelo mundo inteiro. Depois do workshop ACI, sobre betão de elevado desempenho promovido pelo Prof. *Paul Zia*, em Bangkok, Novembro de 1994, o betão auto-compactável passou a ser um ponto de interesse comum de investigadores e engenheiros de todo o mundo, que se interessavam pelos problemas da durabilidade do betão e pela racionalização do processo construtivo. Em 1996, a “Ferguson Lecture by Okamura” na “ACI Fall Convention”, que decorreu em New Orleans, despertou também o interesse dos investigadores e engenheiros da América do Norte [Okamura e Ouchi, 1999].

No Japão, foi publicado um conjunto de manuais e recomendações sobre a utilização de SCC, por diferentes organizações:

- “*Recommendations for Mix Design and Construction Practice of High Fluidity Concrete*” (The Architectural Institute of Japan);
- “*Recommendations for Self-Compacting Concrete*” (The Japan Society of Civil Engineers);
- “*Manual for manufacturing Self-Compacting Concrete*” (The Ready-Mixed Concrete Industry Association, Japan).

O primeiro seminário sobre SCC decorreu em Kochi, Japão, Agosto de 1998, onde se decidiu estabelecer uma rede de intercâmbio de informação, usando um web-site na internet “International Network for Self-Compacting Concrete (SCC-Net)”. Esta página da internet entrou em funcionamento em Fevereiro de 1999 e pode ser consultada no seguinte endereço: <http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/>.

Apesar do grande desenvolvimento ocorrido no Japão, as empresas de construção desenvolveram os seus próprios sistemas independentemente e em competição entre elas. Mesmo havendo recomendações gerais também já publicadas nesse país, o conhecimento manteve-se de alguma forma fragmentado, particularmente no que respeita às práticas e materiais europeus. Para remediar esta situação foram levados a cabo diversos esforços de cooperação a nível europeu, para investigar e descrever as propriedades do SCC de uma forma generalizada.

Os parágrafos seguintes pretendem fornecer um resumo temporal dos desenvolvimentos mais relevantes a nível europeu.

Em Janeiro de 1997 formou-se um comité técnico da RILEM “The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures”, TC 174-SCC, com o objectivo de reunir, analisar e apresentar o estado da arte desta tecnologia emergente assim como procurar ideias unificadas no que respeita à avaliação e ensaio das propriedades essenciais. Foi criado também um projecto Brite-Euram de grande dimensão (3 milhões de Euros), financiado pela comunidade europeia, sob o tema “Rational Production and Improved Working Environment through Using Self Compacting Concrete” (1997-2000). O projecto contou com a parceria de duas empresas de construção de grande dimensão (*NCC* – Suécia e *GTM* – França) em colaboração com especialistas de centros de investigação e universidades (“Advanced Concrete and Masonry Centre” – Universidade de Paisley na Escócia, “Laboratoire Central des Ponts et Chaussées” – França, “Swedish Cement and Concrete Research Institute” e “Technical University of Lulea” – Suécia) e ainda fabricantes de fibras e adjuvantes. Este projecto foi subdividido em duas partes, a primeira parte dizia respeito ao desenvolvimento do betão auto-compactável com e sem fibras de aço; e a segunda parte tratava das experiências à escala real, tanto para aplicações mais correntes (habitação) como em obras-de-arte. O objectivo principal consistiu em desenvolver métodos de produção e transporte adequados para SCC e a optimização da organização da obra tornando a construção mais competitiva e com custos reduzidos. Adicionalmente, a nível nacional, foram iniciados programas de investigação e desenvolvimento em países como França, Suécia e Islândia e as “Concrete Society” de Inglaterra e França estabeleceram grupos de trabalho para produzir recomendações para SCC [Bartos e Grauers, 1999].

A indústria da construção holandesa mostrou-se também bastante interessada neste material. Em 1993, o Prof. *Walraven* visitou o laboratório do Prof. *Okamura*, na Universidade de Tóquio, onde tomou conhecimento da tecnologia e propriedades deste novo material e, de volta ao seu país, divulgou-o junto dos produtores de betão procurando apoios para desenvolver investigação neste assunto. No período entre 1995 e 1996 foi adquirida experiência inicial com o betão auto-compactável. Em 1996, o grupo do Prof. *Walraven* recebeu apoio financeiro por parte da “Technical Sciences Foundation” para desenvolver investigação fundamental sobre as propriedades do material. A vinda para Delft em 1996, por um período de dois anos, do investigador convidado japonês *Kazunori Takada*, que havia adquirido experiência trabalhando como técnico de investigação para a empresa de construção *Kajima*, constituiu uma mais-valia preciosa para o grupo de trabalho de Delft com a introdução do “know-how” japonês. Depois de introduzido o método de concepção da mistura japonês, em 1997, demonstrou-se ser possível fazer SCC resistente à segregação com os materiais holandeses. Quando, baseados na investigação desenvolvida na Universidade de Delft, os fornecedores de betão-pronto revelaram a

capacidade de produzir SCC, por questões de competitividade, a indústria de pré-fabricação teve de reagir. Após ter falhado uma tentativa inicial de estreita cooperação com a indústria de betão-pronto, para um maior desenvolvimento do SCC, os 24 membros da “Precast Concrete Industry” holandesa (BELTON), em 1998, iniciaram um projecto de investigação independente para desenvolver SCC com materiais holandeses. Este projecto contou também com a cooperação da empresa japonesa *Kajima*, que ofereceu formação teórica e experimental a um grupo de representantes da BELTON no “Kajima Technical Research Institute”, em Tóquio, funcionando também como consultor para as fases seguintes de desenvolvimento do projecto. Este projecto é especial na medida em que a investigação semi-fundamental foi desenvolvida, na sua maioria, nos laboratórios das diversas companhias pelo seu próprio pessoal, segundo procedimentos rigorosamente definidos. No final, o conhecimento adquirido será transferido para a totalidade das 24 companhias e partilhado com a *Kajima*.

Em Setembro de 1999, na Suécia, decorreu o “First International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete” organizado pelo comité técnico 174-SCC da RILEM. Este simpósio contou com um total de 67 comunicações, com o contributo de 13 países, dos quais se destacam o Japão e a Suécia. As comunicações tratam da análise do mecanismo de orientação das partículas baseadas num comportamento reológico aproximado, propriedades no estado fresco e endurecido, estudo da composição, assim como, o desenvolvimento de diversos adjuvantes e adições. Aproximadamente 20 comunicações reportam para a experiência adquirida em aplicações práticas, o que confirma que a investigação realizada até então conduziu ao desenvolvimento de trabalhos de aplicação, assim como, o uso na construção corrente.

Alguns dos resultados obtidos com os trabalhos desenvolvidos no âmbito do projecto europeu Brite-Euram já se encontram disponíveis na internet (<http://www.scc.ce.luth.se/>) e os restantes serão divulgados brevemente. Entretanto foi iniciado um novo projecto – FP5 Brite-Euram SCC Project (2001-2004) – com o objectivo de desenvolver os ensaios de verificação da conformidade do betão, no estado fresco. No que respeita a recomendações europeias, foram publicadas:

- “*Betons Auto-Plaçants. Recommandations provisoires*” (Association Francaise de Génie Civil), Julho 2000;
- “*Self-Compacting Concrete*” (State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC), 2001.

As primeiras apontam para as principais questões que se colocam em relação a este novo tipo de betão e identificam os assuntos que ainda necessitam de ser investigados nesta matéria constituindo, desta forma, o trabalho de base para o início do futuro “Project National”. No ano

corrente publicaram-se também recomendações por parte da Suécia, com larga experiência na aplicação prática deste material. Na Holanda estão também a preparar-se as recomendações nacionais.

Em Portugal, o primeiro artigo que apresenta o conceito deste novo material e do seu interesse no fabrico e colocação do betão estrutural foi apresentado em 1999, nas “3<sup>as</sup> Jornadas de Estruturas de Betão” [David, 1999] e a primeira aplicação em obra no “1º Congresso Nacional da Indústria de Pré-Fabricação em Betão” [Sampaio, 2000].

Nos próximos dias 23-25 de Outubro 2001 decorrerá o “Second International Symposium on Self-Compacting Concrete”, na Universidade de Tóquio, que irá possibilitar a actualização da informação acerca do betão auto-compactável e permitir a sempre valiosa troca de ideias. De entre as questões ainda não suficientemente estudadas, no que respeita ao SCC, a organização do congresso identificou as questões da durabilidade a longo prazo e “life cycle cost” como aquelas para as quais é urgente obter resposta. Pretende-se que este congresso forneça um contributo positivo nesse sentido.

## 2.3 Aplicações práticas de betão auto-compactável

Ao longo do desenvolvimento do SCC, o número de aplicações práticas foi crescendo, no início, mais intensamente no Japão e depois em alguns países da Europa e no exterior. Os pontos seguintes pretendem apresentar, de forma sucinta, para diversos países, exemplos de situações onde a aplicação de SCC se revelou do maior interesse.

### 2.3.1 Japão

Após o desenvolvimento do protótipo do SCC na Universidade de Tóquio, iniciou-se uma investigação intensiva em diversos lugares, especialmente nos institutos de investigação de grandes companhias de construção. Como resultado, o SCC tem tido aplicação prática em diversas estruturas. A primeira aplicação de SCC ocorreu num edifício em Junho de 1990 e o SCC foi depois utilizado nas torres de uma ponte atirantada em 1991. Foi aplicado betão auto-compactável leve na viga principal de uma ponte atirantada em 1992 e, desde então, o uso do SCC nas estruturas actuais tem aumentado gradualmente. Correntemente as principais razões que motivam o emprego deste betão são a redução do período de construção, a garantia de compactação do betão em toda a estrutura, em particular nas zonas de difícil acesso, e a redução

do ruído devido à vibração, especialmente na pré-fabricação em betão [Okamura et al., 2000]. As principais aplicações do SCC resumiam-se seguidamente:

- pontes (ancoragens, arcos, vigas, torres, juntas);
- “box culvert”;
- edifícios;
- colunas de aço preenchidas com betão;
- túneis;
- barragens;
- produtos de betão (blocos, paredes, tanques de água, lajes).

O betão auto-compactável é correntemente aplicado para reduzir o período de construção em obras de grande dimensão. Um exemplo típico é a ponte “Akashi-Kaikyo (Straits)” posta em serviço em Abril de 1998, uma ponte suspensa com um comprimento total de 3911m cujo vão central com 1991m constitui um recorde mundial. Os maciços de ancoragem que suportam os cabos principais da ponte apresentam um comprimento de 84.5m, 63m de largura e 47.5m de altura. Assim, revelou-se particularmente importante reduzir o tempo de construção desta estrutura de betão “gigantesca”. Para tal foi desenvolvido e utilizado com sucesso um betão auto-compactável para racionalizar o trabalho e reduzir as necessidades de mão-de-obra. Isto foi particularmente importante em zonas com elevada densidade de armadura, como as amarrações das cabeças de ancoragem que congestionavam os referidos maciços, ver Figura 2.3. As vantagens decorrentes da redução da mão-de-obra e do tempo de compactação ficaram a dever-se à elevada fluidez e resistência à segregação do betão. O volume de betão auto-compactável utilizado na construção destas ancoragens foi de 290000m<sup>3</sup> [Kashima et al., 1998].



Figura 2.3 – Betonagem de uma das ancoragens da ponte de “Akashi Kaikyo”

Visto tratar-se de uma betonagem em massa foram tomadas algumas medidas para evitar o aumento excessivo da temperatura, após a colocação, tais como a utilização de um cimento de baixo calor de hidratação, o arrefecimento prévio dos agregados e da água de amassadura, e o arrefecimento da tubagem após cada betonagem. A dimensão máxima do agregado utilizado foi de 40mm, para se obter a massa volúmica exigida e reduzir a dosagem de cimento. Apesar da elevada dimensão do agregado grosso o betão foi lançado de uma altura variável de 1.5 a 3.5m. Para assegurar a fluidez incorporou-se um agente introdutor de ar e redutor de água, e para conseguir uma resistência à segregação adequada utilizou-se filer calcário.

Adoptou-se também um sistema de construção novo, mais racional, para obter o máximo proveito do desempenho do betão auto-compactável. O betão foi misturado numa central de betão, montada especialmente para o efeito, e bombado ao longo de tubagem de 200m até ao local da aplicação, onde as saídas eram dispostas com afastamento de 3 a 5m. O betão foi depositado por meio de válvulas localizadas em intervalos de 5m ao longo da tubagem e que eram controladas automaticamente de forma a manter a superfície do betão a um determinado nível. Numa análise final, o uso do SCC reduziu o tempo de construção das ancoragens em 20%, isto é, de 2.5 para 2.0 anos, ver Figura 2.4.

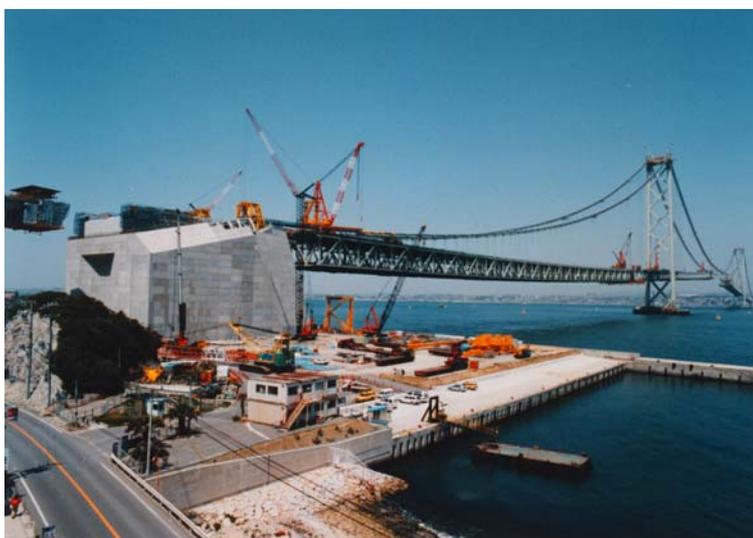


Figura 2.4 – Aspecto final de um dos blocos de ancoragem

Em cada fase do processo construtivo, o controle de qualidade fez-se do seguinte modo:

- controle dos materiais de construção, medindo o teor de humidade dos agregados para cada mistura;

- controle do betão fresco, medindo o diâmetro de espalhamento e o tempo de escoamento num funil especial concebido para o efeito;
- controle da fendilhação causada por variações da temperatura, medindo a temperatura e as tensões no interior do betão;
- controle da resistência do betão endurecido, avaliando a resistência à compressão, a massa volúmica e a percentagem de agregado grosso.

Os resultados indicaram que o betão foi colocado com sucesso apresentando uma qualidade uniforme.

Outro exemplo de aplicação com destaque foi a utilização de SCC de elevada resistência (valor característico de 60 MPa) no tanque exterior pré-esforçado de um depósito destinado ao armazenamento de metano liquefeito (LNG) com uma capacidade de 180000kl, o que faz dele o maior tanque não-enterrado do mundo, e cujo dono de obra é a “Osaka Gas Company” – Japão, ver Figura 2.5, [Kitamura et al., 1998]. A estrutura de betão pré-esforçado, correspondente a um volume de betão com 12000m<sup>3</sup>, apresenta 84.2m de diâmetro, 38.4m de altura e 0.8m de espessura, foi construída com SCC para atingir a impermeabilidade e durabilidade exigidas, assim como, reduzir o período de construção e os custos.

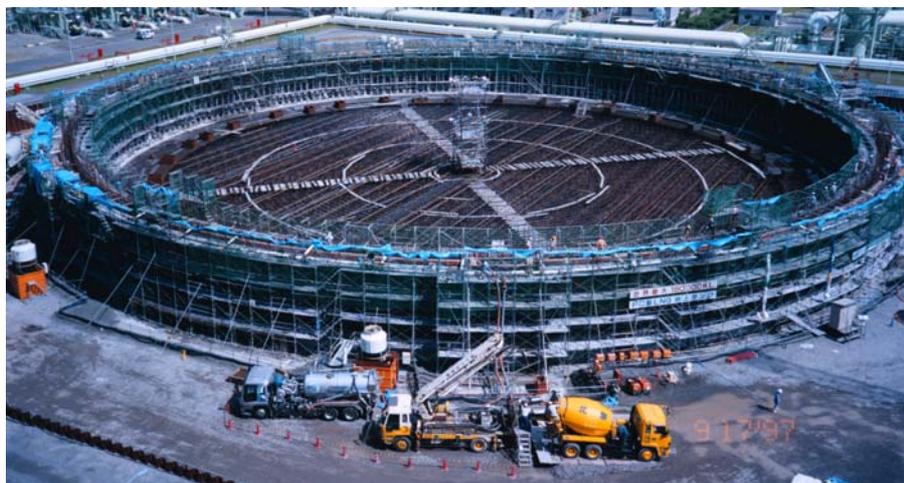


Figura 2.5 – Vista geral do local de construção durante a betonagem

O LNG tem sido utilizado largamente para produzir gás de cidade e gerar energia eléctrica. Com vista a um fornecimento estável de energia, e devido às recentes preocupações com os problemas do meio ambiente a procura de LNG tem vindo a aumentar. O LNG tem desempenhado um papel social e económico importante no Japão, constituindo um dos seus principais recursos energéticos. Um dos requisitos fundamentais para se verificar um fornecimento estável de gás é a fiabilidade dos tanques de armazenamento. Assim, foi iniciado um programa de investigação para desenvolver o “PC LNG tank”, que consiste num tanque metálico como

contentor primário e uma estrutura de betão pré-esforçado para contentor secundário, prevendo uma folga entre eles para conter o LNG caso ocorra alguma fuga do contentor interior. Estes são mais económicos e permitem um aproveitamento mais eficaz do espaço. A primeira aplicação deste tipo de tanque foi terminada em 1993 e, entretanto, foi construído um segundo tanque semelhante ao primeiro com uma capacidade de 140000kl. Em 1997, iniciou-se a construção de um terceiro tanque projectado para uma capacidade de 180000kl. Para a estrutura de betão pré-esforçado deste último tanque foi adoptado o betão auto-compactável de elevada resistência. A escolha por este tipo de betão ficou a dever-se, essencialmente, às três razões seguintes. Primeiro, a utilização de betão de elevada resistência permitiu reduzir o tamanho e a quantidade dos elementos estruturais. Para evitar a fendilhação por variação da temperatura, como consequência do aumento da quantidade de cimento para atingir a resistência pretendida, uma das medidas adoptadas foi a utilização de um cimento de baixo calor de hidratação. Segundo, o SCC permitiu aumentar a altura de descarga do betão que é condicionada pelo trabalho de compactação em betão convencional e, desta forma, reduziu-se o número de fases de betonagem de 14 para 10. Como resultado o período de construção foi reduzido de 15 para 11 meses. Finalmente, a eliminação da vibração reduz a necessidade de mão-de-obra envolvida nos trabalhos de betonagem e torna desnecessária a contratação de mão-de-obra suplementar para o dia da betonagem, tal como sucedeu com os tanques pré-esforçados de betão convencional.

A altura da parede foi dividida em 10 zonas, cada uma de 4.4m de altura. Com o objectivo de tornar mais rápida a construção, betonando-se cada zona em cinco horas com 1000m<sup>3</sup>, a produção foi assegurada simultaneamente por 5 a 7 centrais de betão-pronto da cidade, tendo sido estabelecido um sistema de controle de qualidade para a aceitação do SCC. Um dos aspectos inovadores deste sistema de controle foi a instalação de um equipamento de avaliação da auto-compactabilidade entre o camião e a bomba, ver Figura 2.6. Este equipamento contendo dois obstáculos, materializados por duas filas de varões de 70mm espaçados entre eles de 40mm, foi considerado apropriado para verificar a auto-compactabilidade definida na fase de estudo da composição, isto é, o equivalente a uma altura de enchimento mínima de 300mm nos ensaios do tipo U (ver Capítulo 4, “Ensaio da Caixa-U” e “Ensaio da Caixa”).



Figura 2.6 – Equipamento de avaliação da auto-compactabilidade do betão, antes de bombear

Um betão auto-compactável em comparação com um betão convencional pode ser constituído por uma dosagem maior de cimento, pela necessidade de uma maior quantidade de materiais finos. O conseqüente acréscimo da resistência do betão pode, contudo, ajudar a racionalizar o projecto através de medidas como a redução das secções transversais e do peso da estrutura. Dado que não é exigida compactação, a altura de cada betonagem deixa de ser condicionada pelo raio de acção do vibrador e pode ser definida com maior liberdade. Assim, o período de construção pode ser reduzido aumentando a eficiência do trabalho e a frequência da colocação. Estes efeitos combinados contribuem igualmente para uma redução de custos.

No decorrer destes trabalhos de construção, a racionalização do projecto e do processo construtivo tirando partido das características fundamentais do SCC demonstrou um grande mérito devido aos efeitos sinérgicos, tendo sido reduzidos o período de construção e os custos, tal como definido nos objectivos iniciais. Contudo, foi mobilizada apenas parte do elevado potencial do betão auto-compactável. No futuro, os autores [Kitamura et al., 1998] pretendem desenvolver métodos mais eficientes de utilização do SCC em combinação com novos processos construtivos e outros materiais e aperfeiçoar as tecnologias baseando-se em informação pertinente e resultados obtidos, promovendo uma maior racionalização da utilização do betão.

No Japão, tem-se registado também um aumento significativo do número de aplicações de betão auto-compactável em produtos de betão, sendo estes produtos dos mais diversos tipos e dimensões.

Convencionalmente, na indústria japonesa de produtos de betão, o betão fresco é compactado cuidadosamente recorrendo a vibradores acoplados à cofragem, mesas vibratórias, e/ou vibradores de agulha. A compactação durante a colocação do betão é um factor fundamental para garantir a qualidade do produto final, em particular, para produtos com secções estreitas ou

de elevada densidade de armadura. O mesmo acontece quando se utiliza um betão demasiado consistente. Para garantir a qualidade do produto final, todas as singularidades do elemento devem ficar preenchidas com betão e o grau de compactação exigido varia de secção para secção e com a consistência do betão. Por vezes a qualidade do betão degrada-se por vibração excessiva, originando segregação, ou por compactação deficiente, resultando num enchimento incompleto. O grau de compactação depende da capacidade técnica do operador do vibrador e, tem consequências na qualidade do betão. No que respeita ao ambiente de trabalho no interior de uma fábrica, o ruído e a vibração originados pelos vibradores por vezes excede os 100dB, um nível insuportável para trabalhadores que não utilizem protecção do aparelho auditivo.

Uma das principais características do SCC é que enquanto fresco flui no interior da cofragem preenchendo todos os espaços existentes, sem necessitar de compactação. Desta forma, pensou-se que o SCC iria impedir a produção de obras com betão de má qualidade, reduzir o ruído e vibração, e tornar possível a aplicação de novos métodos de construção. O SCC é considerado particularmente adequado para produtos de betão, nos quais os pequenos defeitos originados por deficiente compactação afectam bastante a sua funcionalidade, e espera-se que conduza ao desenvolvimento de métodos de produção inovadores e mais racionais [Uno, 1998]. Um dos exemplos de sucesso na aplicação de SCC na indústria de pré-fabricação japonesa refere-se à construção de aduelas para túneis. Na Figura 2.7, pode-se observar a operação de enchimento dos referidos elementos, onde é evidente a industrialização do processo construtivo.



Figura 2.7 – Enchimento de um segmento para revestimento de túneis

Neste caso, o sucesso do SCC ficou a dever-se não só à melhoria da qualidade dos produtos e do ambiente no interior da fábrica, discutidos anteriormente, mas também à racionalização da produção e redução do custo global. As razões desta redução de custos foram as seguintes:

- com um processo construtivo simplificado, os custos do equipamento de produção tais como mesas vibratórias, salas de cura a vapor e equipamento para mover a cofragem foram reduzidos;
- com um processo construtivo simplificado e menos equipamento auxiliar, diminuiu a mão-de-obra necessária e consequentemente os custos;
- a cofragem pode ser mais leve, menos rígida e simplificada, diminuindo desta forma os custos com a cofragem;
- a redução da quantidade de equipamento necessário nas fábricas implicou uma redução do consumo energético.

Para a obtenção de uma superfície do betão de boa qualidade, isto é, sem as habituais imperfeições foram tidos alguns cuidados com a cofragem, por exemplo, foram previstos furos para permitir a saída do ar que se liberta do interior do betão fresco.

### 2.3.2 Suécia

As principais razões que estiveram na origem do desenvolvimento do SCC, na Suécia, foram o aumento da produtividade e a melhoria do ambiente de trabalho. Desta forma, o objectivo foi claramente o desenvolvimento do SCC para utilização generalizada e não um produto especial para um nicho de mercado.

O SNRA (“The Construction and Maintenance Centre at the Swedish National Road Administration” e o CBI (“Swedish Cement and Concrete Research Institute”) iniciaram um projecto conjunto que apontava para que, no final de 2002, 50% dos trabalhos de betão em pontes da Suécia fossem realizados em SCC. Assim, entre os primeiros interessados em aplicar os resultados de investigação emergentes encontrava-se a divisão de produção do “Swedish National Road Authority” e as primeiras aplicações práticas foram realizadas em obras de arte. Durante 1997 foram realizados ensaios-piloto em modelos à escala reduzida e em elementos de pontes e na primavera de 1998 foram betonadas três pontes exclusivamente com SCC. A experiência positiva decorrente da aplicação em pontes fez despertar novos interesses e surgiram outras áreas de aplicação. Rapidamente, foram reconhecidas as perspectivas positivas de utilização do SCC na construção de túneis, onde são importantes não só os aspectos da produtividade e

ambiente de trabalho, mas também as dificuldades de colocação do betão, em compactar por vibração estruturas com forma curva e em betonar as abóbadas. A utilização de SCC na construção de túneis tornou-se uma alternativa natural para os empreiteiros.

A melhoria verificada nas propriedades do betão endurecido, causada pela microestrutura melhorada do SCC, tem impulsionado ainda mais o seu desenvolvimento no que respeita à aplicação em obras de arte. Para isto contribuíram a melhoria da resistência, da durabilidade, coloração e uniformidade das superfícies. Um outro factor importante foi, naturalmente, a redução do custo do produto final.

A utilização de SCC em aplicações mais correntes (construção de edifícios) iniciou-se mais tarde, embora ultimamente tenha vindo a desenvolver-se. O baixo conteúdo em finos do betão tradicional na construção de edifícios, assim como, certas condicionantes como a necessidade de descofragem ao fim de pouco tempo, fazem com que a tecnologia do material seja diferente da que é utilizada nas estruturas das obras-de-arte. Em aplicações mais correntes a relação custo total/benefícios tem sido questionada, mas quando os clientes e empreiteiros forem capazes de identificar os diversos aspectos positivos poderá observar-se um aumento claro da utilização de SCC. No âmbito do projecto europeu para a industrialização da construção em betão (projecto Brite Euram: *“Rational production and improved working environment through using self-compacting concrete”*), desenvolveu-se SCC, com e sem fibras, para aplicação na construção de edifícios correntes, tendo sido realizado pelos empreiteiros parceiros no projecto ensaios em edifícios à escala real, ver Figura 2.8.



Figura 2.8 – Aplicação de SCC na construção de edifícios, na Suécia

Segundo *Skarendahl*, actualmente, os factores chave que determinam a expansão do SCC no mercado são a transferência de tecnologia e a formação. Outro factor determinante é o investimento, por exemplo, em silos para o material fino além do cimento. Uma das maiores empresas de construção suecas reportaram que o uso de SCC dentro das suas actividades na construção de edifícios, na primavera de 2001, foi de aproximadamente 30% do volume total prevendo-se um crescimento com maior formação e aumento dos investimentos [Skarendahl, 2001].

### 2.3.3 Outros países

Depois da Suécia, dos países europeus com investigação intensiva sobre SCC e maior experiência na sua aplicação em estruturas de betão armado constam a Holanda, Reino Unido, França, Suíça, Dinamarca e Islândia. Foram também divulgados desenvolvimentos significativos e casos de aplicação prática no Canadá, Austrália e Tailândia.

## 2.4 Vantagens económicas e técnicas do uso do betão auto-compactável

Na análise das perspectivas de mercado para o uso do SCC, é importante reconhecer os potenciais beneficiários do uso desta tecnologia e os factores que podem contribuir para a sua adopção. Todas as partes envolvidas no processo construtivo, incluindo os fornecedores de materiais, empreiteiros, engenheiros, arquitectos, donos-de-obra e, no final, os utilizadores podem ter interesse no uso desta tecnologia por diversas razões técnicas e comerciais. Assim, em seguida, apresentam-se genericamente as principais vantagens da utilização do SCC.

A utilização deste material implica uma redução do custo dos trabalhos. Esta redução pode resultar de já não ser necessária a vibração para assegurar o enchimento eficaz da cofragem nem o apropriado acesso aos locais pertinentes para a realização desta tarefa; da redução da necessidade de aplanamento das superfícies, quando é explorada a característica auto-nivelante nos elementos horizontais; e da reduzida necessidade de acabamento nas superfícies dos elementos verticais, podendo ser obtidas superfícies suaves, uniformes, livres de imperfeições e sem descoloração por aplicação de SCC de composição bem estudada, utilizando-se cofragem de boa qualidade e controlando a técnica de aplicação (altura de queda, velocidade e distância percorrida no interior da cofragem).

A aplicação deste novo material permite também uma redução do período de construção à custa de um maior ritmo de colocação. Uma vez que este betão possui a capacidade de se mover no interior das cofragens, existe maior flexibilidade na distribuição dos pontos de saída do betão. Isto pode reduzir o movimento frequente dos camiões e a necessidade de deslocar as linhas de bombagem (possível redução do número de bombas, operadores de bomba, etc.). Disto resulta, obviamente, uma maior flexibilidade no planeamento dos trabalhos. Existe ainda a possibilidade de aumentar a velocidade de bombagem, aumentando a viscosidade do betão fluido ou, por outro lado, permitir o uso de bombas menos potentes ou a redução da pressão de bombagem, o que pode ser benéfico em termos do desgaste das mesmas e da necessidade da existência de bombas suplementares em determinados locais da obra. A colocação do betão por bombagem evita a necessidade de equipamento suplementar como é o caso de gruas e baldes.

Outra vantagem importante diz respeito ao meio ambiente e a um tipo de poluição não menos importante que as restantes, a poluição sonora. Ao eliminar a necessidade do processo de compactação por vibração, verificou-se que se elimina a principal fonte de ruído durante a construção em betão, tanto para a construção “in-situ” como na pré-fabricação. A introdução da tecnologia do betão auto-compactável representa um avanço no sentido da diminuição do ruído no local de construção, e vem na linha de uma directiva Europeia (Council Directive 86/188/EEC). Esta directiva exige a redução do risco de exposição dos trabalhadores ao ruído para o nível mais baixo, razoavelmente praticável, tendo em conta o progresso tecnológico e a disponibilidade de meios para controlar o ruído, em particular actuando na fonte [Bartos, 2000]. O ruído no local de trabalho é especialmente crítico em zonas urbanas e para secções que exigem um elevado nível de compactação por vibração. O betão auto-compactável tem sido promovido como “betão silencioso” ou “revolução silenciosa”, uma vez que em áreas urbanas é proibido realizar betonagens a partir de uma determinada hora do dia devido ao ruído desenvolvido durante a vibração de um betão convencional.

Por exemplo, em França é exigido que a montagem da cofragem seja terminada até às 16:30 deixando tempo suficiente para a colocação e vibração antes das 18:00, de modo a evitar muitas pesadas. Contudo, com a utilização do SCC alguns empreiteiros franceses relataram ser possível realizar a montagem da cofragem até às 18:00, deixando o encarregado e um ou dois ajudantes para a colocação do betão sem ruído. Em diversas situações a extensão do horário laboral possibilita uma maior liberdade no planeamento dos trabalhos e alivia algumas dificuldades decorrentes das condições de tráfego nas zonas urbanas. Também em França, as empresas da indústria de pré-fabricação são obrigadas a estabelecer uma espécie de seguro contra o risco que corre a saúde e a segurança dos trabalhadores, o prémio do seguro é proporcional ao nível de ruído que existe na fábrica. Em algumas fábricas de pré-fabricação, o custo-extra decorrente da utilização de SCC, quando comparado com o betão convencional, é muito inferior ao prémio do

seguro [Khayat e Aitcin, 1998]. Menos ruído promove um ambiente de trabalho mais agradável, maior produtividade e reduz a necessidade de protecção do aparelho auditivo.

Em termos de projecto, este material confere uma maior flexibilidade no que respeita à disposição da armadura, concepção de estruturas mais complicadas e elementos mais finos. Facilita e torna mais rápido o preenchimento de secções dos mais diferenciados tipos, em particular secções com elevada percentagem de armadura e cofragens complexas, enquanto assegura boa qualidade construtiva. Uma estrutura realizada com SCC é potencialmente mais homogénea, ou seja, não existe a variação devido à compactação por vibração durante a colocação do betão. Implica igualmente menor variação na produção resultando num menor desvio padrão da distribuição da resistência do betão, ao longo da estrutura. Um betão auto-compactável com uma boa composição possui maior compacidade, pelo maior conteúdo em finos (partículas com dimensão igual ou inferior às do cimento), podendo representar uma melhoria em termos de durabilidade.

Correntemente, este betão é ainda encarado como um betão especial ao contrário de um betão corrente. Do ponto de vista das características específicas do SCC, isto pode justificar-se uma vez que o próprio conceito de auto-compactabilidade é completamente novo e ainda não foi estabelecido um método de avaliação racional. Além disso, esta propriedade pode ser bastante afectada pelas características dos materiais e das proporções na composição, e ainda não existe consenso quanto a um método racional de concepção da composição. A variação das características dos materiais, especialmente o teor de humidade do agregado fino, pode afectar a auto-compactabilidade resultando em instabilidade da amassadura durante a produção. Por estas razões, é necessário um maior controle das propriedades do betão antes da sua colocação, isto porque, auto-compactabilidade insuficiente não pode ser compensada por trabalhos de reparação. Apesar das reduções de custos e mais-valias mencionadas anteriormente, o custo global dos trabalhos de construção nem sempre é reduzido, excepto em construções de larga escala onde prevaleça o factor tempo. A justificação para este facto reside no processo construtivo convencional baseado fortemente na necessidade de vibração para a compactação do betão. A utilização de betão auto-compactável permite aperfeiçoar bastante o processo construtivo. Como é do conhecimento geral a compactação, conseguida convencionalmente à custa da vibração, pode facilmente causar segregação, e isto tem sido um impedimento para a racionalização do processo construtivo. Uma vez ultrapassado este obstáculo, pode caminhar-se para a racionalização da construção em betão podendo ser desenvolvido um novo sistema construtivo, incluindo a cofragem, armadura e a própria concepção estrutural. O esquema da Figura 2.9, proposto por Ozawa [Okamura e Ouchi, 1999], pretende traduzir isso mesmo.

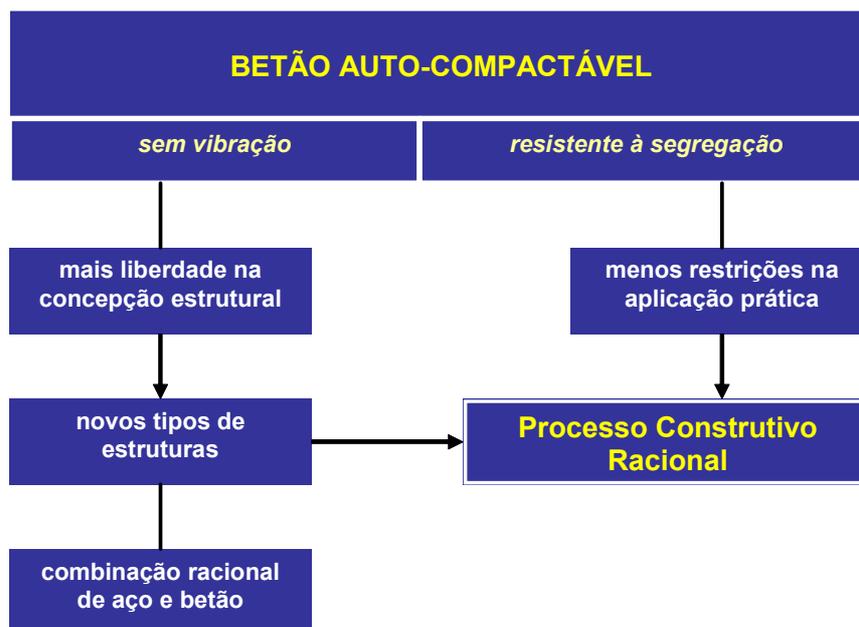


Figura 2.9 –Processo Construtivo Racional para o pleno aproveitamento do desempenho do SCC

## 2.5 Situação actual e potenciais aplicações

A falta de conhecimento, dados técnicos, experiência e “know-how” para a produção, controlo de qualidade e condições de colocação do SCC, em conjunto com a actual regulamentação e questões legais, resultam numa relutância dos engenheiros em especificarem este novo betão e nos empreiteiros em usá-lo. Engenheiros e empreiteiros são tradicionalmente conservadores, dificilmente adoptando novos materiais a não ser que estes apresentem uma clara redução de custos, ou melhoria no desempenho com um aumento de custos limitado. Contudo, esta hesitação desaparece quando as vantagens da tecnologia estão bem documentadas e publicitadas, especialmente através de projectos-piloto.

A existência de estudos credíveis e informação oriunda de projectos com vista à produção, forma de construção, características mecânicas e durabilidade do SCC são essenciais para adopção desta tecnologia num largo número de aplicações, incluindo as seguintes:

- elementos de construção vertical (paredes estruturais ou não, pilares, etc.);
- betão especializado para reduzir o tempo de construção e garantir a qualidade, especialmente em elementos com elevada percentagem de armadura (por exemplo, em regiões de elevado risco sísmico);
- trabalhos de reabilitação, incluindo áreas de difícil acesso e secções congestionadas;

- indústria de pré-fabricação para eliminar ou reduzir o uso de vibração e permitir a produção de elementos estruturais de qualidade superior;
- aplicações de SCC reforçado com fibras de aço, como é o caso de elementos de fundação, muros e lajes.

Apesar da investigação já desenvolvida acerca desta tecnologia emergente, o uso industrial do SCC está ainda na sua infância. A rapidez com que o SCC vai ser adoptado depende do esforço promocional das indústrias de cimento, misturas e betão-pronto, assim como da confiança dos engenheiros consultores e empreiteiros especializados em especificarem e usarem esta nova categoria de “high-performance concrete” [Khayat et al., 1999].

## Capítulo 3

### Discussão em torno da concepção de um betão auto-compactável

---

#### 3.1 Conceito de betão auto-compactável

Antes de iniciar qualquer tipo de discussão acerca dos métodos de concepção da composição parece oportuno clarificar o conceito de betão auto-compactável, muitas vezes confundido com betão de elevada fluidez, betão de elevado desempenho, betão auto-nivelante, etc.. A designação adoptada inicialmente pelo Prof. *Okamura* para este novo tipo de betão foi a de “self-consolidating concrete” (designação ainda frequentemente utilizada na América do Norte). No entanto, esta designação foi substituída por “self-compacting concrete” (betão auto-compactável) por se considerar que a característica mais proeminente deste material, enquanto fresco, é a sua capacidade de preencher todos os espaços do interior da cofragem à custa do peso próprio e o termo auto-compactável traduz isto de uma forma mais realista. Este termo vulgarizou-se sendo, hoje em dia, a designação mais usada. Note-se que um betão de elevada fluidez não é necessariamente auto-compactável. Um betão auto-compactável apresenta, obviamente, elevada

fluidez, mas esta característica por si só não é suficiente. Um betão auto-compactável não é necessariamente auto-nivelante, no entanto, por exemplo na aplicação em lajes havendo interesse esta característica pode ser realçada. Contudo, será incorrecto generalizar afirmando que um betão auto-nivelante é auto-compactável. Tal como exposto anteriormente (ver 2.2) o termo “high-performance concrete” (betão de elevado desempenho) também não é adequado para designar este material utilizando-se, por vezes, “high-performance self-compacting concrete” para designar um betão que além de exibir elevado desempenho, possui a característica auto-compactável no estado fresco.

O betão auto-compactável (SCC) é um betão capaz de se mover, libertar o ar e preencher completamente os espaços existentes entre a armadura, no interior da cofragem, sem a influência de energia adicional de compactação, estando sujeito apenas à acção da gravidade. A composição de um SCC deve ser resistente à ocorrência de segregação, de que são exemplos a exsudação e o assentamento das partículas mais grossas (sedimentação). Num SCC é também possível a existência de um volume de ar residual, tal como ocorre num betão convencional compactado adequadamente por vibração ou um teor de ar aumentado artificialmente para, por exemplo, aumentar a resistência à acção de gelo e degelo.

O comportamento do betão fresco durante a colocação e consolidação é influenciado basicamente pelas suas características reológicas. O betão fresco pode ser descrito como uma suspensão de partículas, apesar de bastante complexa, uma vez que, possui uma granulometria extensa de partículas e apresenta propriedades que variam com o tempo devido às reacções químicas. O comportamento reológico do betão no estado fresco é caracterizado através da “tensão de cedência” e “viscosidade plástica” definidas geralmente de acordo com um modelo simplificado de *Bingham*. Segundo este modelo, inicialmente, é necessário aplicar uma dada tensão de corte para se iniciar o movimento ( $\tau_0$  - tensão de cedência), seguido pelo aumento da tensão de corte aplicada a uma velocidade de corte crescente [David, 1999]. O declive da recta corresponde à viscosidade plástica ( $\mu_{pl}$ , em Pa.s), ver Figura 3.1. Os principais mecanismos que influenciam a reologia são o atrito interno das partículas e a quantidade de água livre, que são dependentes da tensão superficial e da dispersão das partículas. Estas, por sua vez, podem ser modificadas utilizando superplastificantes apropriados e conseguindo um empacotamento adequado das partículas finas (incluindo o cimento). Pode utilizar-se ainda um agente de viscosidade responsável por modificar principalmente a viscosidade plástica [Skarendhal e Petersson, 2001].

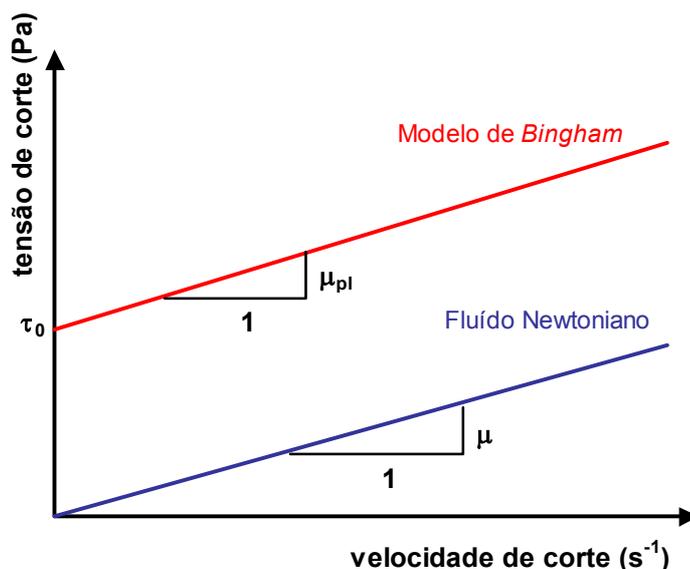


Figura 3.1 – Modelo reológico de *Bingham* e o comportamento de um fluido Newtoniano

O campo correspondente ao betão auto-compactável encontra-se na zona de valores baixos da tensão de cedência (i.e., aproximando-se de um fluido Newtoniano, ver Figura 3.1, de que são exemplo muitos solventes e certos óleos [David, 1999]) e, simultaneamente, um valor adequado da viscosidade plástica. Esta última depende bastante dos materiais a utilizar e do tipo de aplicação, nomeadamente, da técnica de colocação do betão, do tipo e configuração da estrutura que se pretende construir [Skarendahl, 1998]. Na Figura 3.2 é possível observar o campo reológico do betão auto-compactável comparativamente com outros tipos de betão.

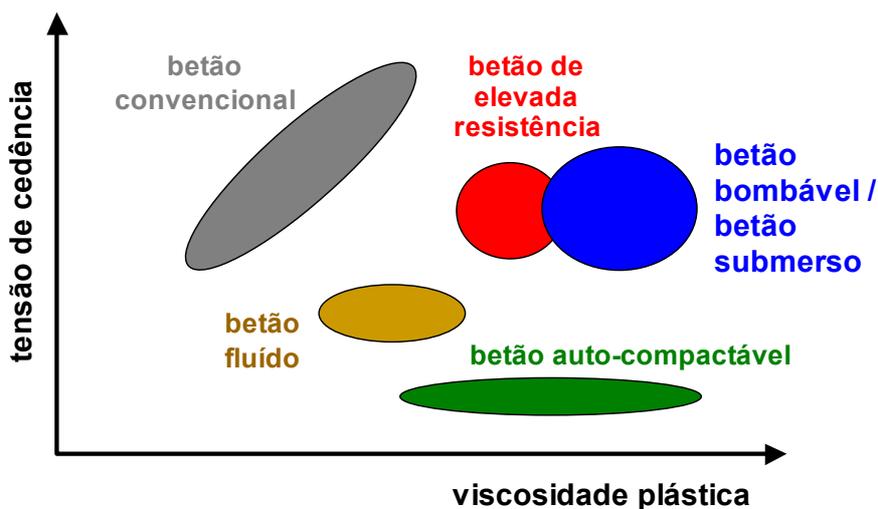


Figura 3.2 – Comportamento reológico do betão, função do tipo de aplicação

## 3.2 Efeito dos materiais constituintes

### 3.2.1 Materiais finos

A selecção dos materiais finos é de extrema importância porque as suas propriedades afectam não só o grau de auto-compactabilidade, mas também a qualidade do betão endurecido. Consideram-se como finos, além do cimento, todas as partículas sólidas presentes no betão com finura igual ou superior à do cimento. Parte da água presente no betão fresco é adsorvida pelas partículas sólidas, e uma das principais características dos finos é a sua elevada superfície específica, isto é, capacidade de adsorver uma grande quantidade de água, por unidade de volume. Ensaios de espalhamento realizados com a pasta mostraram que existe uma relação linear entre a área de espalhamento e a razão volumétrica água/finos. Estes ensaios de espalhamento para a pasta ou argamassa são realizados com um cone semelhante ao de Abrams, para o betão, mas de dimensões inferiores ( $d_{max}=100\text{mm}$ ,  $d_{min}=70\text{mm}$  e  $h=60\text{mm}$ ), ver Capítulo 4 Figura 4.3. Verificou-se que a razão volumétrica (água adsorvida pelos finos)/(finos) toma valores entre 0.7 e 1.0, apesar de se verificar uma ligeira variação dependente da granulometria, forma e algumas propriedades como a reactividade. Por outras palavras, os finos adsorvem uma quantidade de água aproximadamente equivalente ao próprio volume [Okamura e Ozawa, 1995].

Existe um valor óptimo da razão volumétrica água/finos para conferir à pasta a viscosidade adequada para um SCC e este valor está directamente relacionado com a quantidade de água adsorvida pelos finos. A quantidade de água confinada por materiais finos com uma forma regular tais como as cinzas volantes é muito baixa e, desta forma, o valor óptimo da razão água/finos, em volume, é igualmente baixo. A forma esférica e a elevada finura das cinzas volantes influenciam claramente o comportamento reológico do betão. Conduzem a baixos coeficientes de atrito entre as suas partículas e também entre estas e as partículas dos outros componentes, minorando a energia despendida para a realização do fluxo e, por consequência, afectam a trabalhabilidade. A obtenção de uma trabalhabilidade de referência num betão com a utilização de cinzas volantes consegue-se com menor quantidade de água do que a necessária para um betão sem cinzas [Ferreira e Jalali, 2000]. O grau de hidratação inicial e a distribuição granulométrica afectam também a quantidade de água confinada; por exemplo, a razão da água confinada por um cimento portland de calor de hidratação moderado é geralmente inferior à de um cimento portland corrente [Okamura e Ozawa, 1995].

### **3.2.1.1 Cimento**

A elevada deformabilidade do SCC baseia-se principalmente na dispersão das partículas de cimento devido ao efeito do adjuvante e é também afectada significativamente pelas características dos finos. Os factores químicos que afectam a deformabilidade incluem a influência dos componentes minerais do cimento na dispersão do adjuvante. Uma parte substancial das moléculas do adjuvante é adsorvida inicialmente à superfície do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e aluminoferrato tetracálcico ( $C_4AF$ ), poucos minutos após o contacto com a água devido à sua rápida hidratação inicial. O restante é adsorvido no silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e silicato bicálcico ( $C_2S$ ), que são os principais componentes do cimento. Por consequência, a quantidade adsorvida nos silicatos é dependente da quantidade adsorvida pelos aluminatos. Assim, num cimento rico em aluminatos a adsorção do adjuvante não é uniforme sobre a superfície do cimento e a acção de dispersão do adjuvante não é exercida plenamente. Além disto, a etringite – o produto de hidratação do  $C_3A$  e  $C_4AF$  com gesso – combina-se com as partículas de cimento e reduz a deformabilidade. Consequentemente, o cimento portland de calor de hidratação moderado com pequena fase intersticial tais como  $C_3A$  e  $C_4AF$  ou cimento rico em belite permite aproveitar a acção de dispersão de uma forma mais eficaz. Obtém-se um valor da tensão de cedência baixo, mesmo com uma razão água/cimento reduzida, o que conduz a uma viscosidade plástica adequada. Assim, estes cimentos podem ser considerados adequados para o fabrico de SCC. Em particular, o cimento com um conteúdo de belite ( $C_2S$ ) elevado inibe o desenvolvimento do calor de hidratação e é ideal para a utilização em SCC de elevada resistência [Nawa et al., 1998].

