



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Contribuição para a formulação do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço**

**Margarida Maria Monteiro Ramos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira

**Covilhã, Outubro de 2010**



À minha família,

Ao Carlos,

Ao meu príncipe, por tantas vezes faltar às tuas brincadeiras, por tanta falta de atenção, e mesmo assim dizias: “gosto muito de ti mamã”, desculpa filho.



## Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luiz António Pereira de Oliveira, Professor Associado na Universidade da Beira Interior e meu orientador neste trabalho, por toda a compreensão e carinho nas horas mais difíceis, por todo o apoio, disponibilidade, preocupação, amizade e sobretudo pela persistência ao longo do tempo. Pela capacidade de diálogo e saber científico, o meu mais profundo obrigado.

Ao Professor Doutor Castro Gomes, pelo estímulo e pela incitação ao término desta dissertação, expresso a minha gratidão.

Ao Nuno Santos e Albino Alves, técnicos de laboratório e meus companheiros nesta tarefa, pela disponibilidade sempre mostrada e pela vontade em ajudar na realização dos ensaios de laboratório realizados no Laboratório de Materiais da Universidade da Beira Interior, os meus sinceros agradecimentos.

Ao Eng. Fernando Caldeira (Director do DEM), pela compreensão pelas minhas ausências.

À Câmara Municipal da