Por outro lado, a distribuição granulométrica e a forma das partículas podem ser consideradas como factores físicos. Por exemplo, quanto maior a superfície específica do cimento, maior será a viscosidade plástica. Num cimento com maior superfície específica, o número de partículas de finos na pasta aumenta, e assim aumenta a área em contacto com a água. Desta forma, a distância entre as partículas diminui e a frequência de colisão e os pontos de contacto entre estas partículas aumenta. Verificou-se que quanto maior o empacotamento das partículas maior a fluidez da pasta, ou seja, menor o valor da tensão de cedência. Desta forma, foi desenvolvido um cimento estabilizado mecanicamente, misturando partículas grossas de clínquer com partículas mais finas. Hoje em dia, utiliza-se também cimento de baixo calor de hidratação, do tipo II ou III, misturando escórias de alto-forno de elevada finura e cinzas volantes com elevada superfície específica [Nawa et al., 1998].

### 3.2.1.2 Adições

Segundo a definição da ENV-206, uma adição é um material inorgânico finamente dividido que pode ser adicionado ao betão (na amassadura) com a finalidade de melhorar certas propriedades ou adquirir propriedades especiais. Existem dois tipos de adições: adições quase inertes (tipo I) e pozolanas ou adições hidráulicas latentes (tipo II).

#### (i) cinzas volantes

As cinzas volantes são um sub-produto obtido quando se queimam carvões pulverizados, numa central de energia. Estas são obtidas por precipitação electrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima. A qualidade das cinzas varia com o tipo de carvão e da caldeira utilizada, algumas delas, especialmente aquelas que têm propriedades pozolânicas, são utilizadas na produção de betão aplicado num largo número de estruturas, principalmente em obras de arte. Trata-se de um pó fino constituído principalmente por partículas esféricas e vítreas composto essencialmente por  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Uma vez que as cinzas de boa qualidade apresentam uma forma esférica, a deformabilidade do betão é melhorada pelo efeito de rolamento. Por esta razão, as cinzas volantes são utilizadas frequentemente no SCC.

#### (ii) filer calcário

O filer calcário consiste em calcário pulverizado cujo principal componente é a calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), podendo apresentar uma superfície específica *Blaine* de 2500 a 8000 $\text{cm}^2/\text{g}$ . Do ponto de vista químico é quase inerte e por essa razão é uma adição do tipo I.

Este material é utilizado para aumentar a viscosidade da pasta, em especial, quando se pretende que o aumento da quantidade de finos não se traduza directamente num aumento da resistência do betão, como aconteceria com uma adição reactiva. Nos últimos anos, tem aumentado o uso de filer calcário no SCC para estruturas de betão em massa, onde ocorre frequentemente fendilhação devido aos gradientes térmicos, porque a sua utilização impede o aumento de temperatura no betão quando a sua quantidade na composição do betão é elevada [Nawa et al., 1998].

#### (iii) outros

O estudo de outros sub-produtos das mais diversas indústrias, que apresentem elevada finura, capazes de funcionarem como filer, mesmo sem características pozolânicas, revela-se do maior interesse. Este é um aspecto a explorar uma vez que o aproveitamento de sub-produtos da indústria pode revelar-se muito eficaz em termos económicos, contribuindo para reduzir a diferença de custo relativamente a um betão convencional. Isto assume ainda maior relevância se se tratarem de sub-produtos sem uma reutilização prevista e que por esta razão são acumulados

em depósitos podendo constituir uma ameaça ambiental. Como exemplo, no nosso país, pode referir-se o caso do pó-de-mármore que se acumula em depósitos junto às fábricas onde esse material é trabalhado.

### 3.2.2 Agregados

Os agregados são o constituinte mais durável e resistente do betão. Em geral, quanto maior for o conteúdo em agregados no betão, melhor será a qualidade do betão endurecido. Contudo, *Yoshida Tokujiro* demonstrou que isto nem sempre é verdade. De facto, é preferível que o traço em volume cimento, agregados finos, e agregados grossos seja 1:1:2 para obter a resistência máxima, usando determinados materiais. Se o volume dos agregados exceder este traço, a máxima resistência atingida diminui drasticamente. Quanto maior for a percentagem de agregados grossos com partículas de maior diâmetro, melhor serão as propriedades mecânicas do betão endurecido, para uma mesma quantidade total de agregados. *Yoshida* recomenda que o traço em volume agregados finos, agregados grossos deverá ser 1:2. Do ponto de vista da resistência ao bloqueio, quando o betão tem que passar pelos espaços entre obstáculos, é preferível aumentar a percentagem de agregados finos. No caso do SCC, o traço em volume agregados finos, agregados grossos recomendada é aproximadamente 1:1 [Okamura e Ozawa, 1995]. Quando o volume de agregados grossos é elevado, a probabilidade de contacto directo entre partículas aumenta drasticamente, resultando num aumento da engrenagem entre as partículas, com uma maior intensidade que no caso dos agregados finos.

Na investigação levada a cabo por *Okamura* e *Ozawa* sobre o efeito dos agregados finos na fluidez da argamassa revelou-se que os grãos mais finos dos agregados finos (com dimensão inferior a  $90\mu\text{m}$ ) na argamassa devem ser encarados como pertencendo à parcela dos finos. Realizaram-se também estudos sobre o efeito das características dos agregados finos na auto-compactabilidade do SCC fresco, incluindo a dimensão média (módulo de finura) e forma das partículas [Nawa et al., 1998]. Este estudo apresenta uma relação entre a capacidade de enchimento do SCC fresco (que é uma medida da auto-compactabilidade, ver 4.2 (vi)) com o volume de agregado fino por unidade de volume de argamassa ( $V_s/V_m$ ). A capacidade de enchimento mostrou-se praticamente constante para valores baixos de  $V_s/V_m$ . No entanto, verificou-se que aumentando  $V_s/V_m$  existe um valor a partir do qual a capacidade de enchimento começa a diminuir, este valor designou-se por valor limite de  $V_s/V_m$ . O valor limite de  $V_s/V_m$  depende do tipo de agregado fino e da forma das partículas, para um mesmo valor do módulo de finura. Para os agregados testados, concluiu-se que o valor máximo de  $(V_s/V_m)_{\text{limite}}$  é alcançado para um valor do módulo de finura aproximadamente igual a 2.5, assumindo valores inferiores para módulos de finura superiores ou inferiores a 2.5.

### 3.2.3 Água

Além da função de hidratação do cimento, a dosagem de água permite alterar a deformabilidade e a viscosidade do betão fresco. A água livre no betão define-se como sendo a quantidade de água presente na pasta subtraindo a água absorvida e adsorvida pelos finos e agregados finos. Verificou-se que existe um aumento da área de espalhamento da argamassa com o aumento da quantidade de água livre, segundo uma relação linear, no “Ensaio de espalhamento da argamassa” (ver 4.2 (iv)). Verificou-se também que a velocidade de escoamento no “Ensaio de fluidez da argamassa” (ver 4.2 (iv)) é proporcional à razão volumétrica água livre/finos, aumentando com esta [Okamura e Ozawa, 1995]. Ou seja, um aumento da quantidade de água livre traduz-se num aumento da deformabilidade e numa diminuição da viscosidade da argamassa.

De forma similar à água, um superplastificante aumenta a deformabilidade do betão. Para pequenas dosagens de superplastificante, a área de espalhamento no “Ensaio de espalhamento da argamassa” e a velocidade de escoamento no funil do “Ensaio de fluidez da argamassa” aumentam com o aumento da dosagem. Contudo, para as dosagens normalmente utilizadas para SCC verificou-se que grandes alterações na área de espalhamento estão associadas a relativamente pequenas mudanças na velocidade de escoamento o que permite diferenciar a influência da água da do superplastificante. Outra diferença fundamental, que torna essencial o uso de um superplastificante na composição do SCC, é a capacidade de melhorar a deformabilidade sem aumentar o risco de ocorrência de segregação (não altera significativamente a viscosidade). Teria sido impossível desenvolver um SCC sem o desenvolvimento dos superplastificantes. É necessário encontrar o ponto de equilíbrio entre a razão água/finos e a dosagem de superplastificante, de forma a respeitar simultaneamente as exigências de deformabilidade e resistência à segregação.

### 3.2.4 Superplastificantes

Os superplastificantes utilizados no SCC são essencialmente de dois tipos: agentes redutores de água de alta gama e agentes introdutores de ar e redutores de água de alta gama. Os agentes redutores de água de alta gama são utilizados essencialmente na indústria dos produtos de betão. Os agentes introdutores de ar e redutores de água de alta gama melhoram a capacidade de retenção da fluidez do betão. Além disto, o agente introdutor de ar mantém o teor de ar no betão num nível constante tendo sido utilizado em aplicações da indústria do betão-pronto que exige tempo para o transporte e colocação [Nawa et al., 1998].

Até agora, os principais superplastificantes utilizados consistem em polímeros de naftaleno sulfonado (“salts of sulfonated naphthalene-formaldehyde condensates”, SNF), ou melamina sulfonada (“salts of sulfonated melamine –formaldehyde condensates”, SMF), mas têm sido desenvolvidos agentes baseados nos carboxilatos modificados (“polycarboxylate-based agents”, PC) com uma capacidade de redução da água melhorada. Estes últimos são os designados de superplastificantes da “nova geração”. Uma vez que é utilizada uma grande quantidade de superplastificante num SCC há uma tendência para retardar o início da presa. Nos últimos anos foram desenvolvidos, no Japão, superplastificantes com menor atraso do início da presa. A escolha do tipo de superplastificante deve ter em consideração estes aspectos e ainda a interacção com outros adjuvantes (por exemplo, um agente de viscosidade).

As interacções entre o superplastificante e as partículas de cimento podem classificar-se em interacções físicas e interacções químicas.

#### 3.2.4.1 Interacções físicas

Na ausência de adjuvantes as forças que se estabelecem entre as partículas de cimento são, em geral, de atracção e tendem a produzir floculação dessas partículas em aglomerados de tamanho significativo que retêm a água. Quanto mais pronunciado for este efeito de floculação maior será a tensão de cedência e a viscosidade da composição. A adsorção das moléculas de superplastificante pelas partículas de cimento impede a sua floculação devido à geração de forças repulsivas cuja origem pode ser electrostática e/ou através de repulsão estérica. Consequentemente, as partículas são homoganeamente distribuídas na solução aquosa, minimizando a quantidade de água necessária para que estas fiquem dispersas, o que conduz a uma maior fluidez/trabalhabilidade do betão, ver Figura 3.3, [Roncero et al., 2000].

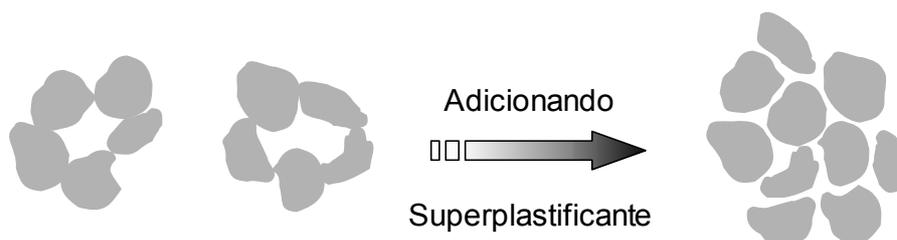


Figura 3.3 – Floculação e desfloculação das partículas de cimento

As moléculas de superplastificante são adsorvidas pelas partículas de cimento devido à interacção electrostática ou do tipo forças *Van der Waals* e esta interacção depende de vários factores. Demonstrou-se que a adsorção depende dos grupos funcionais do superplastificante. Além disso, o superplastificante é adsorvido preferencialmente nos aluminatos em relação aos

silicatos. Os sulfatos parecem ter um papel chave na eficiência dos adjuvantes. A quantidade de adjuvante adsorvido depende da quantidade de sulfato alcalino presente, que reduz a adsorção nos aluminatos em favor da adsorção nos silicatos. Isto implica a existência de um valor óptimo do conteúdo de sulfato no cimento para maximizar a fluidez. A quantidade de adjuvante adsorvido depende também do instante no qual ele é incorporado no sistema cimento-água. Diversos autores defendem que esta quantidade é menor quando é adicionado depois de misturar o cimento com a água conferindo uma melhoria significativa da trabalhabilidade. Outros autores sugerem que o superplastificante deva ser adicionado 2 minutos após a adição da água, o que coincide com o início do período dormente. Isto explica-se pelo facto de o início da hidrólise do  $\text{Ca}^{2+}$  alterar a superfície da partícula de cimento reduzindo a adsorção do superplastificante e aumentando a quantidade de superplastificante livre na solução aquosa para actividade futura. Por outro lado, a distribuição do peso molecular dos polímeros afecta claramente a quantidade de adjuvante adsorvido. A forma como os polímeros são adsorvidos depende também do seu tipo. Por exemplo, SNF é adsorvido numa monocamada devido à sua forte interacção, enquanto outros adjuvantes com longas cadeias adoptam configurações mais complexas [Roncero et al., 2000].

Os principais mecanismos de dispersão são a repulsão electrostática e a repulsão estérica (“steric hindrance”). Os polímeros de naftaleno sulfonado e os de melamina sulfonada apresentam uma acção baseada na repulsão electrostática (Figura 3.4 a)). As moléculas do superplastificante são adsorvidas à superfície das partículas de cimento juntamente com os iões dissolvidos, numa camada designada “Stern”, o exterior da qual tem uma carga eléctrica. Sobre esta forma-se uma segunda camada chamada “the diffuse electric double layer” onde a concentração de iões carregados (de carga oposta à da camada “Stern”) diminui gradualmente. Este fenómeno resulta num plano de deslizamento lubrificado no interior desta última camada [Roncero et al., 2000].

O mecanismo de dispersão das partículas de cimento baseado na repulsão estérica é o que está presente nos carboxilatos modificados. Estes possuem uma estrutura química que consiste num polímero de éter carboxílico com longas cadeias laterais de óxido etileno. No início do processo da amassadura ocorre a mesma dispersão electrostática que nos superplastificantes tradicionais, mas as cadeias laterais ligadas ao polímero principal geram um efeito de repulsão estérica que estabiliza a capacidade das partículas se separarem e dispersarem. As cadeias de óxido etileno têm uma grande facilidade de reter a água, formando uma camada de adsorção volumosa e espessa na superfície das partículas de cimento. Outra característica importante do PC's é a possibilidade de modificar ambas as estruturas do polímero principal e das cadeias laterais, permitindo realçar propriedades específicas como resposta a exigências particulares. A alcalinidade criada pela pasta de cimento permite que os polímeros libertem cadeias adicionais de polímeros que previnem a floculação e o endurecimento da amassadura (Figura 3.4 b)). Este

mecanismo permite obter, comparado com os adjuvantes tradicionais (redutores de água/retardadores), um período de trabalhabilidade mais prolongado, maior redução de água e maiores resistências iniciais. Por estas razões, os superplastificantes do tipo PC são considerados os mais adequados para SCC [Prontuário de produtos *Bettor-MBT*, 2000].

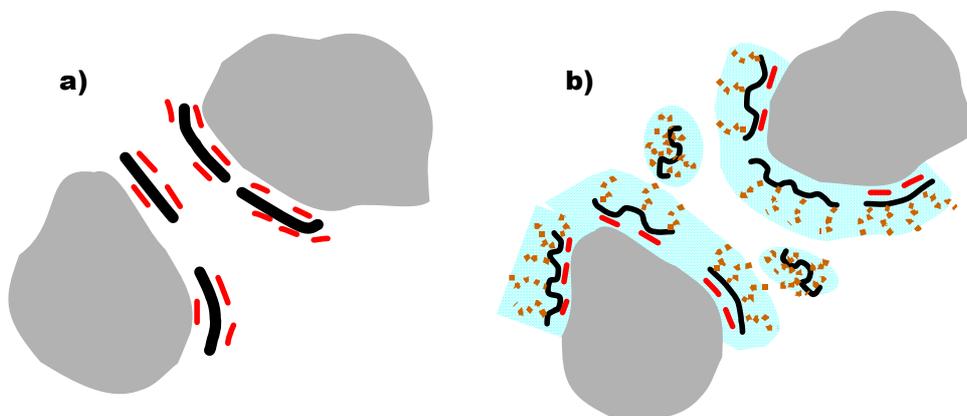


Figura 3.4 – a) Repulsão electrostática e b) Repulsão estérica

#### 3.2.4.2 Interações químicas

Indiscutivelmente, as interações físicas envolvidas no fenómeno da floculação-desfloculação desempenham um papel fundamental no que diz respeito à acção do superplastificante. Contudo, existem também interações químicas devido ao superplastificante que se manifestam como alterações na composição da solução aquosa e na morfologia dos hidratos formados. Uma dessas interações entre o superplastificante e as partículas de cimento é a adsorção química das moléculas de superplastificante. Demonstrou-se que no interior da camada adsorvida a concentração dos principais componentes do adjuvante (C e S) e do cimento (Ca) variam com uma certa distribuição, o que parece confirmar a existência de adsorção química. Outro mecanismo é a formação de iões complexos entre o superplastificante e  $\text{Ca}^{2+}$  conduzindo a uma diminuição da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução. Isto contribui para o aumento do tempo de início de presa, ou seja, para a retenção da fluidez, uma vez que a solução demora mais tempo a alcançar a supersaturação de  $\text{Ca}^{2+}$ , o que é essencial para o início do período de aceleração no processo de hidratação do cimento [Roncero et al., 2000].

Em suma, a trabalhabilidade melhorada do betão fresco devido ao superplastificante é uma consequência do efeito de dispersão. As forças repulsivas entre as partículas de cimento previnem a floculação, conduzindo ao comportamento reológico pretendido. Contudo, existem muitos factores que podem afectar este comportamento, por exemplo, a finura do cimento, o seu conteúdo em  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ , a quantidade de sulfatos, a natureza do superplastificante e o seu peso molecular, assim como, a sequência de mistura e o tipo de misturadora. No betão fresco, os

fenómenos da exsudação e da segregação surgem também agravados pela incorporação de um superplastificante, especialmente em dosagens elevadas.

A incorporação de um superplastificante conduz a alterações não apenas nas propriedades do betão no final da amassadura, mas também do seu comportamento nas fases subsequentes. Um desses efeitos é o atraso do início da presa, já referido anteriormente, que aumenta com a dosagem de superplastificante empregue. Obviamente, existem outros factores que afectam o tempo de início de presa, tais como a finura e composição do cimento, a natureza (especialmente dos grupos funcionais), o peso molecular do superplastificante e a temperatura. O conteúdo em  $C_3A$  do cimento representa também um papel importante. Em termos do betão endurecido a incorporação de um superplastificante afecta a estrutura porosa do betão. Em geral, os vazios não-ligados são maiores, apesar dos poros capilares serem menores [Roncero et al., 2000]. Nos outros aspectos do comportamento do betão, por exemplo a resistência à compressão, a incorporação de um superplastificante, mantendo constante a razão água/cimento, não produz diferenças significativas. No entanto, o maior benefício é a capacidade de redução da quantidade de água sem sacrificar a trabalhabilidade. Isto conduz a uma melhoria considerável das propriedades mecânicas do betão endurecido, assim como da impermeabilidade e durabilidade [Roncero et al., 2000].

### 3.2.5 Agentes de viscosidade

Os agentes de viscosidade utilizados no SCC podem incluir-se, genericamente, em polímeros solúveis em água, à base de celulose, polímeros solúveis em água, à base de acrílico, polímeros solúveis em água, à base de glicol, bio-polímeros e agentes de viscosidade inorgânicos. A quantidade utilizada, as suas características e as formas de interacção variam consoante o tipo de agente. Por exemplo, os polímeros solúveis em água, à base de celulose, e os polímeros solúveis em água à base de acrílico são utilizados tanto em composições de SCC na gama de pequenas como de grandes quantidades de finos (SCC dos tipos agente de viscosidade e combinação, respectivamente, ver 3.4.2 e 3.4.3). Por outro lado, os bio-polímeros (por exemplo, “welam gum”) e os agentes de viscosidade inorgânicos são utilizados apenas para composições de SCC na gama de grandes quantidades finos (SCC do tipo combinação, ver 3.4.3). Além dos referidos anteriormente, foram desenvolvidos recentemente adjuvantes possuindo ambas as funções de redução de água e aumento da viscosidade [Nawa et al., 1998].

Os mecanismos de acção dos agentes de viscosidade que conferem ao betão resistência à segregação dos seus constituintes dependem largamente do tipo de agente. Estes mecanismos são essencialmente de dois tipos: mecanismos que actuam sobre as partículas dos finos, tais como as do cimento; e mecanismos que actuam sobre a água livre existente no betão. Os agentes

de viscosidade, na sua maioria, são adsorvidos à superfície das partículas de cimento, devido à sua estrutura molecular. Verificou-se que existe uma relação entre a viscosidade plástica e a fluidez de argamassas preparadas com agentes de viscosidade possuindo diferentes propriedades de adsorção [Nawa et al., 1998]. Quanto maior a viscosidade, menor a fluidez da argamassa. Quanto mais agente de viscosidade for adsorvido na superfície das partículas de cimento menor será a quantidade de superplastificante adsorvido, e assim se justifica a menor fluidez das argamassas. 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.

Os agentes 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, à base de glicol, 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.

Os agentes que controlam a segregação (que engloba a sedimentação e a exsudação) têm sido utilizados como forma de maximizar a deformabilidade, dentro de certos limites e, simultaneamente, manter uma resistência à segregação adequada. A utilização destes produtos tornou-se de certa forma prescindível no SCC uma vez que foram já propostas composições que produzem resultados similares sem a utilização de um agente de viscosidade. É adequado utilizar estes produtos quando necessário, contudo, porque a quantidade de ligante pode ser reduzida pelo seu uso.

Os adjuvantes e aditivos empregues, tradicionalmente, no betão bombado e betão submerso e que se destinam a aumentar a viscosidade ou evitar a exsudação não são os mais adequados para o SCC. Estes produtos são geralmente mais caros e constituem um factor de produção adicional, aplicam-se em doses muito pequenas o que dificulta a sua adição numa central, podendo provocar atraso do início da presa e a introdução suplementar de ar. Por outro lado, ao diminuírem a tendência para a exsudação, diminuem em geral a deformabilidade do

betão e a retenção de água não é permanente, isto é, após o endurecimento pode haver retracção (de secagem). Este fenómeno é mais ou menos intenso em função da quantidade de produto utilizada. Uma utilização excessiva destes produtos pode surgir na tentativa de corrigir uma composição mal proporcionada ou pouco robusta.

### **3.2.6 Ar**

A introdução de bolhas de ar no interior do betão, pela utilização de agentes introdutores de ar, é necessária para o aumento da resistência à acção de gelo-degelo do betão endurecido. No betão fresco, as bolhas de ar adsorvem uma quantidade mínima de água na sua superfície. Uma vez que as bolhas de ar não são capazes de suportar o choque das partículas dos agregados tais como os finos, as bolhas de ar têm uma pequena influência na prevenção dos choques entre as partículas. No entanto, quando há falta de finos, permitem corrigir a granulometria, melhorando a trabalhabilidade, devido ao efeito lubrificante de “rolamento de esferas” das bolhas de ar [Catálogo de fichas técnicas SIKA, 2000].

## **3.3 Formas de atingir a auto-compactabilidade**

Em termos de trabalhabilidade de um SCC, a auto-compactabilidade significa a capacidade do betão fresco, depois de depositado, se mover e preencher todos os espaços no interior da cofragem, apenas por acção da gravidade, daí resultando um produto final de qualidade uniforme e sem defeitos.

A auto-compactabilidade, como propriedade do betão fresco, pode ser caracterizada essencialmente pelos seguintes três requisitos funcionais: capacidade de enchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passar entre espaços estreitos [Skarendahl e Petersson, 2001].

### **3.3.1 Capacidade de enchimento**

A capacidade de enchimento inclui o escoamento em termos da distância alcançada pelo betão desde o ponto onde foi depositado (capacidade de deformação) e a velocidade com que este se move (velocidade de deformação). Para se conseguir uma capacidade de enchimento adequada deve existir equilíbrio entre a capacidade de deformação e a velocidade de deformação, que passa por reduzir o atrito inter-partículas e obter uma pasta com elevada deformabilidade.

A deformabilidade do betão aumenta com a redução do atrito entre as partículas sólidas, que incluem o agregado grosso, agregado fino e os materiais finos. Para reduzir o atrito agregado-agregado é necessário reduzir o número de contactos inter-partículas, por redução do conteúdo de agregados ou então por aumento do conteúdo de pasta. Por outro lado, a redução do atrito entre as partículas dos materiais finos não é possível à custa do aumento da distância inter-partículas, por aumento do conteúdo de água na pasta. A pasta, por si só, deve exibir elevada deformabilidade e isto passa pela dispersão das partículas dos finos, o que foi possibilitado por uma nova geração de superplastificantes com elevado poder de dispersão. Um conteúdo de água excessivo conduz à segregação e a um mau desempenho do betão endurecido, em termos de resistência e durabilidade. Com se referiu atrás, a forma das partículas dos finos desempenha também um papel importante nas quantidades de água e superplastificantes necessárias. A redução do atrito entre os agregados e as partículas dos finos tende a reduzir a resistência à segregação. Parece ser mais eficaz não tentar aumentar a deformabilidade da pasta e betão como um todo, mas aumentar a viscosidade da pasta.

Para alcançar a auto-compactabilidade não é suficiente reduzir o atrito inter-partículas da fase sólida do betão. A pasta deve apresentar elevada deformabilidade. É importante assegurar elevada fluidez (valor baixo da tensão de cedência) e, simultaneamente, elevada resistência à segregação (viscosidade moderada). A deformabilidade do betão está estreitamente relacionada com a deformabilidade da pasta, que pode ser aumentada introduzindo um superplastificante. Ao contrário da água, que reduz a tensão de cedência e a viscosidade, a introdução de um superplastificante reduz essencialmente a tensão de cedência (aumenta a fluidez) e causa uma diminuição limitada da viscosidade. Assim, pode obter-se um betão com elevada fluidez sem afectar significativamente a sua coesão. A redução da razão água/finos pode limitar a deformabilidade da pasta. A razão água/finos deve ser controlada de modo a não ser demasiado baixa ou demasiado elevada, uma vez que, ambas as situações põem em causa a deformabilidade. Uma pasta com muito baixa razão água/finos e com um superplastificante incorporado tende a possuir elevada capacidade de deformação, mas baixa velocidade de deformação.

Em síntese, para se conseguir uma capacidade de enchimento adequada, devem considerar-se as seguintes acções:

reduzir o atrito inter-partículas;

- baixar o volume de agregado grosso (aumentar o volume de pasta)
- otimizar a granulometria da fase sólida

aumentar a deformabilidade da pasta;

- adicionar um superplastificante
- controlar a razão água/finos.

### 3.3.2 Resistência à ocorrência de segregação

A segregação do betão fresco é caracterizada pela falta de homogeneidade na distribuição dos seus materiais constituintes, que influencia a distribuição das propriedades na estrutura de betão. O betão pode não exibir uma tendência para a segregação sob determinadas condições de movimento, mas segregar quando sujeito a outras condições, por exemplo, ao passar por secções com elevada densidade de armadura.

O SCC não deve apresentar nenhum dos tipos de segregação seguintes, tanto em repouso como em movimento:

- exsudação;
- segregação da pasta e agregados;
- segregação do agregado grosso originando o bloqueio;
- não-uniformidade da distribuição dos poros de ar.

Para evitar a exsudação (segregação entre sólidos e água) é essencial reduzir a quantidade de água livre na composição. Isto consegue-se reduzindo o conteúdo em água e a razão água/finos. É possível, também, utilizar materiais finos com elevada superfície específica, aumentando assim a quantidade de água adsorvida à superfície das partículas dos finos. Obviamente, a resistência à segregação entre a água e os sólidos pode ser melhorada pela introdução um agente de viscosidade.

Os outros tipos de segregação podem ser solucionados através de uma pasta capaz de transportar as partículas dos agregados e o ar, evitando um deslocamento diferenciado entre fases. Isto consegue-se à custa de uma força de interacção entre as fases elevada, para a qual contribuem o atrito e a coesão. O aumento da resistência à segregação à custa de um aumento do atrito entre as fases, como se viu atrás, não é desejável pois afecta negativamente a capacidade de deformação e aumenta a possibilidade de bloqueio. Assim, é preferível aumentar a coesão entre as fases, que na prática se consegue reduzindo a razão água/finos da pasta. Por vezes também se usam adjuvantes com este propósito.

De entre os diferentes tipos de segregação, no que respeita ao enchimento de volumes densamente armados, a segregação dos agregados grossos parece assumir um factor determinante para se obter uma auto-compactabilidade adequada.

Em síntese, para se conseguir adequada resistência à segregação, devem considerar-se as seguintes acções:

reduzir a separação dos sólidos;

- limitar o conteúdo de agregados
- reduzir a dimensão máxima do agregado
- baixar a razão água/finos
- introduzir um agente de viscosidade

minimizar a exsudação;

- baixar o conteúdo de água
- baixar a razão água/finos
- utilizar materiais finos com maior superfície específica
- introduzir um agente de viscosidade.

### **3.3.3 Capacidade de passar entre espaços estreitos**

Um SCC deve possuir suficiente fluidez e, ao mesmo tempo, resistência à segregação para se comportar adequadamente. Nos casos onde existam espaços apertados na cofragem ou congestionamento da armadura é necessário satisfazer um requisito extra, nomeadamente evitar a ocorrência de bloqueio dos agregados grossos. Assim, deve haver compatibilidade entre a dimensão e quantidade das partículas sólidas maiores e o espaçamento entre os varões da armadura e as aberturas da cofragem, por onde o SCC deverá passar.

O mecanismo de bloqueio pode ser entendido através da Figura 3.5 que pretende traduzir, de forma simplificada, o escoamento do betão através do espaço entre dois varões da armadura. A existência de obstáculos provoca uma alteração do percurso das partículas dos agregados, provocando contactos instantâneos entre elas. Devido a estes contactos existe a possibilidade de se formar um arco estável, que bloqueia o resto do escoamento do betão. A formação deste arco é facilitada com agregados de maior dimensão e quando o conteúdo de agregados é elevado. Para agregados de dimensões reduzidas, o arco pode formar-se quando existe um elevado

conteúdo em agregados, mas isto não acontece se as partículas sólidas forem muito mais pequenas do que a dimensão da abertura.

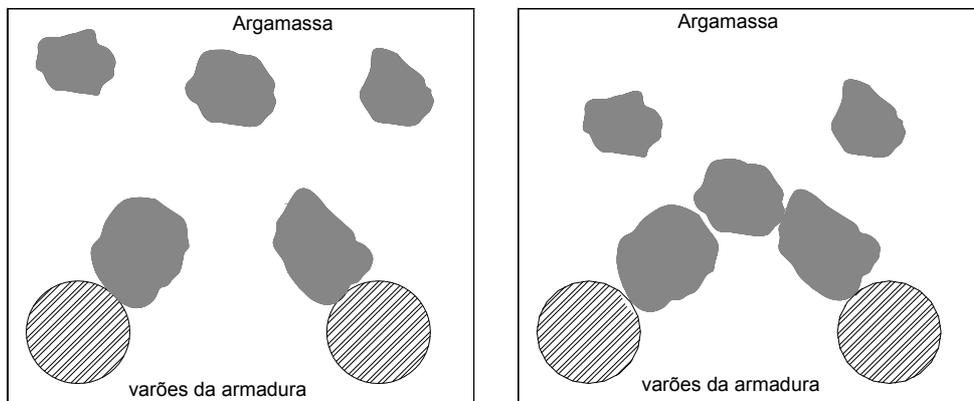


Figura 3.5 – Mecanismo de bloqueio

O risco de bloqueio aumenta se a composição possuir uma tendência para a segregação das partículas grossas. Assim, o bloqueio pode ocorrer mesmo que a dimensão máxima do agregado grosso não seja excessiva. Para um dado SCC, a existência de uma armadura com um maior diâmetro aumenta o risco de bloqueio, para o mesmo espaçamento entre os varões, porque os varões de maior diâmetro conferem um suporte mais estável para o arco dos agregados.

Em síntese, para se conseguir a capacidade de passar entre espaços estreitos, devem considerar-se as seguintes acções:

melhorar a coesão para reduzir a segregação dos agregados ;

- baixar a razão água/finos
- introduzir um agente de viscosidade

compatibilizar o espaçamento dos varões com as características do agregado grosso ;

- diminuir o volume de agregado grosso
- diminuir a dimensão máxima dos agregados.

### 3.4 Classificação geral para o betão auto-compactável

O SCC, proposto até então, pode ser classificado genericamente nos três tipos seguintes, função do método utilizado para prevenir a ocorrência de segregação, ou seja, o método para aumentar a viscosidade da pasta:

- 1) **Tipo finos**, para o qual é adicionado um elevado volume de finos;
- 2) **Tipo agente de viscosidade**, para o qual é adicionado um agente de viscosidade;
- 3) **Tipo combinação**, combinação dos métodos anteriores.

Em seguida, apresentam-se as características de cada um destes tipos de SCC.

#### 3.4.1 Betão auto-compactável do tipo finos

Se for aumentada a quantidade de finos da pasta, a tensão de cedência e a viscosidade aumentam. Por outro lado, quando é adicionado um superplastificante, o valor da tensão de cedência da pasta diminui consideravelmente, e para uma dosagem de superplastificante elevada o valor da tensão de cedência é praticamente equivalente a zero. Contudo, a viscosidade não diminui significativamente quando comparado com o valor da tensão de cedência. A razão água/finos, em volume, é ajustada para um valor de aproximadamente 1.0 para conferir uma viscosidade adequada à pasta e assim evitar a ocorrência de segregação, ver Figura 3.6. Nas composições deste tipo a quantidade total de finos é superior à quantidade presente num betão convencional, devido ao aumento do volume da pasta no betão. Em consequência, parte dos finos (cimento) é substituída por adições minerais tais como cinzas volantes, escórias de alto forno, filer, etc.. Este foi o método utilizado para o protótipo do “self-compacting high-performance concrete”, exibindo elevada resistência e durabilidade [Okamura e Ozawa, 1989].

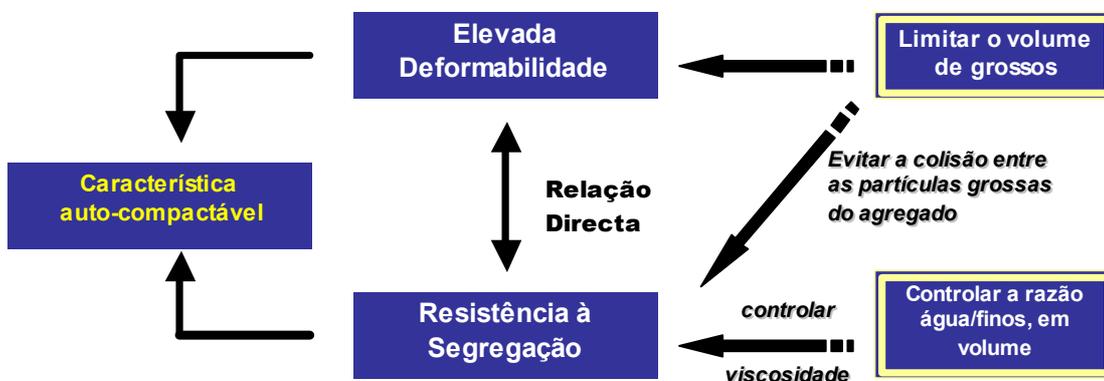


Figura 3.6 – Melhoria da característica auto-compactável controlando o volume dos constituintes

### 3.4.2 Betão auto-compactável do tipo agente de viscosidade

Este é um tipo de SCC considerado como uma extensão do betão submerso (“antiwashout underwater concrete”). As principais características deste tipo de betão são a possibilidade de obter um betão de elevada deformabilidade, mesmo na gama de pequenas quantidades de finos, e ser produzido mesmo no local de construção utilizando a própria misturadora do camião betoneira.

No betão submerso, destinado a colocação debaixo de água, a ocorrência de segregação é evitada apenas pela adição de uma grande quantidade de um agente de viscosidade, impedindo as partículas de cimento de se dissolverem na água. Por isso, este tipo de betão não é aplicável em estruturas expostas ao ar, uma vez que a viscosidade é tão elevada que impede a libertação do ar aprisionado no interior da massa de betão e este apresenta dificuldades em atravessar zonas congestionadas com armadura. De forma simplista, o SCC com um agente de viscosidade é um betão do tipo submerso com viscosidade reduzida apropriado para colocação ao ar, ver Figura 3.7.

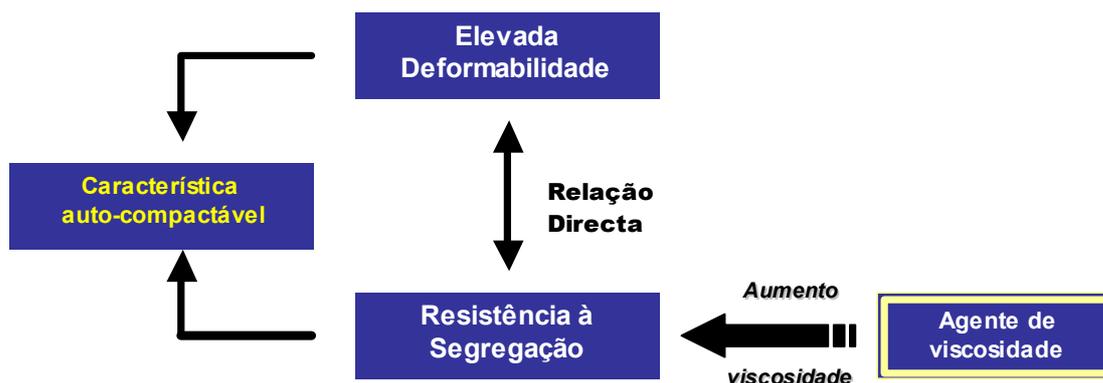


Figura 3.7 – Melhoria da característica auto-compactável com um agente de viscosidade

*Takeshita et al.* conseguiram pela primeira vez SCC por este método e tentaram aplicá-lo a estruturas correntes. O equilíbrio entre o agente de viscosidade e o superplastificante é importante no sentido de aumentar a auto-compactabilidade, no entanto, nem sempre esta é a melhor solução. Foi um método adoptado por *Okamura* e *Ozawa*, mas abandonado no decorrer do processo de desenvolvimento [Okamura e Ozawa, 1989].

### **3.4.3 Betão auto-compactável do tipo combinação**

Para o SCC baseado na adição de finos a deformabilidade do betão varia consideravelmente em consequência de alterações nos factores de produção, dos quais o teor de humidade e a granulometria do agregado fino (módulo de finura) são frequentemente apontados como os mais críticos. Assim, surgiu a necessidade de diminuir a variabilidade da deformabilidade de SCC's do primeiro tipo. O objectivo foi conseguido adicionando uma pequena quantidade de um determinado agente de viscosidade ao SCC do tipo finos. Isto permitiu reduzir a variabilidade da deformabilidade, não apenas devido a alterações dos factores de produção, mas também da temperatura do betão.

## **3.5 Métodos de concepção da composição de um betão auto-compactável**

A composição de um SCC deve ser concebida para satisfazer a um conjunto de exigências, nomeadamente, auto-compactabilidade, resistência e durabilidade. De uma forma genérica, o estudo da composição de um SCC pode ser dividido em três estágios. Num primeiro estágio, devem ser definidas as exigências de desempenho que se colocam ao betão com base nas condições estruturais, construtivas e ambientais da aplicação em causa. O estágio seguinte consiste na selecção dos materiais, a sua caracterização e definição preliminar da composição do betão. A composição de um SCC tem sido obtida adoptando abordagens distintas, das quais se destacam, pela larga experiência do passado, os métodos propostos pelos investigadores japoneses. No estágio final, deve verificar-se se a amassadura com a composição inicial satisfaz as exigências de desempenho. Caso algum aspecto não seja satisfeito, a composição deverá ser revista e testada até se alcançar o desempenho pretendido.

Nos pontos seguintes apresentam-se algumas das abordagens e métodos adoptados por investigadores de diferentes países para a obtenção da composição de um SCC.

### **3.5.1 Método proposto pela JSCE**

Em Julho de 1998, a Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis (JSCE) publicou recomendações para a construção com SCC, nas quais propõe um procedimento de obtenção da composição apresentado esquematicamente na Figura 3.8. Estas recomendações basearam-se em investigação realizada no passado e na experiência obtida com aplicações práticas mais recentes. Segundo este método, o volume de água, o volume de finos ou de ligante, por unidade

de volume de betão, e a razão água/finos variam consoante o tipo de SCC que se está a estudar, isto é, do tipo agente de viscosidade ou do tipo finos [Nawa et al., 1998].

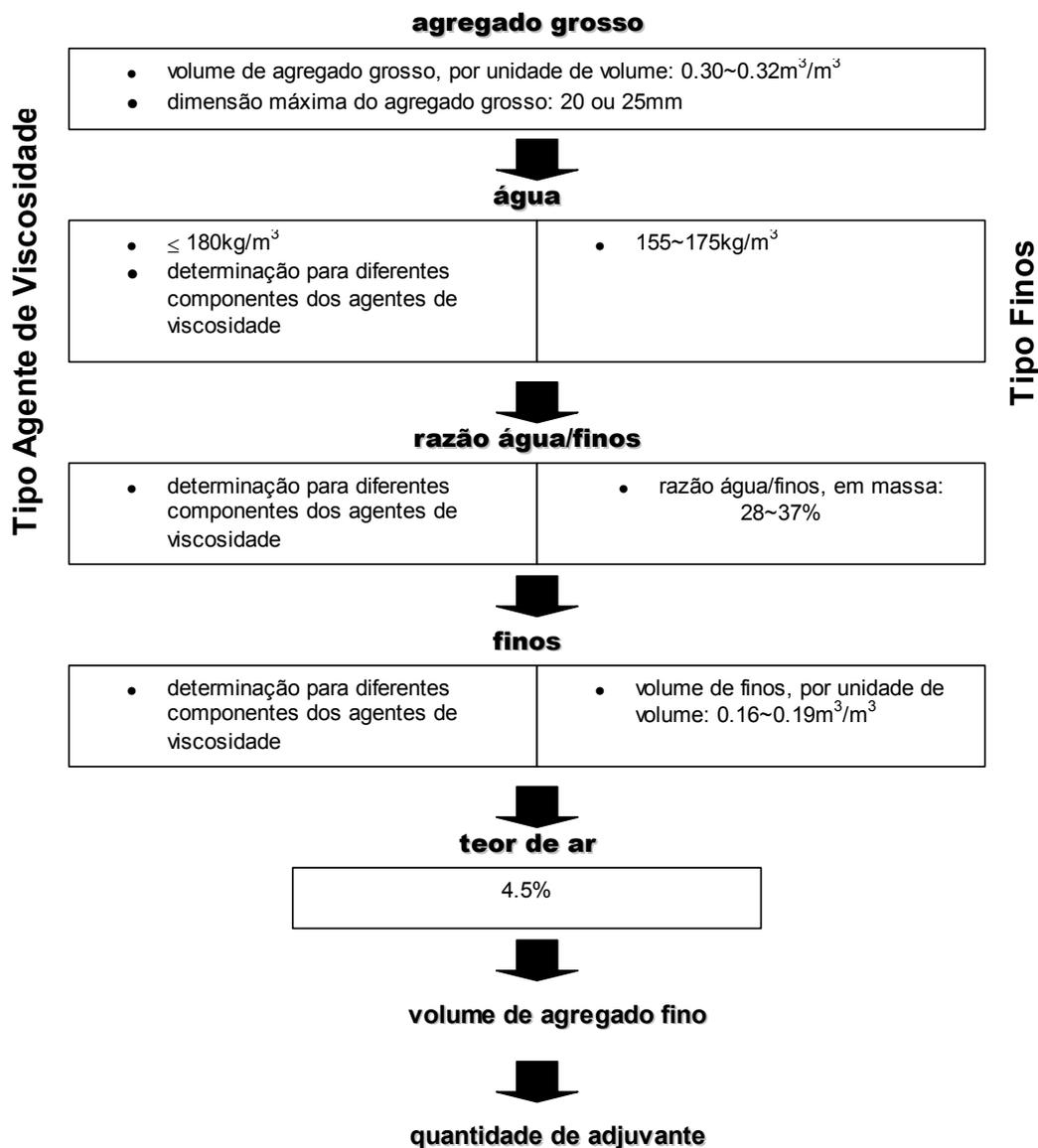


Figura 3.8 – Método de concepção da composição proposto pela JSCE

Assim, de acordo com este método, dependendo do nível de auto-compactabilidade exigido o volume de agregado grosso deverá ser ajustado. A dimensão máxima do agregado grosso deverá ser de 25 ou 20mm. Em termos da quantidade de água, se é utilizado um agente de viscosidade, esta deverá ser inferior a  $180 \text{ kg}/\text{m}^3$ , em geral. No caso de estruturas nas quais a durabilidade não seja um factor condicionante, a quantidade de água poderá ir até  $190 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Por outro lado, quando não é utilizado um agente de viscosidade (SCC do tipo finos) a quantidade de água situa-se habitualmente entre 155 e 175kg/m<sup>3</sup>. A razão água/finos deve ser determinada com base nas exigências de desempenho do betão endurecido e o seu valor, em massa, deverá estar entre 28% a 37% ou, em termos de volume, 0.85 a 1.15. Uma vez definida a quantidade de água e a razão água/finos é possível obter o volume de finos, por unidade de volume, que deverá estar compreendido entre 0.16-0.19m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

No Quadro 3.1, para o caso das composições de SCC com um agente de viscosidade, apresentam-se as quantidades típicas dos constituintes cujos valores são omissos na Figura 3.8.

Quadro 3.1 – Quantidades típicas para diferentes agentes de viscosidade

Constituinte	tipo de agente de viscosidade				
	celulose	acrílico	glicol	“polysaccharide polymer” (β-1,3 glucan)	“water-soluble polysaccharide” (welam gum)
<b>água</b>	170-180 kg/m <sup>3</sup>	170-180 kg/m <sup>3</sup>	155-170 kg/m <sup>3</sup>	≤ 180 kg/m <sup>3</sup>	≤ 180 kg/m <sup>3</sup>
<b>finos</b>	300-450 kg/m <sup>3</sup>	400-450 kg/m <sup>3</sup>	400-480 kg/m <sup>3</sup>	≥ 0.13 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	≥ 0.13 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>agente de viscosidade</b>	0.15-0.3% (da água)	3.0-5.0% (da água)	2.0-3.0% (da água)	0.5-1.5 kg/m <sup>3</sup>	0.05% (da água)

O teor de ar deverá ser fixado tendo em conta a resistência pretendida e as condições ambientais a que a estrutura vai estar exposta. O valor corrente recomendado foi de 4.5%. A quantidade de agregado fino, por unidade de volume, pode ser obtida à custa das quantidades de agregado grosso, água, finos e ar. Quanto à dosagem de superplastificante ou agente de viscosidade recomenda-se que seja determinada com base na experiência do passado e nas recomendações dos fabricantes dos produtos. Algumas dosagens típicas de agente de viscosidade para SCC do tipo agente de viscosidade apresentam-se também no Quadro 3.1.

Um SCC possui características específicas, que genericamente se traduzem por auto-compactabilidade. O nível de auto-compactabilidade deve ser definido adequadamente atendendo às exigências que se colocam ao betão imediatamente antes da sua colocação, condicionadas pela forma e dimensões das cofragens e pela densidade e disposição da armadura da estrutura a betonar. Os restantes aspectos de desempenho, como a resistência e durabilidade, devem ser definidos da mesma forma que no betão convencional. As referidas recomendações estabelecem três níveis de auto-compactabilidade [Japan Society of Civil Engineers, 1998]. No Quadro 3.2 apresenta-se de forma resumida, para cada nível, as condições estruturais correspondentes e os critérios a respeitar em termos da composição e dos resultados de alguns ensaios desenvolvidos

para o efeito. Uma apresentação detalhada destes ensaios e das grandezas avaliadas consta do Capítulo 4.

Quadro 3.2 – Níveis de auto-compactabilidade e critérios correspondentes

NÍVEL DE AUTO-COMPACTABILIDADE		1	2	3
<b>Condições estruturais</b>	Mínimo espaçamento entre varões, mm	35 ~ 60	60 ~ 200	≥ 200
	Densidade de armadura, kg/m <sup>3</sup>	≥ 350	100 ~ 350	≤ 100
<b>Altura de enchimento no “Ensaio da caixa U” ou “Ensaio da caixa”, mm</b>		≥ 300 (obstáculo R1)	≥ 300 (obstáculo R2)	≥ 300 (obstáculo R3)
<b>Volume de agregado grosso, por unidade de volume de betão, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></b>		0.28 ~ 0.30	0.30 ~ 0.33	0.32 ~ 0.35
<b>Deformabilidade</b>	Valor do diâmetro de espalhamento, mm	600 ~ 700	600 ~ 700	500 ~ 650
<b>Resistência à segregação</b>	Tempo de escoamento no “Ensaio de fluidez do betão”, segundos	9 ~ 20	7 ~ 13	4 ~ 11
	Tempo que o betão demora a alcançar um espalhamento de diâmetro 500mm, segundos	5 ~ 20	3 ~ 15	3 ~ 15

Tal como se pode observar no quadro anterior, os diferentes níveis são definidos em função das dimensões e condições da armadura existente nas estruturas. Um betão do nível 2 é definido com um betão que é auto-compactável numa estrutura onde a armadura apresenta um espaçamento mínimo de 60 a 200mm, o que corresponde normalmente a uma densidade de armadura de 350 a 100kg/m<sup>3</sup>. No nível 1 o betão enfrenta condições mais severas que um betão do nível 2. Pelo contrário, no nível 3 o betão encontra condições menos exigentes que no nível 2, devendo exibir auto-compactabilidade em situações nas quais o espaçamento mínimo é de 200mm e a densidade de armadura é inferior a 100kg/m<sup>3</sup>. Do exposto, conclui-se que nas estruturas de betão armado mais correntes, onde o espaçamento entre as armaduras varia entre 60 a 200mm e a densidade de armadura entre 100 e 200kg/m<sup>3</sup>, o nível 2 de auto-compactabilidade é o mais adequado. De notar que, em geral, um betão de um nível de auto-compactabilidade mais elevado é também auto-compactável quando sujeito a condições correspondentes a níveis mais baixos.

### 3.5.2 Método proposto por *Okamura et al.*

O método de concepção da composição proposto pelo grupo de investigação liderado pelo Prof. *Okamura* [Okamura et al., 2000] apresenta-se de uma forma esquemática na Figura 3.9. Considerando um fornecimento normal numa central de betão, este método parte do princípio que a única fonte de materiais finos é o cimento portland de baixo calor de hidratação. Desta forma, com este método a qualidade do betão endurecido é, normalmente, automaticamente assegurada se for alcançada a auto-compactabilidade do betão fresco.

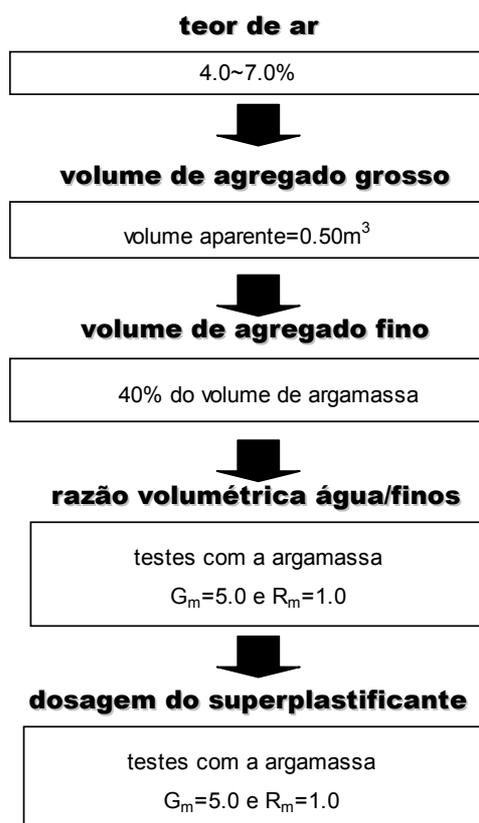


Figura 3.9 – Método de concepção da composição proposto por *Okamura et al.*

Conseguir-se a auto-compactabilidade do betão depende não só das propriedades do betão mas também das condições de colocação, assim como, das condições-fronteira determinadas pelos obstáculos, tais como a armadura presente no interior da cofragem. Desta forma, é possível seleccionar uma metodologia na qual o nível de auto-compactabilidade seja alterado em função das condições de colocação e da estrutura a construir, enquanto se mantém um elevado controle de qualidade tal como no betão convencional (veja-se a classificação proposta pela JSCE). Contudo, do ponto de vista do controle de produção, consegue-se maior fiabilidade se existir apenas um tipo de betão ao invés de vários, uma vez que as propriedades do betão fresco são mais sensíveis a alterações na qualidade dos materiais e nas proporções do que

as do betão endurecido. Em geral, uma alteração da qualidade dos materiais constituintes ou do processo produtivo tende a baixar o nível da auto-compactabilidade. A escolha de um nível de auto-compactabilidade elevado é, normalmente, mais fácil do que manter um elevado controle de qualidade.

Os autores recomendam um método no qual é fixado um nível de auto-compactabilidade elevado realizando-se apenas um ajuste das tolerâncias em função da estrutura em questão. Revela-se difícil manter a auto-compactabilidade num nível específico, mais difícil, de facto, do que controlar a qualidade do betão convencional. Falhar na obtenção da auto-compactabilidade especificada pode pôr em causa a fiabilidade de toda a estrutura. Mesmo quando um nível de auto-compactabilidade baixo é adequado, é mais seguro optar por um nível mais elevado e depois adaptar as diversas condicionantes da estrutura e da construção permitindo uma maior variabilidade na produção, e assim alargando os limites de controle.

Segundo este método, a definição da composição começa por fixar o teor de ar sendo recomendado o intervalo de valores entre 4 a 7%, dependendo do ambiente ao qual a estrutura vai estar exposta. O volume real de agregado grosso, por unidade de volume de betão, é o correspondente a um volume aparente de  $0.5\text{m}^3$ , com as partículas compactadas, excluindo o ar previsto para a composição. Deste modo, a quantidade de agregado grosso depende do grau de empacotamento que as partículas do agregado permitem, ou seja, depende das características físicas do próprio material. Assim, é possível determinar o volume de argamassa, considerando-se que o volume de agregado fino (partículas com dimensão superior a  $90\mu\text{m}$ ) corresponde a 40% desse volume. Com os volumes de agregado grosso e fino assim definidos, obtém-se adequada auto-compactabilidade mas, para percentagens superiores rapidamente se deixa de verificar esta característica. Para uma definição completa da composição resta determinar a razão volumétrica água/finos e a dosagem de superplastificante. Segundo este método, o ajuste da razão água/finos e da dosagem de superplastificante passa inicialmente pela realização de ensaios com a argamassa, recorrendo a dois tipos de ensaios, o “Ensaio de Espalhamento” e o “Ensaio de fluidez do betão” que fornecem os parâmetros  $G_m$  (diâmetro de espalhamento relativo) e  $R_m$  (tempo de escoamento relativo), respectivamente. A argamassa adequada para um SCC deverá conduzir simultaneamente a  $G_m=5.0$  e  $R_m=1.0$ , a que corresponde uma elevada deformabilidade e suficiente viscosidade, respectivamente. De notar que, estes ensaios servem para avaliar a influência dos materiais constituintes.

No Capítulo 4 explica-se, de uma forma mais detalhada, a aplicação do método na definição da composição de um SCC e apresenta-se o conjunto de ensaios no qual este se baseia.

### 3.5.3 Método proposto pelo CBI

O primeiro método que permitiu o estudo da composição de um SCC de uma forma mais racional e simples foi o método de *Okamura et al.*. No entanto, pelas razões mencionadas anteriormente, este conduz geralmente a um betão com um volume de pasta, por unidade de volume, mais elevado do que o exigido numa composição “ótima”. Isto é particularmente notório quando o agregado grosso possui dimensão máxima reduzida ou quando se utiliza areia natural de rio. O acréscimo de custo induzido pode tornar-se inaceitável em países onde o custo dos materiais está sujeito a uma competição intensa. Este ponto de vista é defendido pela grande maioria dos investigadores europeus que se debruçaram sobre o estudo deste novo material. Por conseguinte, um outro método foi proposto por *Petersson e Billberg* do CBI (“Swedish Cement and Concrete Research Institute”), baseado no trabalho desenvolvido por *Tangtermsirikul* [Skarendahl e Petersson, 2001]. Nos parágrafos seguintes são apresentados, de uma forma genérica, os princípios fundamentais deste método.

O método proposto baseia-se no conceito de que o betão fresco é constituído por duas fases, designadas por fase líquida e sólida e encontra-se esquematizado na Figura 3.10. A fase sólida inclui os agregados grosso e fino e o restante constitui a fase líquida. O objectivo deste método é encontrar a proporção óptima entre o agregado grosso e o fino, capaz de minimizar o volume de pasta, baseando-se para tal, no conceito de máxima distância inter-partículas e num critério de bloqueio. O valor óptimo da razão agregado grosso/total (num SCC) é atingido, segundo este método, para um volume de pasta o menor possível, e a maior distância inter-partículas, sem a ocorrência de bloqueio.

O volume relativo entre agregado grosso e fino afecta o volume de vazios (a compactidade) e a superfície específica da fase sólida. O volume de pasta é necessário para preencher todos os vazios da fase sólida e para envolver toda a superfície das partículas dos agregados. Assim, é necessário considerar não só o volume de vazios, mas também a superfície das partículas do total de agregados. Duas composições podem apresentar o mesmo volume de vazios, mas diferentes superfícies específicas. Para pastas da mesma qualidade, uma superfície específica maior exige um aumento de volume de pasta para cobrir toda a superfície das partículas com vista a manter a deformabilidade do betão. Assumindo que a forma das partículas do agregado é esférica e conhecendo a distribuição granulométrica dos agregados, é possível calcular a distância média entre as partículas, para um dado volume de pasta e uma determinada razão volumétrica agregado grosso/agregado fino. Este cálculo implica a determinação experimental do volume de vazios da fase sólida compactada. A aspereza das partículas pode ser tida em consideração aplicando um factor de angulosidade, representando a razão entre a superfície específica de partículas irregulares e a superfície específica de um grupo de esferas, ambas incluídas na mesma fracção granulométrica. Assim, é possível estudar, para diferentes

proporções entre agregado grosso e fino e um dado volume de pasta, qual a que conduz a uma maior distância inter-partículas. A partir destes estudos é possível obter uma curva que fornece o volume mínimo de pasta em função da razão entre o agregado grosso/agregado fino e então estimar uma composição inicial.

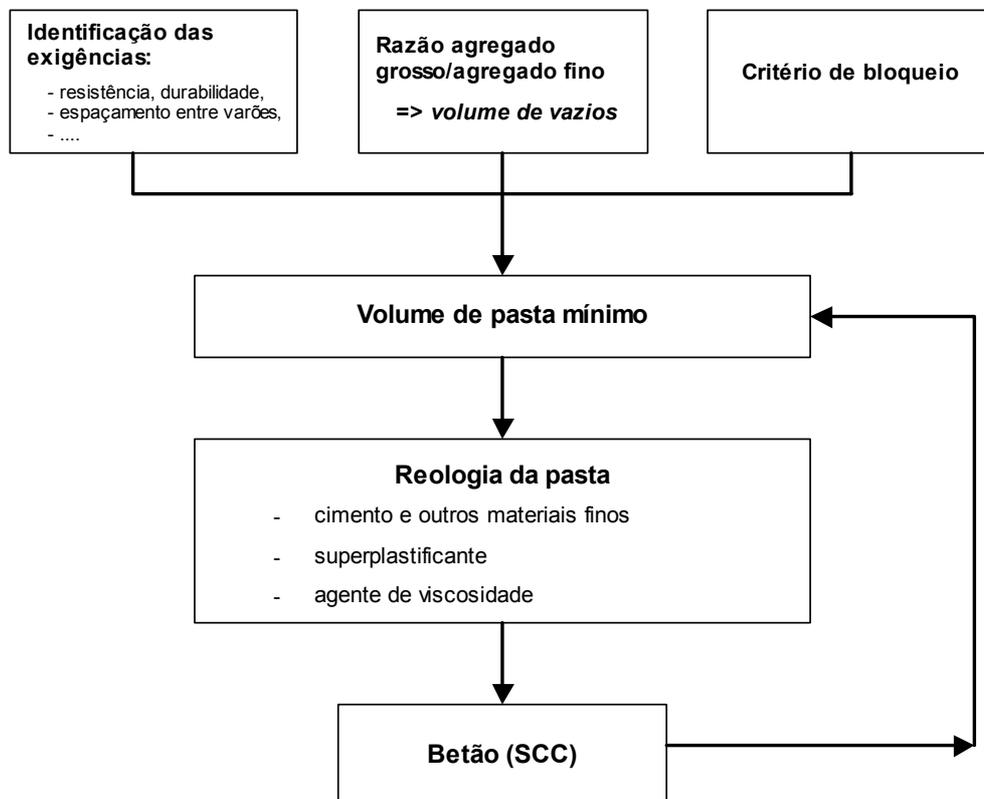


Figura 3.10 – Método de concepção da composição proposto pelo CBI

A capacidade que um SCC possui de preencher todos os espaços no interior de uma cofragem depende significativamente, tal como se viu, da deformabilidade e resistência à segregação do betão. Contudo, existem também factores externos que afectam esta capacidade, o que é mais comum considerar é a densidade de armadura. A dimensão máxima do agregado e a quantidade de partículas de maior dimensão no betão desempenham um papel determinante na capacidade do betão escoar através de uma secção armada. Para o mesmo volume de agregado, um maior volume de partículas grandes resulta numa redução da quantidade de pasta necessária (devido a uma redução da superfície específica), mas o risco de bloqueio é maior. Assim, para evitar o bloqueio dos agregados houve necessidade de implementar um critério “de bloqueio” juntamente com o conceito de máxima distância inter-partículas (para um dado volume de pasta). Com o objectivo de propor um critério de bloqueio, foram realizadas experiências com diferentes tipos de agregados utilizando o “Ensaio da caixa”. Neste estudo foi considerado apenas o efeito do tipo de agregado, a dimensão do agregado, o volume do agregado, a dimensão dos varões da

armadura e espaçamento entre eles, assumindo que a quantidade de agregado que provoca o bloqueio é independente das propriedades da pasta, desde que a composição não sofra segregação estática. Assim, o risco de bloqueio pode ser avaliado fazendo uso de um conjunto de expressões propostas e de um gráfico que traduz o risco de bloqueio associado a diferentes materiais, para diferentes relações entre espaçamento da armadura e dimensão das partículas [Tangtermsirikul, 1998]. O critério de bloqueio deverá ser utilizado em combinação com a teoria dos vazios da fase sólida-superfície específica (associada à máxima distância inter-partículas) para determinar o melhor valor da razão agregado grosso/agregado fino e o volume máximo de agregado admissível sem a ocorrência de bloqueio.

As quantidades de finos, água, superplastificante e outros adjuvantes são ajustadas de forma a obter a resistência pretendida e obter suficiente viscosidade e um valor baixo da tensão de cedência. A avaliação reológica realizada com a pasta serve para otimizar o tipo e quantidades de materiais finos incluindo o cimento e também avaliar a eficácia de diferentes adjuvantes. Esta abordagem, do ponto de vista da reologia, substitui os equipamentos de ensaio utilizados pelos japoneses no “Ensaio de espalhamento” e “Ensaio de fluidez”, para argamassas. Finalmente, depois de determinado o volume de pasta mínimo e de otimizada a composição da mesma, deve ser realizada uma amassadura do betão e este deve ser ensaiado para verificar se apresenta as características da auto-compactabilidade. Para tal, são previstos dois ensaios: o “Ensaio de espalhamento do betão” e o “Ensaio da Caixa-L”. Os critérios de aceitação destes ensaios podem ser adaptados consoante o tipo de aplicação. Caso estes não sejam satisfeitos, o volume da pasta ou a sua composição deverá ser alterado e os ensaios repetidos.

### 3.5.4 Outros métodos

O método anterior propõe uma optimização do esqueleto sólido com vista à obtenção de um SCC durável e eficiente do ponto de vista económico, enquanto aplicável a diferentes tipos de materiais. No entanto, a obtenção das curvas de referência relativas ao critério de bloqueio não é geral, devendo ser obtida para agregados de natureza diferentes, o que o transforma num processo moroso.

Os investigadores do LCPC (“Laboratoire Central des Ponts et Chaussés”, França) preocuparam-se, entre outros aspectos, com a redução da elevada retracção potencial do SCC, através da optimização do esqueleto sólido da composição de betão e minimização do volume de pasta. Estes investigadores encontraram-se insatisfeitos com os diversos ensaios “standard”, tais como o “Ensaio da caixa-L”, para verificar as propriedades do SCC e representar de forma adequada as condições de colocação em estruturas específicas. Como resultado, no LCPC desenvolveu-se um novo método de concepção da composição baseado nas medições da

deformabilidade e viscosidade realizadas com um reómetro de grandes dimensões, o BTRHEOM, e num modelo (“Compressible Packing Model”) que entra em conta com a natureza das partículas e também com a configuração da armadura/cofragem que oferece maior resistência ao movimento do betão. No âmbito do projecto Brite-Euram, coube ao LCPC a completa caracterização do comportamento reológico do SCC. Depois da identificação das propriedades fundamentais pretende-se, por aproximação teórica, prever o comportamento do SCC em estruturas reais. Ao mesmo tempo, procura-se definir correlações e relações com os resultados dos ensaios de avaliação da trabalhabilidade mais correntemente utilizados para este tipo de betão (por exemplo, o “Ensaio de Espalhamento”) [Sedran e Larrard, 1999].

## **Capítulo 4**

### **Método de *Okamura et al.***

---

#### **4.1 Introdução**

Após uma fase de investigação preliminar, no âmbito desta dissertação aplicou-se o método de concepção da composição recomendado por *Okamura et al.* com o objectivo de estudar a composição do SCC segundo um método mais racional capaz de identificar, de uma forma mais clara, o efeito dos diferentes materiais constituintes do betão. A sua aplicação passou, inicialmente, pela realização de ensaios com pastas e argamassas e, no final, com o betão. Estes ensaios envolveram a utilização de equipamentos relativamente simples e de fácil execução, o que justifica também a escolha deste método para esta dissertação. Uma abordagem semelhante foi seguida por um grupo de investigação da Universidade de Delft cujos resultados e metodologias das experiências efectuadas serviram também de orientação para o trabalho desenvolvido.

## 4.2 Descrição do método

A auto-compactabilidade é largamente afectada pelas características dos materiais e as proporções na composição. Assim é necessário um método racional de concepção da composição aplicável a uma variedade de materiais. *Okamura et al.* propuseram um sistema simples de determinar as proporções na composição. As quantidades de agregado grosso e fino são fixadas de forma que a auto-compactabilidade seja conseguida facilmente ajustando apenas a razão água/finos ou a dosagem de superplastificante.

As proporções da composição, por  $m^3$  de betão, podem ser obtidas através dos seguintes passos [Okamura, 1997]:

( i ) determinação do volume de ar;

O volume de ar ( $V_a$ ) é definido pela quantidade de ar incorporada no betão para aumentar a resistência à acção do gelo-degelo, caso seja necessário.

( ii ) determinação do volume de agregado grosso;

O volume de agregado grosso ( $V_g$ ) é o equivalente a um volume aparente de  $0.50m^3$ , no estado compactado, excluindo o volume de ar previsto para a composição no ponto anterior, ver Figura 4.1.

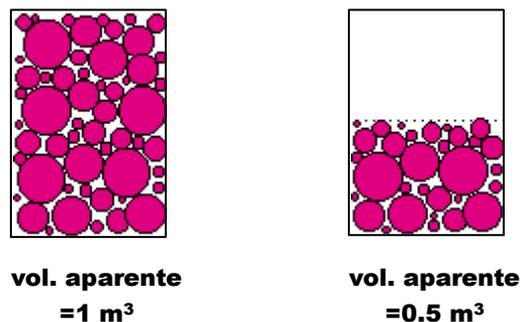


Figura 4.1 – Volume de agregado grosso adequado para um SCC

No limite, o valor máximo do volume de agregado grosso ( $V_{g,lim}$ ), equivalente a um volume aparente de  $1m^3$ , é numericamente igual à razão entre o valor da baridade (compactada) e da massa volúmica. Desta forma, o valor adequado do volume de agregado grosso para o SCC obtém-se pela expressão (4.2.1). Note-se que a quantidade de agregado grosso, assim definida, depende das suas características físicas, tais como, a distribuição granulométrica e a forma das partículas, que condicionam a compacidade de uma dada massa de agregado compactada.

Quanto mais contínua for a granulometria, menor será o volume de vazios (maior compactidade), logo maior será o valor da baridade permitindo, desta forma, maior quantidade de agregado grosso na composição de um SCC.

$$V_g = 0.5 \cdot V_{g,\text{lim}} \cdot (1 - V_a) \quad (4.2.1)$$

(iii) determinação do volume de agregado fino;

O volume de agregado fino ( $V_s$ ) é fixado em 40% do volume de argamassa, ver Figura 4.2, e considera-se que fazem parte do agregado fino apenas as partículas cuja dimensão esteja compreendida entre 0.09 e 5mm. Ou seja, nas areias, que geralmente respeitam o limite superior dos 5mm, as partículas com dimensão inferior a 0.09mm são incluídas na parcela dos finos e não do agregado fino. Através da distribuição granulométrica da areia é possível determinar a percentagem de partículas nestas condições, por unidade de volume, aqui designada por  $ksf$ . O valor de  $ksf$  entra na expressão (4.2.2) para quantificar o volume total de areia, que assegura a percentagem fixada de agregado fino relativamente ao volume de argamassa. Quando a areia apresenta uma elevada percentagem de partículas finas, o volume total de areia na composição é maior, uma vez que apenas parte da areia pode ser considerada como agregado fino.

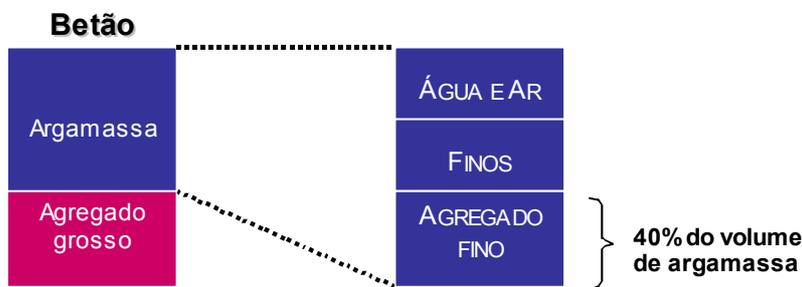


Figura 4.2 – Quantidade de agregado fino

$$V_s = \frac{0.4 \times (1 - V_a - V_g)}{1 - ksf} \quad (4.2.2)$$

(iv) determinação da razão volumétrica água/finos e da dosagem de superplastificante;

No estudo da composição de um betão convencional e desprezando o aspecto da durabilidade, para simplificar, a razão água/cimento é fixada em função da resistência pretendida. Contudo, com o SCC a razão água/finos deve ser definida tendo em atenção

a auto-compactabilidade, uma vez que esta característica é bastante sensível à sua variação. Na maioria dos casos a resistência exigida não é determinante na definição da razão água/cimento porque a razão água/finos é, em geral, suficientemente baixa para conferir a resistência adequada no caso de estruturas de betão armado correntes. Caso se utilize, como material fino, adições não reactivas isto pode não acontecer.

Uma vez que a razão volumétrica água/finos ( $V_w/V_p$ ) é bastante influenciada pelas propriedades físicas e químicas dos finos, adjuvantes e agregados finos, este método preconiza que esta razão seja definida realizando ensaios com a argamassa. Para tal, é previsto o “Ensaio de espalhamento da argamassa” realizado num molde de forma tronco-cónica e dimensões reduzidas, em comparação com o cone de *Abrams*, e o “Ensaio de fluidez da argamassa” realizado com um funil de faces planas.

Na Figura 4.3 esquematiza-se o funcionamento do ensaio de espalhamento. De forma simples, este ensaio consiste em encher com argamassa (ou pasta) um molde de forma tronco-cónica, com as dimensões interiores apresentadas na figura, levantá-lo, e medir o diâmetro médio da área de espalhamento resultante após a cessação do movimento. O diâmetro médio de espalhamento serve para calcular o índice de deformabilidade  $G_m$  (área de espalhamento relativa), recorrendo à expressão (4.2.4). No caso do ensaio com a pasta este índice designa-se por  $G_p$ .

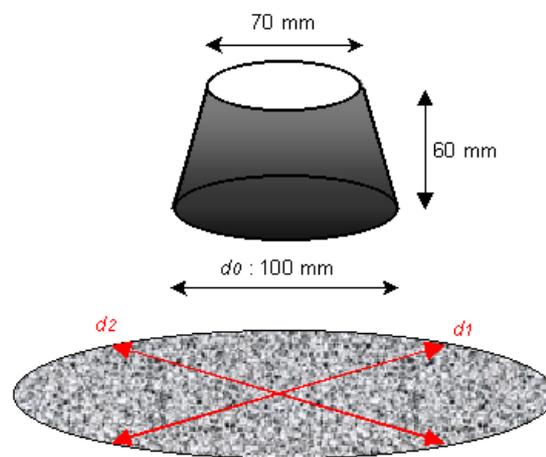


Figura 4.3 – Ensaio de espalhamento da argamassa (ou pasta)

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2.0} \quad (4.2.3)$$

$$G_m = \left( \frac{d}{d_0} \right)^2 - 1.0 \quad (4.2.4)$$

Na Figura 4.4 esquematiza-se o ensaio de fluidez. Neste ensaio é medido o tempo que a argamassa em estudo demora a escoar do interior de um funil com as dimensões interiores apresentadas na figura. O tempo de escoamento serve para determinar um índice de viscosidade  $R_m$  (tempo de escoamento relativo), calculado à custa da expressão (4.2.5).

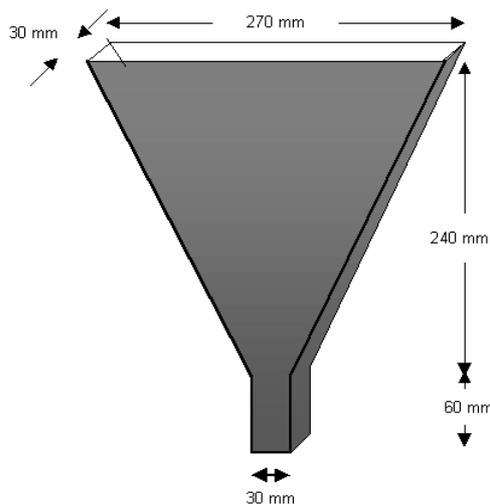


Figura 4.4 – Ensaio de fluidez da argamassa

$$R_m = \frac{10.0}{t}, \quad t \text{ em segundos} \quad (4.2.5)$$

Um valor maior de  $G_m$  indica maior deformabilidade, enquanto um valor menor de  $R_m$  corresponde a uma maior viscosidade da argamassa. Ao determinar o valor destes índices está-se a realizar, de uma forma indirecta, uma avaliação reológica da argamassa. Estes índices são práticos de usar uma vez que podem ser obtidos facilmente a partir dos ensaios apresentados anteriormente, em especial quando não se dispõe de equipamento específico para um estudo reológico mais elaborado. *Ozawa et al.* investigaram a relação entre a auto-compactabilidade do betão fresco e da argamassa utilizando os índices  $G_m$  e  $R_m$ . Verificou-se que uma argamassa com  $G_m=5.0$  e  $R_m=1.0$  é a mais adequada para conseguir um betão auto-compactável [Takada et al., 1998a].

Fixando a percentagem de agregado fino na argamassa em 40%, tal como proposto, a dosagem de superplastificante e a razão água/finos devem ser modificadas até se obterem os valores adequados de  $G_m$  e  $R_m$ , simultaneamente. Contudo, surgiu a necessidade de estabelecer

um método racional para determinar a dosagem de superplastificante relativamente ao total de finos,  $(Sp/P)$ , e a razão volumétrica água/finos,  $(V_w/V_p)$ , que conduzem a deformabilidade e viscosidade adequadas. Esta não é uma tarefa fácil uma vez que a deformabilidade e viscosidade da argamassa no betão auto-compactável depende largamente dos materiais utilizados, em especial do tipo de finos e do superplastificante.

A dosagem de superplastificante é estimada de forma grosseira com os ensaios da argamassa. O efeito do superplastificante no betão é diferente do efeito na argamassa devido às diferenças na amassadura e no próprio volume de material envolvido. Assim, a dosagem de superplastificante deve ser estimada com ensaios sobre o betão. Recomenda-se que se realize o “Ensaio de espalhamento do betão”, ver Figura 4.5. Neste ensaio o cone utilizado no habitual ensaio de abaixamento é cheio (obviamente, sem compactar), levantado, e é medido o diâmetro final da área de espalhamento. Assim, determina-se a dosagem de superplastificante que resulta num valor do diâmetro de espalhamento entre 600 e 700mm, em geral.

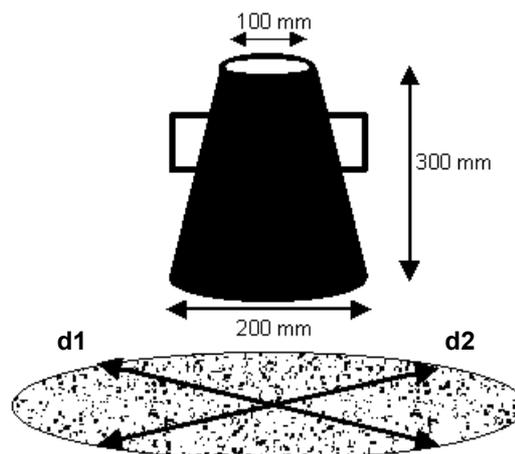


Figura 4.5 – Ensaio de espalhamento do betão

Recomenda-se ainda outro ensaio para avaliar as propriedades do SCC com um equipamento designado “Ensaio de fluidez do betão”. Trata-se de um funil semelhante ao utilizado no “Ensaio de fluidez da argamassa” mas com maiores dimensões, adequado para o betão, e com uma comporta na sua parte inferior, ver Figura 4.6. Como se pode observar na figura são propostas dimensões diferentes para o funil. Para este trabalho, adoptaram-se as dimensões apresentadas entre parênteses, que correspondem às utilizadas pelos investigadores holandeses [Takada et al., 1998a]. Este funil é cheio com betão e depois de abrir a comporta inferior mede-se o tempo que dura o escoamento. Os valores obtidos para a razão entre 10 segundos e a duração do escoamento, também em segundos,  $R_c$ , devem estar compreendidos entre 0.5 e 1.0.

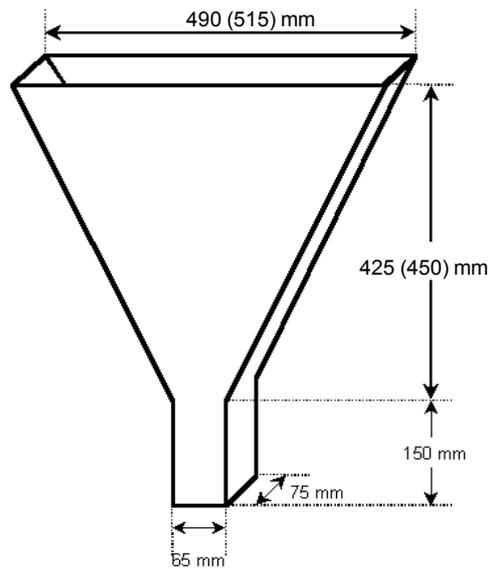


Figura 4.6 – Ensaio de fluidez do betão

( v ) ensaio da auto-compactabilidade;

Depois de ajustada a dosagem de superplastificante, para satisfazer os critérios descritos anteriormente, a composição assim obtida deve ser validada recorrendo a ensaios de avaliação da capacidade de enchimento, ainda no laboratório, sendo para tal proposto o “Ensaio da caixa-U” (desenvolvido pelo grupo da empresa *Taisei*) ou o “Ensaio da caixa”. Tal como se pode observar nas Figura 4.7 e Figura 4.8 estes ensaios são muito semelhantes, em ambos, a capacidade de enchimento é avaliada através da altura atingida pelo betão depois de ultrapassar um obstáculo, ao passar da coluna onde é depositado para a coluna contígua vazia. No “Ensaio da caixa” é possível escolher entre dois obstáculos, recomendando-se a utilização do mais exigente, ou seja, o que possui um maior número de varões e com menor espaçamento entre eles e entre os varões e as paredes do equipamento [Okamura et al., 2000]. Além desta maior versatilidade, este ensaio revela-se mais adequado para detectar betões com elevado risco de ocorrência de segregação entre o agregado grosso e a argamassa, o que se justifica pela forma não arredondada na parte do fundo. Assim, betões que apresentem uma altura de enchimento superior ou igual a 300mm podem ser considerados auto-compactáveis.

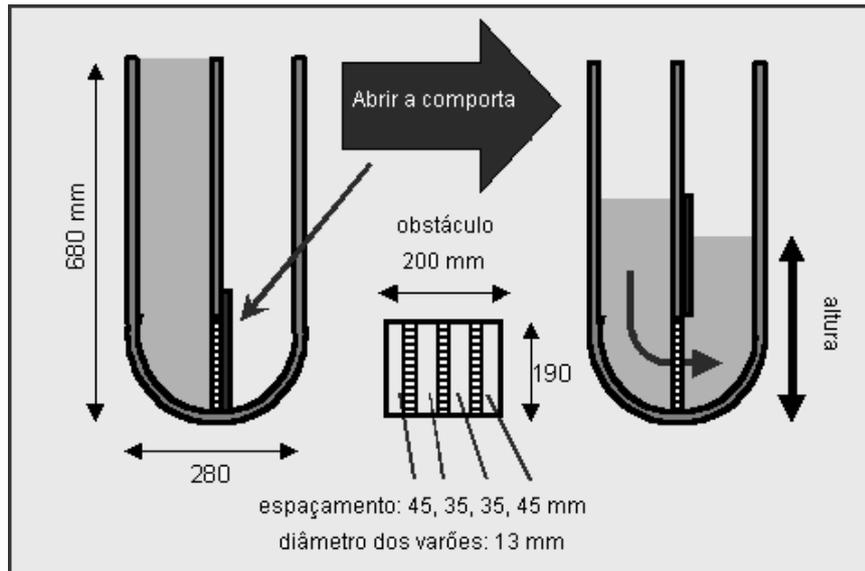


Figura 4.7 – Funcionamento do “Ensaio da caixa-U” para o betão



Figura 4.8 –Na esquerda o equipamento utilizado no “Ensaio da caixa”, na direita os obstáculos que se colocam no interior

Após 60 a 90 minutos do final da amassadura é recomendada a repetição do “Ensaio de espalhamento do betão”. Esta repetição é importante para avaliar a capacidade de retenção da fluidez do superplastificante utilizado.

#### 4.2.1 Caracterização dos materiais finos

Com vista na selecção da composição dos materiais finos foram propostos ensaios com a pasta. Para cada composição de materiais finos (total de finos = cimento + adições) deve obter-se o valor da área de espalhamento relativa ( $G_p$ ), para um conjunto de valores de  $V_w/V_p$  recorrendo ao mesmo ensaio de espalhamento apresentado para as argamassas, ver Figura 4.3. Verificou-se que o conjunto de pares de resultados ( $V_w/V_p, G_p$ ) ajustam-se a uma recta, ver Figura 4.9. Esta recta permite determinar a razão da água retida pelos finos ( $\beta_p$ ) e o factor de deformação ( $E_p$ ).  $\beta_p$  é a razão volumétrica água/finos para a qual a deformação é nula e os espaços entre as partículas que constituem os finos encontram-se saturados com água, ou seja, a abcissa para a ordenada nula da recta de ajuste.  $E_p$  é a inclinação da referida recta, quando se representam em abcissas os valores de  $G_p$  e em ordenadas os valores de  $V_w/V_p$ . Estes parâmetros representam as propriedades físicas de cada material fino e da sua combinação. O material fino (ou a composição de materiais finos) que apresente maior valor de  $\beta_p$  exige uma maior quantidade de água para apresentar uma dada deformação no “Ensaio de espalhamento da pasta”.

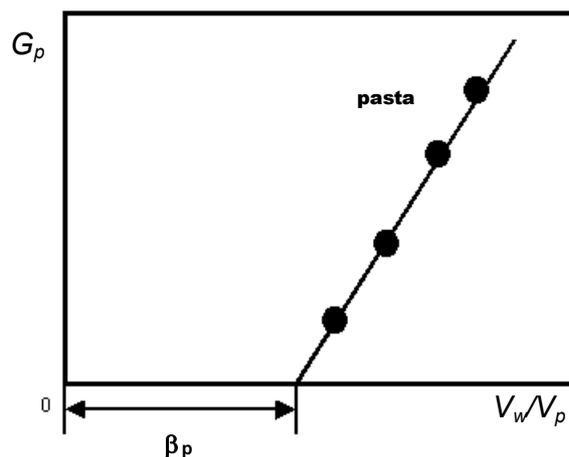


Figura 4.9 – Resultados do “Ensaio de espalhamento da pasta”

#### 4.2.2 Avaliação do efeito da razão água/finos e da dosagem de superplastificante nas propriedades da argamassa

As relações entre as propriedades da argamassa do betão auto-compactável e as proporções na composição foram estudadas e formuladas [Okamura et al., 2000]. Estas relações podem ser utilizadas para estabelecer um método racional de ajuste da razão água/finos e dosagem de superplastificante permitindo alcançar valores adequados para a deformabilidade e viscosidade. A avaliação dos materiais através dos ensaios com a argamassa ou pasta é de extrema importância uma vez que as suas características afectam bastante as características do

betão fresco. A par disto, pretende-se estimar as proporções da composição de forma adequada e com um número mínimo de tentativas.

Na Figura 4.10 apresentam-se alguns resultados experimentais do estudo da relação entre deformabilidade e viscosidade, fazendo variar a quantidade de superplastificante e a razão água/finos. O material fino utilizado foi constituído apenas por cimento de calor de hidratação moderado e a percentagem de areia na argamassa foi de 40%. Na figura, o número associado a cada ponto corresponde ao valor da razão água/finos, em percentagem, para dosagens de superplastificante iguais a 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4% e 1.8% da quantidade de finos. Verificou-se que existe uma relação aproximadamente linear entre  $G_m$  e  $R_m$ , mantendo constante a dosagem de superplastificante  $Sp/P$  (%). Adicionalmente, a recta  $G_m$ - $R_m$  passa praticamente na origem do referencial. Assim, pode assumir-se que o declive da recta  $G_m$ - $R_m$  é função apenas de  $Sp/P$ . Neste estudo, os autores definem o declive da recta  $G_m$ - $R_m$ , dado pela razão  $G_m/R_m$ , como um indicador do efeito do superplastificante, independente da razão água/finos. Valores superiores de  $G_m/R_m$  indicam um maior efeito do superplastificante, isto é, maior deformabilidade ( $G_m$ ) sem diminuir a viscosidade ( $1/R_m$ ).

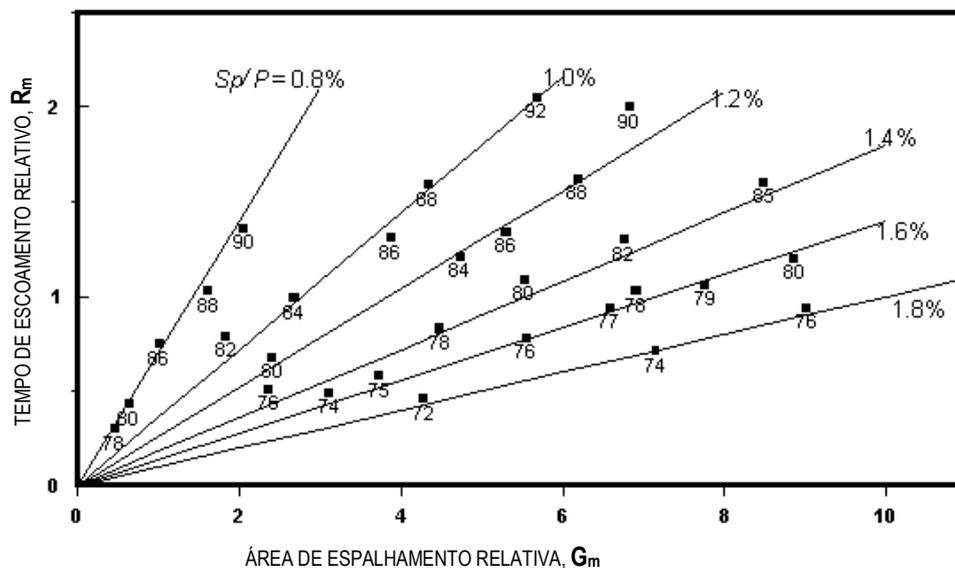


Figura 4.10 – Relação entre  $G_m$  e  $R_m$  para diferentes valores de  $Sp/P$  e  $V_w/V_p$

A relação entre  $Sp/P$  e  $G_m/R_m$  é muito afectada pela combinação do superplastificante e dos materiais finos, tal como se pode observar na Figura 4.11 onde, **MC** corresponde a um cimento de calor de hidratação moderado, **BS4000** corresponde a escórias de alto-forno cuja superfície específica *Blaine* é de  $4000\text{cm}^2/\text{g}$ , **BRC** corresponde a um cimento rico em belite ( $C_2S$ ) e com **FA** corresponde a cinzas volantes. A cada uma destas siglas encontra-se associada uma segunda, **SP-8N(...)** ou **SP-8S(...)**, que corresponde ao tipo superplastificante. Assim, esta relação

não pode ser estimada sem ensaios sobre a argamassa devido à interação química entre o superplastificante e os finos utilizados.

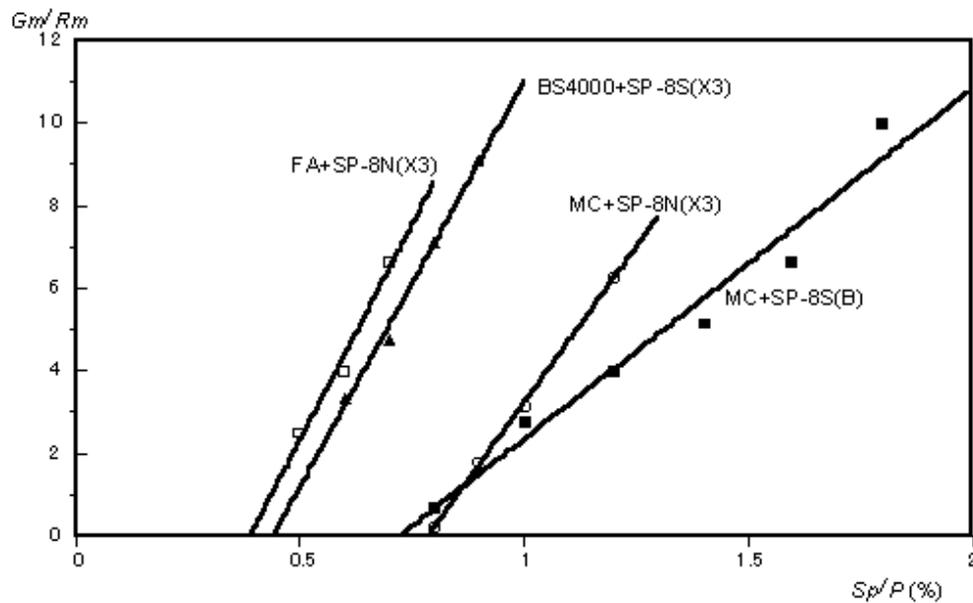


Figura 4.11 – Relações lineares obtidas para diferentes materiais finos e superplastificantes

A relação entre  $G_m$  e  $R_m$  fazendo variar  $Sp/P$ , para um dado valor de  $V_w/V_p$ , foi também investigada, tal como se apresenta na Figura 4.12. Nesta figura, cada linha corresponde a um valor da razão água/finos e o número associado a cada ponto corresponde à dosagem de superplastificante (em porcentagem do peso dos finos).

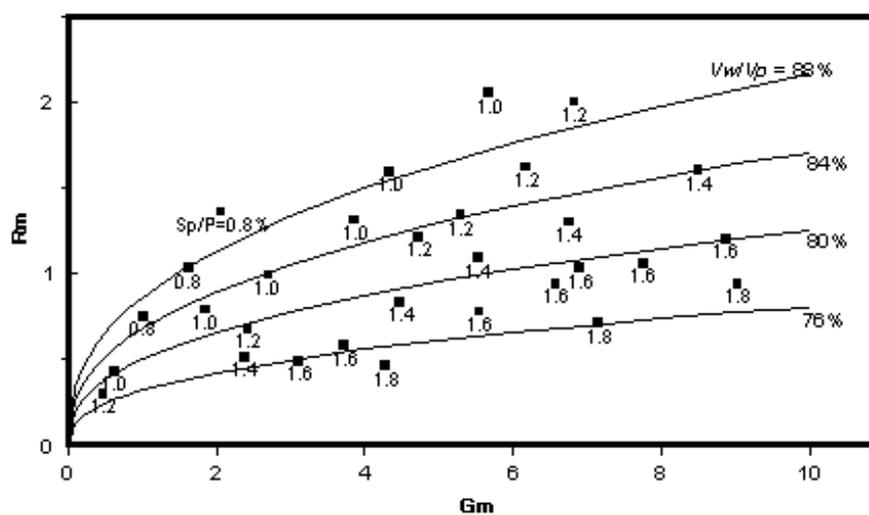


Figura 4.12 - Relação entre  $G_m$  e  $R_m$  para diferentes valores de  $Sp/P$  e  $V_w/V_p$

A expressão (4.2. 6) apresenta a relação obtida, onde se introduz uma variável A, de tal forma que, existe uma relação linear entre A e  $V_w/V_p$ . Fazendo variar o tipo de materiais finos obtêm-se diferentes inclinações da recta, ver Figura 4.13.

$$R_m = A \cdot G_m^{0.4}, \text{ com } A = K \cdot \left( \frac{V_w}{V_p} \right) \text{ e } K = \text{constante} \quad (4.2. 6)$$

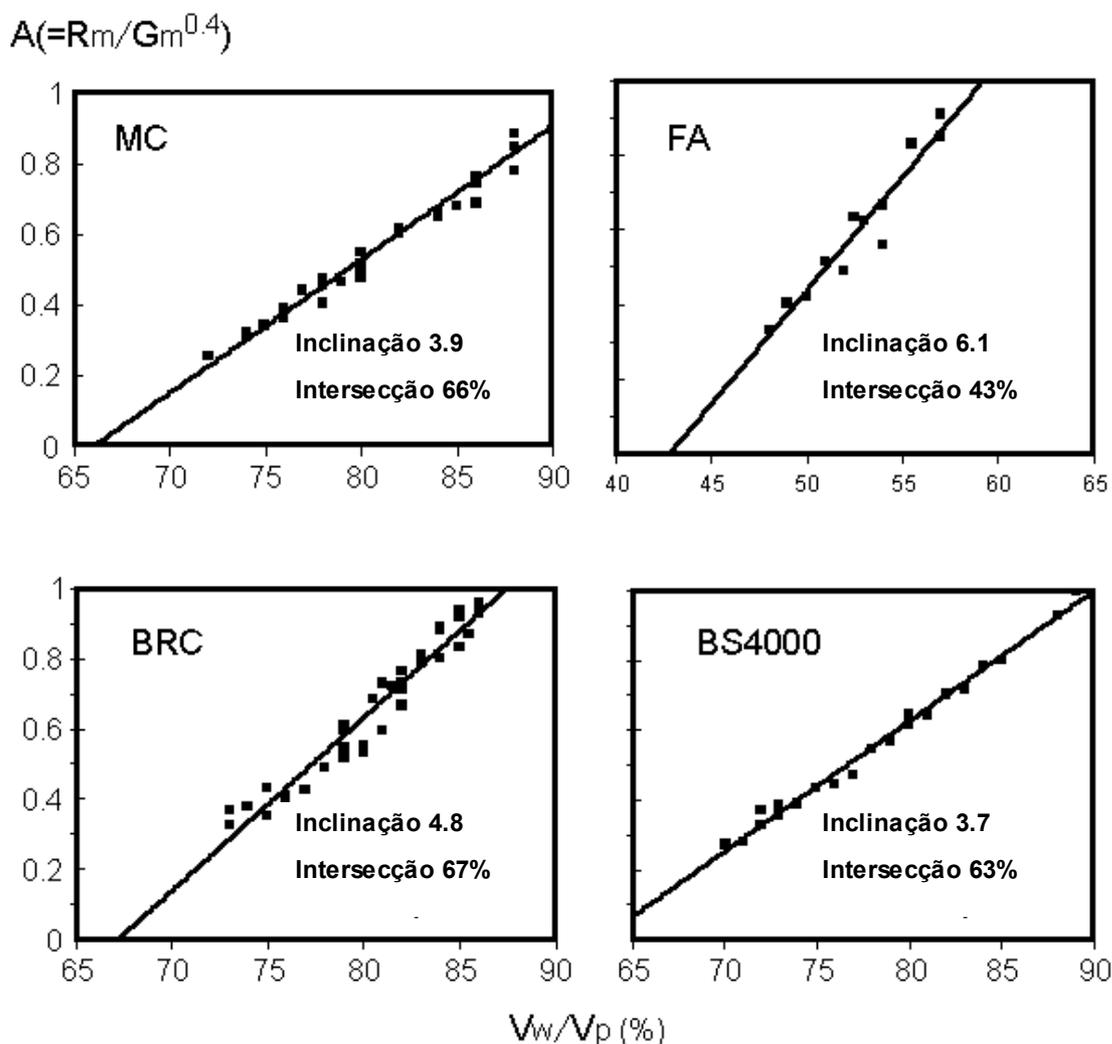


Figura 4.13 – Relações obtidas entre  $V_w/V_p$  e A para diferentes materiais

Tal como se pode constatar na figura anterior obteve-se uma inclinação máxima para argamassas com cinzas volantes. Para materiais finos correntes, apresentando uma superfície específica  $Blaine=3000$  a  $4000\text{cm}^2/\text{g}$ , a inclinação ficou próxima de 4.0. Verificou-se também que a inclinação daquela recta é independente do tipo de superplastificante utilizado [Okamura et al., 2000].

## 4.3 Avaliação das propriedades do betão fresco, em laboratório e “in-situ”

Neste ponto pretende-se rever o estado da arte da caracterização do SCC, no estado fresco, referir os ensaios mais utilizados para o efeito (incluindo os mencionados na proposta de Okamura et al.), algumas vantagens e desvantagens, e discutir alguns dos pontos que precisam ser melhorados no futuro.

### 4.3.1 Propriedades relevantes do betão auto-compactável fresco

A realização do SCC veio mudar o conceito habitual de consistência do betão. A forma habitual de medir a consistência de um betão convencional é através do ensaio de abaixamento (“slump-test”), uma vez que o abaixamento do betão serve para traduzir em geral, de forma aproximada, a trabalhabilidade do betão. Assim, pequeno abaixamento e elevado abaixamento significa betão não-trabalhável e betão sujeito à ocorrência de segregação, respectivamente. Por outras palavras, a consistência do betão fresco convencional é avaliada do ponto de vista unidimensional. Em contrapartida, o SCC é fluido, mas coeso exigindo uma avaliação bidimensional, com parâmetros da reologia como a tensão de cedência e a viscosidade. Adicionalmente, as propriedades do betão auto-compactável fresco são expressas em termos de capacidade de enchimento, capacidade de passar entre espaços estreitos e resistência à ocorrência de segregação. Estas propriedades estendem-se desde as propriedades básicas do material até propriedades estritamente relacionadas com condições construtivas tais como a disposição da armadura. Assim, as propriedades do SCC são avaliadas de formas distintas dependendo se o objectivo é a selecção de materiais, definição da composição, controle de produção na central e verificação da conformidade no local de construção, por exemplo, com equipamentos precisos ou modelos de elementos estruturais, quase à escala real, no laboratório e com equipamentos mais simplificados “in-situ”.

A capacidade de enchimento é definida como a propriedade do betão fresco através da qual o betão pode fluir no interior de espaços e ficar completamente compactado, sem vibração. O grau de capacidade de enchimento depende da forma da cofragem e da densidade de armadura, mas também do modo com vai decorrer a betonagem, ou seja, a velocidade e o volume depositado. SCC’s com a mesma composição e as mesmas propriedades reológicas podem apresentar diferentes capacidades de enchimento quando sujeitos a diferentes condições, assim o SCC deve ser concebido para satisfazer o nível de capacidade de enchimento requerido. Quando o SCC é colocado numa cofragem cujo interior esteja congestionado com armadura, deve passar “suavemente” nos espaços entre os varões sem bloquear devido a interações entre as partículas

do agregado e/ou entre as partículas de agregado e os varões. Se for exigido um tempo de execução pequeno o SCC deve fluir com pequena inclinação da superfície livre, mesmo que a velocidade de depósito seja elevada. O SCC é geralmente depositado no interior da cofragem numa posição fixa devendo fluir no interior da área pretendida à custa do peso próprio sem causar segregação, ou seja, mantendo a composição inicial uniforme, resultando assim em estruturas de betão homogéneas. Outras propriedades adicionais relacionadas com a bombagem, o acabamento da superfície, a resistência à lavagem, etc., podem ser importantes e especificadas para projectos/aplicações particulares.

As propriedades chave devem ser mantidas em níveis adequados por um período de tempo determinado (por exemplo, 90 minutos) após o final da composição. A capacidade de passar entre espaços estreitos e a resistência à segregação constituem o maior avanço relativamente às tradicionais composições de betão fresco com um superplastificante, que podem ser mais fluidas que uma composição de SCC.

#### **4.3.2 A necessidade de utilizar ensaios não-normalizados**

A forma de testar a composição de um SCC é uma das maiores dificuldades que surge e o desafio mais imediato para o futuro. O comportamento do SCC fresco e as suas propriedades chave, que devem ser especificadas e medidas, colocam-no fora do âmbito dos ensaios normalizados para avaliação da trabalhabilidade e outras propriedades relacionadas com o betão fresco. Actualmente, não existem nas normas europeias (EN 206) ou outras nacionais (em países da Europa ou fora dela) ensaios de avaliação da trabalhabilidade que permitam uma verificação rápida das propriedades chave destes betões, no estado fresco, “in-situ”, com o objectivo de verificar se a composição é auto-compactável. Consultando as actuais normas europeias (EN 206) para especificação e medição da trabalhabilidade do betão tradicional vibrado é possível verificar que são inadequadas para SCC. De entre os diferentes ensaios indicados na ENV 206, refere-se que para betões de grande trabalhabilidade quando se usam adjuvantes altamente redutores de água, como é o caso do SCC, convém utilizar-se o ensaio de espalhamento. Este ensaio, eliminando a compactação conferida pelas pancadas, seria aplicável. No entanto, muitos autores defendem que o cone apresenta dimensões demasiado reduzidas. Por outro lado, ainda não foram estabelecidos ensaios fiáveis que permitam avaliar quantitativamente parâmetros tais como a resistência à segregação (estabilidade da composição) e a capacidade de passar entre espaços estreitos (resistência ao bloqueio).

A história do desenvolvimento do SCC na qual as grandes empresas, no Japão, e investigadores de outros países desenvolveram os seus próprios métodos de ensaio, isoladamente, conduziu à prática corrente de SCC que assenta em mais do que o número usual

de ensaios diferentes, apenas parcialmente aplicáveis. Os ensaios não foram normalizados ou harmonizados. Tais como com outros tipos de novos betões, podem concluir-se projectos com sucesso utilizando ensaios não-normalizados, mas existe um acréscimo de custos com o aumento da necessidade de utilização de ensaios “semi-relevantes” e é exigida substancial experiência prévia para uma interpretação correcta dos resultados. Por outro lado, em países como a Alemanha, na ausência de normas e regulamentos aplicáveis ao SCC a sua utilização, na área de aplicação da DIN 1045, exige uma aprovação por parte das autoridades ou “individual approval”, o que se traduz num acréscimo de custos.

Verifica-se a necessidade de identificar métodos de ensaio apropriados para serem aceites como normas europeias e, se for caso disso, desenvolver novos ensaios. É necessário estabelecer ensaios que permitam ser reproduzidos, tenham precisão, garantam repetibilidade e, ao mesmo tempo, fornecer orientações para a interpretação dos respectivos resultados. Os ensaios normalizados devem fornecer uma avaliação rápida e fiável das propriedades-chave do SCC fresco, no local de construção, e o respectivo equipamento de ensaio deve ser robusto, fiável, fácil de transportar e pouco dispendioso. Os resultados obtidos devem ter significado podendo ser interpretados por técnicos com uma formação mínima e utilizados para identificar diferentes composições de SCC. A gama de sensibilidade dos ensaios normalizados deve ser tal que permita a especificação de diferentes composições de SCC, com parâmetros ajustados a uma determinada aplicação. Há a possibilidade de serem realizados ensaios indirectos para as propriedades chave se não existirem ensaios directos fiáveis. Devem ainda ser identificados métodos de ensaio suplementares, para o laboratório, baseados na avaliação da trabalhabilidade/reologia das composições de SCC [Bartos, 2001].

Como se pode imaginar, o trabalho de investigação e desenvolvimento necessário para estabelecer novos ensaios normalizados é complexo e exigente. A única verificação fiável da capacidade de um determinado ensaio para detectar variações significativas nas propriedades chave é conseguida realizando experiências à escala real, nas quais se betonam elementos estruturais típicos com diferentes tipos de armadura. A falta de ensaios normalizados, que forneçam os dados adequados para a especificação e conformidade das composições de SCC, tem adiado a adopção do SCC pela construção em geral.

### 4.3.3 Métodos de avaliar as propriedades do betão auto-compactável fresco

Foram desenvolvidos diversos ensaios especificamente para SCC envolvendo, habitualmente, o betão a passar através de secções com varões. Apesar de existir alguma correlação entre os resultados destes ensaios existe pouco consenso no que respeita às dimensões dos equipamentos, espaçamentos entre os varões, etc..

- Medições reológicas

Para caracterizar o comportamento do SCC fresco é necessário medir as duas constantes reológicas, a tensão de cedência e a viscosidade, ou medir grandezas relevantes relacionadas com estas constantes físicas. Os ensaios sobre a reologia permitem a obtenção directa e a aproximação teórica das constantes reológicas baseada nos resultados dos ensaios. O equipamento para estes ensaios envolve um mecanismo complexo e preciso, devendo apresentar dimensões suficientemente grandes para se poder considerar o SCC como um fluido homogéneo. Assim, estes tipos de ensaios ficam limitados às aplicações em laboratório. É necessário atender à alteração que este tipo de ensaios pode provocar no fluxo e, conseqüentemente, nas propriedades do SCC, por outro lado, o aparelho de medição pode facilmente ser afectado pelo peso do SCC e o próprio desgaste mecânico. Muitas vezes, é difícil encontrar relações entre os resultados de diferentes modelos deste tipo de equipamentos.

As constantes reológicas descrevem vários aspectos da trabalhabilidade de um SCC, mas não todos. A avaliação do comportamento reológico constitui um dado valioso para a avaliação da trabalhabilidade. As medições reológicas, sendo realizadas com equipamento de laboratório, prestam-se mais para o desenvolvimento de novas composições e ensaio de novos materiais, de uma forma mais científica. As medições da trabalhabilidade, por exemplo, como o “Ensaio de espalhamento do betão” ou “Ensaio da caixa-L”, têm sido usadas como ensaios de rotina na entrega e aceitação do betão “in-situ”. Nestes ensaios, geralmente, são avaliadas a deformação final e a velocidade do movimento, parâmetros estes, que podem relacionar-se com as constantes reológicas.

Como exemplos de métodos para a avaliação da reologia existem: o “Reómetro de cilindros coaxiais” no qual é colocada uma amostra de betão na folga existente entre dois cilindros coaxiais de diâmetros diferentes e é medido o momento torsor no cilindro exterior para diferentes velocidades de rotação do outro; o “Ensaio de elevação da esfera” no qual é medida a força que é necessária para elevar uma esfera do interior da amostra de betão, a diferentes velocidades; o “Ensaio da caixa de corte” onde é medida a força de corte aplicada a uma amostra de betão, colocada no interior de uma caixa, para diferentes velocidades enquanto sujeita a uma força

vertical constante; o “Ensaio dos dois pontos”, concebido por *Tattersal*, no qual é mergulhada uma haste com pás laterais numa amostra de betão, no interior de um copo, medindo-se o momento torsor necessário para provocar a rotação da haste a uma dada velocidade [Noguchi e Mori, 1998]. No âmbito do projecto europeu Brite-Euram, incluído na tarefa de definição da composição levada a cabo pelo LCPC, foram utilizados o “Ensaio BML” e “Ensaio BTRHEOM”, ver Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente. O primeiro destes é um modelo mais avançado do “Ensaio dos dois pontos”, e apesar do esforço promocional, este ensaio não alcançou aceitação geral para um ensaio “in-situ”. No “Ensaio BTRHEOM” foi adoptada uma abordagem distinta, este pretende fornecer dados reológicos básicos como resultados do ensaio. O equipamento de ensaio tornou-se mais compacto e de utilização mais agradável, contudo constitui ainda um equipamento de ensaio complexo e muito dispendioso e, por isso, apenas ao alcance de alguns laboratórios mais desenvolvidos.



Figura 4.14 – Aspecto do equipamento do “Ensaio BML”



Figura 4.15 – Aspecto do equipamento do “Ensaio BTREOM”

- Ensaio de espalhamento do betão

Este ensaio define a capacidade do betão se deformar quando sujeito apenas à acção do peso próprio e da resistência oferecida pelas paredes do molde. O “Ensaio de espalhamento do betão” é um dos métodos mais usados para avaliar a consistência do SCC, tanto em laboratório como no local de construção, graças à facilidade de operação e de transporte. Apesar de ser adoptado pela grande maioria dos investigadores que lidam com o SCC, ainda existe alguma confusão. Este ensaio pode ser executado tanto como uma variante do ensaio de abaixamento (utilizando o cone de *Abrams*) ou como uma variante do ensaio de espalhamento (com um cone mais pequeno) sem pancadas. Este molde, segundo especificado pela JCSE, apresenta as mesmas dimensões que o molde especificado pela NP-87 para o ensaio de abaixamento. Este é um ensaio de controle bastante útil, depois de estudada a composição em laboratório, mas ainda assim exige a observação de um operador experiente para a decisão de aceitação ou não do SCC. Serve igualmente para verificar a estabilidade do betão, os agregados devem estar distribuídos uniformemente até à periferia onde também não se deve verificar a ocorrência de segregação. Contudo, com este ensaio não se consegue avaliar a capacidade do betão passar através de zonas reforçadas com armadura, uma vez que a deformabilidade do betão é avaliada quando sujeito a poucas restrições externas, deforma-se sobre uma superfície plana sem obstáculos. Ou seja, betões com o mesmo valor do diâmetro de espalhamento podem apresentar comportamentos diferentes ao passar por obstáculos, como é o caso das armaduras, dependendo das proporções na composição. Quando este ensaio é executado no local de construção requer a existência de uma superfície nivelada e em boas condições. Caso se pretenda determinar o tempo que a amostra demora a atingir um diâmetro determinado (frequentemente, 500mm) torna-se difícil determinar o instante exacto com precisão.

- Ensaio de fluidez do betão

Convencionalmente, utilizam-se funis para medir a viscosidade aparente de pastas e caldas de injeção. O ensaio realizado com o funil é uma forma simples de avaliar a capacidade de o betão passar através de espaços limitados. Os funis convencionais possuem uma secção transversal circular, através da qual o betão sofre uma deformação tridimensional. Contudo, nas cofragens correntes o betão ao passar através das armaduras deforma-se de uma forma bidimensional, o que justifica a forma do funil utilizado, ver Figura 4.16. Depois de encher o funil com o betão, mede-se o tempo que decorre desde a abertura do orifício de descarga e o aparecimento do primeiro raio de luz no fundo do funil, quando se olha verticalmente pela parte superior do mesmo. Segundo proposto por diferentes autores é desejável obter um tempo de escoamento do betão da ordem de 10 segundos. Apesar de existirem diferentes propostas para as dimensões dos funis estas, em geral, apresentam duas ordens de grandeza distintas, consoante se destinam a ensaiar betões ou argamassas, como foi apresentado anteriormente.



Figura 4.16 – Equipamento para o “Ensaio de fluidez”

- Ensaio da caixa-U e ensaio da caixa

Estes são ensaios para avaliar a capacidade do betão passar através dos varões da armadura devido apenas à acção do peso próprio. A auto-compactabilidade é avaliada à custa da altura alcançada pelo betão depois de passar através de um obstáculo constituído por varões paralelos, com um espaçamento reduzido entre eles. A vantagem deste ensaio é a facilidade de medição, sobretudo se existir um material transparente na parte onde se procede à avaliação da altura do betão. Estes ensaios são eficazes apenas para decidir se o betão possui ou não suficiente auto-compactabilidade, como se esquematiza na Figura 4.17. Se o betão não apresentar suficiente auto-compactabilidade, a causa deve ser detectada quantitativamente, de tal forma que, as proporções na composição sejam corrigidas.

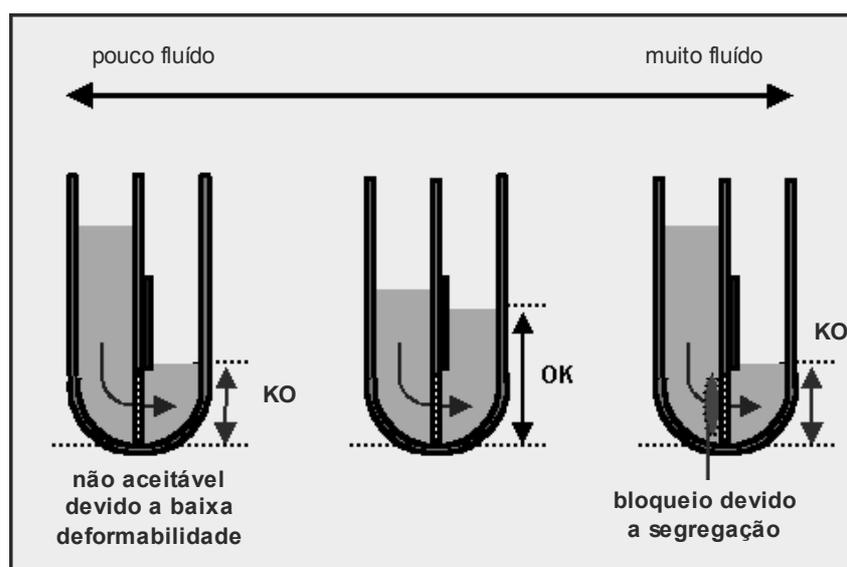


Figura 4.17 – Avaliação da auto-compactabilidade com o “Ensaio da caixa-U”

- Ensaio da caixa-L

O “Ensaio da caixa-L” constitui uma alternativa aos ensaios anteriores pois permite igualmente avaliar a capacidade do betão passar através das armaduras por acção do peso próprio, ver Figura 4.18. A auto-compactabilidade é avaliada em termos da altura alcançada pelo betão depois de passar através de varões de aço paralelos e de percorrida uma distância na horizontal. Com este ensaio é possível avaliar diferentes propriedades com é o caso da deformabilidade, bloqueio e segregação. A parte vertical da caixa é cheia com betão que se deixa a repousar durante 1 minuto. Durante este período de tempo, por observação visual, é possível verificar se o betão é ou não estável, e se ocorre segregação. Depois, a comporta é aberta e o betão flui da parte vertical para a horizontal passando através dos varões de aço. Pode ainda determinar-se a velocidade de movimento do betão medindo o tempo que o betão demora a percorrer 200 e 400mm ao longo da parte horizontal. No final do movimento, determina-se a razão entre a altura do betão na parte final e a altura na coluna (ver com maior detalhe em 5.3.3). Segundo *Peter Billberg* do CBI [Petersson e Billberg, 1999] o valor desta razão deve ser maior ou igual a 0.8.



Figura 4.18 – Funcionamento do “Ensaio da caixa-L”

Os resultados obtidos com este ensaio são bastante úteis, mas não existe consenso quanto aos principais parâmetros do equipamento de ensaio, tais como o tamanho ou a forma da caixa em forma de L, ainda existe pouco conhecimento sobre a influência dos parâmetros da caixa-L nos resultados dos ensaios. Outra dificuldade prática surge com os pontos exactos onde devem ser medidas as alturas do betão. A avaliação da resistência ao bloqueio na “caixa-L” é efectuada com uma amostra de betão que está inicialmente em repouso, sendo esta uma crítica frequente.

- O ensaio do “Orimet” e do anel japonês

O “Orimet” consiste num tubo vertical com uma parte amovível, com uma forma cónica, na zona inferior, ver Figura 4.19. No fundo é utilizada uma comporta de abertura rápida para fechar o orifício. Este tubo possui um diâmetro interno de 120mm que na parte inferior se reduz gradualmente até 80mm. Esta redução do diâmetro é adequada para agregados com uma dimensão que não ultrapassa os 20mm. Dependendo da composição e da trabalhabilidade pretendida, podem ser adaptados orifícios com outros diâmetros, habitualmente de 70 a 90mm. O tubo é suportado por um tripé cujas pernas podem ser recolhidas, o que facilita o transporte. Existem duas possibilidades para realizar o ensaio do “Orimet”. Uma delas consiste em, depois de encher o tubo com uma amostra de betão (7.5litros) e de abrir a comporta inferior, olhando pela parte superior, medir o tempo que o betão leva a escoar, considera-se como instante final aquele em que aparece o primeiro raio de luz na parte inferior do tubo. Outra possibilidade, em vez de obter o tempo de escoamento, consiste em abrir a comporta e observar o escoamento pelo orifício. Quando o escoamento parar, aguarda-se 5 a 10 segundos, olha-se para o interior do funil para verificar se todo o betão foi descarregado. Este ensaio apresenta como vantagens a capacidade de distinguir as composições de SCC com diferentes deformabilidades, simula de forma aproximada o movimento do betão aquando da sua colocação em obra, é um ensaio versátil, simples, com equipamento fácil de executar e transportar.

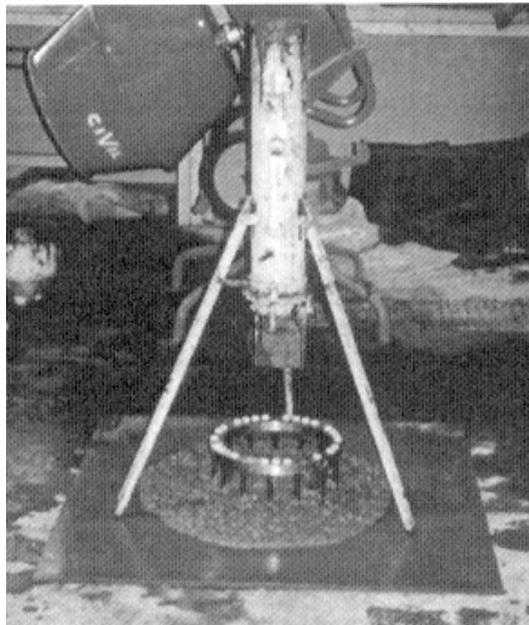


Figura 4.19 – Aspecto do “Orimet” juntamente com o anel japonês

Quando a este ensaio se juntou o “anel japonês” foi possível ultrapassar algumas das limitações do “Ensaio da caixa-L”, no que respeita à avaliação da resistência ao bloqueio. O “Ensaio do anel” foi desenvolvido originalmente no Japão, constituído por um anel de 300mm de

diâmetro ligado a varões verticais de diâmetro e espaçamento fixo, tendo sido utilizado conjuntamente com o “Ensaio de espalhamento do betão”. Este anel foi redesenhado no ACM (“Advanced Concrete and Masonry Centre” -Escócia) passando a ser constituído por um anel de secção transversal rectangular no interior da qual é possível dispor numerosas combinações de diâmetros de varões e espaçamentos entre eles. Colocando este anel com varões verticais sobre uma superfície, e deixando cair o betão que escoo do “Orimet” no centro do anel, é possível examinar o bloqueio do betão, junto aos varões, em condições de escoamento dinâmicas, ver Figura 4.20. O bloqueio é avaliado pela razão entre as alturas médias do betão retido no interior do anel e fora dele.

O “Ensaio do Orimet” foi desenvolvido originalmente pelo Prof. *Bartos* do ACM, Escócia, [Bartos, 1998] para avaliar a trabalhabilidade de betões deformáveis, no estado fresco, em combinação com o “Anel japonês”, um ensaio de avaliação da capacidade do betão passar entre varões. Esta combinação tem sido investigada pela possibilidade de medir a fluidez (viscosidade), detectar baixa resistência à segregação e verificar o potencial bloqueio. O “Anel japonês” da forma como tem vindo a ser utilizado permite ajustar as condições de bloqueio para simular as condições reais da armadura e constitui uma forma mais realista, e dinâmica, de testar o SCC quando combinado com o “Orimet”. Neste ensaio não ocorre o efeito de parede quando comparado com o “Ensaio da caixa-L”.



Figura 4.20 – Medição do diâmetro de espalhamento no final do “Ensaio do Orimet e do anel japonês”

- Execução de modelos à escala real

A capacidade de enchimento é muitas vezes avaliada em modelos à escala real, ou pouco reduzida, de elementos ou partes de elementos das estruturas de betão armado, ver Figura 4.21. A capacidade de enchimento é avaliada com base na observação e/ou medida do comportamento

do movimento do betão, como seja, inclinação da superfície livre do escoamento, velocidade, deformação final, distribuição dos agregados e existência de defeitos.

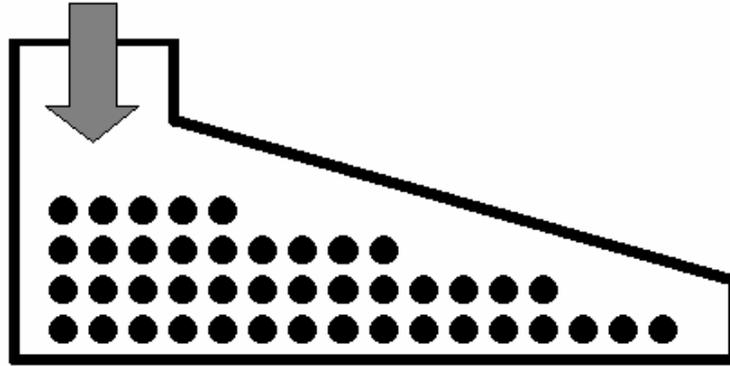


Figura 4.21 – Modelo de um elemento de fundação



# Capítulo 5

## Fase experimental: estudo de composições

---

### 5.1 Introdução

Antes de iniciar qualquer tipo de caracterização das propriedades do SCC, no estado endurecido, foi necessário dominar a forma de conceber a composição. Este é um aspecto fundamental e que pela falta de consenso no seio da comunidade científica constitui a primeira tarefa a ser ultrapassada pelo investigador que inicie o tratamento deste assunto.

Numa primeira abordagem, tendo por base a informação divulgada sobre composições de SCC em diversos países, optou-se por um estudo iterativo de uma composição, utilizando um determinado conjunto de materiais locais [Nunes et al., 2001b]. De notar que, o estudo da composição do SCC, que apresenta características inovadoras em termos de consistência, não pode ser efectuado com os métodos utilizados para um betão convencional, como é o caso do *Método de Faury*.

Rapidamente, se percebeu que o processo iterativo de obtenção de uma composição que satisfaça os critérios de auto-compactabilidade é, geralmente, moroso não permitindo identificar

de uma forma isolada o efeito de cada um dos constituintes e a interação entre eles. Por estes motivos, de entre as diferentes metodologias divulgadas, procurou-se um método que permitisse realizar o estudo da composição de uma forma mais científica, recorrendo a ensaios com equipamentos simples já existentes ou de fácil execução. O método escolhido foi o proposto pelo grupo de investigação liderado pelo *Prof. Okamura* e serviu de base para o estudo de composições com dois conjuntos de materiais distintos, disponíveis no mercado português. Neste capítulo apresenta-se esse estudo e retiram-se algumas conclusões quanto à viabilidade da proposta original de *Okamura*, no contexto das condições existentes em Portugal.

## 5.2 Materiais constituintes e preparação das amostras

### 5.2.1 Materiais

#### 5.2.1.1 Cimento

No decorrer deste trabalho foi utilizado cimento Portland do Tipo I 42.5 R e do Tipo II 32.5 (segundo a NP 2064) cuja composição química, propriedades físicas e os valores médios da resistência à compressão, determinado em provetes de argamassa normalizada, são fornecidas no Quadro 5.1. Estes dados foram obtidos a partir do controlo estatístico anual realizado pela empresa *CIMPOR*.

Quadro 5.1 – Caracterização dos cimentos utilizados

		<b>Tipo I 42.5 R</b>	<b>Tipo II 32.5</b>
Características Químicas	<b>SiO<sub>2</sub></b>	19.68 %	18.36 %
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.22 %	4.77 %
	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.29 %	2.97 %
	<b>CaO total</b>	62.14 %	60.48 %
	<b>MgO</b>	2.52 %	2.42 %
	<b>SO<sub>3</sub></b>	3.33 %	2.69 %
	<b>perda ao fogo</b>	2.63 %	7.10 %
	<b>cloretos</b>	0.01 %	0.01 %
	<b>cal livre</b>	1.01 %	0.90 %
	<b>resíduo insolúvel</b>	2.03 %	2.63 %
Características Físicas	<b>massa volúmica</b>	3150 kg/m <sup>3</sup>	3080 kg/m <sup>3</sup>
	<b>superfície <i>Blaine</i></b>	3708 cm <sup>2</sup> /g	3774 cm <sup>2</sup> /g
	<b>tempo início de presa</b>	166 minutos	179 minutos
	<b>tempo fim de presa</b>	222 minutos	235 minutos
	<b>expansibilidade</b>	1.0 %	1.1 %
Características Mecânicas Médias	<b>resist. compressão 2 dias</b>	33.7 MPa	22.3 MPa
	<b>resist. compressão 7 dias</b>	45.3 MPa	33.8 MPa
	<b>resist. compressão 28 dias</b>	53.3 MPa	40.6 MPa

#### 5.2.1.2 Fíler calcário

A maior quantidade de finos necessária para uma composição de SCC é, muitas vezes, conseguida à custa de uma composição de cimento e adições. Nas composições estudadas foi utilizado filer calcário, fornecido pela empresa *COMITAL Companhia Mineira de Talcos, Lda*. A escolha deste material, em detrimento de outras adições, deve-se a uma maior oferta no mercado português. Em geral, utilizou-se o filer com a designação *Micro 100*, mas em algumas das composições na fase de investigação preliminar [Nunes et al., 2001b] utilizou-se um filer com a designação *Plastex 25*. A diferença entre eles reside na granulometria, o *Plastex 25* apresenta maior finura que o *Micro 100*, tal como se pode constatar no Quadro 5.2 onde se caracterizam ambos os materiais. O facto de o *Plastex 25* apresentar um maior número de partículas com dimensão inferior às do cimento pode contribuir para um maior sucesso na concepção de uma composição de SCC, estas partículas ocupam os vazios entre as partículas de cimento contribuindo para um maior empacotamento. No entanto, a produção actual deste produto é insuficiente para aplicações industriais, no fabrico de betão, e o preço praticado torna-o numa opção inviável do ponto de vista económico. Por estas razões, voltou-se a utilizar o *Micro 100* no estudo das composições de betão, que tinham em vista uma aplicação prática em obra. Por outro

lado, a partir sensivelmente do início do ano de 2001, com a instalação de um novo moinho, a distribuição granulométrica do *Micro 100* foi alterada, passando a conter um maior número de partículas de menor dimensão. Este material passou a apresentar 78.7% de partículas com dimensão <10 $\mu$ m e 19% de partículas com dimensão <2 $\mu$ m. Todas as características apresentadas foram obtidas a partir das respectivas fichas técnicas, disponibilizadas pela empresa.

Quadro 5.2 – Caracterização dos dois tipos de filer calcário utilizados

		<b>Micro 100</b>	<b>Plastex 25</b>
Características Químicas	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	99.0 %	99.0 %
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	< 0.4 %	< 0.4 %
	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.04 %	0.04 %
	<b>insolúveis em HCl</b>	0.36 %	0.36 %
Características Físicas	<b>massa volúmica</b>	2700 kg/m <sup>3</sup>	2700 kg/m <sup>3</sup>
	<b>superfície Blaine</b>	5150 cm <sup>2</sup> /g	--
	<b>perda ao fogo</b>	43.10 %	43.10 %
	<b>partículas &lt; 106 <math>\mu</math>m</b>	99.9 %	--
	<b>partículas &lt; 36 <math>\mu</math>m</b>	--	99.8 %
	<b>partículas &lt; 25 <math>\mu</math>m</b>	82.0 %	--
	<b>partículas &lt; 10 <math>\mu</math>m</b>	62.0 %	--
	<b>partículas &lt; 2 <math>\mu</math>m</b>	--	16.0 %
<b>diâmetro médio</b>	4.52 $\mu$ m	3.95 $\mu$ m	

### 5.2.1.3 Cinzas volantes

Tal como foi referido anteriormente, nas composições de betão estudadas no âmbito deste trabalho utilizou-se como adição o filer calcário. No contexto actual, uma central de betão depara-se com dificuldades em assegurar um fornecimento regular de cinzas nacionais, absorvidas na sua maioria pelas empresas cimenteiras. Por esta razão, a utilização de cinzas vindas de Espanha tem constituído uma solução alternativa.

Neste trabalho, os estudos com as pastas e argamassas, também contemplaram uma composição de cimento e cinzas volantes. Estas cinzas foram originárias da central térmica *Compostilla II*, cuja caracterização que nos foi facilitada se apresenta no Quadro 5.3. A partir da amostra que nos foi fornecida, na FEUP, realizou-se um ensaio para determinação da massa volúmica, tendo-se obtido um valor de 2310 kg/m<sup>3</sup>.

Quadro 5.3 – Caracterização química das cinzas

<b>Cinzas</b>		
Características Químicas	<b>SiO<sub>2</sub></b>	55.23 %
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	26.46 %
	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	8.75 %
	<b>CaO</b>	2.84 %
	<b>MgO</b>	2.17 %
	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.77 %
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	3.67 %
	<b>SO<sub>3</sub></b>	0.01 %
	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1.01 %

#### 5.2.1.4 Agregados

Os agregados foram cedidos pela empresa *ENGIL* e as composições de betão foram estudadas para dois conjuntos de agregados distintos, um deles proveniente da central de betão-pronto de Valongo e o outro da central de Penacova. A caracterização destes materiais apresenta-se nos parágrafos seguintes. Estes dados foram disponibilizados pelo laboratório da central tendo sido confirmados por ensaios realizados no Laboratório de Estruturas (LE) e Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), da FEUP, em especial a caracterização granulométrica. Ao longo deste trabalho cada conjunto de materiais será designado à custa do nome do local de origem.

#### *Agregados de Valongo*

Este conjunto de agregados é constituído por duas areias, uma areia fina natural originária de S. Jacinto (Areia V1) e uma areia média artificial resultante da britagem de granito (Areia V2), e por uma brita de origem granítica, com dimensão máxima de 19mm (Brita V1). No Quadro 5.4 apresenta-se a caracterização de cada material e na Figura 5.1 as respectivas curvas granulométricas. Em algumas das experiências efectuadas a distribuição granulométrica inicial da areia artificial foi alterada; essa alteração será mencionada oportunamente.

Quadro 5.4 – Caracterização do conjunto de agregados de Valongo

Designação	Agregados finos		Agregado grosso
	Areia V1	Areia V2	Brita V1
<b>gama de dimensões (mm)</b>	0.15 – 1.18	0.15 – 4.75	4.75 – 19.0
<b>módulo de finura</b>	2.06	3.63	6.85
<b>massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2599	2533	2622
<b>absorção (%)</b>	0.39	0.74	0.99
<b>baridade não compactada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1510	1493	1416
<b>baridade compactada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1657	1629	1517

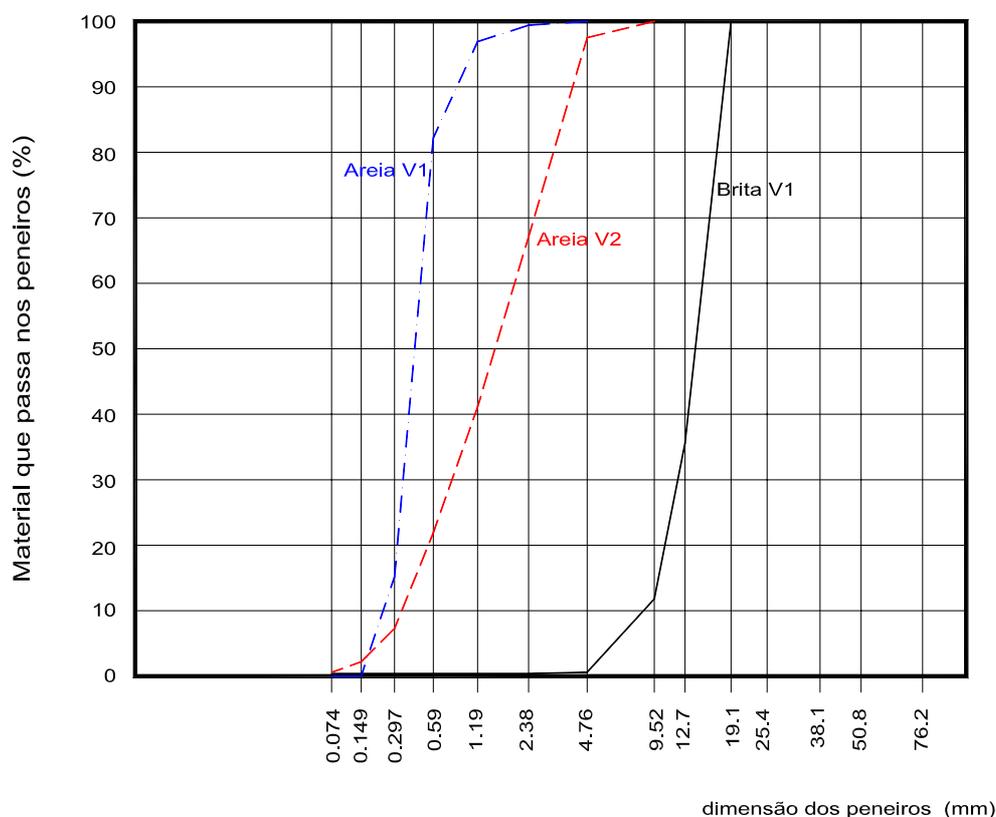


Figura 5.1 – Curvas granulométricas do conjunto de agregados de Valongo

### Agregados de Penacova

Este conjunto de agregados é constituído por duas areias naturais, de origem siliciosa, uma areia fina natural (originária da Figueira da Foz) e uma areia média do rio Mondego, e por uma brita de origem calcária, com dimensão máxima de 12.5mm. No Quadro 5.5 apresenta-se a caracterização de cada material e na Figura 5.2 as respectivas curvas granulométricas.

Quadro 5.5 – Caracterização do primeiro conjunto de agregados de Penacova

Designação	Agregados finos		Agregado grosso
	Areia P1	Areia P2	Brita P1
<b>gama de dimensões (mm)</b>	0.15 – 2.36	0.30 – 4.75	4.75 – 12.5
<b>módulo de finura</b>	2.00	4.02	6.44
<b>massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2621	2554	2627
<b>absorção (%)</b>	0.40	1.42	0.60
<b>baridade não compactada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1340	--	--
<b>baridade compactada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1510	--	--

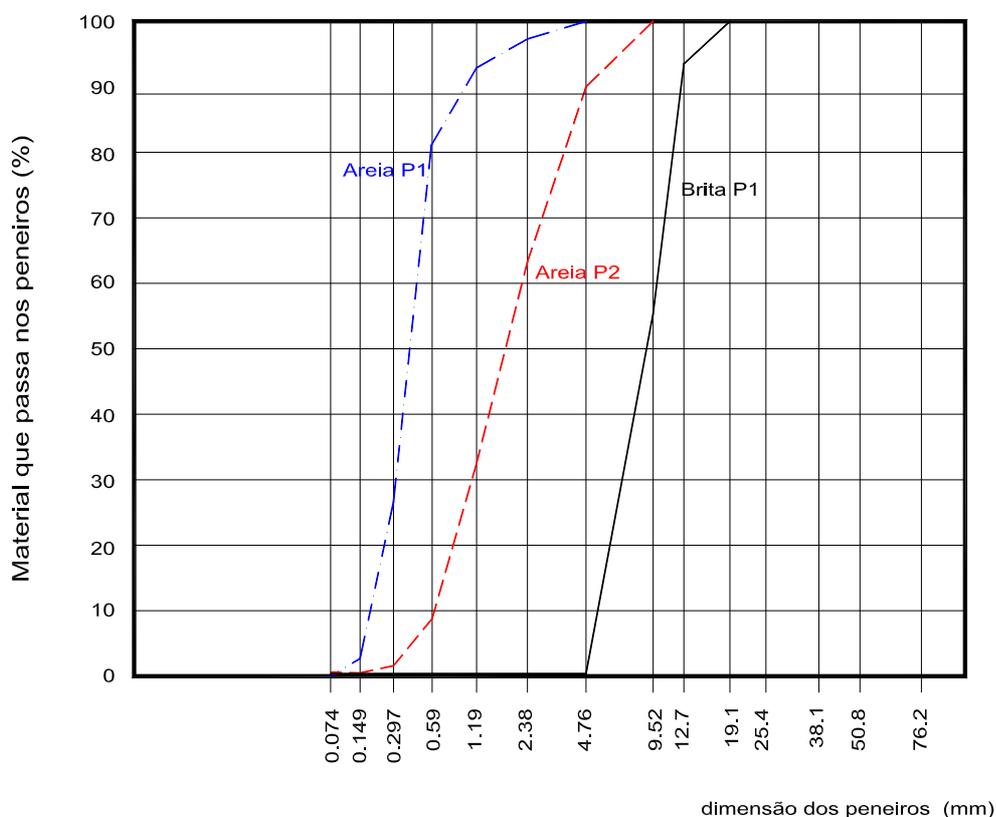


Figura 5.2 – Curvas granulométricas do primeiro conjunto de agregados de Penacova

Alguns meses depois do primeiro estudo realizado com os materiais de Penacova foi novamente enviada para a FEUP uma amostra dos materiais que estavam a ser utilizados nessa central. Verificou-se que, entretanto os agregados finos tinham sido alterados, no entanto, continuava-se a utilizar duas areias. Por esta razão foi efectuada no LE da FEUP uma análise granulométrica dos referidos materiais que se apresenta na Figura 5.3. As restantes características apresentam-se no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Caracterização do segundo conjunto de agregados de Penacova

Designação	Agregados finos		Agregado grosso
	Areia P1'	Areia P2'	Brita P1
gama de dimensões (mm)	0.15 – 1.18	0.3 – 4.75	4.75 – 12.5
módulo de finura	1.95	4.04	6.47
massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2610	2620	2627
absorção (%)	--	--	0.60
baridade não compactada (kg/m <sup>3</sup> )	--	--	--
baridade compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1660	1612	1481

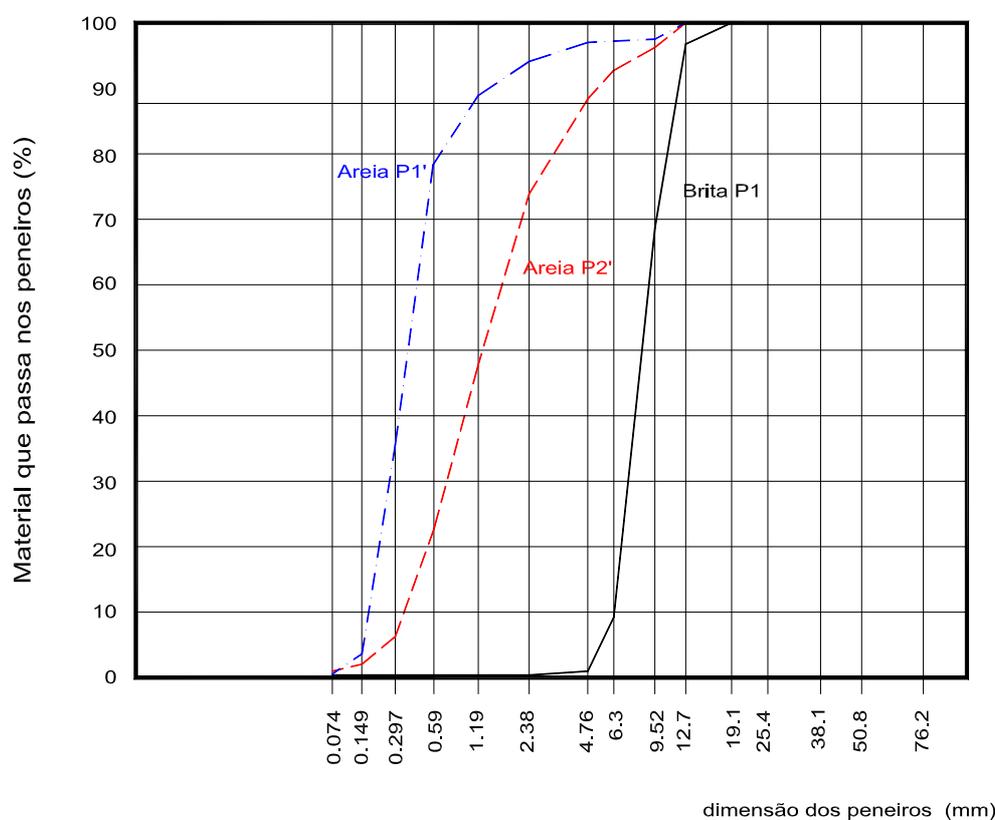


Figura 5.3 – Curvas granulométricas do segundo conjunto de materiais de Penacova

### 5.2.1.5 Adjuvantes

Nos ensaios realizados no âmbito deste trabalho foram utilizados adjuvantes de uma das marcas presentes no mercado português, *SIKA*. Utilizou-se o adjuvante recomendado pela marca para betão auto-compactável, com a designação comercial de *Viscocrete 3000*, e um agente introdutor de ar, designado *Sika AER5*. As principais propriedades destes produtos foram cedidas pelo fornecedor e apresentam-se no Quadro 5.7.

Quadro 5.7– Propriedades dos adjuvantes *SIKA* utilizados

Designação	<i>Viscocrete 3000</i>	<i>Sika AER5</i>
<b>base</b>	carboxilatos modificados	--
<b>aspecto</b>	líquido levemente amarelado	líquido castanho
<b>peso específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.06 ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>	1.03 ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>
<b>teor de sólidos</b>	--	7.1 ± 0.4 %
<b>pH</b>	7 ± 1	11 ± 1
<b>dosagem recomendada</b>	1.0 – 2.0% (*)	0.05 – 0.08% (*)

(\*) dosagem relativa à massa do cimento

Segundo esclarecimentos recolhidos junto do departamento técnico da *SIKA* o *Viscocrete 3000* contém como principais constituintes activos polímeros da família dos acrílicos. Contém outros menores para estabilização daqueles e para regular a introdução de ar. Não deve ser considerado um simples superplastificante (ou redutor de água de alta gama), porque esta categoria exige apenas uma redução de água de pelo menos 12%, enquanto que com o *Viscocrete 3000* é possível atingir 20, 25 ou mesmo 30% sem afectar negativamente o betão. No entanto, formalmente, como a norma EN 934-2 (ou a sua interna correspondente LNEC E 374) não prevê ainda a existência destes produtos recentes, o produto tem que ser “arrumado” nessa categoria.

## 5.2.2 Procedimentos de amassadura

Foram adoptados diferentes procedimentos de amassadura para as três fases do material estudadas: pasta dos finos, argamassa e betão.

### 5.2.2.1 Sequência de amassadura para as pastas

Para o estudo de diferentes composições de materiais finos, através da realização de ensaios com a pasta, foi utilizada a misturadora apresentada na Figura 5.4. Adoptou-se a seguinte sequência de amassadura: misturam-se os materiais finos (cimento+adições) com 80% da água total, durante 1 minuto, depois descola-se o material aderente às paredes da panela e na pá, com a ajuda de uma colher, e reinicia-se a mistura durante mais 1 minuto. Em seguida, adiciona-se a água restante (20% da água total) e deixa-se misturar por mais 1 minuto, ao fim do qual se repete a operação de limpeza das paredes e pá, deixa-se misturar por mais 0.5 minutos e desliga-se a misturadora. Aguarda-se 1 minuto sem mexer e, finalmente, mexe mais 0.5 minutos.

Esta mistura é sempre realizada a baixa velocidade com exceção dos últimos 0.5 minutos, que é realizada a alta velocidade.



Figura 5.4 – Misturadora utilizada na amassadura das pastas

#### 5.2.2.2 Sequência de amassadura para as argamassas

A sequência adoptada para as argamassas foi a utilizada por um grupo de investigadores, da Universidade de Delft, que verificaram a aplicabilidade do método proposto por *Okamura* na concepção de SCC com materiais holandeses [Takada et al., 1998b]. As argamassas estudadas foram amassadas na mesma misturadora utilizada para as pastas, respeitando a seguinte sequência de amassadura: a baixa velocidade, misturam-se os agregados finos, os finos e parte da água total (Água 1) durante 1 minuto, em seguida, descolam-se os materiais aderentes às paredes e pá com a ajuda de uma colher e reinicia-se a mistura por mais 1 minuto. Depois adiciona-se a água restante (Água 2 = Água Total - Água 1) onde previamente se juntou o superplastificante, e mistura-se durante 1 minuto ao fim do qual se repete a operação de limpeza das paredes e pá. Em seguida, mistura-se durante 0.5 minutos, pára-se o movimento durante 1 minuto, e finalmente, mistura-se novamente durante 0.5 minutos, mas a elevada velocidade. Para valor da Água 1 adoptou-se a massa correspondente a  $70\% \beta_p$  (ver 5.4.1), ou seja, é quantificada em função da maior ou menor exigência de água por parte da composição de materiais finos adoptada.

### 5.2.2.3 Sequência de amassadura para os betões

Ao longo do desenvolvimento deste estudo foram adoptadas três sequências de amassadura distintas, que serão designadas de sequência **A**, **B** e **C**. As amassaduras do betão foram efectuadas em dois tipos distintos de betoneira, consoante o volume desejado, uma betoneira de eixo vertical, ver Figura 5.5, apenas com uma velocidade e outra de eixo basculante, ver Figura 5.6.



Figura 5.5 – Amassadura do betão na betoneira de eixo vertical



Figura 5.6 – Amassadura do betão na betoneira de eixo basculante

### **Sequência A**

Esta sequência de amassadura foi uma das estudadas pelo grupo de investigação da Universidade de Delft [Takada et al., 1998b], para uma betoneira de eixo vertical. As fases da amassadura consistem em: colocar no tambor da betoneira os agregados finos e os materiais finos; iniciar o movimento da betoneira e a contagem do tempo; depois de serem executadas algumas rotações introduz-se a totalidade da água de amassadura onde previamente se adicionou o superplastificante. Ao fim de 3.0 minutos, introduz-se o agregado grosso e mistura-se por mais 1.5 minutos. No final deste período pára-se o movimento e aguarda-se durante 1 minuto. Finalmente, mistura-se durante 0.5 minutos.

### **Sequência B**

Esta sequência de amassadura foi uma das estudadas pelo grupo de investigação da Universidade de Delft [Takada et al., 1998b], para uma betoneira de eixo basculante, e destaca-se pela simplicidade das operações envolvidas. As fases da amassadura consistem em: colocar no tambor da betoneira todos os materiais secos, ou seja, agregados grossos, agregados finos e materiais finos (sugere-se a seguinte ordem de entrada:  $\frac{1}{2}$  agregados grossos,  $\frac{1}{2}$  agregados finos, materiais finos,  $\frac{1}{2}$  agregados grossos,  $\frac{1}{2}$  agregados finos) e em seguida inicia-se o movimento da betoneira, e a contagem do tempo, depois de ter executado algumas rotações introduz-se a totalidade da água de amassadura onde previamente se adicionou o superplastificante. Ao fim de 2.5 minutos pára-se o movimento e aguarda-se durante 1 minuto; e finalmente mistura-se durante 1 minuto.

### **Sequência C**

Esta sequência foi utilizada na fase final do presente trabalho e baseou-se no procedimento de amassadura adoptado pelos investigadores do ACM para os betões estudados, no âmbito do projecto Brite Euram [Sonebi et al., 2000]. A sequência de amassadura é a seguinte: misturam-se os agregados finos, os agregados grossos e  $\frac{1}{4}$  da água total de amassadura durante 2.5 minutos, pára-se o movimento e aguarda-se 2.5 minutos para que se dê a absorção. Em seguida, adicionam-se os materiais finos e a água restante misturada com o superplastificante, e finalmente, mistura-se durante 5 minutos.

## 5.3 Descrição do procedimento dos ensaios realizados

No decorrer do estudo das composições, para a avaliação das propriedades do SCC fresco, foram adoptados alguns dos ensaios propostos, apresentados anteriormente. Os respectivos equipamentos de ensaio, com excepção do cone de *Abrams*, não se encontram à venda no mercado, por isso, houve necessidade de os fazer à medida. Para tal, recorreu-se às indicações sobre a forma e dimensões presentes nas figuras de alguns dos elementos bibliográficos, apresentadas no Capítulo 4.

### 5.3.1 Ensaio de espalhamento

#### 5.3.1.1 Ensaio de espalhamento do betão

Este método de ensaio permite a avaliação da deformabilidade do SCC fresco a partir da observação da velocidade de deformação e diâmetro de espalhamento de uma amostra deformada por acção do peso próprio.

Para realizar este ensaio é necessário dispor de um cone de *Abrams* (o apresentado na ISO 4109 ou NP 87); uma placa de aço com uma espessura superior a 2mm, uma área superior a 0.8x0.8m<sup>2</sup>, com uma superfície suave e com uma circunferência de 500mm nela desenhada; uma fita métrica e um cronómetro. De notar que, para os ensaios com o betão, o material da placa utilizada foi um contraplacado marítimo e não aço, como seria mais recomendável. Contudo, aquela possui rigidez e impermeabilidade suficientes, apresenta uma superfície suave; este material é utilizado correntemente em cofragens.

O procedimento adoptado foi o seguinte: humedeceu-se o interior do cone e a superfície da placa de espalhamento, passando com um pano húmido; colocou-se a placa sobre uma superfície firme, plana e nivelada; e posicionou-se o cone no centro da mesma. Logo após o final da amassadura, encheu-se o cone de uma só vez, sem qualquer tipo de compactação, nivelou-se o betão no topo do cone e, em seguida, levantou-se de forma cuidadosa e contínua o cone na direcção vertical. No final do movimento do betão, mediu-se o diâmetro aparentemente máximo da área de espalhamento do betão e o diâmetro perpendicular a este, ver Figura 5.7. Para o valor do diâmetro de espalhamento da amostra de betão testada tomou-se a média dos dois diâmetros registados. O tempo que o betão demora a atingir o diâmetro de 500mm ( $T_{50}$ , segundos) foi medido com um cronómetro desde o início do levantamento do cone até o diâmetro máximo da área de betão atingir a circunferência dos 500mm. O tempo de final do escoamento ( $T_{\text{final}}$ ,

segundos) foi medido com um cronómetro desde o início do levantamento do cone até ao final do movimento da amostra de betão.



Figura 5.7 – Medição do diâmetro da área de espalhamento no “Ensaio de espalhamento do betão”

$$\text{diâmetro de espalhamento} = \frac{(d1 + d2)}{2} \quad (5.4.1)$$

Foi ainda possível observar e registar o aspecto do betão (a forma do contorno, a ocorrência de exsudação, a uniformidade da distribuição dos agregados). Repetiu-se este ensaio 60 a 70 minutos, após o final da amassadura.

#### 5.3.1.2 Ensaio de espalhamento da argamassa (ou pasta)

No estudo das pastas e argamassas foi também realizado um ensaio de espalhamento. Nestes ensaios utilizou-se um cone de dimensões reduzidas, tal como apresentado na Figura 5.8, e o mesmo procedimento de ensaio apresentado anteriormente no que respeita à obtenção dos dois diâmetros da área de espalhamento da amostra, ou seja, a velocidade de deformação não foi avaliada.

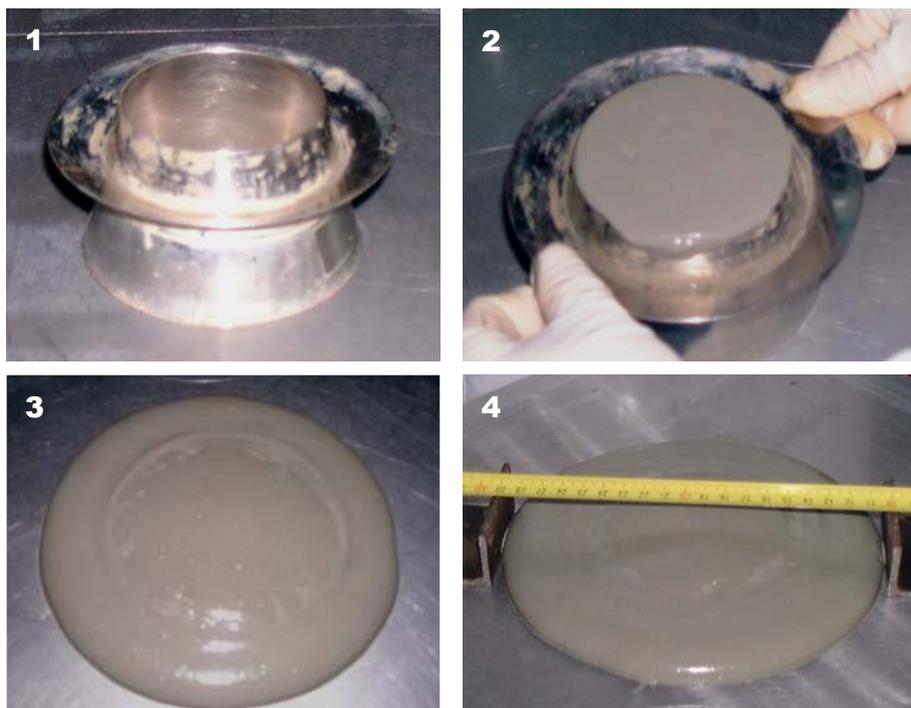


Figura 5.8 – Sequência do “Ensaio de espalhamento da argamassa (ou pasta)”

Este ensaio foi realizado duas vezes em consecutivo. Com o valor médio dos dois diâmetros registados,  $d$  em mm, determinou-se o valor do índice de deformabilidade,  $G_p$  e  $G_m$  para as pastas e argamassas, respectivamente, através da expressão (4.2.4).

## 5.3.2 Ensaios de fluidez

### 5.3.2.1 Ensaio de fluidez do betão

Este ensaio permite avaliar a capacidade do SCC fresco passar através de pequenas aberturas, o que envolve a viscosidade, através da observação da velocidade de escoamento de uma amostra de betão num funil, especialmente concebido para o efeito, por acção do peso próprio.

O referido funil foi construído com a forma e dimensões propostas pelos holandeses (ver Capítulo 4), em chapa de aço, e concebeu-se também uma estrutura de suporte para manter o funil na posição vertical. Na parte inferior, foi previsto um dispositivo de descarga, estanque enquanto fechado, de abertura rápida e sem interferir com a consequente descarga do betão. Além do funil, para realizar este ensaio, basta dispor de um cronómetro para a medição do tempo.

O procedimento adoptado foi o seguinte: humedeceu-se o interior do funil com um pano húmido; colocou-se o funil numa posição vertical (com a parte superior horizontal) numa superfície plana, nivelada e firme; posicionou-se um recipiente para receber o betão e fechou-se a comporta inferior. Depois, encheu-se completamente com uma amostra representativa do betão de forma contínua e sem qualquer tipo de vibração, nivelou-se o betão na parte superior, ver Figura 5.9. Em seguida, abriu-se a comporta e iniciou-se a contagem do tempo, simultaneamente. Observando o movimento pela parte superior parou-se a contagem do tempo com o aparecimento dos primeiros raios de luz no fundo do funil.



Figura 5.9– Funil utilizado no “Ensaio de fluidez do betão”

#### 5.3.2.2 Ensaio de fluidez da argamassa

No âmbito dos estudos com as argamassas em conjunto com o ensaio de espalhamento realizou-se um ensaio de fluidez. Trata-se de um ensaio, semelhante ao “Ensaio de fluidez do betão”, realizado com um funil de dimensões reduzidas, ver Figura 5.10. O procedimento adoptado para a medição do tempo de escoamento foi o mesmo que o descrito para o betão.

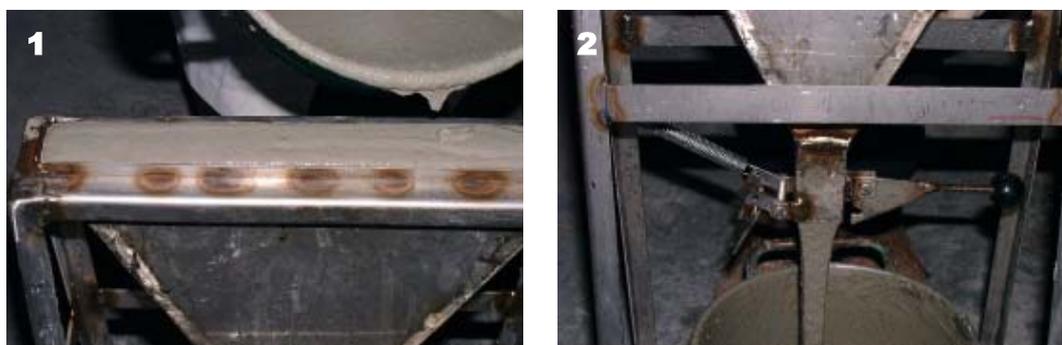


Figura 5.10– Sequência do “Ensaio de fluidez da argamassa”

Este ensaio foi realizado duas vezes em consecutivo. O tempo de escoamento relativo calculou-se pela expressão (4.2.5).

### 5.3.3 Ensaio de auto-compactabilidade

#### 5.3.3.1 Ensaio da caixa-L

Este método permite avaliar a auto-compactabilidade do SCC fresco. Com uma caixa em forma de L é possível avaliar diferentes propriedades, tais como, a capacidade de enchimento, resistência ao bloqueio e resistência à segregação.

A forma e dimensões interiores da caixa utilizada neste ensaio apresentam-se na Figura 5.11. Esta foi construída em contraplacado marítimo, no entanto este material não se revelou suficientemente resistente e ao fim de algumas utilizações, com as sucessivas lavagens, a caixa apresentou grandes variações dimensionais e ficou inutilizável. A sua construção em chapa de aço teria sido mais recomendável. Por esta razão o ensaio foi utilizado apenas na fase de investigação preliminar [Nunes et al., 2001b]. Nesta caixa devem desenhar-se duas linhas, uma a marcar a distância de 200mm e outra 400mm medidas a partir da comporta, para permitir medir a velocidade de deformação da amostra de betão. Além desta caixa, para a realização deste ensaio, é necessário dispor de um cronómetro e fita métrica.

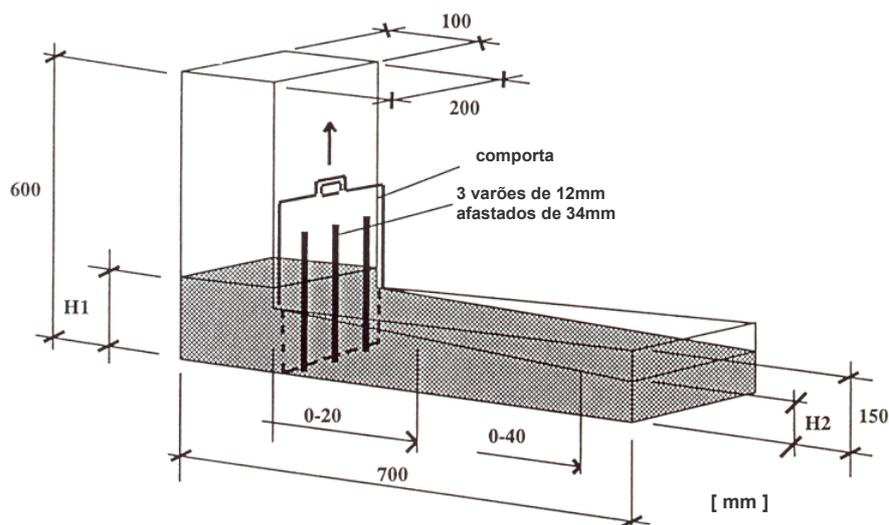


Figura 5.11 – Forma e dimensões da caixa-L adoptada

Para este ensaio o procedimento utilizado foi o seguinte: montou-se a caixa com os varões de obstáculo e a comporta fechada; humedeceram-se as suas paredes interiores; encheu-

se a parte vertical da caixa, com aproximadamente 12 litros de betão e deixou-se repousar durante 1.0 minuto. Este tempo de espera permitiu avaliar a estabilidade da amostra (segregação). Em seguida, abriu-se a comporta vertical e deixou-se o betão fluir da parte vertical para a horizontal atravessando os varões verticais. Após a remoção da comporta foi possível medir o tempo que o betão demorou a percorrer 200mm, e registou-se T20 (segundos), e o tempo que o betão demorou a percorrer 400mm, e registou-se T40 (segundos). No final, depois de cessar o movimento, mediram-se as alturas H1 e H2, em mm, tal como identificado na Figura 5.11 e Figura 5.12, e calculou-se  $H2/H1$ . Um dos critérios de aceitação propostos é  $H2/H1 \geq 0.8$ , para uma caixa semelhante à utilizada (as mesmas dimensões interiores). De acordo com a experiência sueca este valor deve encontrar-se entre 0.80 e 0.85.

Este ensaio permitiu também avaliar a resistência ao bloqueio e a estabilidade da amostra de betão, por observação visual. Nos casos em que se formou uma barreira de agregados atrás da armadura, considerou-se que ocorreu o bloqueio dos agregados (Figura 5.13 **a**) e **d**) ou ocorreu segregação (Figura 5.13 **b**). Habitualmente, o bloqueio distingue-se pelas partículas do agregado grosso presas entre os varões. Quando se observaram partículas de agregado grosso distribuídas à superfície do betão, ao longo de toda a extensão da parte horizontal, o betão foi considerado com estável, ou seja, resistente à segregação.



Figura 5.12 – Medição das alturas finais da amostra de betão

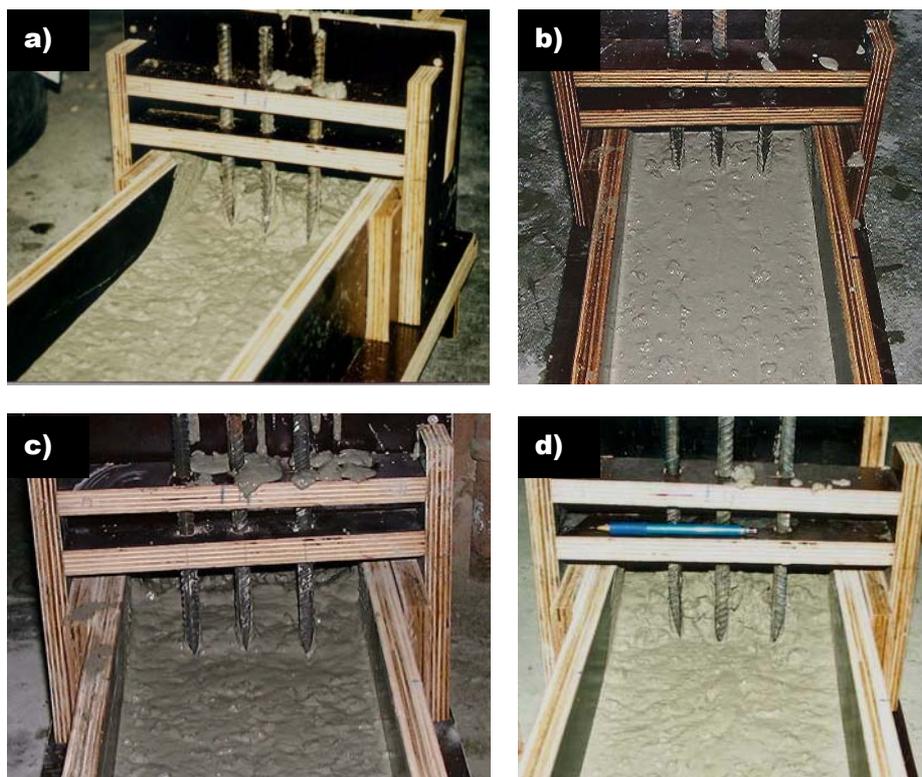


Figura 5.13 – Betões com diferentes comportamentos quanto à resistência ao bloqueio

### 5.3.3.2 Ensaio da caixa

Este método de ensaio permite avaliar a auto-compactabilidade do SCC fresco, por ação do peso próprio, através da observação da altura alcançada pelo betão numa caixa especialmente concebida para o efeito.

A forma e dimensões deste equipamento apresentam-se na Figura 5.14, os materiais utilizados foram chapas de aço, pela sua rigidez e suavidade da superfície, e uma chapa de acrílico transparente numa das paredes para facilitar a medição da altura atingida pelo betão, ver Figura 5.15. Para este ensaio recomendam-se dois tipos de obstáculos: um deles, constituído por cinco varões de 10mm de diâmetro e o outro por três varões de 13mm de diâmetro. Adoptou-se o primeiro por se tratar do mais exigente. Na zona central desta caixa foram previstas duas ranhuras, na primeira encaixa a placa com o obstáculo e na segunda, o mais junto possível da primeira, desliza outra placa que funciona como comporta de separação dos dois compartimentos. É ainda necessária uma fita métrica para medir a altura do betão.

Este ensaio foi conduzido do seguinte modo: instalou-se a placa do obstáculo e, à frente desta, a comporta de separação entre os dois compartimentos; humedeceram-se as paredes interiores de ambos os compartimentos e colocou-se a caixa numa posição vertical (a parte

superior na horizontal) sobre uma superfície plana, nivelada e firme. Em seguida, encheu-se o compartimento maior com uma amostra representativa do betão, de uma forma contínua, sem consolidar por vibração; nivelou-se o betão na parte superior e aguardou-se 1 minuto. Depois, levantou-se a comporta deixando o betão escoar do compartimento de depósito para o vazio, passando através do obstáculo constituído pelos varões espaçados. Depois de cessar o movimento mediu-se a altura alcançada pelo betão na coluna da direita, o que foi facilitado pela colocação de uma placa de acrílico nesta parte.

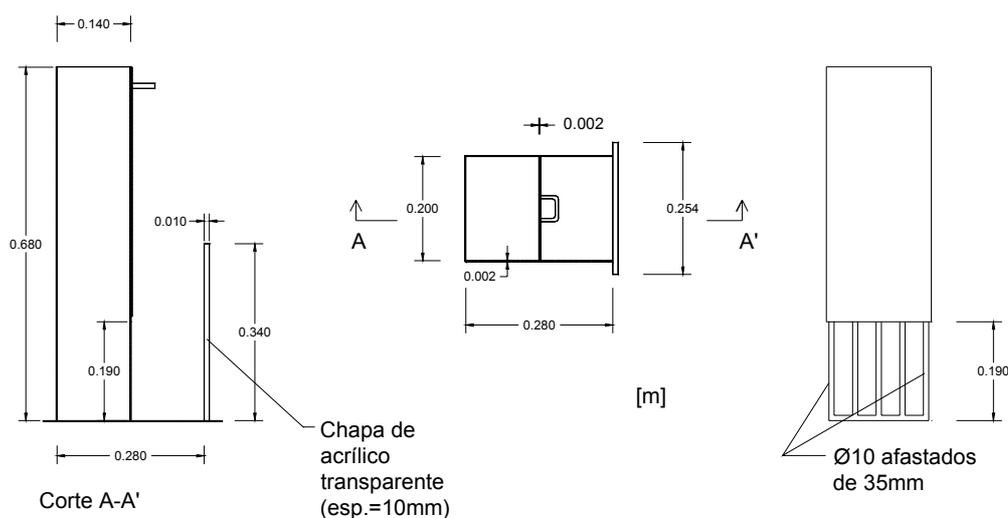


Figura 5.14 – Forma e dimensões do equipamento utilizado no “Ensaio da caixa”, incluindo a placa de obstáculo com os varões

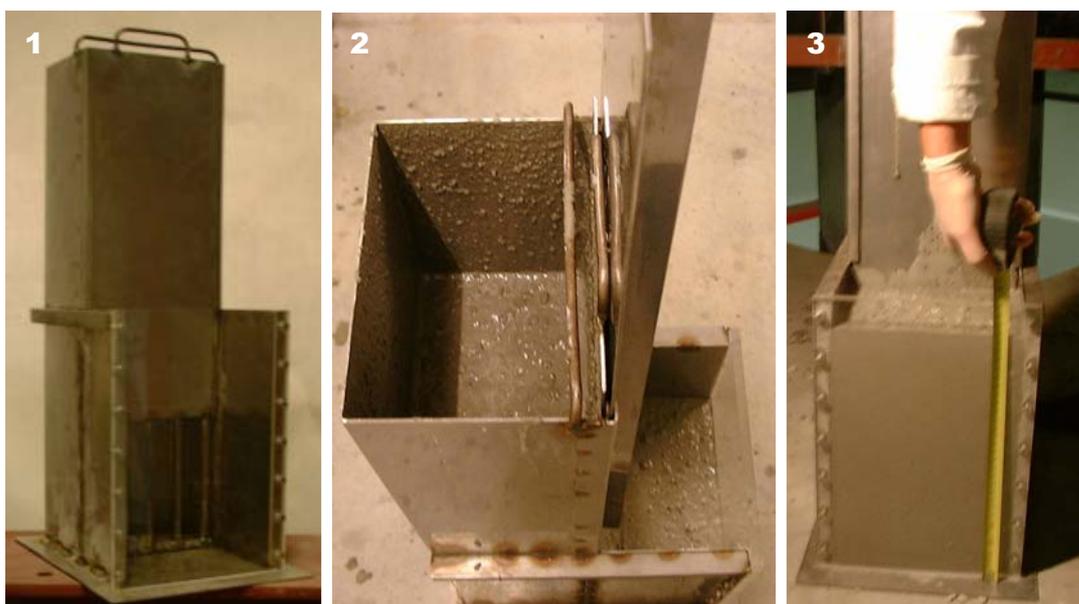


Figura 5.15 – Sequência do ensaio no “Ensaio da caixa”

## 5.4 Aplicação do método de *Okamura et al.*

Após a fase de investigação preliminar aplicou-se o método de concepção da composição recomendado por *Okamura et al.* com o objectivo de estudar a composição do SCC segundo um método mais racional capaz de identificar, de uma forma mais clara, o efeito dos materiais constituintes. A sua aplicação passou pela realização de ensaios com a pasta, argamassa e betão. Este método foi aplicado aos dois conjuntos de materiais, nomeadamente, de Valongo e de Penacova.

Este estudo foi realizado com o intuito de, no final, ser realizada uma experiência-piloto numa obra, num cenário o mais próximo possível da realidade. Por este motivo, apesar do seu carácter académico, este trabalho ficou igualmente à mercê da realidade do mercado dos materiais, no que respeita às suas limitações e alterações.

### 5.4.1 Metodologia adoptada

O estudo das composições passou pelos seguintes passos:

( i ) Ensaios com a pasta dos finos

Como exposto anteriormente (ver 4.2), para cada composição de materiais finos realizou-se o “Ensaio de espalhamento da pasta” para determinar os valores de  $\beta_p$  (a razão da água retida pelos finos) e  $E_p$  (o factor de deformação), que servem para ajudar a seleccionar o tipo de adição ou a percentagem de substituição de cimento pela adição.

Para um determinado tipo de adição e uma dada percentagem de substituição de cimento pela adição foram testadas pastas com diferentes valores da razão volumétrica água/finos ( $V_w/V_p$ ). Para cada amassadura, a quantidade dos materiais foi obtida a partir das seguintes expressões:

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) V_p = 1.0 \Rightarrow V_p = \frac{1.0}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (5.4.2)$$

$$(1 - f) V_p + f V_p = V_p \quad (5.4.3)$$

sendo  $V_p$  o volume de finos,  $V_w$  o volume de água e  $f$  a percentagem de substituição de cimento por outra adição, desprezando o volume de ar. Sendo assim,  $(1 - f)V_p$  corresponde ao volume de cimento e  $fV_p$  ao volume da adição.

A quantidade realizada para cada amassadura foi de 0.75 litros e a amassadura efectuada de acordo com o procedimento apresentado. No final de cada amassadura, realizou-se o ensaio de espalhamento seguindo o procedimento apresentado atrás. De entre o conjunto de valores obtidos para  $G_p$  aceitaram-se apenas os compreendidos entre 1.0 e 4.0, a que corresponde um diâmetro médio de espalhamento de 141 e 224mm, respectivamente. Ou seja, as pastas demasiado fluidas ou, no outro extremo, as demasiado coesas não são as mais adequadas para avaliar o aumento da deformabilidade com a razão água/finos. Com um conjunto mínimo de três pares de valores ( $G_p, V_w/V_p$ ), nas condições referidas, procurou-se uma recta de ajuste. Esta recta permitiu determinar a razão da água retida pelos finos ( $\beta_p$ ) e o factor de deformação ( $E_p$ ).  $\beta_p$  é a ordenada na origem da recta de ajuste e  $E_p$  a sua inclinação.

#### (ii) Ensaio com a argamassa

A partir dos resultados dos ensaios com as pastas, para diferentes composições de materiais finos, e tendo em consideração outros factores condicionantes como a resistência especificada, o preço relativo dos materiais finos, etc., escolheram-se os materiais finos a utilizar e a proporção com que entram na composição ( $f$ ).

Mantendo fixa a percentagem de agregado fino na argamassa, devem ser modificadas a quantidade de superplastificante e a razão água/finos até se obter os valores adequados de  $G_m$  e  $R_m$ , ou seja, 5.0 e 1.0, respectivamente, segundo a proposta de *Okamura et al.*. A par disto, pretende-se estimar as proporções da composição de forma adequada e com um número mínimo de tentativas. Assim, utilizaram-se as relações deduzidas entre  $G_m$  e  $R_m$  que permitiram estabelecer um método racional para determinar a dosagem de superplastificante,  $Sp/P$ , e a razão água/finos,  $V_w/V_p$ , que conduzem a deformabilidade e viscosidade adequadas.

Para cada amassadura, e um dado valor de  $V_w/V_p$ , o volume de finos pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$V_s + V_p + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) V_p = 1.0 \Rightarrow V_p = \frac{1.0 - V_s}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (5.4.4)$$

Note-se que o volume de agregado fino é fixado à partida e segundo a proposta de *Okamura* deverá ser de 40% do volume de argamassa, ou seja,  $V_s = 0.40$ . Assim, o correspondente volume de cimento é dado por  $(1 - f) V_p$  e o volume da adição por  $f V_p$ . Se o agregado fino consiste numa combinação de duas areias a quantidade de cada uma delas pode ser obtida à custa das expressões (5.4.5) e (5.4.6), onde  $s_1$  e  $s_2$  são as percentagens, em volume, de cada areia na composição. A proporção entre as duas areias está directamente relacionada com o módulo de finura de cada uma.  $ksf_1$  e  $ksf_2$  são a percentagem de partículas consideradas como finos (com dimensão  $<0.09\text{mm}$ , segundo *Okamura*) da areia 1 e 2, respectivamente. Por uma questão de simplicidade, neste trabalho adoptou-se a dimensão do peneiro mais próxima de  $0.09\text{mm}$ , da série de peneiros normalizada, ou seja, consideraram-se como finos as partículas do agregado fino com dimensão  $<0.074\text{mm}$ . Assim, areias com uma maior quantidade de finos permitem um maior volume de areia a constituir a argamassa e por isso menos cimento e adição. Alguns autores adoptaram a dimensão  $0.149\text{mm}$  no lugar dos  $0.09\text{mm}$ , o que se pode traduzir numa poupança significativa em termos de materiais finos adicionais. Nesta formulação não foi considerada a quantidade do superplastificante.

$$V_{s1} = s_1 \cdot \frac{V_s}{(1 - ksf_1)} \quad (5.4.5)$$

$$V_{s2} = s_2 \cdot \frac{V_s}{(1 - ksf_2)} \quad (5.4.6)$$

A quantidade realizada para cada amassadura foi de 1.50 litros, e a amassadura executada de acordo com o procedimento apresentado. No final de cada amassadura realizou-se o ensaio de espalhamento e, logo a seguir, com a mesma amostra o ensaio de fluidez. Assim, para cada amostra de argamassa, caracterizada pelo valor da razão água/finos ( $V_w/V_p$ ) e pela dosagem de superplastificante ( $Sp/P$ ), obteve-se o correspondente par de valores  $G_m$  e  $R_m$ .

#### Obtenção da dosagem de superplastificante ( $Sp/P$ )

Como exposto anteriormente, foi proposta uma relação linear entre a dosagem de superplastificante  $Sp/P$  (em percentagem da massa dos finos) e a razão entre a área de espalhamento relativa e o tempo de escoamento relativo ( $G_m/R_m$ ), obtidos a partir do “Ensaio de espalhamento da argamassa” e do “Ensaio de fluidez da argamassa”, respectivamente. Neste método, os autores definem o declive da recta  $G_m-R_m$ , dado pela razão  $G_m/R_m$ , como um indicador do efeito do superplastificante, independente da razão água/finos. Daqui retira-se que, para determinar a dosagem de superplastificante adequada, ou seja, a que conduz a um valor de

$G_m/R_m=5.0/1.0=5.0$  bastará, para um dado valor de  $V_w/V_p$ , realizar os ensaios com a argamassa fazendo variar  $Sp/P(\%)$  e procurar a recta de ajuste aos pares de resultados ( $Sp/P, G_m/R_m$ ). De imediato, coloca-se a seguinte questão: qual deverá ser o valor a adoptar para  $V_w/V_p$  ?

O valor da razão  $V_w/V_p$  deve ser tal que exista sensibilidade à variação da dosagem de superplastificante, isto é, para pequenas dosagens a argamassa resultante deverá apresentar baixa deformabilidade e para dosagens elevadas a argamassa resultante deverá ser muito deformável. Só desta forma é possível avaliar adequadamente a influência do superplastificante.

Uma análise mais atenta dos resultados apresentados na Figura 5.16 permitem concluir que à medida que aumenta a dosagem de superplastificante  $Sp/P$  obtêm-se pares de resultados ( $G_m, R_m$ ) para valores mais baixos de  $V_w/V_p$ . Com uma dada razão  $V_w/V_p$  apenas se conseguem obter pares de resultados ( $G_m, R_m$ ) para uma dada gama de dosagens de  $Sp/P$ . A figura apresenta uma relação linear entre  $G_m$  e  $R_m$  com início na origem do referencial, para cada valor de  $Sp/P(\%)$ , podendo concluir-se que teoricamente para a mesma dosagem de superplastificante o valor de  $G_m/R_m$  assume um valor constante e aumenta com o aumento de  $Sp/P$ . Pode identificar-se  $G_m/R_m$  com o inverso da inclinação de cada uma das rectas da figura.

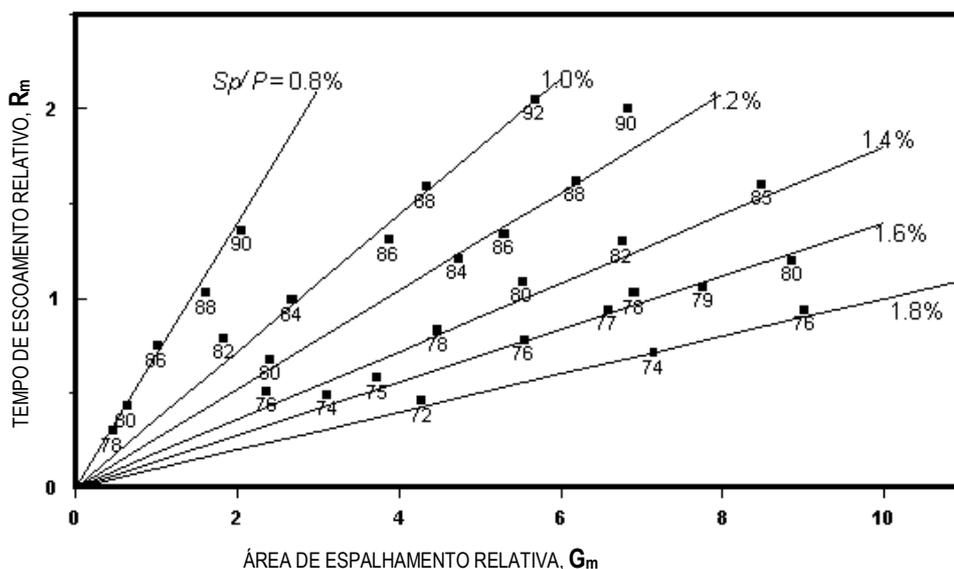


Figura 5.16 – Relação entre  $G_m$  e  $R_m$ , para cada dosagem de  $Sp/P$  (%)

Nos ensaios realizados aceitaram-se apenas os resultados tais que  $G_m \in [3.0, 7.0]$  e  $R_m \in [0.5, 2.0]$ . De outra forma, podemos afirmar que apenas nos interessam pares de resultados para os quais a média do diâmetro de espalhamento, medida no “Ensaio de espalhamento da argamassa”, não exceda aproximadamente os 280mm e não seja inferior a 200mm. Quanto ao tempo de escoamento devem-se rejeitar argamassas demasiado fluidas, isto é, com um tempo de

escoamento, no “Ensaio de fluidez da argamassa”, inferior a 5 segundos, sendo também de evitar as demasiado coesas aqui definidas como apresentando um tempo de escoamento superior a 20 segundos. Nos ensaios realizados verificou-se que geralmente estes valores limite não são alcançados simultaneamente, o que se percebe pois quando estamos a determinar a Sp/P(%) pretende-se alterar a deformabilidade, sem alterar demasiado a viscosidade e, vice-versa, quando se procura a razão  $V_w/V_p$  adequada. Verificou-se também que estes valores limite servem para balizar e controlar os resultados dos ensaios.

Para aceitar apenas pares de resultados contidos no interior dos intervalos estabelecidos anteriormente, e conseguir um número razoável de pontos, testaram-se argamassas para diferentes valores de  $V_w/V_p$ . À semelhança dos gráficos apresentados, para uma dada razão água/ligante, testaram-se argamassas para valores de Sp/P pertencentes a um conjunto discreto de valores,  $Sp/P(\%) \in \{0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8\}$ . Com os pares de valores  $(Sp/P, G_m/R_m)$ , nas condições referidas, procurou-se uma recta de ajuste e calculou-se a dosagem que conduz a  $G_m/R_m=5.0$ .

Ao testar argamassas com diferentes  $V_w/V_p$ , para alguns dos valores de Sp/P(%) obteve-se mais que um resultado para  $G_m/R_m$  (teoricamente estes deveriam ser iguais). Assim, ao realizar um ajuste global dos resultados atenuam-se os desvios da recta teórica. Obviamente, quanto maior o número de resultados obtidos melhor será a aproximação. A metodologia descrita foi a que se revelou mais eficaz para determinar a dosagem adequada de superplastificante, relativamente a outras abordagens adoptadas no estudo de materiais mais desfavoráveis como foi o caso dos agregados de Valongo. Esta metodologia permitiu perceber melhor a influência dos diferentes factores e conseguiu-se estabelecer uma forma de conduzir os ensaios de modo a obter resultados válidos (isto é, com significado físico), numa gama de valores que permite estudar o efeito do superplastificante.

#### Obtenção da razão água/finos ( $V_w/V_p$ )

Mantendo fixo o valor de Sp/P(%), e igual à dosagem adequada determinada na fase anterior, realizaram-se diversas amassaduras fazendo variar a razão  $V_w/V_p$ . Para cada amassadura realizaram-se os ensaios com a argamassa e obtiveram-se os correspondentes

pares de resultados  $(G_m, R_m)$ . Tomando os pares de resultados na forma  $(\frac{V_w}{V_p}, \frac{R_m}{G_m^{0.4}})$  procurou-se

a equação da recta de ajuste a esses pontos, e com ela obteve-se o valor procurado de  $V_w/V_p$

correspondente a  $A = \frac{R_m}{G_m^{0.4}} = \frac{1.0}{5.0^{0.4}} = 0.525$ .

De salientar que, com os resultados desta fase é possível verificar se a dosagem de superplastificante foi avaliada correctamente. Nesta fase os resultados obtidos para  $G_m$  e  $R_m$  deverão estar já bastante próximos de 5.0 e 1.0, respectivamente. Os valores de  $V_w/V_p$  testados deverão ser tais que os respectivos resultados  $G_m$  e  $R_m$  assumam valores em torno dos valores óptimos e, simultaneamente, por valores superiores ou inferiores. A necessidade de um maior número de ensaios, aquando do ajuste da dosagem de superplastificante, vem acompanhada por um menor número de ensaios para a obtenção da dosagem de água/ligante. As experiências realizadas demonstraram que se a dosagem de Sp for avaliada correctamente quando se passa para a determinação do valor adequado de  $V_w/V_p$  rapidamente nos aproximamos do valor pretendido.

### ( iii ) Ensaios com o betão

Depois de estudada a argamassa e definido um valor de referência para  $V_w/V_p$  foram definidas as quantidades dos materiais que constituem o betão e com uma amostra deste levaram-se a cabo alguns ensaios. A equação fundamental que traduz a composição de um betão é a seguinte:

$$V_p + V_s + V_g + V_w + V_a = 1.0 \quad (5.4.7)$$

em que  $V_p$  é o volume de finos,  $V_s$  o volume de agregado fino,  $V_g$  o volume de agregado grosso,  $V_w$  o volume de água e  $V_a$  o volume de ar.

Nesta equação a parcela  $V_a$  foi fixada em 2%. O volume de grossos foi definido como o correspondente a um volume aparente de  $V_{ap}$ , de acordo expressão (5.4.8). Segundo o método de *Okamura et al.*,  $V_{ap} = 0.50m^3$ .

$$V_g = V_{ap} \cdot V_{g,lim} \cdot (1 - V_a) \quad (5.4.8)$$

Tal como foi referido atrás, para os ensaios da argamassa, o volume de agregado fino é definido como uma dada percentagem do volume total da argamassa ( $S$ ), de acordo com a expressão (5.4.9) ou (5.4.10) consoante esteja prevista a utilização de um ou dois tipos de areia. Segundo o método de *Okamura et al.*  $S = 40\%$ .

$$V_s = \frac{S \cdot (1 - V_a - V_g)}{1 - ksf} \quad (5.4.9)$$

$$V_s = V_{s1} + V_{s2}$$

$$V_s = s1 \cdot \frac{S \cdot (1 - V_a - V_g)}{1 - ksf_1} + s2 \cdot \frac{S \cdot (1 - V_a - V_g)}{1 - ksf_2} \quad (5.4.10)$$

Substituindo na equação (5.4.7) o volume de agregados, assim determinado, e tendo sido definida a razão água/finos à custa dos ensaios das argamassas é possível quantificar o volume de finos de acordo com a expressão (5.4.11) e o correspondente volume de água. Para tornar a referida equação mais abrangente afectou-se a razão  $\frac{V_w}{V_p}$ , obtida dos ensaios com a argamassa, por um factor  $\alpha \geq 1.0$ . Como se verá mais adiante, pode haver interesse em adoptar um valor de  $\alpha$  ligeiramente superior a 1.0 o que significa reduzir a viscosidade da argamassa, isto é, diminuir a quantidade de finos.

$$V_p + V_s + V_g + \alpha \left( \frac{V_w}{V_p} \right) \cdot V_p + V_a = 1.0 \Rightarrow$$

$$V_p = \frac{1.0 - V_s - V_g - V_a}{1.0 + \alpha \left( \frac{V_w}{V_p} \right)} \quad (5.4.11)$$

Mais uma vez, o volume total de finos pode ser repartido pelo volume de cimento e volume da adição à custa de  $f$ , da mesma forma que exposta atrás, ver expressão (5.4.3).

O efeito do superplastificante no betão é diferente do efeito na argamassa devido à maior ou menor eficiência da amassadura. Assim, a dosagem de superplastificante deve ser ajustada com ensaios sobre o betão. Para tal, recorreu-se ao “Ensaio de espalhamento do betão”. Assim, aquando da amassadura do betão introduziu-se apenas parte da dosagem de superplastificante prevista e logo após o final da amassadura efectuou-se o referido ensaio. O procedimento adoptado para este ensaio foi apresentado em 5.3.1.1, sem a medição dos tempos. Quando o valor médio do diâmetro de espalhamento foi suficiente, isto é, ficou entre 600 e 700mm, passou-se ao ensaio seguinte; caso contrário, para diâmetros inferiores voltou-se a amassar o betão adicionando mais algum superplastificante e repetiu-se o ensaio de espalhamento. Quando após o final da primeira amassadura se obteve um diâmetro de espalhamento excessivo, obviamente, a amostra foi rejeitada e realizou-se outra amassadura.

Depois de ajustada a dosagem de superplastificante, ou seja, de obtida uma composição que satisfizesse os requisitos em termos de deformabilidade foi necessário verificar se o mesmo satisfazia em termos de viscosidade. Para tal efectuou-se o “Ensaio de fluidez do betão” tal como descrito em 5.3.2.1. Aceitaram-se valores do tempo de escoamento, assim medido, iguais a  $15 \pm 5$  segundos. Quando o tempo de escoamento não respeitou os limites estabelecidos foi necessário corrigir a composição no sentido de eliminar a insuficiência verificada. No final, realizou-se o “Ensaio da caixa” para verificar a auto-compactabilidade da amostra de betão. Este ensaio foi levado a cabo tal como exposto em 5.3.3.2, considerando-se como adequados os valores da altura de enchimento superiores ou iguais a 300mm.

## 5.4.2 Resultados obtidos com os materiais de Penacova 1

Os resultados apresentados em seguida correspondem a uma primeira tentativa de aplicação do método de *Okamura et al.* que surgiu na sequência da fase de investigação preliminar. Isto, aliado ao facto de os agregados serem bastante mais favoráveis justifica o número relativamente reduzido de ensaios efectuados para cumprir os critérios recomendados, quando comparado com a fase posterior dos estudos com os materiais de Valongo.

### 5.4.2.1 Ensaios com as pastas

Nesta fase foi testada apenas uma composição de materiais finos, correspondente a 65.8% cimento (Tipo I 42.5) e 34.2% de filler (*Micro 100*), em volume. Assim, para cada valor da razão  $V_w/V_p$  realizou-se uma amassadura e o “Ensaio de espalhamento da pasta” medindo o valor da área de espalhamento relativa  $G_p$ . O conjunto de resultados obtidos apresenta-se na Figura 5.17 bem como a respectiva recta de ajuste de onde é possível retirar  $\beta_p=0.85$  e  $E_p=0.12$ .

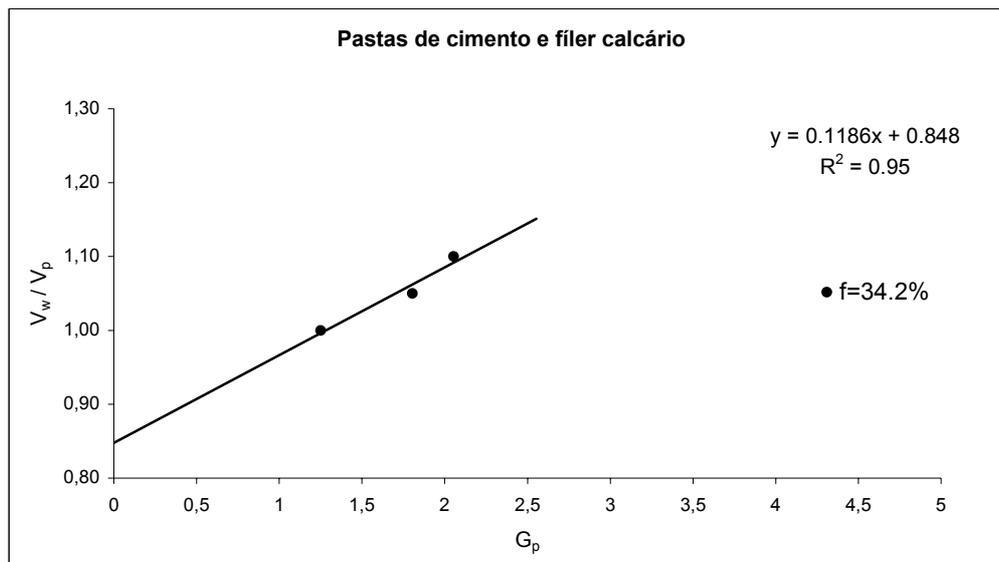


Figura 5.17 – Recta de ajuste aos pares de resultados ( $G_p$ ,  $V_w/V_p$ ) para a composição estudada

#### 5.4.2.2 Ensaio com as argamassas

Tal como foi referido, o conjunto de materiais de Penacova 1 é constituído por duas areias, uma areia fina natural (Areia P1) e uma areia grossa de rio (Areia P2), cuja caracterização se apresentou em 5.2.1.4. De acordo com a metodologia adoptada, estudaram-se diversas argamassas fazendo variar a razão água/ligante e a dosagem de superplastificante. Em todas as argamassas, o volume de agregado fino fixou-se em 40% do volume de argamassa, ou seja, adoptou-se  $S=40\%$ , tal como proposto por *Okamura et al.*. O agregado fino consistiu numa composição de 50% de Areia P1 com 50% de Areia P2, em massa, resultando um módulo de finura da composição de 3.0. Para estas areias a percentagem de finos ( $d<0.04\text{mm}$ ) foi  $ksf_1=0.2\%$  e  $ksf_2=0\%$ .

Inicialmente, fazendo variar a dosagem de superplastificante, foram realizadas amassaduras para uma razão  $V_w/V_p=0.80$  e os resultados obtidos nos ensaios com a argamassa apresentam-se na Figura 5.18 juntamente com a recta que melhor ajusta este conjunto de valores e que permitiu estimar o valor da dosagem  $Sp/P$  adequado. O valor resultante para  $Sp/P$  foi 1.6%.

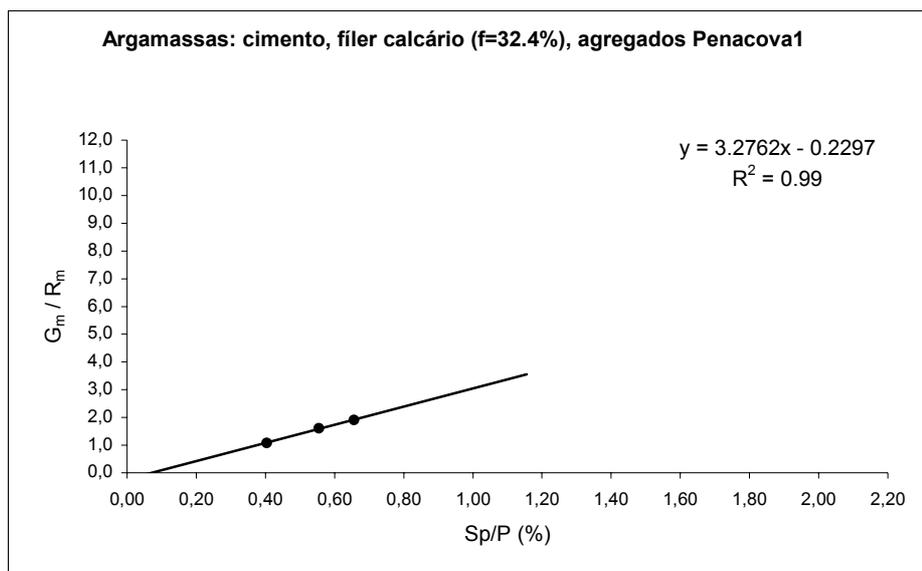


Figura 5.18 - Recta de ajuste dos pares de resultados ( $Sp/P$ ,  $G_m/R_m$ ), para obtenção da dosagem adequada de superplastificante

Com o valor obtido para a dosagem de superplastificante, fez-se variar a razão água/finos de modo a obter resultados em torno do valor de  $(R_m/G_m^{0.4})$  procurado. Os valores testados apresentam-se no Quadro 5.8 e, por aproximação linear, um valor de  $V_w/V_p$  de 0.641 foi estimado como valor adequado. De notar que, à medida que  $G_m$  se aproxima de 5.0,  $R_m$  aproxima-se de 1.0 o que confirma que a dosagem de superplastificante foi ajustada adequadamente.

Quadro 5.8 - Resultados dos ensaios para ajustar a razão água/finos

$V_w/V_p$	$Sp/P$ (%)	$G_m$	$R_m$	$R_m/G_m^{0.4}$
<b>0.630</b>	1.6	6.56	1.09	<b>0.514</b>
<b>0.650</b>	1.6	7.41	1.15	<b>0.516</b>
<b>0.700</b>	1.6	9.48	1.85	<b>0.759</b>

#### 5.4.2.3 Ensaio com o betão

A composição estudada apresenta-se no Quadro 5.9 juntamente com os resultados dos ensaios com o betão fresco. Como neste conjunto de materiais o agregado grosso apresenta uma dimensão máxima reduzida foi possível aumentar  $V_{ap}$  para  $0.58m^3$ . O cálculo das quantidades para os diversos constituintes foi efectuado recorrendo ao conjunto de expressões apresentadas

em 5.4.1 que dependem do conjunto de parâmetros apresentados também no referido quadro. Com a composição resultante deste estudo, pretendia-se realizar um volume de amassadura maior, para o enchimento de um modelo em forma de U, para o qual foi necessário utilizar uma betoneira de eixo basculante. Desta forma, a amassadura da amostra utilizada no ajuste da dosagem de superplastificante foi realizada na mesma betoneira, de acordo com a sequência de amassadura C. Em termos de avaliação do betão no estado fresco foram realizados o “Ensaio de espalhamento do betão” e o “Ensaio da caixa”, o “Ensaio de fluidez do betão” não foi realizado pois ainda não se dispunha deste equipamento.

Quadro 5.9 - Caracterização da composição estudada

<b>composição nº</b>		<b>1</b>	
sequência da amassadura		<b>B</b>	
data da amassadura		14/11/00	
instante após o final da amassadura (minutos)		<b>~ 0</b>	<b>60 a 90</b>
Parâmetros da composição	<b>V<sub>ap</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0.58	
	<b>S (%)</b>	40	
	<b>V<sub>w</sub>/V<sub>p</sub></b>	0.641	
	<b>α</b>	1.02	
	<b>f (%)</b>	34.2	
Quantidades na composição (kg/m <sup>3</sup> )	<b>cimento</b>	487	
	<b>filer</b>	219	
	<b>brita P1</b>	859	
	<b>areia P1</b>	339	
	<b>areia P2</b>	339	
	<b>água</b>	155	
	<b>superplastificante</b>	7.77	
<b>w/c</b>		0.32	
<b>w/p</b>		0.22	
<b>Sp/P (%)</b>		1.10	
Caracterização do betão no estado fresco	<b>“Ensaio de espalhamento”- diâmetro de espalhamento (mm)</b>	685	780
	<b>“Ensaio de fluidez”- tempo de escoamento (segundos)</b>	--	--
	<b>“Ensaio da caixa”- altura de enchimento (mm)</b>	300	--

Posteriormente, a auto-compactabilidade desta composição foi avaliada observando o escoamento de uma amostra de betão, de maior volume, pelo interior de um modelo quando sujeita apenas à acção da gravidade. Esta experiência é descrita no Capítulo 6.

### 5.4.3 Resultados obtidos com os materiais de Valongo

#### 5.4.3.1 Ensaio com as pastas

Numa primeira fase os materiais finos testados foram o cimento Tipo II 32.5 e o filler calcário (*Micro 100*). Definindo  $f$  como a percentagem de substituição de cimento por filler calcário, em volume, foram estudadas quatro composições com diferentes percentagens de substituição (0%, 15%, 30% e 40%). Para cada composição testou-se um conjunto mínimo de seis pastas, com diferentes valores de  $V_w/V_p$  e determinaram-se os respectivos valores do espalhamento relativo,  $G_p$ . Com este conjunto de resultados obtiveram-se as respectivas rectas de ajuste apresentadas na Figura 5.19, onde se apresentam também as correspondentes equações e coeficientes de correlação. À custa destas equações determinou-se a razão da água retida pelos finos ( $\beta_p$ ) e o factor de deformação ( $E_p$ ), resumidos no Quadro 5.10.

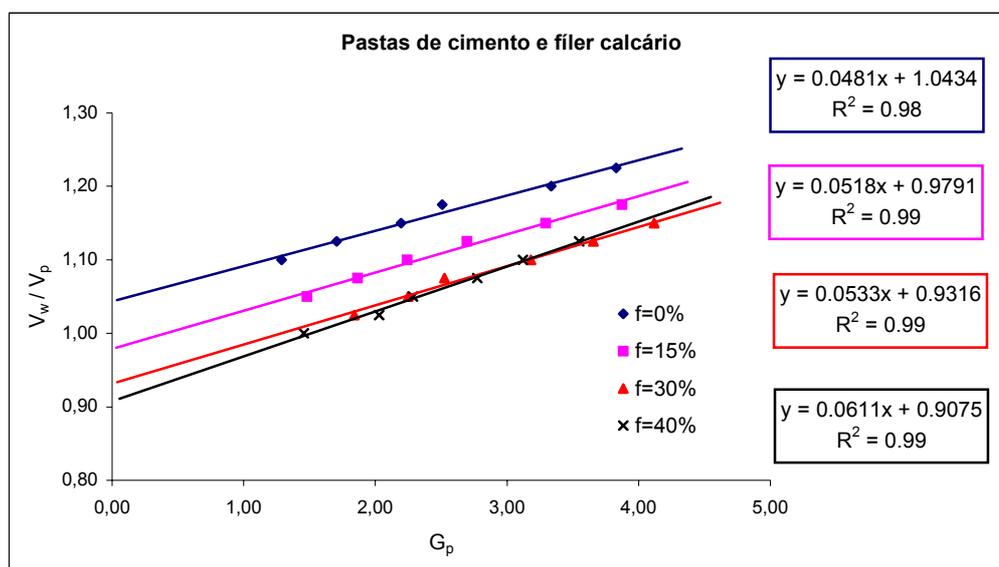


Figura 5.19 – Rectas de ajuste ao pares de resultados ( $G_p$ ,  $V_w/V_p$ ), para diferentes composições de cimento e filler calcário

Quadro 5.10 – Resultados dos ensaios com as pastas, para cada composição dos finos

<i>Composição dos finos (em volume)</i>	<i>f</i>	<i>β<sub>p</sub></i>	<i>E<sub>p</sub></i>
<b>100% cimento</b>	0%	1.04	0.048
<b>85% cimento + 15% filer calcário</b>	15%	0.98	0.052
<b>70% cimento + 30% filer calcário</b>	30%	0.93	0.053
<b>60% cimento + 40% filer calcário</b>	40%	0.91	0.061

Analisando os resultados anteriores verifica-se que à medida que aumenta a percentagem de filer há uma diminuição do valor de  $\beta_p$ . O valor do factor de deformação  $E_p$  sofre também um ligeiro aumento quando se aumenta a percentagem de filer. Desta forma, pode concluir-se que maiores percentagens de substituição de cimento por filer estão associadas a uma menor exigência de água por parte dos finos.

A decisão relativamente ao valor a adoptar para a percentagem de substituição de cimento por filer baseou-se nas conclusões anteriores e nas exigências em termos de resistência. Como o filer não apresenta propriedades pozolânicas, apenas o cimento contribui para a obtenção da resistência necessária. Assim, foi necessário escolher uma percentagem de substituição, de tal forma que, para a gama possível do valor adequado de  $V_w/V_p$  corresponda uma gama de valores da razão água/cimento compatível com a classe de resistência pretendida. Desta forma, nos ensaios das argamassas e betão que se seguiram adoptou-se  $f=30\%$ .

Posteriormente, foram testadas pastas com uma combinação de 60% de cimento (Tipo II 32.5) com 40% de cinzas volantes (originárias de Espanha), ou seja, a percentagem de substituição de cimento por cinzas foi  $f=40\%$ . A respectiva recta de ajuste ao par de resultados ( $G_p, V_w/V_p$ ) apresenta-se na Figura 5.20.

Como seria de esperar, o valor obtido para  $\beta_p$ , 0.82, é bastante inferior ao determinado para as composições de cimento e filer com a mesma percentagem de substituição. O já conhecido efeito lubrificante das cinzas, devido à sua forma esférica, que se traduz num aumento da deformabilidade para a mesma razão água/finos, é evidenciado pela recta da Figura 5.20 que se situa bastante abaixo da correspondente da Figura 5.19.

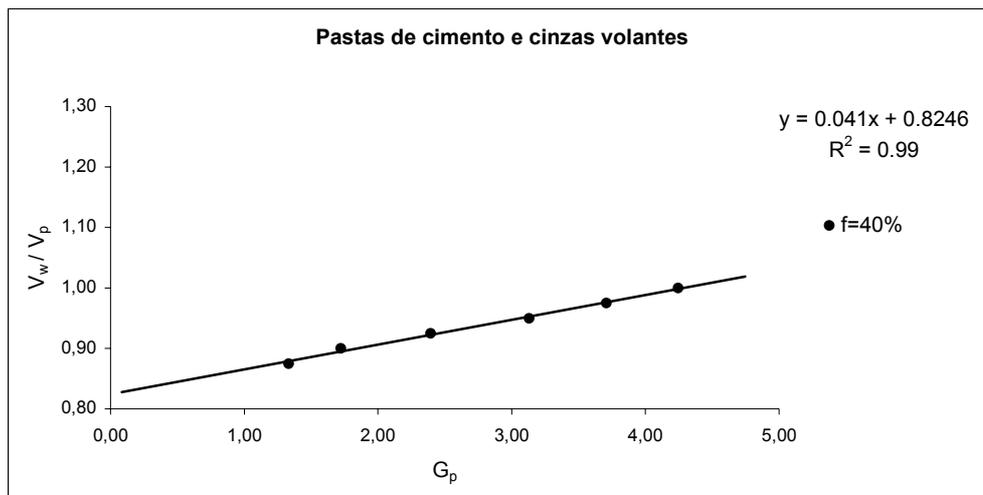


Figura 5.20 - Recta de ajuste aos pares de resultados ( $G_p$ ,  $V_w/V_p$ ), para a composição estudada de cimento e cinzas

#### 5.4.3.2 Ensaios com as argamassas

Tal como foi referido, o conjunto de materiais de Valongo é constituído por duas areias, uma areia fina natural (Areia V1) e uma areia grossa artificial (Areia V2), cuja caracterização se apresenta em 5.2.1.4. De acordo com a metodologia adoptada, estudaram-se diversas argamassas fazendo variar a razão água/ligante e a dosagem de superplastificante. Em todas as argamassas, o volume de agregado fino fixou-se em 40% do volume de argamassa, ou seja, adoptou-se  $S=40\%$ , tal como proposto por *Okamura et al.*

Em resultados preliminares, obtidos com os ensaios das argamassas, verificou-se que a utilização da Areia V2 completa inibe o efeito do superplastificante. Assim, recolheram-se alguns relatos de dificuldades decorrentes da utilização das areias britadas na produção de betão sendo, em geral, a causa atribuída ao designado “pó de pedra”, isto é, as partículas mais finas da areia britada. No nosso caso, a solução encontrada foi retirar da Areia V2 todas as partículas com dimensão inferior a 1.19mm, por peneiração, numa gama granulométrica coberta pela Areia V1. A Areia V2 apresenta algumas partículas com dimensão superior a 4.76mm, consideradas como fazendo parte do agregado grosso, assim, para os ensaios das argamassas estas foram também retiradas, por peneiração. A curva granulométrica resultante da designada Areia V2-modificada apresenta-se na Figura 5.21. Assim, nas argamassas estudadas o agregado fino consistiu numa composição das duas areias, misturou-se 67.5% Areia V1 (módulo de finura=2.06) com 32.5% (módulo de finura=4.33) de Areia V2-modificada, em massa. O módulo de finura do agregado fino resultante foi 2.80. Nestas condições,  $k_{sf_2}=0\%$ , ou seja, foram retiradas as partículas

consideradas como finos da Areia V2 e  $k_{sf_1}=0\%$ , pois a Areia V1 não apresentou partículas com essa dimensão.

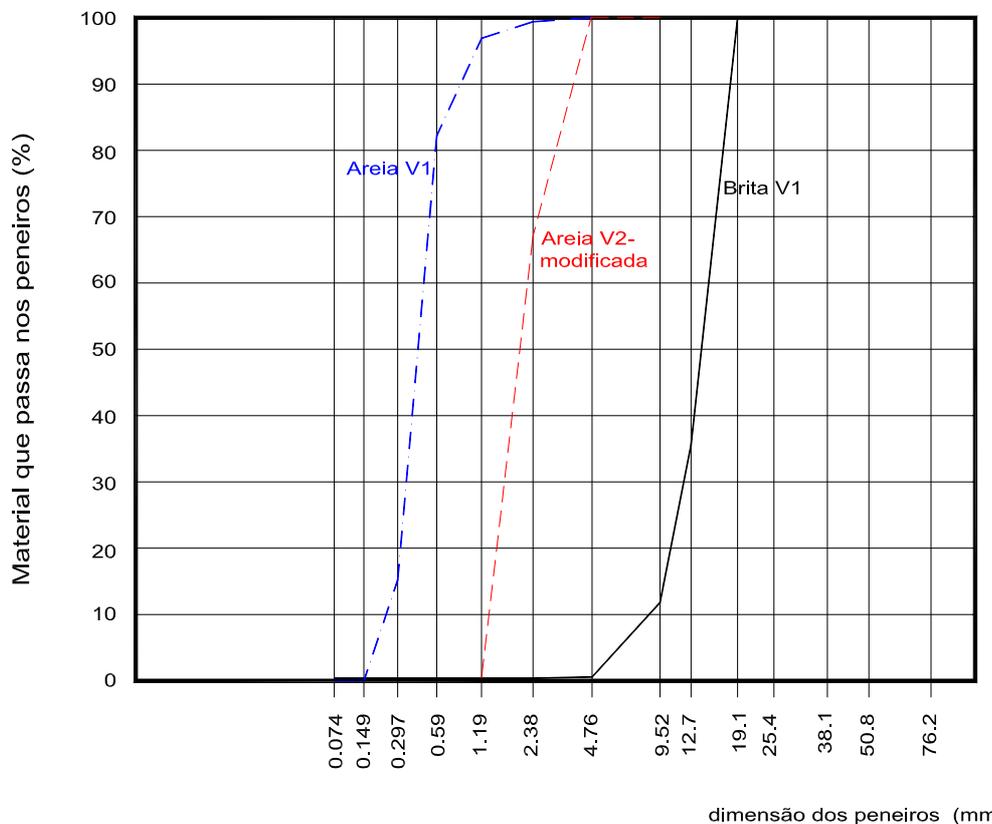


Figura 5.21 – Curvas granulométricas do conjunto de materiais de Valongo, incluindo as alterações efectuadas na Areia V2

Para a composição de 70% de cimento com 30% de fíler, em volume, a que corresponde  $\beta_p=0.93$  realizou-se um conjunto de amassaduras para determinar a dosagem adequada de superplastificante. Os pares de resultados ( $Sp/P$ ,  $G_m/R_m$ ) foram ajustados por uma recta, ver Figura 5.22, cuja equação permitiu estimar a dosagem adequada de superplastificante, ou seja, a que corresponde a  $G_m/R_m=5.0$ . Desta forma, obteve-se  $Sp/P=2.3\%$ .

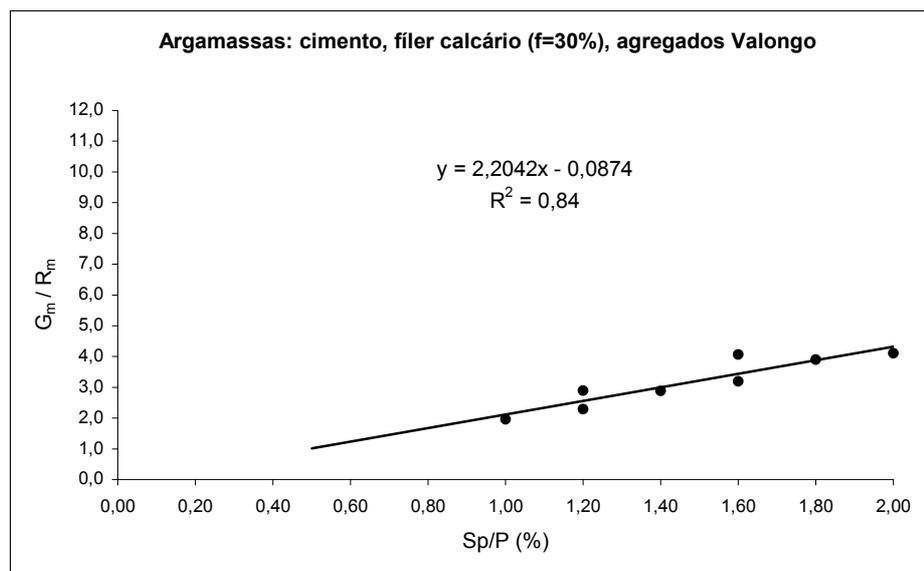


Figura 5.22 – Recta de ajuste as pares de resultados (Sp/P, G<sub>m</sub>/R<sub>m</sub>), para obtenção da dosagem adequada de superplastificante

Com o valor obtido para a dosagem de superplastificante, fez-se variar a razão água/finos até encontrar a correspondente a  $R_m/G_m^{0.4}=0.525$ . Os valores testados apresentam-se no Quadro 5.11. Por aproximação linear, estimou-se que  $V_w/V_p=0.629$  conduz ao valor óptimo de  $R_m/G_m^{0.4}$ , que será o valor a adoptar na composição do betão.

Quadro 5.11 – Resultados dos ensaios para ajustar a razão água/finos

$V_w/V_p$	Sp/P (%)	G <sub>m</sub>	R <sub>m</sub>	$R_m/G_m^{0.4}$
<b>0.600</b>	2.3	3.13	0.53	<b>0.336</b>
<b>0.625</b>	2.3	4.16	0.92	<b>0.520</b>
<b>0.650</b>	2.3	5.13	1.25	<b>0.650</b>

Na Figura 5.23 representam-se os pares de resultados ( $V_w/V_p$ ,  $R_m/G_m^{0.4}$ ) de todas as amostras ensaiadas e a respectiva recta de ajuste. A inclinação desta recta é aproximadamente 4.0, e isto acontece quando se utilizam materiais finos com uma superfície específica *Blaine* de 3000 a 4000 cm<sup>2</sup>/g [Okamura et al., 2000].

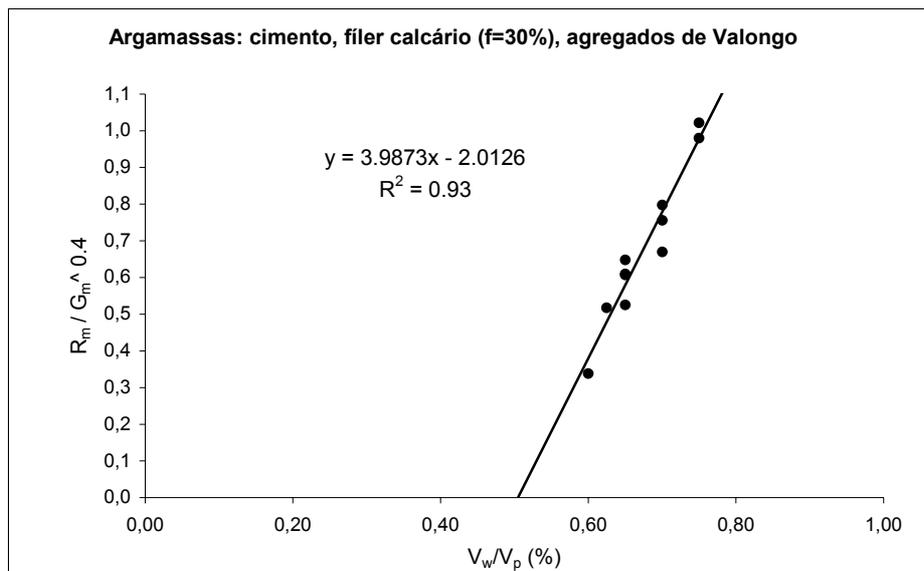


Figura 5.23 – Relação entre  $V_w/V_p$  e  $R_m/G_m^{0.4}$ , para todas as amostras testadas

Para a composição de 60% de cimento com 40% de cinzas, em volume, a que correspondeu  $\beta_p=0.82$ , realizou-se um conjunto de amassaduras para determinar a dosagem adequada de superplastificante. Os pares de resultados ( $Sp/P$ ,  $G_m/R_m$ ) foram ajustados por uma recta representada na figura Figura 5.24, indicando-se a respectiva equação. A dosagem de superplastificante adequada foi estimada em 2.0%.

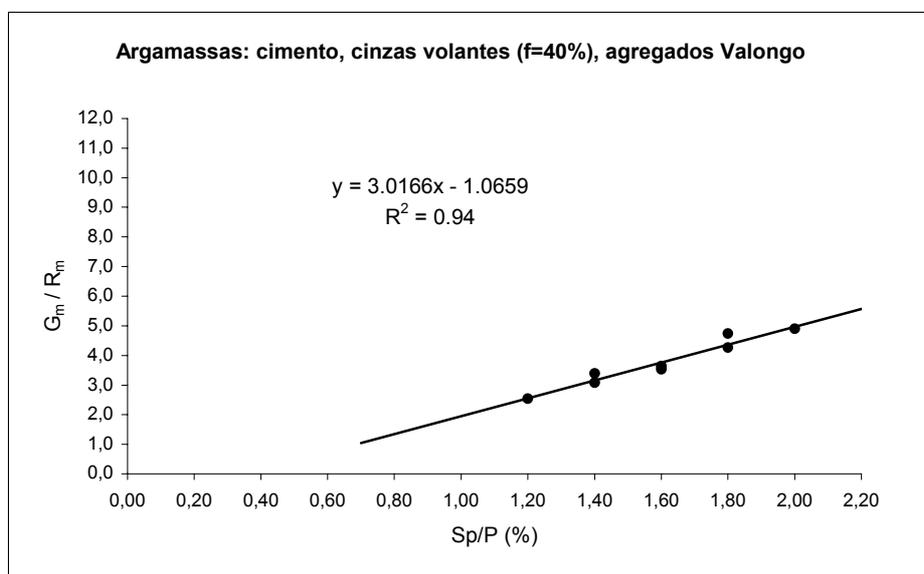


Figura 5.24 - Recta de ajuste dos pares de resultados ( $Sp/P$ ,  $G_m/R_m$ ), para obtenção da dosagem adequada de superplastificante

Fixando este valor para a dosagem de superplastificante, fez-se variar a razão água/finos de modo a obter resultados em torno do valor de  $R_m/G_m^{0.4}$  procurado. Os valores testados apresentam-se no Quadro 5.12 e, por aproximação linear, 0.578 foi estimado para valor adequado de  $V_w/V_p$ .

Quadro 5.12 - Resultados dos ensaios para ajustar a razão água/finos

$V_w/V_p$	Sp/P (%)	$G_m$	$R_m$	$R_m/G_m^{0.4}$
<b>0.554</b>	2.0	4.16	0.85	<b>0.481</b>
<b>0.577</b>	2.0	4.86	0.92	<b>0.489</b>
<b>0.600</b>	2.0	5.44	1.18	<b>0.598</b>

Na Figura 5.25 representam-se os pares de resultados ( $V_w/V_p$ ,  $R_m/G_m^{0.4}$ ) de todas as amostras testadas e a respectiva recta de ajuste. Obteve-se uma inclinação relativamente baixa (3.5) quando comparada com o valor de 6.1 apresentado na bibliografia [Okamura et al., 2000] para um outro tipo de cinzas. No entanto, é sabido que existe uma grande diversidade de cinzas, sendo de esperar diferentes resultados.

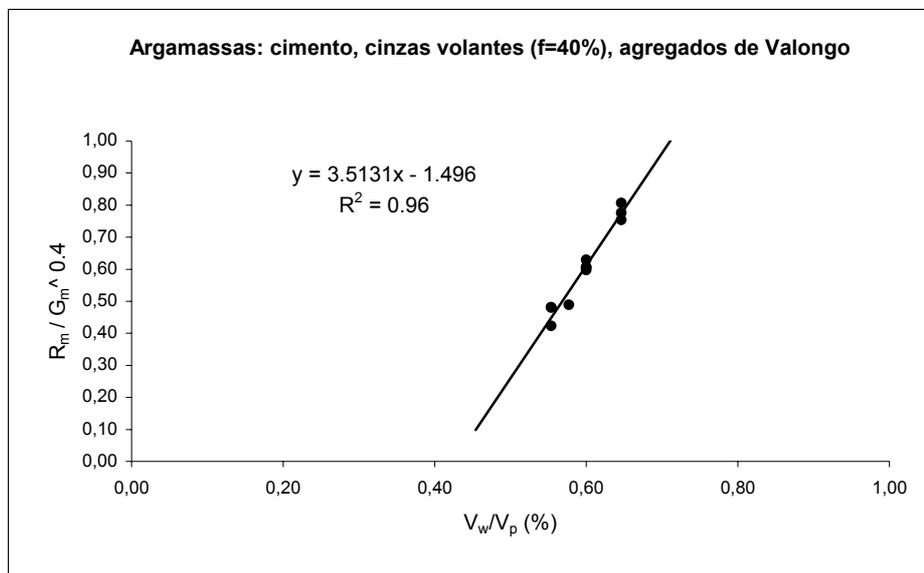


Figura 5.25 - Relação entre  $V_w/V_p$  e  $R_m/G_m^{0.4}$ , para todas as amostras testadas

#### 5.4.3.3 Ensaios com o betão

Nas composições de betão estudadas utilizou-se apenas a composição de cimento e filler calcário. O superplastificante utilizado foi o *Viscocrete 3000* e em algumas das composições utilizou-se o agente introdutor de ar *Sika AER5*. As referidas composições apresentam-se no Quadro 5.13 juntamente com os resultados dos ensaios com o betão fresco e do valor médio das resistências avaliadas no ensaio à compressão de provetes cúbicos ( $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{m}^3$ ), em diferentes idades. O cálculo das quantidades dos diversos constituintes foi efectuado recorrendo ao conjunto de expressões apresentadas em 5.4.1 que dependem do conjunto de parâmetros apresentados também no referido quadro. Inicialmente, para o estudo de cada composição realizou-se uma amostra de betão com um volume de 25 litros, na betoneira de eixo vertical, de acordo com procedimento indicado no quadro.

Na proposta geral de *Okamura et al.* o valor adequado do volume de agregado grosso é quantificado para um volume aparente de  $0.50 \text{m}^3$  para alcançar a auto-compactabilidade, incluindo uma certa margem de segurança. Contudo, este valor deve ser aplicado a agregados cuja dimensão máxima é próxima de 20mm. Na investigação desenvolvida em Delft [Takada et al., 1998a], a dimensão máxima dos agregados utilizados foi de 16mm. Estes investigadores desenvolveram estudos para confirmar a possibilidade de aumentar o volume de grossos na composição do betão através dos ensaios de auto-compactabilidade. Utilizando partículas de agregados de menores dimensões, menor é a probabilidade de colisão entre elas ou a ocorrência de bloqueio, para as mesmas condições fronteira. Aqueles autores concluíram que, para os agregados com dimensão máxima de 16mm o valor do volume aparente poderia aumentar para valores de 0.55 a  $0.58 \text{m}^3$ . Com o aumento do volume de grossos conseguiram uma redução de cerca de 10% do volume de pasta dos finos e, por esta razão, uma composição mais eficiente do ponto de vista económico. O mesmo estudo revelou que o valor de  $V_w/V_p$  obtido à custa dos ensaios com a argamassa resultou demasiado baixo, ou seja, o betão resultante apresentava-se muito viscoso e dificilmente “trabalhável”, ao contrário do que seria de esperar. Assim, a solução encontrada foi aplicar um factor  $\alpha$  ( $\geq 1.0$ ) ao valor obtido de  $V_w/V_p$  [Takada et al., 1998b]. Do mesmo modo, no presente estudo realizaram-se experiências com valores de  $V_{ap}$  e  $\alpha$  diferentes dos apresentados na proposta original, tal como apresentado no Quadro 5.13.

Quadro 5.13 – Caracterização das composições estudadas

composição nº		1	2	3	4	5
data da amassadura		30/03/01	20/04/01	10/05/01	11/05/01	17/05/01
sequência da amassadura		<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
Parâmetros da composição	$V_{ap}$ (m <sup>3</sup> )	0.55	0.50	0.50	0.53	0.525
	S (%)	40	40	40	45	40
	$V_w/V_p$	0.629	0.629	0.629	0.629	0.629
	$\alpha$	1.05	1.05	1.20	1.20	1.20
	f (%)	30	30	30	30	30
Quantidades na composição (kg/m <sup>3</sup> )	cimento	515	536	506	453	498
	filer	196	204	193	173	190
	brita V1	818	742	742	787	779
	areia V1	465	486	486	533	475
	areia V2	--	233	233	256	228
	areia V2-modificada	223	--	--	--	--
	água	160	166	180	161	177
	superplastificante	12.04	12.58	9.09	11.27	8.94
	introdutor de ar	0	0.268	0	0	0
w/c		0.31	0.31	0.36	0.36	0.36
w/p		0.23	0.22	0.26	0.26	0.26
Sp/P (%)		1.7	1.7	1.3	1.8	1.3
Caracterização do betão no estado fresco	“Ensaio de espalhamento”- diâmetro de espalhamento (mm)	615	600	600	635	622
	“Ensaio de fluidez”- tempo de escoamento (seg.)	16.0	14.2	7.6	11.2	7.9
	“Ensaio da caixa”- altura de enchimento (mm)	200	311	330	285	305
Ensaio à compressão de provetes cúbicos	resist. comp., 7 dias (MPa)	--	47.1	46.9	44.5	43.2
	resist. comp., 14 dias (MPa)	--	--	--	--	--
	resist. comp., 28 dias (MPa)	59.6	54.1	51.0	51.0	46.6

Na primeira composição testada, composição nº1, adoptou-se  $V_{ap}=0.55\text{m}^3$  e  $\alpha=1.05$  tendo sido utilizada a Areia V2-modificada, no seguimento dos resultados dos ensaios com as argamassas. Ajustou-se a dosagem de superplastificante para obter um valor adequado do diâmetro de espalhamento. O valor obtido para o tempo de escoamento encontra-se dentro dos limites e apenas a altura de enchimento ficou aquém do mínimo recomendado, devido ao bloqueio dos agregados na zona dos varões. Isto indicou que  $V_{ap}=0.55\text{m}^3$  adoptado foi excessivo, para o

grau de exigência imposto por aquele obstáculo. Por esta razão, nas experiências subsequentes adoptou-se um valor inferior para  $V_{ap}$ .

No decorrer da experiência anterior contava-se com a facilidade de alterar a granulometria da Areia V2 facultada pelo fornecedor, ou seja, corte dos finos com dimensão inferior a 1.19mm, em quantidades industriais para a realização da experiência-piloto. No entanto, depois da tragédia ocorrida com a ponte de Entre-os-Rios, e a conseqüente escassez das areias de rio, na zona do Porto, fez aumentar a procura das areias artificiais, impedindo o fornecimento da areia V2 modificada. Em face desta situação, tentou-se de diversas formas ultrapassar as dificuldades verificadas com a utilização da Areia V2 completa.

Como forma de obviar os inconvenientes da areia britada foram reportados casos de utilização de um agente introdutor de ar juntamente com o superplastificante em que num deles utilizou-se apenas areia britada (sem corte dos finos) e a dosagem de Sika AER5 foi de 0.05% a 0.08%, mas no máximo 0.1% da quantidade de cimento. A introdução de ar (em dosagens superiores às referidas) é, em geral, para produzir um betão mais resistente à acção de gelo-degelo, mas existem outros efeitos do ar introduzido nas propriedades do betão, que é importante considerar, uns benéficos e outros não. Um dos mais importantes é a influência dos vazios na resistência do betão em todas as idades. A resistência do betão é função directa da sua densidade, e os vazios causados pelo ar introduzido irão afectar a resistência da mesma forma que os vazios de outra origem. Por outro lado, a introdução de ar tem um efeito benéfico considerável na trabalhabilidade do betão. Como resultado, mantendo constante a trabalhabilidade, a incorporação de ar introduzido pode vir acompanhada pela redução da razão água/cimento, quando comparada com uma composição semelhante sem ar introduzido. A razão para a melhoria da trabalhabilidade pela introdução de ar prende-se provavelmente com as bolhas de ar, com uma forma esférica mantida por tensão superficial, que funcionam como agregado fino de baixo atrito superficial e considerável elasticidade. Introduzir ar na composição fá-la funcionar como uma composição com um conteúdo de areia excessivo, pelo que, a adição de um introdutor de ar deve ser acompanhada por uma redução do conteúdo em areia. Esta redução permite uma maior redução do conteúdo de água na composição, que pode vir a compensar a perda de resistência causada pelo aumento de vazios. É interessante notar que, a introdução de ar afecta a consistência ou “mobilidade” da amassadura de um modo qualitativo. Pode dizer-se que a amassadura é mais plástica de tal forma que para a mesma trabalhabilidade, medida pelo índice de compactabilidade (NP ISO 4111), a composição contendo ar introduzido é mais fácil de colocar e compactar do que uma composição sem ar [Neville, 1995]. Foi este aspecto, em particular, que interessou explorar embora em composições mais ricas (como é o caso das composições de SCC) o efeito do ar introduzido na trabalhabilidade seja menor, de tal forma que a razão água/cimento sofre apenas uma pequena redução levando a uma perda final de resistência.

Na composição nº 2 utilizou-se a Areia V2 completa, o superplastificante (*Viscocrete 3000*) e um agente introdutor de ar (*Sika AER5*). Com esta composição conseguiram-se valores adequados nos ensaios do betão fresco sem um acréscimo significativo da dosagem de superplastificante e, como seria de esperar, verificou-se uma redução no valor da resistência. Apesar disto, esta composição não foi adoptada para a experiência-piloto pois as doses muito baixas acarretam problemas de doseamento, aquando do fabrico do betão, sendo necessário instalar bombas doseadoras adequadas. É necessário dominar bem a produção deste tipo de betões, com doses pequenas de adjuvante. Além disto, existe o custo extra do agente introdutor de ar e das operações adicionais.

Para as últimas três composições adoptou-se uma abordagem distinta. O intervalo de aceitação para o valor do tempo de escoamento do betão, no “Ensaio de fluidez do betão”, adoptado pelos investigadores de Delft foi de 9 a 13 segundos (apesar de o funil adoptado possuir dimensões superiores, ver 4.2), o que é bastante diferente do intervalo da proposta genérica 10 a 20 segundos. De notar que, este tempo de escoamento está fundamentalmente relacionado com a viscosidade do betão e esta com o risco da ocorrência de segregação. Pode-se concluir que nas composições anteriores estávamos na presença de um betão demasiado viscoso para a aplicação em vista, menos exigente em termos resistência à ocorrência de segregação. Será necessário definir melhor os valores limite destes parâmetros, em função das exigências da aplicação em vista. Nas últimas composições, ao adoptar  $\alpha=1.20$ , baixou-se o nível de exigência e ao mesmo tempo obteve-se uma composição mais económica. Como seria de esperar, o aumento da razão água/ligante e, por consequência, da razão água/cimento provocou uma redução nos valores da resistência.

Na composição nº 3 a única alteração introduzida consistiu no aumento para 1.20 do factor  $\alpha$ . Assim, conseguiu-se um valor adequado do diâmetro de espalhamento com uma dosagem de superplastificante reduzida. O valor da altura de enchimento obtida é superior ao valor mínimo recomendado, no entanto, o valor obtido para o tempo de escoamento foi demasiado baixo. Na composição nº 4 além da alteração referida, que influencia essencialmente a viscosidade da argamassa, aumentou-se  $V_{ap}$  e  $S$  no sentido de melhorar o esqueleto sólido. O acréscimo de agregado grosso e, principalmente, da areia obrigaram à utilização de uma dosagem excessiva de superplastificante, para obter a deformabilidade adequada, resultando também num aumento do tempo de escoamento, devido aumento das interacções entre as partículas dos agregados, e redução da altura de enchimento. Assim, fomos conduzidos à composição nº 5 onde se voltou a adoptar  $S=40\%$ , pela já confirmada maior quantidade de superplastificante exigida pelas areias britadas. Com  $V_{ap}$  ligeiramente superior ao da composição

nº 2 a grande diferença entre as duas verificou-se no tempo de escoamento, aqui ditado pela viscosidade da argamassa.

Quadro 5.14 – Evolução ao longo do tempo das características do betão, betoneira de eixo vertical

<b>composição nº</b>		<b>2</b>					
sequência da amassadura		<b>A</b>					
instante após o final da amassadura (minutos)		<b>~ 0</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>65</b>	<b>75</b>	<b>80</b>
Caracterização do betão no estado fresco	“Ensaio de espalhamento”- diâmetro de espalhamento (mm)	535	605	635	588	--	--
	“Ensaio de fluidez”- tempo de escoamento (seg.)	--	--	--	--	17.9	--
	“Ensaio da caixa”- altura de enchimento (mm)	--	--	--	--	--	308
Ensaio à compressão de provetes cúbicos	resist. comp., 7 dias (MPa)	46.4					
	resist. comp., 14 dias (MPa)	--					
	resist. comp., 28 dias (MPa)	49.9					

Quadro 5.15 – Evolução ao longo do tempo das características do betão, betoneira de eixo basculante

<b>composição nº</b>		<b>2</b>			
sequência de mistura		<b>B</b>			
instante após o final da amassadura (minutos)		<b>~ 0</b>	<b>30</b>	<b>55</b>	<b>75</b>
Caracterização do betão no estado fresco	“Ensaio de espalhamento”- diâmetro de espalhamento (mm)	490	625	632	568
	“Ensaio de fluidez”- tempo de escoamento (seg.)	27.2	17.0	--	--
	“Ensaio da caixa”- altura de enchimento (mm)	160	190	--	277
Ensaio à compressão de provetes cúbicos	resist. comp., 7 dias (MPa)	33.2 / 35.8			
	resist. comp., 14 dias (MPa)	42.73 / 38.37			
	resist. comp., 28 dias (MPa)	36.62 / 38.37 / 39.24			

No Quadro 5.14 apresenta-se a evolução dos resultados dos diferentes ensaios, ao longo do tempo, obtidos com a composição nº 2 juntando logo no início a água e as quantidades ajustadas dos adjuvantes. No final da amassadura realizou-se o primeiro ensaio de espalhamento, nos ensaios seguintes as amostras de betão foram reutilizadas (o volume total da amassadura foi de 25 litros) e antes de cada nova medição mexeu-se o betão durante 1.5 minutos. Deste modo, foi possível verificar inicialmente um ganho e depois, ao fim de aproximadamente 60 minutos, a perda de deformabilidade. O ensaio com o funil e com a caixa foram realizados no final dos ensaios de espalhamento, apresentando ainda valores aceitáveis. No Quadro 5.15 apresentam-se os resultados de uma experiência semelhante, para a mesma composição, mas com a betoneira de eixo basculante o que permitiu obter um maior volume de amassadura (35 litros). O procedimento de amassadura foi também alterado. Depois de terminada a sequência de amassadura realizaram-se os 3 tipos de ensaios e, em seguida, amostra de betão foi colocada novamente na betoneira, e esta foi posta em movimento durante mais algum tempo, repetindo-se esta sequência diversas vezes. Comparando os resultados de ambos os quadros verificam-se diferenças significativas no que respeita ao tempo de escoamento e à altura de enchimento o que pode estar relacionado com uma menor eficiência da amassadura. Frequentemente, neste tipo de betoneira, parte dos materiais finos aderem às paredes da mesma, principalmente para volumes de amassadura pequenos, fazendo com que a amostra testada deixe de ser representativa daquela composição uma vez que o volume de pasta foi reduzido. O modo de misturar desta betoneira introduz mais ar na amostra, o que também não será conveniente numa composição com um agente introdutor de ar, pois corre-se o risco de as bolhas de ar se fundirem, com consequências negativas na resistência do betão endurecido, ver variação dos valores da resistência no quadro Quadro 5.15.

De entre as composições testadas escolheu-se a composição nº 5 para utilizar numa primeira experiência levada a cabo na central de betão-pronto de Valongo. Nas amassaduras efectuadas, de 0.5m<sup>3</sup> de volume, não se conseguiu obter uma composição com a deformabilidade e viscosidade pretendidas. Rapidamente, passou-se de uma composição com um valor do diâmetro de espalhamento insuficiente (que aparenta um conteúdo excessivo de agregado) indiciando que o superplastificante não actuou devidamente, para uma composição demasiado fluida. Julga-se que as dificuldades sentidas prendem-se com a areia artificial e o problema que se verifica em Portugal da inconstância da granulometria, principalmente na quantidade de finos. As areias britadas são ricas em partículas que podem ser consideradas como finos, mas o volume destas varia bastante e estas flutuações afectam gravemente a auto-compactabilidade. Em diversas aplicações práticas, quando não é possível disponibilizar um material com um tratamento adequado este acaba por ser dispensado. O mesmo aconteceu no presente trabalho, relativamente à areia britada e então procurou-se um conjunto de materiais constituído por areias naturais que facilitasse a obtenção da auto-compactabilidade tanto no laboratório como,

posteriormente, numa produção à escala industrial. Deste modo, voltou a utilizar-se o conjunto de materiais de Penacova.

#### 5.4.4 Resultados obtidos com os materiais de Penacova 2

Pelas razões atrás expostas, decorreu algum tempo desde os primeiros ensaios realizados com os materiais de Penacova, apresentados em 5.4.2, e os descritos neste ponto tendo, entretanto, sido alterada a origem e portanto as características dessas areias. No entanto, em termos de distribuição granulométrica as alterações não foram significativas. De qualquer modo realizaram-se alguns ensaios com argamassas não só porque a natureza das areias era diferente como também se passou a utilizar outro tipo de cimento - Tipo II 32.5.

Neste houve uma clara e particular preocupação de conceber uma composição de SCC eficiente do ponto de vista económico. Tendo consciência que a composição obtida com os materiais de Penacova<sup>1</sup> corresponde a um nível de auto-compactabilidade bastante exigente, com um elevado conteúdo de finos e, por isso, com um custo elevado, optou-se por baixar o nível de exigência que está directamente relacionado com o tipo de aplicação em vista, por exemplo, a densidade de armadura dos elementos a betonar, o espaçamento entre os varões e o seu diâmetro, etc.. Neste caso concreto de aplicação em obra pretendia-se betonar diferentes elementos estruturais de uma habitação corrente, o que corresponde a um nível de exigência, em termos de auto-compactabilidade, mais baixo. Um cenário diferente seria, por exemplo, a betonagem de secções de viadutos com zonas de elevada densidade de armadura, onde dificilmente entra o vibrador, caso em que o nível de exigência seria bastante superior. Uma quantidade maior de cimento neste caso deixaria também de constituir problema visto que, frequentemente, são também exigidas elevadas resistências iniciais ou finais, por motivos diversos.

##### 5.4.4.1 Ensaio com as argamassas

Uma composição mais económica passará, obviamente, por uma percentagem de substituição de cimento por fíler maior, pelo que se adoptou um factor de substituição de cimento por fíler de 40%. Aumentou-se também o volume de agregado fino na argamassa, considerando-o igual a 45% do volume de argamassa, sendo este constituído por uma composição de 50% de Areia P1' com 50% de Areia P2', cuja caracterização se apresenta em 5.2.1.4. Para estas areias a percentagem de finos, desta vez considerando as partículas com  $d < 0.149\text{mm}$ , foram de:  $ksf_1 = 3.59\%$  e  $ksf_2 = 2.06\%$ .

Partindo de uma composição semelhante à dos estudos com a argamassa na primeira série de ensaios com os materiais de Penacova, foi possível com apenas três amassaduras, para  $V_w/V_p=0.700$ , obter valores próximos dos valores recomendados para  $G_m$  e  $R_m$ . Em termos práticos, não foi necessária mais “precisão” no ajuste do valor de  $V_w/V_p$ , uma vez que aquando dos ensaios do betão este valor foi multiplicado por um factor  $\alpha$  ( $\geq 1.0$ ), para reduzir a viscosidade da argamassa.

Quadro 5.16 – Resultados dos ensaios com a argamassa

$V_w/V_p$	$Sp/P$ (%)	$G_m$	$R_m$	$G_m/R_m$	$R_m/G_m^{0.4}$
<b>0.650</b>	1.6	1.78	0.43	<b>4.14</b>	<b>0.345</b>
<b>0.700</b>	1.6	1.76	0.52	<b>3.38</b>	<b>0.417</b>
<b>0.700</b>	1.8	3.09	0.87	<b>3.55</b>	<b>0.556</b>

#### 5.4.4.2 Ensaio com o betão

A composição estudada apresenta-se no Quadro 5.17 juntamente com os resultados dos ensaios com o betão fresco. Nesta composição o superplastificante utilizado foi o *Viscocrete 3000* e para  $V_{ap}$  adoptou-se  $0.55m^3$ . Inicialmente, para o ajuste da dosagem de superplastificante foi realizado um volume de 25 litros, na betoneira de eixo vertical. Como se pode observar no quadro, com a dosagem inicial de superplastificante, 1.2%, o valor do diâmetro de espalhamento obtido foi insuficiente e, depois de adicionar o restante para completar 1.5% verificou-se que esta dosagem foi exagerada sendo necessário realizar outra amassadura. Com a composição resultante deste estudo pretendia-se repetir o enchimento do modelo em forma de U, e portanto, a nova amassadura foi realizada já na betoneira de eixo basculante, com um volume de 35 litros. Assim, conseguiu-se um valor adequado do diâmetro de espalhamento para uma dosagem 1.24% e o valor do tempo de escoamento ficou no interior do intervalo [9,13] segundos. Atendendo aos objectivos estabelecidos, considerou-se esta composição aceitável, apesar de não ter sido atingida a altura mínima de 300mm no “Ensaio da caixa”. Isto ficou a dever-se ao tipo de obstáculo introduzido na caixa utilizada. Para um nível de exigência inferior, o obstáculo proposto correspondente é constituído apenas por três varões e com um espaçamento maior entre eles (ver Capítulo 4, Figura 4.8) que não foi o utilizado pois dispunha-se apenas do obstáculo mais exigente.

Quadro 5.17 - Caracterização das composições estudadas

composição nº		1	2
sequência da amassadura		<b>C</b>	
data da amassadura		03/07/01	05/07/01
Parâmetros da composição	$V_{ap}$ (m <sup>3</sup> )	0.55	
	S (%)	45	
	$V_w/V_p$	0.700	
	$\alpha$	1.20	
	f (%)	40	
Quantidades na composição (kg/m <sup>3</sup> )	cimento	360	
	filer	213	
	brita P1	799	
	areia P1	412	
	areia P2	407	
	água	166	
	superplastificante	8.60	7.11
w/c		0.46	
w/p		0.29	
Sp/P (%)		1.5	1.24
Caracterização do betão no estado fresco	“Ensaio de espalhamento” - diâmetro de espalhamento (mm)	534 ; Sp/P $\approx$ 1.2% 774 ; Sp/P $\approx$ 1.5%	633
	“Ensaio de fluidez” - tempo de escoamento (seg.)	7.7	11.8
	“Ensaio da caixa” - altura de enchimento (mm)	250	< 300
Ensaio à compressão de provetes cúbicos	resist. comp., 8 dias (MPa)	--	26.3
	resist. comp., 14 dias (MPa)	--	--
	resist. comp., 28 dias (MPa)	35.0	31.0

À semelhança do que se fez para a composição final do estudo com os materiais de Penacova 1, a auto-compactabilidade desta composição foi validada observando o escoamento de uma amostra de maior volume, pelo interior de um modelo em forma de U quando sujeita apenas à acção da gravidade. Esta experiência é também descrita no Capítulo 6.



## **Capítulo 6**

### **Fase experimental: validação das composições**

---

#### **6.1 Introdução**

Com o objectivo de visualizar mais facilmente o comportamento do SCC e validar os aspectos de trabalhabilidade evidenciados pelos ensaios efectuou-se a betonagem de um molde em forma de U. Trata-se de um molde com dimensões bastante superiores às dos equipamentos utilizados na avaliação do betão fresco e, por isso, envolvendo maior volume de betão o que por si só colocou uma série de novas questões como a necessidade de utilização de uma betoneira com maior capacidade, o tipo de funcionamento desta, o tipo de cofragem e a sua segurança, a forma de colocação, etc.. O molde foi construído com chapas de acrílico transparente e em parte do seu interior foi colocada armadura, sem qualquer função estrutural, apenas para simular os obstáculos que as armaduras numa viga ou pilar correntes constituem ao movimento do betão. A existência de duas colunas permite que o betão seja vazado numa delas e ascenda na outra por acção do peso próprio avaliando-se, no final, a diferença entre as alturas do betão em ambas as colunas. Permite também comparar as propriedades do betão endurecido em cada uma das colunas e a sua variação ao longo da altura. As dimensões do molde e da respectiva armadura estão representadas na Figura 6.1. Foram realizados dois enchimentos, utilizando os agregados de

Penacova, um para o conjunto de Agregados 1 e outro para os Agregados 2. Com a composição dos Agregados 2 foram reunidas condições para realizar uma experiência-piloto em obra, cuja descrição se apresenta também neste capítulo.

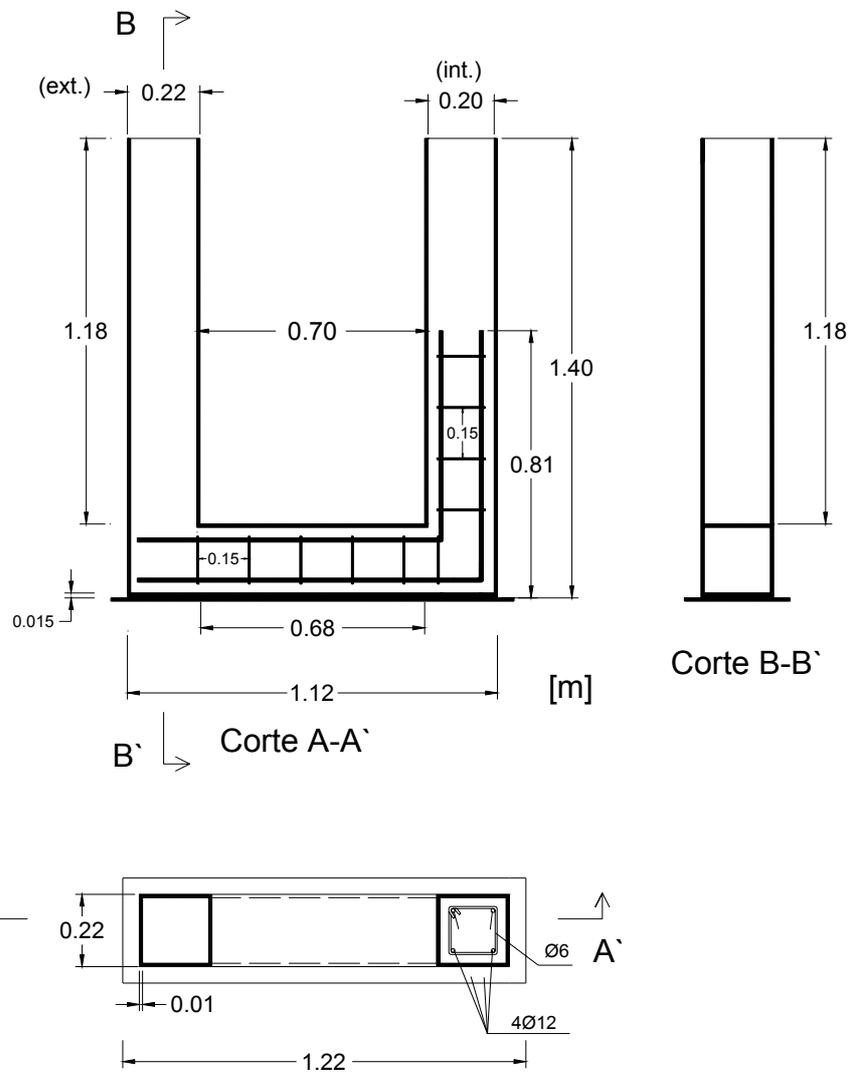


Figura 6.1 – Forma e dimensões do molde em forma de U

## 6.2 Ensaio sobre elemento em U – Agregados 1

### 6.2.1 Caracterização do betão no estado fresco

A composição do betão utilizada, ver Quadro 6.1, é a composição final que resultou dos estudos apresentados em 5.5.2, com excepção da dosagem de superplastificante que foi aumentada ligeiramente para  $Sp/P=1.17\%$ .

Quadro 6.1 – Composição do betão adoptada

ref <sup>a</sup> da composição		Agregados 1
sequência da amassadura		<b>B</b>
data da amassadura		15/11/00
Quantidades na composição (kg/m <sup>3</sup> )	cimento	487
	fíler	219
	brita P1	859
	areia P1	339
	areia P2	339
	água	155
	superplastificante	7.77
w/c		0.32
w/p		0.22
Sp/P (%)		1.17

A necessidade de um volume de betão maior, e por facilidade de colocação do mesmo, a amassadura foi realizada numa betoneira de eixo basculante. Realizaram-se duas amassaduras sequencialmente, com um volume de cerca de 70 litros cada, de acordo com a sequência de amassadura B, e armazenou-se o betão num balde provido de um dispositivo de descarga, construído para o efeito. A totalidade do betão resultante destas amassaduras foi suficiente para encher o molde. Como se pode observar na sequência de imagens da Figura 6.2, o betão foi vazado pela parte superior da coluna da esquerda (sem armadura), através do dispositivo de abertura do balde, deslocou-se ao longo da parte horizontal através da armadura, subindo depois, na vertical, na coluna da direita. No final do ensaio a diferença de alturas registada entre a coluna da esquerda e a da direita foi de apenas 65mm. A altura final do betão na coluna da esquerda foi de 1.350m e na coluna da direita de 1.285m, ou seja, a diferença de alturas foi de cerca de 5%. Ao longo do movimento do betão foi possível observar a não ocorrência de segregação e exsudação. Na parte superior da coluna da direita observaram-se os agregados, apresentando uma distribuição uniforme.



Figura 6.2 – Sucessivas fases do enchimento do molde, sob diferentes pontos de observação

Depois do enchimento realizou-se uma terceira amassadura, com um volume menor (cerca de 32 litros), que serviu para realizar o “Ensaio de espalhamento do betão” e o “Ensaio da caixa”. O valor obtido para o diâmetro de espalhamento foi de 623mm, ver Figura 6.3. A amostra de betão deformada apresentou uma forma circular tendo sido observada uma distribuição uniforme dos agregados, presentes mesmo junto do contorno. Não se verificou a ocorrência de exsudação ou de excesso de pasta junto ao contorno, como se pode confirmar nas vistas de cima e de perfil que constam na Figura 6.3. Ao realizar o “Ensaio da caixa” verificou-se mais uma vez que esta composição satisfaz o critério de auto-compactabilidade, com uma altura de enchimento de 310mm, ver Figura 6.4. Depois de realizados os ensaios, o betão da terceira amassadura utilizou-se para encher os moldes que deram origem aos provetes cúbicos e cilíndricos.

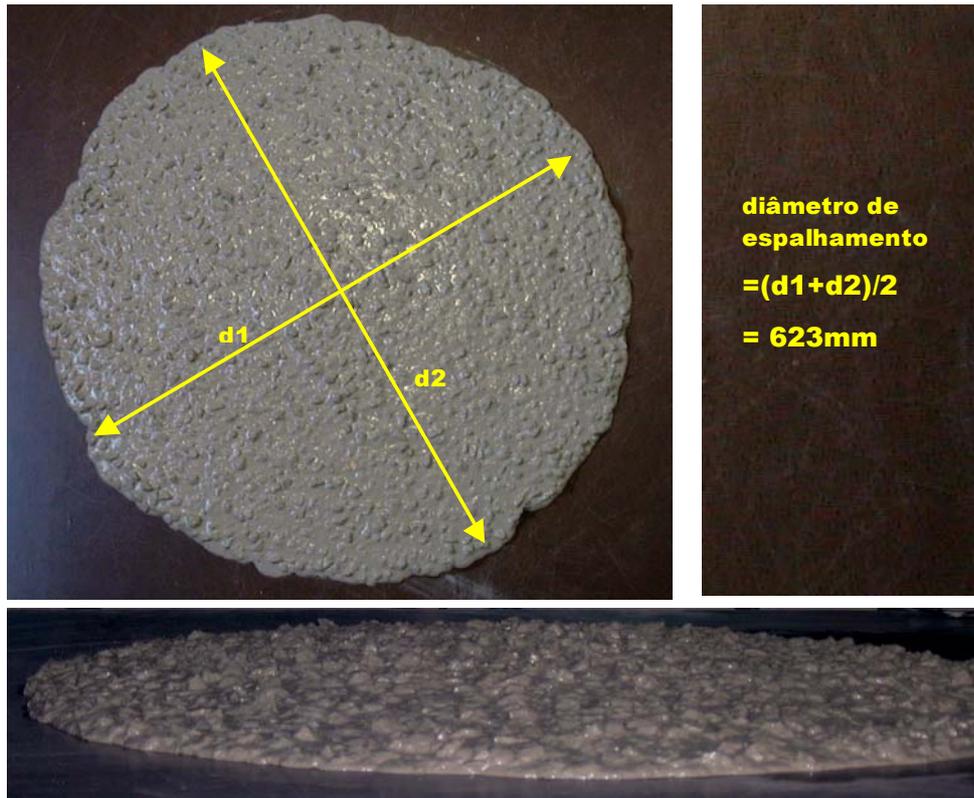


Figura 6.3 – Aspecto final do betão, no “Ensaio de espalhamento”

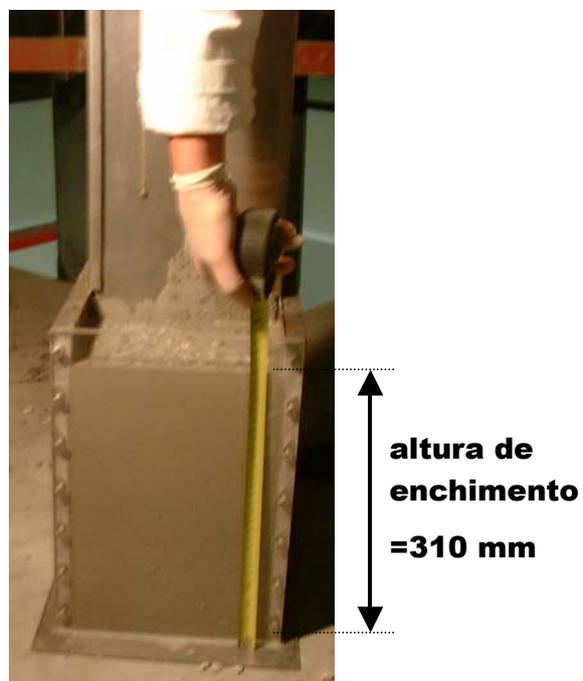


Figura 6.4 – Medição da altura de enchimento no “Ensaio da caixa”

## 6.2.2 Caracterização do betão no estado endurecido

Tendo em vista a realização de uma campanha de ensaios mais alargada e com o objectivo de obter uma caracterização mais completa das propriedades do betão endurecido e a variação das mesmas ao longo de toda a extensão do molde, foram extraídas várias carotes. A Figura 6.5 mostra algumas delas, onde é possível também observar a distribuição uniforme dos agregados. Na Figura 6.6 indica-se, além da posição relativa de cada carote, a sua numeração acompanhada de uma sigla indicativa do principal ensaio a que se destina. Desta forma, as carotes *RC* foram sujeitas ao ensaio de rotura à compressão; nas designadas com *CL* foi avaliada a resistência à penetração dos cloretos; nas designadas com *Ec*, destinadas inicialmente à determinação do módulo de elasticidade, realizou-se o ensaio de absorção por capilaridade e, posteriormente, foram sujeitas ao ensaio de rotura por compressão; nas identificadas com *AC* realizou-se o ensaio de absorção por capilaridade.



Figura 6.5– Aspecto do betão das carotes extraídas do modelo

A extracção das carotes fez-se à custa de um equipamento de corte rotativo com uma coroa de diamante, via húmida. Todas as carotes extraídas foram de diâmetro de 94 mm, com excepção das carotes com a designação CL e das carotes 24AC, 25AC, 26AC e 27AC. Para a realização do ensaio de penetração aos cloretos as carotes devem apresentar um diâmetro de 100 mm daí que se tenha utilizado uma caroteadora distinta para as carotes com designação CL. A razão pela qual não se utilizou este diâmetro em todas as amostras prende-se com a maior facilidade de operação da caroteadora com cabeça de 94 mm. Finalmente, as carotes 24AC a 27AC foram extraídas numa fase posterior, e por questão de aproveitamento do espaço que restava, utilizou-se uma cabeça com cerca de 75 mm.

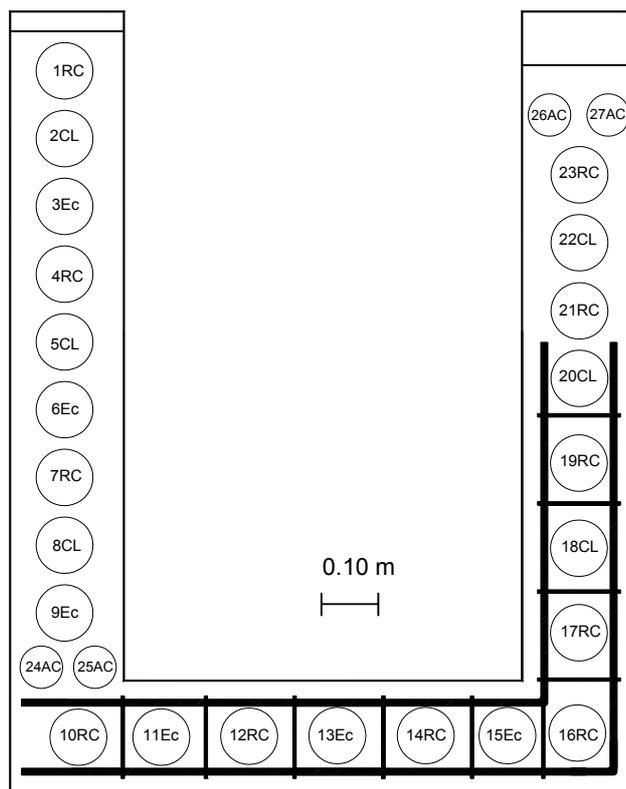


Figura 6.6 – Posição e identificação das carotes extraídas

#### 6.2.2.1 Resistência superficial

O ensaio de resistência superficial é um tipo de ensaio não destrutivo que permite avaliar apenas as propriedades da camada superficial de betão, sendo a espessura desta camada de sensivelmente 30mm. Este ensaio foi conduzido de acordo com a pré-norma europeia pr-EN-ISO 8045-1994 – “Non-destructive testing–Determination of rebound number” – que especifica um método para determinar um índice esclerométrico para uma dada área de betão endurecido, utilizando um equipamento correntemente designado por esclerómetro de *Schmidt*. O resultado deste ensaio é sensível a variações locais do betão como é o caso da presença de uma partícula do agregado imediatamente sob o êmbolo resultando numa leitura anormalmente elevada; contrariamente, a presença de um vazio numa posição semelhante iria conduzir a um valor demasiado reduzido. Além disso, a energia absorvida pelo betão está relacionada com a resistência e a rigidez, logo é a combinação destas características mecânicas que governa o valor do índice esclerométrico.

Neste trabalho, com o ensaio de resistência superficial, pretendia-se avaliar a uniformidade do betão determinando o índice esclerométrico ao longo da altura de ambas as colunas do modelo betonado. Identificando as quatro faces, de cada coluna, por A, B, C e D foram

testadas diferentes zonas, centradas em cada face, e a determinada altura medida a partir do fundo do molde. Para cada zona definiu-se uma malha de 4x4 pontos afastados de 25 mm, ou seja, para cada zona testada obteve-se um conjunto de 16 leituras, ver Figura 6.7. Em cada zona, o resultado vem expresso por um único número igual à mediana de todas as leituras. Todas as leituras foram feitas com o esclerómetro na posição horizontal, perpendicular à coluna vertical, logo não foi necessário efectuar qualquer ajuste aos valores das referidas leituras.

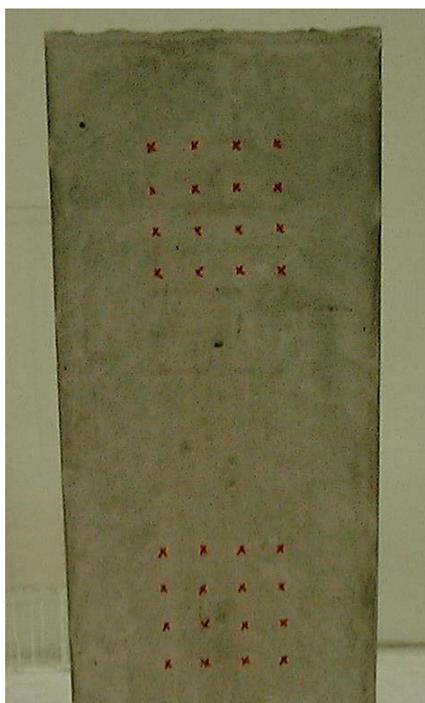


Figura 6.7 – Exemplo da malha de pontos em duas zonas de ensaio distintas

Nas figuras seguintes representa-se a evolução do índice esclerométrico, para cada coluna e para cada face, em percentagem do valor obtido no topo do molde ( $h=1.25\text{m}$ , para a coluna da direita e  $h=1.15$ , para a coluna da esquerda). Observando a Figura 6.8, relativa à coluna esquerda (onde se efectuou a descarga do betão), constata-se que o valor do índice esclerométrico é relativamente uniforme ao longo da altura, verificando-se uma diferença máxima de cerca de 5%. A Figura 6.9, relativa à coluna direita, evidencia uma certa tendência para o aumento do valor do índice, à medida que a altura diminui, no entanto, com uma diferença máxima de cerca de 10%.

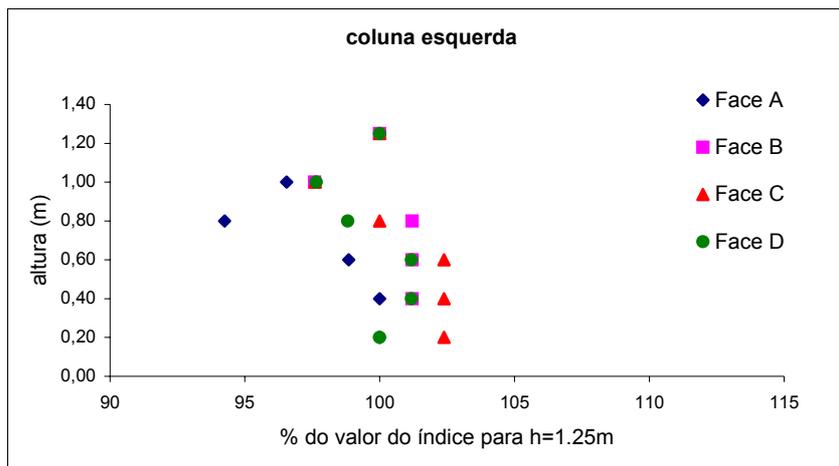


Figura 6.8 – Evolução do índice esclerométrico, na coluna da esquerda (da descarga)

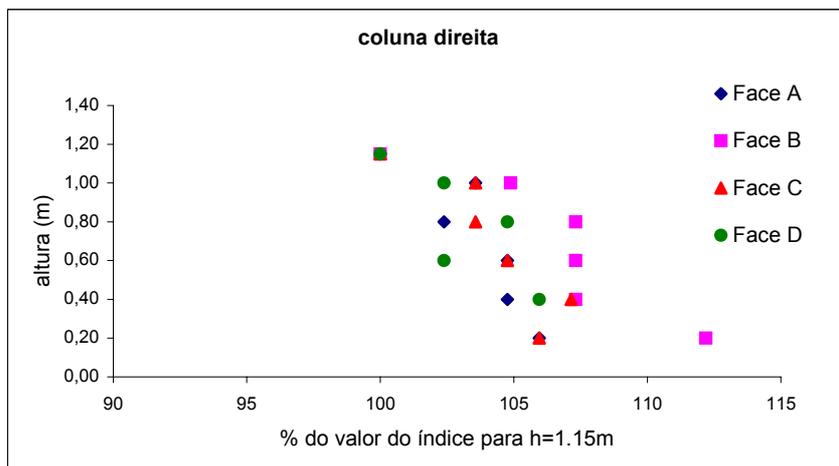


Figura 6.9 – Evolução do índice esclerométrico, na coluna da direita

Assumindo a uniformidade do betão em todas as faces, para uma dada altura e coluna, determinou-se a mediana para o conjunto global de leituras registadas, o que possibilitou fazer a representação da Figura 6.10. Nesta figura, os resultados são apresentados em valores absolutos evidenciando que as leituras efectuadas são da mesma ordem de grandeza obtendo-se, em média, valores ligeiramente superiores na coluna da direita. Em termos da evolução do valor do índice esclerométrico, ao longo da altura de cada coluna, confirmam-se as conclusões anteriores.

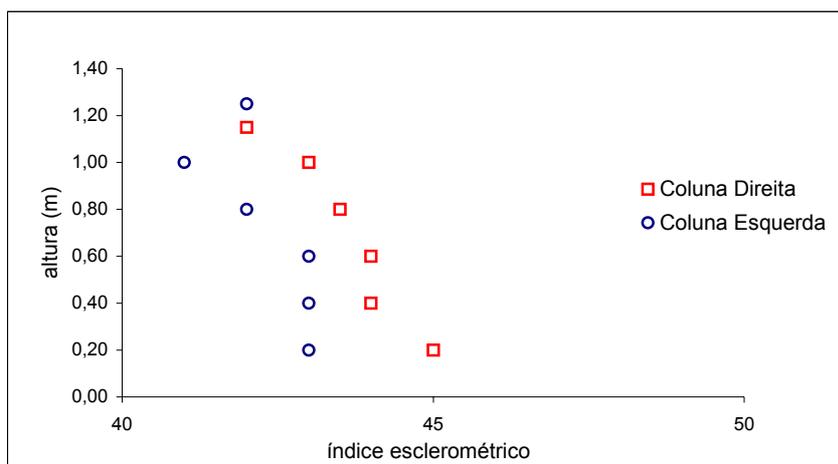


Figura 6.10 – Evolução do valor do índice esclerométrico para todas as faces, em ambas as colunas

#### 6.2.2.2 Resistência à compressão

Aquando do enchimento do molde em forma de U foram moldados 3 cubos de 150 mm de aresta e cobertos com uma película de plástico. Na ausência da instalação de uma câmara húmida nas novas instalações da FEUP, estes provetes foram curados ao ar, no interior do laboratório até à data de ensaio, em condições de cura semelhantes à do molde em forma de U. Mais tarde, foram ensaiados até à rotura por compressão, aos 33 dias de idade, tendo sido obtidos os seguintes valores da resistência à compressão 57, 64 e 56MPa, com um valor médio de 59MPa. Através da pesagem dos provetes calculou-se a respectiva massa volúmica obtendo-se 2533, 2504 e 2533 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, com um valor médio de 2523kg/m<sup>3</sup>. Na Figura 6.11 apresentam-se as curvas de tensão deformação para os três provetes cúbicos ensaiados.

Além dos provetes cúbicos foram também ensaiadas até à rotura por compressão, aos 33 dias de idade, as carotes extraídas do modelo em forma de U identificadas com RC. Tal como se indicou anteriormente na Figura 6.6, estas carotes encontravam-se distribuídas ao longo da altura de ambas as colunas e na parte do fundo por entre as armaduras dispostas no interior do molde (varões longitudinais, estribos e cintas). Mais tarde, aos 64 dias de idade, as carotes identificadas com Ec foram também conduzidas à rotura por compressão. Para ser possível comparar estes resultados com os obtidos anteriormente aplicou-se um coeficiente de 0.92 para atender ao efeito do desenvolvimento da resistência com o tempo, de acordo com o ponto 2.6.1 do [CEB-FIP Model Code, 1990].

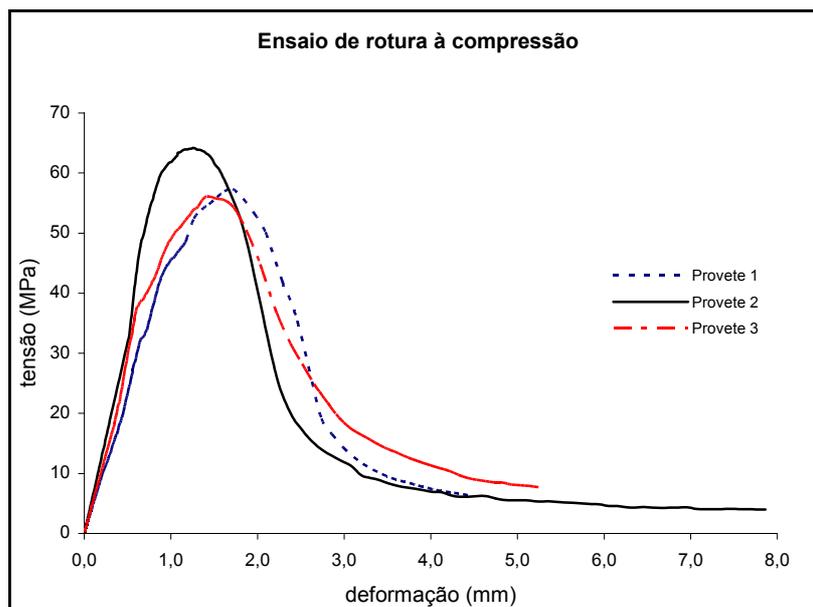
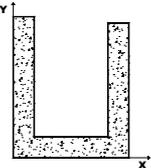


Figura 6.11 – Curvas de tensão-deformação no ensaio de rotura à compressão dos provetes cúbicos

Quadro 6.2 – Resultados da tensão de rotura avaliada nas carotes

	Designação	Coordenadas (m)		Massa volúmica Kg/m <sup>3</sup>	Tensão de rotura (MPa)		
		x	y		valores medidos		valores corrigidos
					33 dias de idade	64 dias de idade	33 dias de idade
Coluna Esquerda	1RC	0.10	1.28	2390	62.5		62.5
	3Ec	0.10	1.04	--		70.9	65.5
	4RC	0.10	0.92	2450	72.5		72.5
	6Ec	0.10	0.68	--		67.1	62.0
	7RC	0.10	0.56	2429	55.3		55.3
	9Ec	0.10	0.32	--		57.8	53.4
	10RC	0.12	0.10	2442	57.6		57.6
Parte Horizontal	11Ec	0.27	0.10	--		56.8	52.5
	12RC	0.42	0.10	2412	47.9		47.9
	13Ec	0.57	0.10	--		49.5	45.8
	14RC	0.72	0.10	2440	36.5		36.5
	15Ec	0.87	0.10	--		55.4	51.2
Coluna Direita	16RC	1.01	0.10	2379	54.2		54.2
	17RC	1.00	0.29	2420	53.0		53.0
	19RC	1.00	0.59	2425	61.1		61.1
	21RC	1.00	0.86	2403	62.2		62.2
	23RC	1.00	1.10	2422	60.5		60.5

Analisando a última coluna do Quadro 6.2, obteve-se para valor médio do conjunto global de resultados, 56MPa, com um desvio padrão de 8.4MPa, sendo os valores médios dos resultados da coluna da esquerda, parte horizontal e coluna da direita de 61, 47 e 58MPa, respectivamente. Da análise atenta destes valores pode verificar-se que ao longo da altura de ambas as colunas, estes se encontram relativamente próximos, apresentando valores significativamente mais baixos na parte horizontal. Ou seja, não existem diferenças significativas entre a coluna onde o betão foi descarregado e a coluna onde o betão teve que ascender. As diferenças registam-se entre os valores ao longo da altura das colunas e os da parte horizontal, no fundo do molde. Em princípio, seria de esperar um aumento da resistência à medida que nos aproximamos do fundo, e menores valores da mesma na coluna da direita relativamente à da esquerda, como resultado da ocorrência de alguma segregação. Uma possível explicação para as resistências inferiores, na parte do fundo, está relacionada com o ar aprisionado que não foi libertado devido à demasiada estanqueidade da cofragem associada à existência de colunas de betão à esquerda e à direita, com sensivelmente a mesma altura, não permitindo um diferencial de pressão suficiente para ocorrer a completa libertação do ar. De facto, nesta zona algum do ar subiu e acumulou-se na parte superior da secção como se pode observar na Figura 6.12, mas, é possível que parte dele tenha ficado aprisionado no interior.



Figura 6.12 – Aspecto do betão na parte horizontal do molde devido ao ar acumulado

Na Figura 6.13 e Figura 6.14 apresenta-se o aspecto, após a rotura, de algumas das carotes ensaiadas. Na Figura 6.13 pode identificar-se o modo de rotura que frequentemente se observa em cilindros de betão sujeitos a compressão axial, correspondendo a alguns dos valores mais elevados da resistência, como se pode confirmar no Quadro 6.2. Por outro lado, na Figura 6.14, exemplificam-se dois casos de modos de rotura menos habituais, cuja ocorrência pode ter-se devido a um deficiente assentamento dos pratos da prensa, aos quais estão associados valores mais baixos da resistência alcançada.



Figura 6.13 – Aspecto das carotes após a rotura por compressão



Figura 6.14 - Aspecto das carotes após a rotura por compressão

Nas Figura 6.15, Figura 6.16 e Figura 6.17 apresentam-se também as curvas tensão-deformação correspondentes ao conjunto de ensaios das carotes *RC*, retiradas da coluna esquerda, parte horizontal e coluna direita, respectivamente. De facto, as correspondentes às carotes retiradas na parte horizontal exibem um andamento mais irregular a par de uma redução do módulo de elasticidade e um abaixamento do valor da tensão máximo atingido.

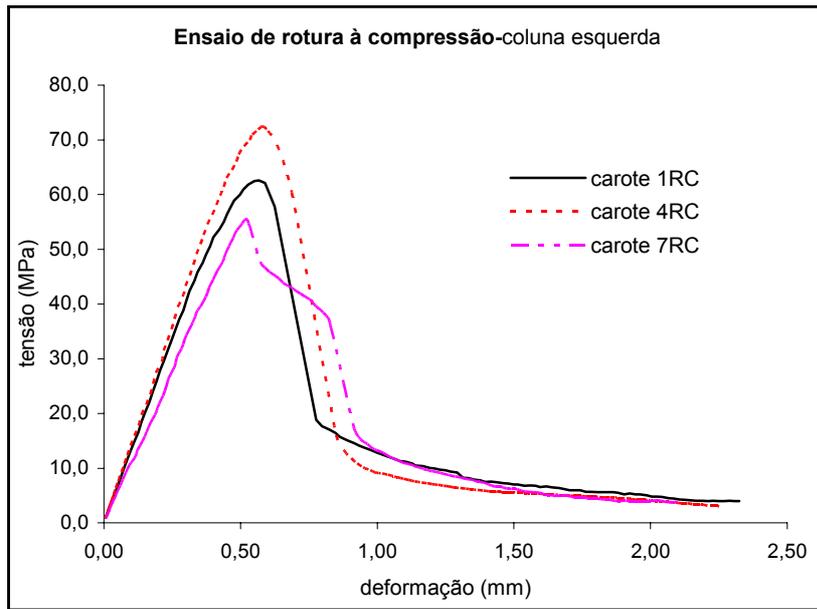


Figura 6.15 - Curvas de tensão-deformação das carotes da coluna esquerda

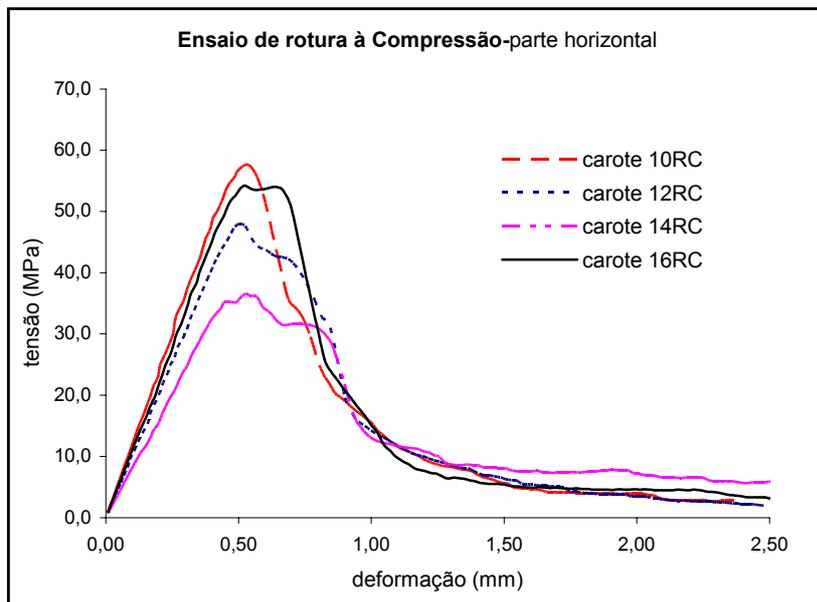


Figura 6.16 - Curvas de tensão-deformação das carotes da parte horizontal

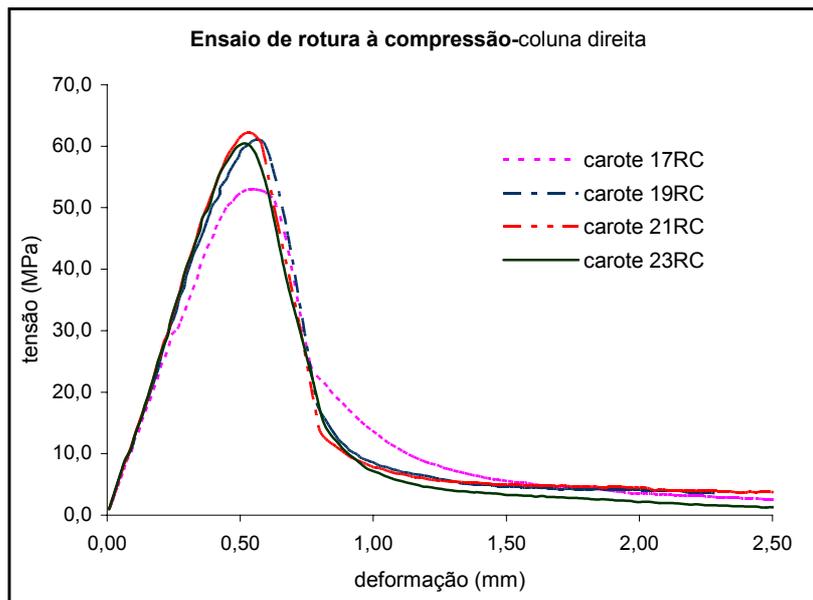


Figura 6.17 - Curvas de tensão-deformação das carotes da coluna direita

#### 6.2.2.3 Módulo de elasticidade

Aquando do enchimento do molde em forma de U, além dos provetes cúbicos encheu-se um molde cilíndrico com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro. O provete obtido foi também curado ao ar e aos 33 dias de idade realizou-se o ensaio para determinação do módulo de elasticidade de acordo com a Especificação Portuguesa E397-193 tendo-se obtido o valor de 42GPa. Aplicando a expressão apresentada no ponto 2.1.4.2 do [CEB-FIP Model Code, 1990] obtém-se para um betão com um valor médio da resistência à compressão de 56MPa um módulo de elasticidade de 38GPa, aos 28 dias de idade.

Como se mencionou anteriormente, foi prevista a determinação do módulo de elasticidade em algumas das carotes extraídas do modelo, as designadas por  $E_c$ , no entanto, por motivos de avaria com o equipamento esta determinação não se realizou.

#### 6.2.2.4 Absorção por capilaridade

Hoje em dia, é reconhecido que as propriedades de transporte da camada do betão superficial representam um papel importante na durabilidade do betão armado. Isto justifica-se porque a maior parte dos processos de deterioração que afectam as estruturas de betão envolvem o transporte de agentes agressivos (por exemplo, água, pura ou transportando agentes agressivos, dióxido de carbono e oxigénio) para o interior do betão e normalmente, quanto mais o betão resistir ao seu ingresso mais durável será. O transporte na camada de betão superficial é

controlado por três mecanismos/processos, nomeadamente, a absorção capilar, a permeabilidade e a difusão [Sonebi et al., 2000].

A sucção capilar ou absorção corresponde à entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares. A ascensão capilar é proporcional à raiz quadrada do tempo e do raio capilar. Este mecanismo ocorre se o betão está sujeito a ciclos de molhagem e secagem sendo muito importante relativamente à maioria das obras na medida em constitui um dos mecanismos preponderantes na entrada de água, e de agentes agressivos nela dissolvidos, no betão de recobrimento das armaduras. A velocidade, extensão e efeitos deste transporte dependerão, do ponto de vista físico, da estrutura dos poros e fendas e do ponto de vista químico da composição do cimento, das adições e das propriedades dos agregados. No que respeita à cinética de absorção é a distribuição dos poros segundo o seu tamanho que influencia a velocidade de transporte dos líquidos e gases na rede porosa pelo que, frequentemente, esse estudo é feito a partir da análise de curvas de absorção capilar. Estas curvas são traçadas a partir dos resultados de ensaios de absorção capilar em que apenas uma face do provete seco é imersa em água e é medido o aumento de peso em função da raiz do tempo decorrido a partir do início do ensaio [Coutinho, 1998].

- *Procedimento de ensaio*

Para a realização deste ensaio foi adoptada e ligeiramente adaptada uma recomendação da RILEM [RILEM TC116-PCD, 1999].

De forma resumida, o procedimento de ensaio adoptado foi o seguinte: depois de extraídos do molde, os provetes foram colocados a secar, a uma temperatura de  $40 \pm 5^\circ\text{C}$ , até atingirem massa constante. Diz-se que se atingiu massa constante, considerando-se o provete seco, quando a diferença entre as pesagens sucessivas  $m_i$  e  $m_{i+1}$ , decorrido determinado intervalo de tempo entre elas, for inferior a  $0.1\% m_i$ . Depois de retirados da estufa deixou-se arrefecer os provetes, sem a ocorrência de trocas de humidade com o ambiente, de modo a estes ficarem em equilíbrio com a temperatura do ar ambiente. Imediatamente antes do ensaio foi medida a massa de cada provete ( $m_0$ ) e, em seguida, a face moldada do provete foi imersa em água até uma altura máxima de 3mm, dentro de um recipiente. O referido recipiente foi tapado para minimizar as trocas de humidade e temperatura com o ar envolvente. Note-se que no molde em forma de U não foram utilizados óleos ou outros agentes descofrantes. De realçar ainda que, as faces em estudo não ficaram em contacto com o fundo do recipiente, mas sim sobre uns pinos, perturbando o menos possível a ascensão da água.

A ascensão da água por absorção capilar foi medida através da massa dos provetes  $m(t)$  em intervalos de tempo de 10 minutos, 30 minutos, 1 hora, 4 horas e 24 horas após contacto com a água. Antes de pesar, a superfície em contacto com a água foi limpa com um pano húmido não absorvente. Para cada intervalo de tempo especificado foi calculada a massa de água de absorção de cada provete testado ( $m(t) - m_0$ ). Cada um destes valores foi dividido pela área da superfície testada obtendo-se os valores da absorção de água por unidade de área da superfície de ensaio [ $\text{g}/\text{m}^2$ ].

- *Resultados obtidos*

Na realização deste ensaio foram utilizadas as carotes identificadas com Ec, possuindo um diâmetro de 93 mm e altura de 200 mm, aos 43 dias de idade do betão. Neste primeiro ensaio as medições não foram efectuadas rigorosamente nos períodos de tempo referidos anteriormente. Um outro problema associado a este conjunto de resultados prende-se com a falta de precisão da balança utilizada. A altura exagerada dos provetes, 200mm, forçou-nos a utilizar uma balança com menos precisão, 1.0 g, o que poderia, de alguma forma, ter afectado os resultados.

Com os resultados obtidos, representou-se em abcissas  $\sqrt{t}$  sendo  $t$ , em minutos, o intervalo de tempo decorrido desde o instante zero em que o provete foi introduzido na água; e em ordenadas a massa de água absorvida por unidade de área, em  $\text{g}/\text{m}^2$ . Estes pares de valores foram aproximados por uma recta, pelo método dos mínimos quadrados, cuja inclinação corresponde ao coeficiente de absorção do respectivo provete. As rectas de ajuste, as respectivas equações e o quadrado do coeficiente de correlação são apresentados na Figura 6.18, para cada um dos provetes. Apresenta-se também um quadro resumo com os valores, para cada provete testado, da absorção capilar em cada instante e o respectivo valor do coeficiente de absorção, que permitiu comparar o desempenho do betão em ambas as colunas. O coeficiente de absorção é dado pela inclinação de cada uma das rectas, em  $(\text{g}/\text{m}^2)/\text{min}^{0.5}$ , segundo as unidades da Figura 6.18, a que correspondem  $10^{-3}\text{mm}/\text{min}^{0.5}$  ou, ainda,  $60^{0.5}\times 10^{-3}\text{mm}/\text{hora}^{0.5}$ . No Quadro 6.3 os valores do coeficiente de absorção são apresentados em  $\text{mm}/\text{hora}^{0.5}$ .

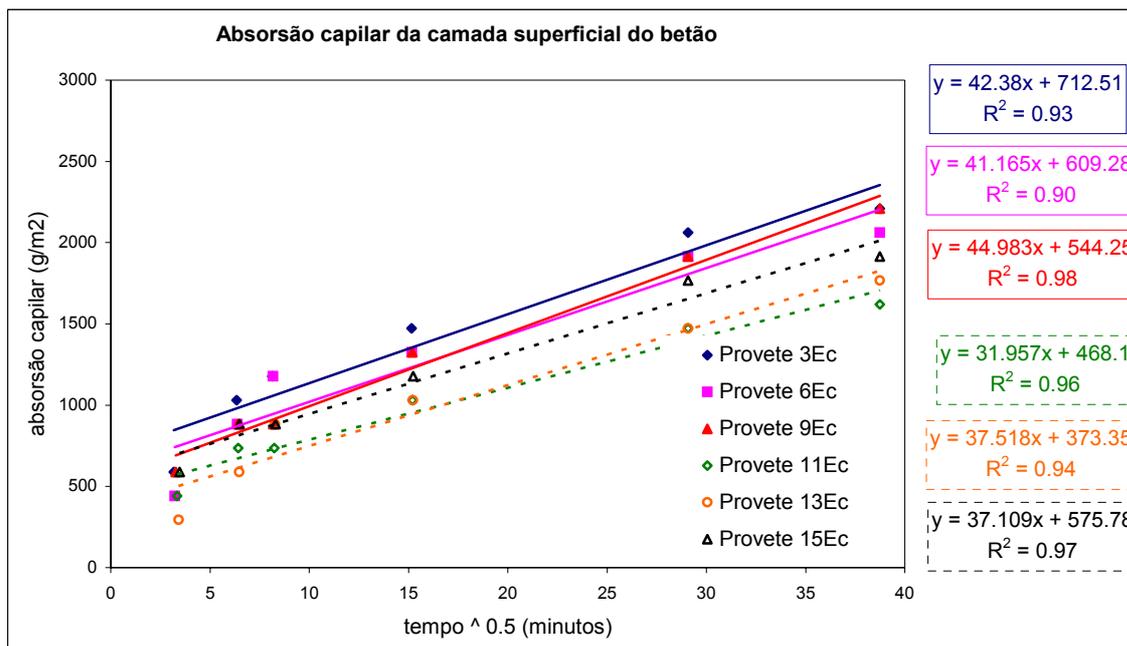


Figura 6.18 – Rectas de ajuste aos pares de resultados obtidos para cada provete

Atendendo que, quanto menor o valor do coeficiente de absorção, melhor a qualidade do betão superficial, pela análise do Quadro 6.3, pode concluir-se que existe uma ligeira melhoria do betão da parte horizontal do fundo relativamente ao da coluna da esquerda. Parece poder concluir-se que quanto mais o betão se deslocou ao longo do molde melhor são as suas propriedades em termos da absorção capilar.

Quadro 6.3 – Valores da absorção capilar e coeficiente de absorção de cada provete

Provetes	coordenadas (m)		Absorção capilar por unidade de área da superfície de teste (g/m <sup>2</sup> )						Coeficiente de absorção (mm/h <sup>0.5</sup> )	
	x	y	10 minutos	40 minutos	1 hora	4 horas	14 horas	25 horas		
Coluna Esquerda	3Ec	0.10	1.04	588.8	1030.5	1177.7	1472.1	2061.0	2208.2	0.328
	6Ec	0.10	0.68	441.6	883.3	1177.7	1324.9	1913.8	2061.0	0.319
	9Ec	0.10	0.32	588.8	883.3	883.3	1324.9	1913.8	2208.2	0.348
Parte Horizontal	11Ec	0.27	0.10	441.6	736.1	736.1	1030.5	1472.1	1619.3	0.248
	13Ec	0.57	0.10	294.4	588.8	883.3	1030.5	1472.1	1766.5	0.291
	15Ec	0.87	0.10	588.8	883.3	883.3	1177.7	1766.5	1913.8	0.287

Com o objectivo de avaliar a possível influência da falta de precisão da balança utilizada, em consequência do tamanho dos provetes, foram extraídos mais quatro provetes com a designação de AC e um diâmetro de 74 mm, aos 50 dias de idade. Estes novos provetes foram cortados a meio tendo sido utilizada apenas uma metade para o ensaio de absorção capilar. Refere-se que, a área de ensaio destes provetes foi de 4301 mm<sup>2</sup> enquanto que a área de ensaio mínima recomendada na recomendação da RILEM é de 17500 mm<sup>2</sup>.

Adoptando o procedimento de ensaio descrito anteriormente determinaram-se os valores da absorção capilar para cada intervalo de tempo especificado e procurou-se a recta de ajuste aos pares de resultados, para cada provete, apresentada na Figura 6.19. Os resultados do coeficiente de absorção que são um indicador da taxa de absorção capilar de água da superfície de betão, são também apresentados no Quadro 6.4.

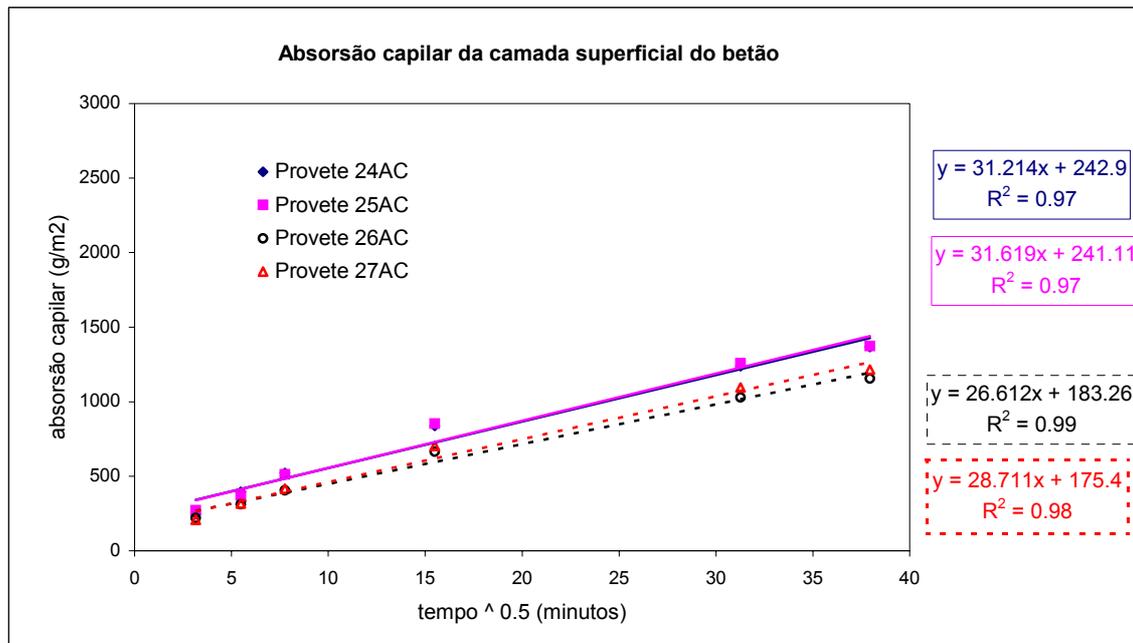


Figura 6.19 - Rectas de ajuste aos pares de resultados obtidos para cada provete

Quadro 6.4 - Valores da absorção capilar e coeficiente de absorção de cada provete

Provetes		coordenadas (m)		Absorção capilar por unidade de área da superfície de teste (g/m <sup>2</sup> )						Coeficiente de absorção (mm/h <sup>0.5</sup> )
		x	y	10 minutos	30 minutos	1 hora	4 horas	16 horas	24 horas	
Coluna Esquerda	24AC	0.05	0.24	248.8	395.3	523.2	839.4	1239.3	1367.2	0.241
	25AC	0.15	0.24	272.0	372.0	513.9	853.3	1257.9	1374.2	0.245
Coluna Direita	26AC	0.95	1.20	220.9	311.6	406.9	665.0	1030.0	1155.6	0.206
	27AC	1.05	1.20	206.9	316.2	416.2	704.5	1095.1	1216.0	0.222

Analisando os resultados anteriores verifica-se que os valores do coeficiente de absorção obtidos para o provetes 24AC e 25AC, localizados junto à parte horizontal na coluna da esquerda, estão muito próximos dos obtidos anteriormente com os provetes Ec, da parte horizontal do molde. Os provetes 26AC e 27AC, localizados na parte superior da coluna da direita, apresentam os valores mais baixos da globalidade dos resultados, o que vem confirmar a hipótese de que as propriedades em termos de absorção por capilaridade melhoram com a distância percorrida pelo betão. Estes resultados estão de acordo com os publicados por Hall, que apresenta 0.728 mm/h<sup>0.5</sup> para o valor do coeficiente de absorção de um betão corrente com um traço cimento:areia:brita de 1:2:4 e uma razão água/cimento de 0.4 [Hall, 1989], ou seja, é de esperar que o betão estudado apresente valores do coeficiente de absorção inferiores a este.

#### 6.2.2.5 Resistência à penetração dos cloretos

Neste ponto, é avaliada a resistência à penetração dos cloretos do betão em estudo, para de uma forma mais completa, caracterizar o seu desempenho em termos de durabilidade. Como se disse atrás, existem três fluidos que podem entrar no betão e são principalmente relevantes para a sua durabilidade: água, pura ou contendo iões agressivos, dióxido de carbono e oxigénio. Estes podem mover-se pelo betão de diferentes formas, mas todo o transporte depende em primeiro lugar da estrutura da pasta de cimento hidratada. A durabilidade do betão depende largamente da facilidade com a qual, ambos líquidos e gases, conseguem entrar e mover-se através do betão, o que frequentemente se designa por permeabilidade do betão. Falando estritamente, a permeabilidade refere-se ao escoamento através de um meio poroso. Neste caso, o movimento dos diversos fluidos através do betão dá-se não apenas por escoamento através do sistema poroso, mas também por difusão e absorção. Apesar disto, o termo “permeabilidade” correntemente aceite irá ser usado para a totalidade dos mecanismos de transporte de fluidos

através do betão, excepto quando, por uma questão de clareza, seja necessário estabelecer a distinção entre os variados tipos de mecanismos [Neville, 1995].

O aspecto mais relevante para a permeabilidade é a natureza do sistema poroso no interior da pasta de cimento endurecida e também da zona junto à interface entre a pasta de cimento e o agregado. A zona de interface ocupa 1/3 a 1/2 do volume total da pasta de cimento endurecida no betão e é conhecido que possui uma microestrutura distinta da restante pasta de cimento endurecida. Esta interface é também o local onde se inicia a microfendilhação. Por estas razões, é de esperar que a zona de interface contribua significativamente para a permeabilidade do betão. Contudo, alguns autores descobriram que apesar da elevada área da zona de interface, a permeabilidade do betão é controlada pela pasta de cimento endurecida restante, que é a única fase contínua no betão. De facto, qualquer movimento de fluidos num betão tem que seguir um caminho mais longo e tortuoso devido à presença dos agregados, e estes reduzem também a área efectiva de escoamento. Assim, a importância da zona de interface no que respeita a permeabilidade mantém-se incerta. Duma maneira geral, pode admitir-se que a relação entre permeabilidade e a estrutura porosa da pasta de cimento endurecida é, quando muito, qualitativa [Neville, 1995].

Os poros relevantes para a permeabilidade são aqueles com um diâmetro de pelo menos 120 ou 160nm. Estes poros têm de ser contínuos. Nos poros que são ineficazes para o escoamento, isto é, à permeabilidade, estão incluídos os poros descontínuos, aqueles que contêm água adsorvida e aqueles que apresentam uma entrada estreita, mesmo que os poros por si sejam largos. O agregado também contém poros, mas estes geralmente são descontínuos. Além disso, as partículas do agregado estão envolvidas por pasta de cimento, de tal forma que, os poros do agregado não contribuem para a permeabilidade do betão. O mesmo se aplica para as bolhas de ar discretas, tais como as bolhas devido a um introdutor de ar. Adicionalmente, o betão como um todo contém vazios originados por compactação insuficiente ou por água de exsudação aprisionada. Estes vazios podem ocupar uma fracção entre 1% a 10% do volume de betão, a última das quais representando um betão com muitos ninhos de brita e de resistência muito baixa [Neville, 1995].

- *Determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos*

A resistência à penetração dos cloretos pode ser avaliada com o ensaio “Determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos”, regulamentado pela ASTM C 1202-94 e AASHTO T277-83, tratando-se do ensaio mais correntemente aceite na América do Norte. Em resumo, este ensaio consiste em determinar a quantidade de corrente eléctrica que passa através de um provete de betão com, aproximadamente, 102mm de diâmetro e 51mm de espessura,

quando é aplicada uma diferença de potencial de 60V durante um período de 6 horas. 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].

Os provetes de betão foram preparados previamente segundo um procedimento especificado para garantir a sua completa saturação com água e depois foram ensaiados. Esta preparação consistiu em 1 hora de secagem ao ar, 3 horas no vácuo (pressão < 1mm Hg) e 1 hora adicional de vácuo com os provetes já submersos em água previamente fervida (para retirar o ar) e arrefecida, seguido de mais 18 horas submersos nessa água. A carga total passada, em Coulomb, é utilizada como um indicador da resistência do betão à passagem dos iões de cloreto [Coutinho, 2001].

Para este ensaio foram cortados discos de cerca de 51mm de espessura, das carotes extraídas do modelo U e identificadas com a designação CL, aos 28 dias de idade do betão e todos relativos à mesma face (designada por face A). Os discos correspondentes à outra face (face B) foram utilizados no ensaio que se descreve no ponto seguinte. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 – Resultados da permeabilidade do betão aos iões de cloreto

Provetes	coordenadas (m)		Carga total passada	Resistência à penetração dos cloretos	
	x	y	Coulomb		
Coluna Esquerda	2CL-A	0.10	1.16	3283	<i>moderada</i>
	5CL-A	0.10	0.80	3176	<i>moderada</i>
	8CL-A	0.10	0.44	3506	<i>moderada</i>
<b>Média</b>			3322 ± 168	<i>moderada</i>	
Coluna Direita	18CL-A	1.00	0.44	2942	<i>moderada</i>
	20CL-A	1.00	0.74	2946	<i>moderada</i>
	22CL-A	1.00	0.98	3029	<i>moderada</i>
<b>Média</b>			2972 ± 49	<i>moderada</i>	
<b>Média Total 3147 ± 221</b>					
<b>Resistência Moderada</b>					

Os resultados anteriores mostram que o betão estudado oferece uma resistência moderada à penetração dos cloretos considerando a norma ASTM C 1202-94. De referir que a classe de resistência “moderada” corresponde ao intervalo de [2000,4000] Coulomb que é um valor típico de betões correntes com uma razão água/cimento de 0.4 a 0.5. Parece que o betão perto do ponto de descarga (provetes 2CL-A, 5CL-A e 8CL-A) é menos resistente à penetração dos cloretos do que o betão que percorreu uma distância maior (18CL-A, 20CL-A e 22CL-A). Isto pode ser verificado comparando os valores respeitantes à colunas esquerda e direita, no Quadro 6.5.

- *Método rápido CTH*

O ensaio descrito anteriormente (ASTM 1202-94) é um ensaio simples e rápido para a avaliação da permeabilidade aos cloretos, mas tem sido alvo de algumas críticas. Entretanto, outros ensaios têm sido propostos tal como o Método Rápido CTH desenvolvido por *Luping* [Coutinho, 2001]. Este, consiste num método de migração não estacionário baseado numa relação teórica entre os fenómenos de difusão e migração. Após um ensaio de migração acelerado, calcula-se o Coeficiente de Difusão Aparente ( $D_{ns}$ ), em que é medida a profundidade de penetração de cloretos ( $x_d$ ) por titulação com uma solução de nitrato de prata sobre as superfícies de fractura dos provetes abertos por compressão linear. Para tal utilizaram-se as equações (6.2.1) e (6.2.2).

$$D_{ns} = \frac{RTL}{IFU} \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \quad (6.2.1)$$

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{IFU}} \times \varepsilon \quad \varepsilon = \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2C_d}{C_o}\right) \quad (6.2.2)$$

onde,

$D_{ns}$  – Coeficiente de Difusão Aparente obtido num ensaio de migração estacionário ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).

R – Constante dos gases,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

T – Temperatura absoluta (K)

L – Espessura do provete (cm)

I – Valência iónica

F – Constante de Faraday,  $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V}\cdot\text{mol})$

U – Diferença de potencial efectivamente aplicada (V)

$X_d$  – Profundidade de penetração medida pelo método colorimétrico (cm)

T – Duração do ensaio (s)

$\alpha$  - Constante de laboratório

$\varepsilon = 0.0764$  se a concentração na solução externa de cloretos for de 0,5 M

$C_d$  – Concentração de cloretos livres para a qual a cor se altera quando se utiliza o método colorimétrico para medir a profundidade de penetração de cloretos ( $\text{kg}_{\text{Cl}}/\text{m}^3_{\text{solução}}$ )

$C_o$  – Concentração de cloretos livres da solução externa de cloretos

Este método foi aplicado utilizando provetes com a mesma localização dos provetes utilizados no ensaio anterior, identificados com CL, mas sobre a face B (oposta da face A). Os provetes foram previamente preparados com o mesmo procedimento descrito para o ensaio AASHTO, e depois dessa preparação foram submetidos a uma diferença de potencial de 30V, durante 24 horas.

Depois de desligar o campo eléctrico, os provetes foram divididos em duas partes e a penetração dos cloretos foi medida utilizando o método colorimétrico. Este método consiste em pulverizar as duas partes obtidas de cada provete com uma solução de nitrato de prata, colocá-las num lugar escuro durante uma hora e depois expô-las a uma luz fluorescente durante algumas horas, ao fim das quais, é determinada a média da profundidade da zona branca na parte central de cada provete, com uma precisão de 0.5mm. Os resultados obtidos para os provetes ensaiados encontram-se resumidos no Quadro 6.6, com excepção dos resultados dos provetes 18CL-B e 20CL-B onde ocorreu um erro na montagem do equipamento.

Quadro 6.6 – Valores obtidos para o coeficiente de difusão aparente

Provetes		coordenadas (m)		$D_{ns}$
		x	y	$\text{cm}^2/\text{s}$
Coluna Esquerda	2CL-B	0.10	1.16	$14 \times 10^{-8}$
	5CL-B	0.10	0.80	$11 \times 10^{-8}$
	8CL-B	0.10	0.44	$10 \times 10^{-8}$
Coluna Direita	18CL-B	1.00	0.44	--
	20CL-B	1.00	0.74	--
	22CL-B	1.00	0.98	$10 \times 10^{-8}$

Na Figura 6.20 apresentam-se fotos das partes dos provetes testados onde é possível distinguir a profundidade de penetração dos cloretos pela diferença de cores.

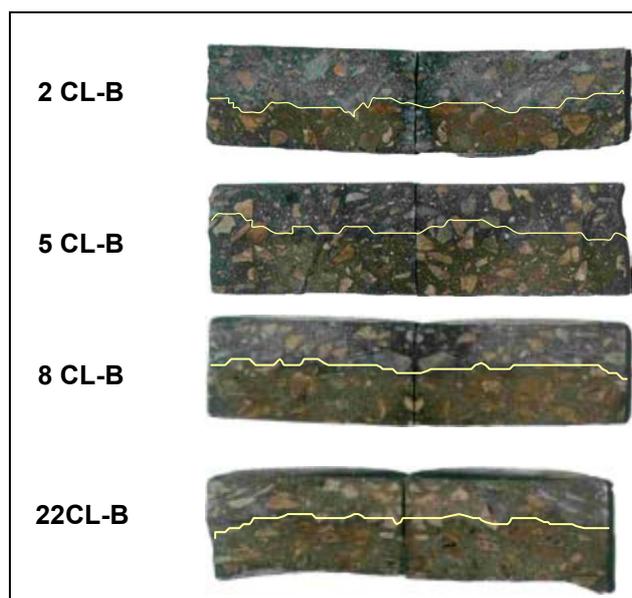


Figura 6.20 – Profundidade de penetração dos cloretos avaliada pelo método colorimétrico, após um ensaio de migração (30V, 24 horas)

### 6.3 Ensaio sobre elemento em U - Agregados 2

Como se referiu atrás, o enchimento do molde em forma de U foi repetido com a composição estudada para o segundo conjunto de materiais da central de Penacova. O objectivo deste novo enchimento foi, além de validar a composição estudada, realizar uma caracterização semelhante à efectuada com a composição Agregados 1 e comparar os resultados obtidos em ambas as experiências. O molde utilizado foi o mesmo da experiência anterior e dispôs-se também armadura em parte do seu interior. Além disto, para avaliar melhor a capacidade deste material de preencher todos os espaços foram coladas placas de acrílico, com uns recortes de diferentes formas geométricas, pelo interior de duas paredes laterais, uma de cada coluna, como se pode observar na Figura 6.21. A análise deste aspecto, correspondente ao acabamento da superfície, poderá ter interesse do ponto de vista arquitectónico.



Figura 6.21 – Aspecto do molde utilizado e pormenor das placas com recortes de formas distintas, coladas no interior das paredes laterais

### 6.3.1 Caracterização do betão no estado fresco

A composição do betão utilizada, apresentada no Quadro 6.7, é a composição final que resultou dos estudos apresentados em 5.5.4, com excepção da razão água/ligante que nesta composição foi ligeiramente mais baixa, 0.823, e da dosagem de superplastificante que foi aumentada para  $Sp/P=1.5\%$ .

Quadro 6.7 - Composição do betão adoptada

ref <sup>a</sup> da composição		Agregados 2
sequência da amassadura		<b>C</b>
data da amassadura		11/07/01
Quantidades na composição (kg/m <sup>3</sup> )	<b>cimento</b>	363
	<b>filer</b>	215
	<b>brita P1</b>	799
	<b>areia P1'</b>	412
	<b>areia P2'</b>	407
	<b>água</b>	164
	<b>superplastificante</b>	8.67
<b>w/c</b>		0.45
<b>w/p</b>		0.28
<b>Sp/P (%)</b>		1.5

A amassadura realizou-se na betoneira de eixo basculante, mas de acordo com a sequência de amassadura C. Inicialmente realizou-se uma amassadura com um volume de 35 litros, para realização dos ensaios habituais, o ajuste da dosagem de superplastificante e o enchimento dos moldes que deram origem aos provetes cúbicos e cilíndricos. Em seguida, realizaram-se duas amassaduras sequencialmente, com um volume de cerca de 70 litros cada e armazenou-se o betão no balde.

Novamente, como se observa na Figura 6.22, o betão foi vazado pela parte superior da coluna da esquerda (sem armadura), através do dispositivo de abertura do balde, deslocou-se ao longo da parte horizontal através da armadura, subindo depois na vertical, na coluna da direita. No final do ensaio a diferença de alturas registada entre a coluna da esquerda e a da direita foi de 130mm. A altura final do betão na coluna da esquerda foi de 1.390m e na coluna da direita de 1.260m, ou seja, a diferença de alturas foi de cerca de 9.4%. Na parte superior da coluna da direita observaram-se bastantes partículas de agregado, apresentando uma distribuição uniforme, ver Figura 6.23, o que revela que não ocorreu segregação durante o movimento do betão.

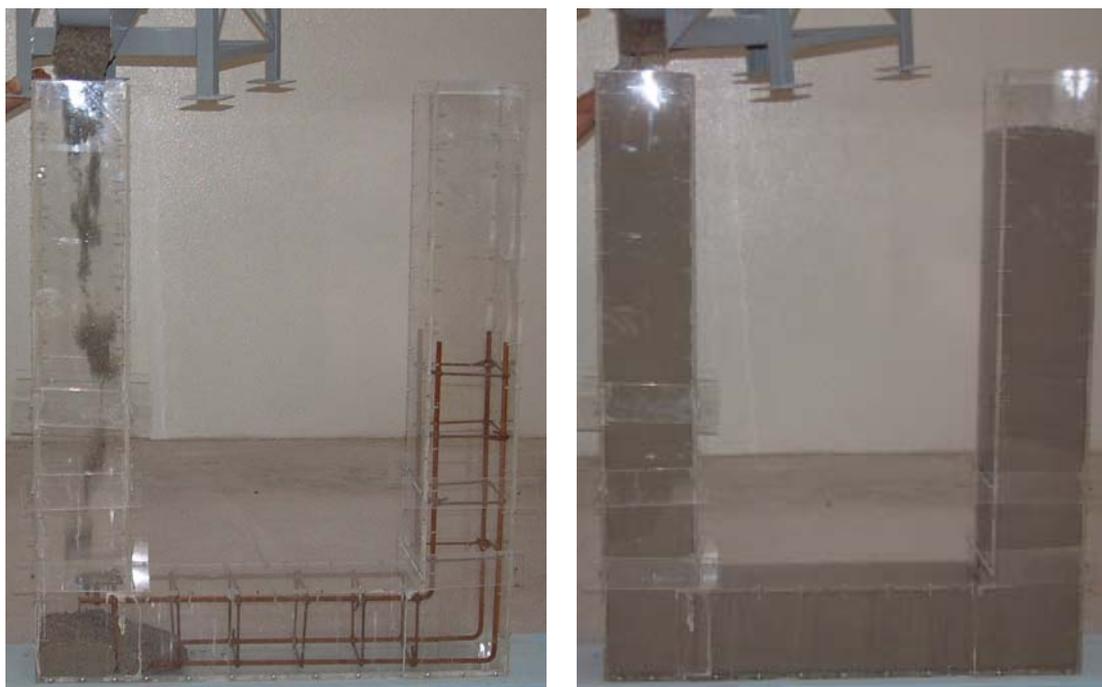


Figura 6.22 – Início e final do enchimento do molde em forma de U



Figura 6.23 – Parte superior do betão na coluna da direita (onde o betão subiu) onde é possível observar bastantes partículas de agregado

As fotografias da Figura 6.24 tiradas após o final do enchimento, junto às placas recortadas, documentam o preenchimento completo dessas zonas que são aqui referidas por se tratarem de zonas especialmente difíceis de preencher.



Figura 6.24 – Pormenor do preenchimento do molde junto às placas com recortes de formas distintas

Como se referiu atrás, com o betão resultante da primeira amassadura ajustou-se a dosagem de superplastificante para um valor do diâmetro de espalhamento de 620mm. A amostra de betão deformada apresentou uma forma circular tendo sido observada uma distribuição uniforme das partículas grossas do agregado, presentes mesmo junto do contorno. Não se verificou a ocorrência de exsudação ou de excesso de pasta junto ao contorno, ver Figura 6.25. No entanto, com uma amostra do betão da primeira amassadura, o tempo de escoamento medido no “Ensaio de fluidez do betão” foi demasiado longo, o que nos levou a concluir que houve um engano na pesagem dos materiais. Deste modo, será de esperar que os provetes cúbicos retirados desta amassadura não sejam representativos do material utilizado no enchimento do molde (da segunda e terceira amassaduras). Em seguida, com uma amostra de betão da segunda amassadura (70 litros) repetiu-se o “Ensaio de fluidez do betão” tendo-se registado um tempo de escoamento satisfatório, de 15.3 segundos. Não foi efectuado o “Ensaio da caixa” pois não se dispunha do obstáculo adequado a um nível de auto-compactabilidade inferior, de acordo com os objectivos para esta composição.

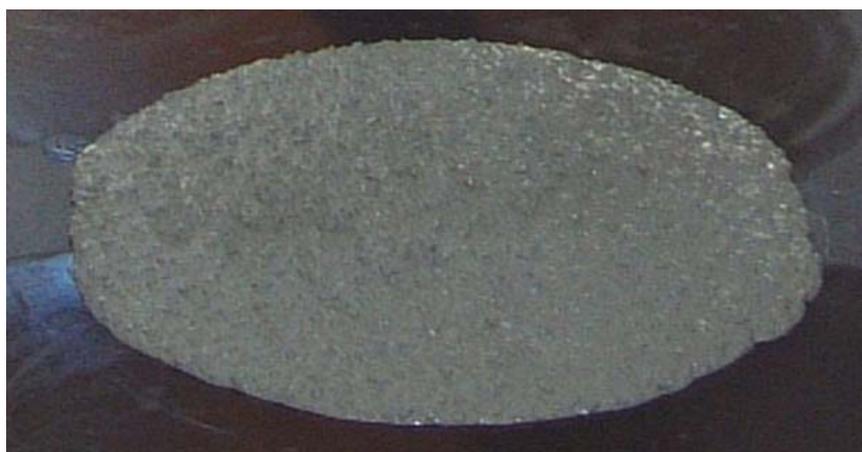


Figura 6.25 – Aspecto da amostra de betão no final do “Ensaio de espalhamento”

### 6.3.2 Caracterização do betão no estado endurecido

Nesta experiência foram retiradas carotes, até aos 23 dias de idade, pelo processo anterior, ao longo de toda a extensão do modelo betonado cuja localização e a respectiva designação apresentam-se na Figura 6.26. As carotes *RC* (com 94 mm de diâmetro) foram sujeitas ao ensaio de rotura à compressão, nas designadas com *CL* (com 100mm de diâmetro) foi avaliada a resistência à penetração dos cloretos e nas com *AC* (com 150mm de diâmetro) realizou-se o ensaio de absorção por capilaridade. Desta vez, por motivos de avaria no equipamento, não foi possível a avaliação do módulo de elasticidade, por esta razão, não foram

retiradas carotes para o efeito. O ensaio de penetração aos cloretos foi levado a cabo nas carotes destinadas para o efeito, no entanto, a total falta de coerência dos resultados obtidos denunciou uma falha na execução do ensaio, pelo que, estes não serão incluídos no presente trabalho.

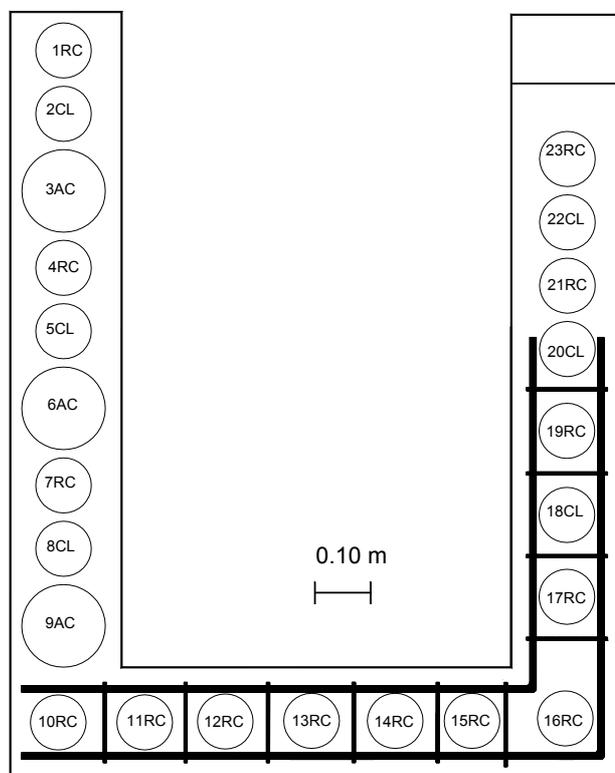


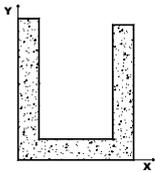
Figura 6.26 – Posição e identificação da carotes extraídas

### 6.3.2.1 Resistência à compressão

Aquando do enchimento do molde em forma de U foram moldados 4 cubos de 150 mm de aresta e cobertos com uma película de plástico. Na ausência da instalação de uma câmara húmida nas novas instalações da FEUP, estes provetes foram colocados no interior de um recipiente com água à temperatura ambiente, no interior do laboratório até à data de ensaio. Mais tarde, dois destes provetes foram testados até à rotura por compressão, aos 7 dias de idade, tendo sido obtidos para valores da resistência à compressão 37 e 40MPa, os respectivos valores da massa volúmica foram 2443 e 2440kg/m<sup>3</sup>. Aos 28 dias de idade, testaram-se os restantes provetes cúbicos por rotura à compressão tendo sido registados para valores da resistência, 47 e 44MPa, cuja massa volúmica foi avaliada em 2435 e 2488kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Além dos provetes cúbicos foram também ensaiadas até à rotura por compressão, aos 28 dias de idade, as carotes extraídas do modelo em forma de U, identificadas com RC. Estas carotes constituem uma amostragem do betão endurecido ao longo de toda a extensão do modelo, ver Figura 6.26.

Quadro 6.8 - Resultados da tensão de rotura avaliada nas carotes



Designação	Coordenadas (m)		Massa volúmica	Tensão de rotura (MPa)	
	x	y	Kg/m <sup>3</sup>	28 dias de idade	
Coluna Esquerda	<b>1RC</b>	0.10	1.28	2335	30.8
	<b>4RC</b>	0.10	0.93	2342	42.0
	<b>7RC</b>	0.10	0.53	2359	30.8
	<b>10RC</b>	0.09	0.10	2394	23.8
Parte Horizontal	<b>11RC</b>	0.24	0.10	2384	29.4
	<b>12RC</b>	0.39	0.10	2386	35.0
	<b>13RC</b>	0.54	0.10	2388	23.8
	<b>14RC</b>	0.69	0.10	2394	26.6
	<b>15RC</b>	0.83	0.10	2384	30.8
Coluna Direita	<b>16RC</b>	1.00	0.10	2409	22.4
	<b>17RC</b>	1.00	0.33	2350	29.4
	<b>19RC</b>	1.00	0.63	2365	25.2
	<b>21RC</b>	1.00	0.89	2351	28.0
	<b>23RC</b>	1.00	1.12	2355	30.8

Analisando a última coluna do quadro anterior, obteve-se para valor médio do conjunto global de resultados, 29MPa, com um desvio padrão de 5.1MPa, sendo os valores médios dos resultados da coluna da esquerda, parte horizontal e coluna da direita de 32, 29 e 27MPa, respectivamente. Ou seja, comprovou-se a falta de representatividade dos provetes cúbicos, moldados com uma amostra do betão da primeira amassadura (35litros). Dos resultados obtidos com as carotes pode verificar-se que existe uma maior uniformidade dos valores ao longo de toda a extensão do modelo e, neste caso, a média da resistência baixou com o aumento da distância percorrida pelo betão, embora este abaixamento não tenha sido significativo. Num escoamento deste tipo, é de esperar alguma perda das propriedades do betão justificável pela ocorrência de alguma segregação, tanto maior quanto mais o betão tiver que se deslocar, no entanto, não houve evidências dessa ocorrência.

6.3.2.2 Absorção por capilaridade

- *Procedimento de ensaio*

O procedimento adoptado foi o apresentado para a composição Agregados1.

- *Resultados obtidos*

Na realização deste ensaio foram utilizadas as carotes identificadas com AC, aos 54 dias de idade do betão, possuindo um diâmetro de sensivelmente 150mm. Estas carotes foram retiradas apenas na coluna da esquerda. Em cada carote cortaram-se dois discos de aproximadamente 5mm de espessura, junto de cada uma das faces moldadas. Deste modo, foi possível cumprir o valor mínimo indicado para a área de teste na recomendação da RILEM identificada atrás e utilizar nas pesagens sucessivas uma balança de maior precisão, 0.1g.

Na Figura 6.27 representam-se os valores da absorção capilar para cada intervalo de tempo especificado e a recta de ajuste a esses pares de resultados, para cada provete. Os resultados do coeficiente de absorção que são um indicador da taxa de absorção capilar de água da superfície de betão, são também apresentados no Quadro 6.9.

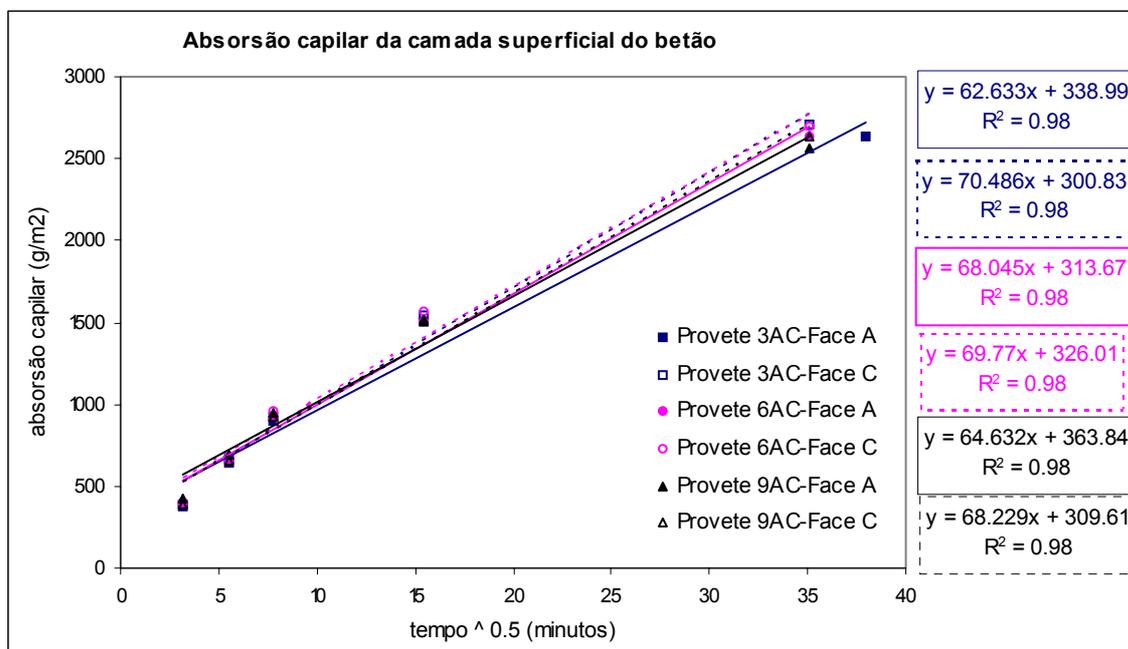


Figura 6.27 - Rectas de ajuste aos pares de resultados obtidos para cada provete

Quadro 6.9 - Valores da absorção capilar e coeficiente de absorção de cada provete

Provetes		coordenadas (m)		Absorção capilar por unidade de área da superfície de teste (g/m <sup>2</sup> )					Coeficiente de absorção (mm/h <sup>0.5</sup> )
		x	y	10 minutos	30 minutos	1 hora	4 horas	24 horas	
Coluna Esquerda	3AC-face A	0.10	1.07	380.2	637.7	902.7	1510.6	2637.0	0.485
	3AC-face B			2029.0	2033.9	2038.4	2049.2	2069.4	0.546
	6AC-face A	0.10	0.67	2058.0	2062.6	2067.2	2077.4	2097.1	0.527
	6AC-face B			404.3	676.7	953.7	1564.5	2701.8	0.540
	9AC-face A	0.10	0.28	430.7	692.2	948.6	1510.6	2564.1	0.501
	9AC-face B			383.7	653.2	923.9	1523.2	2631.8	0.528

No âmbito do projecto europeu Brite-Euram foram apresentados resultados de ensaios de absorção por capilaridade, realizados de acordo com a referida recomendação da RILEM, para diferentes tipos de betão auto-compactável e também betões convencionais de referência [Sonebi et al., 2000]. Foram testadas as faces laterais de cubos moldados com 150 mm de aresta, e não a parte do fundo do molde, tal como recomendado na referida recomendação. Os provetes foram curados em água durante 6 meses e depois colocados numa estufa a 50-55°C durante 4 semanas como pré-acondicionamento. Depois de arrefecidos, os provetes foram preparados e testados de acordo com os procedimentos de ensaio descritos na recomendação da RILEM. A ascensão de água por absorção capilar foi medida por pesagem dos provetes em intervalos de tempo de 10 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas e 24 horas de contacto com a água. Os resultados dos ensaios para os diferentes tipos de SCC (SCCC, destinado a aplicações como obras de arte associadas a elevadas resistências; SCCH, destinado a aplicações mais correntes e resistência mais baixa; FSCC, com fibras de aço) e as composições de referência (RC, destinado a aplicações como obras de arte associadas a elevadas resistências; RH, destinado a aplicações mais correntes e resistência mais baixa), calculados como a absorção de água por unidade de área da superfície de ensaio (g/m<sup>2</sup>), para os respectivos períodos de sucção de água, t (minutos), são resumidos no Quadro 6.10.

Estes resultados indicam claramente que a absorção por capilaridade foi consideravelmente mais elevada nos betões de referência do que nos betões auto-compactáveis de resistência á compressão ou razões água/cimento semelhantes. Comparando todas as composições de betão, o coeficiente de absorção de água, indicado pelo valor de coeficiente de absorção respeitou a seguinte ordem RH>RC>SCCH>FSCC>SCCC. Estes resultados sugerem que o betão da camada superficial é mais denso e mais resistente à entrada de fluidos, nas composições de SCC do que nas correspondentes composições de referência. As razões apontadas para explicar estas diferenças foram a relativamente baixa razão água/ligante de todas

as composições SCC, assim como ao efeito de enchimento do filer calcário nas composições de SCCH e FSCC e o aumento dos produtos de hidratação do cimento devido à inclusão de escórias granuladas de alto forno (GGBS) na composição de SCCC. Outros factores, tais como a melhor dispersão do cimento e das partículas dos finos e melhor retenção de água nas composições de SCC fresco podem também ter contribuído para uma absorção superficial mais baixa [Sonebi et al., 2000].

Quadro 6.10 – Resultados da absorção capilar de água, “Brite Euram Project”

Provetes	w/c	w/p	f <sub>c,28 dias</sub> (*) (MPa)	Absorção capilar por unidade de área da superfície de teste (g/m <sup>2</sup> )					Coeficiente de absorção (mm/h <sup>0.5</sup> )
				10 minutos	30 minutos	1 hora	4 horas	24 horas	
RC	0.43	0.43	61.5	576.5	867.1	1194.5	2292.2	4584.3	0.793
RH	0.68	0.68	37.0	752.8	1192.6	1614.4	2956.6	6616.2	1.180
SCCC	0.58	0.36	79.5	412.7	571.4	734.7	1229.0	2789.0	0.485
SCCH	0.68	0.36	47.0	391.1	613.3	795.6	1413.3	3173.3	0.561
FSCC	0.56	0.29	63.0	217.7	349.2	471.6	1002.2	2602.9	0.493

(\*) valor médio da resistência à compressão, avaliado em provetes cúbicos normalizados, aos 28 dias de idade do betão

Comparando estes resultados com os obtidos na composição estudada (com w/c=0.45 e w/p=0.28), verifica-se que os resultados são da mesma ordem de grandeza, apesar das diferenças do processo de cura dos provetes e da idade do betão na altura de ensaio.

### 6.3.2.3 Acabamento da superfície

A qualidade da superfície final é um aspecto importante a considerar tanto na construção corrente para habitação como nas obras-de-arte. Tem-se verificado alguma dificuldade em controlar a formação de “bolhas de ar” à superfície do betão em contacto com a cofragem. Esta questão prende-se não só com um problema de estética mas também com um problema de durabilidade, em especial, quando se formam poucas bolhas mas profundas. De facto, a dificuldade reside em conseguir um betão com viscosidade suficientemente elevada para impedir a segregação e, ao mesmo tempo, suficientemente baixa para evitar a formação de poros à superfície. Por conseguinte, cai-se num problema de optimização da composição dependente também das condições de colocação, tais como, o processo, o tipo de superfície da cofragem, a natureza do produto descofrante, as dimensões da cofragem, etc. [Bernabeu,2000].

Como se pode observar na Figura 6.28 o SCC preencheu completamente o interior do molde mesmo os espaços existentes nas zonas onde foram coladas as placas com recortes, moldando-se perfeitamente às formas impostas. Quanto à qualidade da superfície, em geral, há a registar o aparecimento de alguns poros superficiais, mesmo nas faces laterais do molde, devido às bolhas de ar que tentaram escapar do interior do betão, enquanto fresco. Para isto terá contribuído o material utilizado no molde, o tipo de betoneira utilizada e a própria forma de descarga do betão.

Estudos efectuados sobre a influência do material da cofragem na qualidade final da superfície do betão indicam melhores resultados para as cofragens de madeira (devido ao efeito de absorção), quando comparadas com cofragens de aço ou contraplacado [Bernabeu,2000], pelo que neste aspecto o material utilizado (acrílico) foi desfavorável. O tipo de betoneira utilizada, de eixo basculante, e a forma de descarga do betão, largado pela parte superior da coluna, ver Figura 6.22, podem também ter contribuído para um aumento do teor de ar do betão fresco. Recomenda-se que a boca de saída do tubo de descarga se mantenha abaixo do nível do betão fresco já existente [Bernabeu,2000].



Figura 6.28 – Aspecto final da superfície do betão, na zona das placas com recortes

## 6.4 Experiência-piloto

A finalizar este trabalho, descrevem-se alguns dos aspectos mais interessantes de uma pequena aplicação realizada numa obra, em Penacova. Assim, depois de comprovado o desempenho da composição, em laboratório, esta experiência provou ser possível reproduzi-lo à escala industrial, sob as condições reais de uma obra.

A referida aplicação consistiu na betonagem de um troço de uma pequena parede com a composição de SCC anteriormente designada de Agregados 2. Esta parede não possui qualquer função estrutural e foi por esta razão escolhida para o efeito. As amassaduras realizaram-se na central montada no local, com o equipamento e o procedimento de controle efectuado para o betão tradicional. A primeira dificuldade surgiu com a necessidade de utilização de um material adicional, o fíler calcário, e a falta de um silo para o armazenar e um doseador. A forma encontrada para ultrapassar esta dificuldade foi a introdução directa do fíler na misturadora da central, tal como se pode observar na Figura 6.29.



Figura 6.29 – Central de betão de Penacova

Foram realizadas pequenas amassaduras de  $0.75\text{m}^3$  de volume. No final de cada amassadura, o betão foi descarregado para uma auto-betoneira onde se manteve durante algum tempo, mantendo o tambor da auto-betoneira em movimento lento, para se avaliar o comportamento do betão fresco ao longo do tempo, em especial a perda de trabalhabilidade. Assim, uma amostra da primeira amassadura retirada da auto-betoneira pouco tempo após o final da amassadura apresentou-se demasiado fluida, ver Figura 6.30. Decorrido algum tempo, verificou-se que o betão havia perdido parte da fluidez registando-se mesmo um diâmetro de espalhamento insuficiente. No entanto, com a adição de algum superplastificante, na própria auto-betoneira, observou-se que o betão recuperou a trabalhabilidade, ver Figura 6.31, apresentando um valor do diâmetro de espalhamento de 618mm e um tempo de escoamento no “Ensaio de

fluidez do betão” de 10 segundos. Como seria de esperar, no “Ensaio da caixa” com o obstáculo mais exigente obteve-se uma altura de enchimento insuficiente de 214mm. Esta amostra de betão serviu também para encher um conjunto de moldes que deram origem a provetes cúbicos e cilíndricos, para ensaiar posteriormente.



Figura 6.30 – Aspecto do betão na descarga da auto-betoneira



Figura 6.31 – Ganho de trabalhabilidade com a adição de superplastificante, na própria betoneira

Observou-se que as amostras com um valor do diâmetro de espalhamento insuficiente aparentam um conteúdo excessivo de agregado grosso, ver Figura 6.32. Avaliou-se uma perda de trabalhabilidade de, aproximadamente, 30 minutos após o final da amassadura, sob condições atmosféricas de um dia de Verão, sendo esta recuperável com a adição de mais algum superplastificante na auto-betoneira imediatamente antes da aplicação.



Figura 6.32 – Aspecto de uma amostra de SCC com um diâmetro de espalhamento insuficiente

No local da aplicação o betão foi descarregado da auto-betoneira para um balde de grandes dimensões, dispondo de uma manga na saída, e depois foi simplesmente descarregado para o interior da cofragem. Com a segunda descarga, efectuada numa das extremidades do muro, foi possível observar o betão a deslocar-se até à outra extremidade enquanto mantinha um aspecto uniforme.

Na Figura 6.33 **a)** é possível observar a cofragem do muro betonado, onde numa zona mais frágil se verificou mesmo uma pequena fuga de material, ver Figura 6.33 **b)**, o que serviu para chamar à atenção dos cuidados a ter com a cofragem. É necessário verificar a sua segurança e a própria estanqueidade, não esquecendo que em muitos aspectos o SCC comporta-se como um fluido.



Figura 6.33 – Aspecto da cofragem no muro betonado e a falta de estanqueidade da mesma permitindo a fuga de alguma material

Os provetes cúbicos foram ensaiados no laboratório da *ENGIL*, aos 28 dias, tendo sido obtido um valor médio da resistência à compressão de 42MPa e um valor médio da massa volúmica de 2410Kg/m<sup>3</sup>. Ou seja, também em termos da resistência do betão endurecido conseguiram-se reproduzir as propriedades exibidas em laboratório.



# Capítulo 7

## Conclusões e desenvolvimentos futuros

---

### 7.1 Conclusões

Após a exposição detalhada do trabalho realizado que consta dos capítulos anteriores, nomeadamente, dos resultados experimentais da fase de estudo das composições, por aplicação do método de *Okamura et al.*, e posteriormente da fase de validação, apresentam-se neste ponto as principais conclusões dele extraídas.

A principal inovação do SCC reside não no material em si, obtido praticamente com os mesmos materiais utilizados num betão convencional, mas na facilidade de colocação por eliminação da necessidade de vibração.

Face à impossibilidade de utilizar os métodos tradicionais de estudo da composição para a definição da composição de um SCC verificou-se a aplicabilidade do método proposto por *Okamura et al.*, utilizando materiais disponíveis no mercado português. No entanto, para assegurar a viabilidade económica das composições que resultam da aplicação deste método é necessário ajustar os valores dos parâmetros da proposta geral de *Okamura et al.*

Os ensaios nos quais o método se baseia exigiram equipamentos simples e de fácil execução. Estes ensaios serviram para avaliar as propriedades do betão fresco, sob os seus diferentes aspectos, no entanto, visto tratar-se de mais que um ensaio a sua execução em obra revelou-se pouco prática.

Nas composições estudadas, a substituição de parte do cimento por fíler calcário facilitou a obtenção de uma auto-compactabilidade adequada e permitiu que a dosagem de cimento se aproximasse dos valores utilizados num betão convencional. Os agregados finos naturais (mais rolados) revelaram-se bastante mais favoráveis para a obtenção de uma auto-compactabilidade adequada, quando comparados com o agregado fino artificial utilizado (de origem granítica) cujas partículas mais finas alteram bastante o comportamento do betão fresco. Deste modo, num SCC, a escolha criteriosa dos agregados assume também uma importância especial.

Existindo controle sobre as características dos materiais constituintes verificou-se que é possível reproduzir as propriedades do SCC exibidas em laboratório, sem alterar significativamente os procedimentos habituais de uma central de fabrico do betão convencional. O principal problema identificado foi a necessidade de armazenar e dosear o material fino adicional.

Esta experiência contribuiu, fundamentalmente, para encorajar o envolvimento de diferentes entidades em futuros projectos de desenvolvimento desta tecnologia, em Portugal.

## 7.2 Desenvolvimentos futuros

Nos parágrafos seguintes são destacadas algumas das questões mais importantes a abordar em desenvolvimentos futuros do estudo da tecnologia do SCC.

A partir de resultados experimentais e/ou métodos numéricos mais elaborados poder-se-á estabelecer um método teórico simples, baseado em relações que dependem de parâmetros-chave à semelhança dos que existem para o betão convencional, de modo a definir a composição de um SCC de uma forma rápida mas robusta, cujo desempenho é depois comprovado com ensaios adequados.

Poder-se-á também identificar claramente os diversos factores que podem alterar as propriedades do SCC fresco durante a produção numa central (variação nas características dos materiais constituintes, tipos de misturadora, procedimento de amassadura, etc.), o transporte até à obra (a perda de trabalhabilidade com o tempo, o tipo de camião-betoneira, etc.), e finalmente a

colocação (por descarga simples, por bombagem, o ponto de descarga, a distância percorrida no interior da cofragem, as pressões exercidas na cofragem, etc.).

Será também de caracterizar de forma mais completa a evolução das propriedades do SCC endurecido, ao longo do tempo, mais especificamente, no que respeita à resistência, deformabilidade, retração, fluência e durabilidade.

Finalmente, poder-se-á comprovar a maior homogeneidade potencial de um SCC ao longo de uma estrutura, comparativamente com um betão convencional, e avaliar a sua influência em termos de segurança estrutural.



# Referências Bibliográficas

- Bartos, P. J. M. (1998), "An Appraisal of the Orimet Test as a Method for On-site Assessment of Fresh SCC Concrete ", *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 121-135.
- Bartos, P. J. M., Grauers, M. (1999), "Self-compacting concrete", *Concrete April 1999*, pp. 9-13.
- Bartos, P. J. M. (2000), "Final Report of Task 8.5: Environment and Ergonomics", *Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete. Brite Euram project BRPR-CT96-0366*, <http://scc.ce.luth.se>, 15-08-2001 10:30.
- Bartos, P. J. M. (2001), "Testing of Fresh Self-Compacting Concrete", *Self-Compacting Concrete. Demonstration and International Workshop*, Paisley.
- Bernabeu (2000), "Final Report of Task 7: Form system and surface quality", *Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete. Brite Euram project BRPR-CT96-0366*, <http://scc.ce.luth.se>, 15-08-2001 10:30.
- Catálogo de fichas técnicas, SIKA, edição 2000.
- CEB-FIP Model Code (1990), CEB-Comité Euro-Internacional do Betão, nº195, 196-First Draft.
- 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.
- Coutinho, J.S. (2001), "Effect of Controlled Permeability Formwork (CPF) on White Concrete", *ACI Materials Journal/March–April 2001*, pp. 148-158
- David, J. (1999), "Betão Auto-compactável: Um Material Novo Para a Pré-Fabricação", 3<sup>as</sup> *Jornadas de Estruturas de Betão*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, pp. 97-110.
- ENV 206 (1993), "Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade".
- EN 480-1 (1997), "Admixtures for concrete, mortar and grout – Test methods – Part 1: Reference concrete and reference mortar for testing".
- Ferreira, R. M. S., Jalali, S. (2000), "Betão auto-compactável – Efeito de superplastificantes da família dos carboxilatos na fluidez e deformabilidade de pastas ligantes", *Novos Materiais de Construção*, Seminário no âmbito da Construnor 2000, Braga, pp.52-65.
- Gibbs, J. C. (xxxx), "The prospects for self-compacting concrete", xxx, pp. 391-402.

- Hall, C. (1989), “Water sorptivity of mortars and concretes: a review”, *Magazine of Concrete Research*, No 147, pp. 51-61.
- Japan Society of Civil Engineers (1998), “Recommendation for Construction of Self-Compacting Concrete”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 417-437.
- Kashima, S., Kanasawa, R., Okada, R. e Yoshikawa, S. (1998), “Application of Self Compacting Concrete Made with Low-heat Cement for Bridge Substructures of Honshu-shikoku Bridge Authority”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 255-261.
- Khayat, K. H. e Aitcin, P. (1998), “Use of Self-Compacting Concrete in Canada-Present situation and perspectives”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 11-21.
- Khayat, K. H., Hu, C. e Monty, H. (1999), “Stability of Self-Consolidating Concrete, Advantages, and Potential Applications”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 143-152.
- Kitamura, H., Ito, H., Chitamatsu, R., Kamada, F. e Okudate, M. (1998), “Construction of Prestressed Outer Tank for LNG Storage Using High-Strength Self-Compacting Concrete”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 262-291.
- Nawa, T., Izumi, T. e Edamatsu, Y. (1998), “State-of-the-art Report on Materials and Design of Self-Compacting Concrete”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 160-190.
- Neville, A. M.(1995), *Properties of concrete*, Fourth edition, Longman, Edinburgh.
- Noguchi, T. e Mori, H. (1998), “State-of-the-art Report: Evaluation of Fresh Properties of Self-Compacting Concrete in Laboratory and on Site”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 97-110.
- NP ISO 4111, “Betão Fresco - Determinação da Consistência – Índice de Compactabilidade”.
- Nunes, S., Coutinho, J. S., Sampaio, J. e Figueiras, J. (2000), “Betão Auto-Compactável (BAC): uma composição.”, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2000*, pp. 75-84.
- Nunes, S., Coutinho, J. S., Sampaio, J. e Figueiras, J. (2001a), “Laboratory Tests on SCC with Portuguese Materials”, *The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Japan.
- Nunes, S., Coutinho, J. S., Sampaio, J. e Figueiras, J. (2001b), “Investigação preliminar em SCC”, *Relatório Técnico*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Okamura, H. e Ozawa, K. (1995), “Mix design for self-compacting concrete”, *Concrete Library of JSCE*, nº 25, pp. 107-120.
- Okamura, H. (1997), “Ferguson Lecture for 1996: Self-compacting high-performance concrete”, *Concrete International, ACI*, Vol. 19, nº 7, pp. 50-54.

- Okamura, H. e Ouchi, M. (1999), "Self-Compacting Concrete. Development, Present Use and Future", *First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete*, Sweden, pp. 3-14.
- Okamura, H., Ozawa, K. e Ouchi, M. (2000), "Self-compacting concrete", *Structural Concrete, Journal of fib*, vol1, nº 1, pp. 3-17.
- Petersson, Ö e Billberg, P. (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.
- Prontuário de produtos *Bettor-MBT*, edição 2000.
- RILEM TC116-PCD (1999), "Permeability of concrete as a criterion of its durability: Determination of the absorption of water of hardened concrete".
- Roncero, J., Gettu, R. e Vilarasau, I. C. (2000), "Effect of superplasticizer on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes", Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelons.
- Sampaio, J. (2000), "Uma Nova Tecnologia de Betões com Aplicação na Pré-Fabricação", *1º Congresso Nacional da Indústria de Pré-Fabricação em Betão*, vol. II.
- Sedran, T. e Larrard, F. (1999), "Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model", *First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete*, Sweden, pp. 321-331.
- Skarendahl, Å. (1998), "Self-compacting Concrete in Sweden. Research and Application", *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 60-71.
- Skarendahl, Å. (2001), "In situ applications of SCC – the Swedish experience", *Self-Compacting Concrete. Demonstration and International Workshop*, Advanced Concrete and Masonry Centre, Paisley.
- Skarendahl, Å. e Petersson, O. (2001), "Self-Compacting Concrete", *State-of-Art report of RILEM Committee 174-SCC*, Report 23, RILEM Publications.
- Sonebi, M., Bartos, P. J. M., Zhu, W., Gibbs, J., Tamimi, A. (2000), "Final Report of Task4: Properties of Hardened Concrete", *Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete. Brite Euram project BRPR-CT96-0366*, <http://scc.ce.luth.se>, 15-08-2001 10:30.
- Takada, K., Pelova, G. I. e Walraven, J.C. (1998a), "Self-Compacting Concrete Produced by Japanese Method with Dutch Materials", *12<sup>th</sup> European Ready Mixed Concrete Congress*, Lisboa, pp. 775-785.
- Takada, K., Pelova, G. I. e Walraven, J.C. (1998b), "Influence of Mixing Efficiency on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete", *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 368-383.

- Tangtermsirikul (1998), “Design and Construction of Self-Compacting Concrete in Thailand”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 72-86.
- Uno, Y. (1998), “State-of-the-Art-Report on the Concrete Products Made of Self-Compacting Concrete”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, [www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/), 05-12-2000 15:30, pp. 384-399.
- 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.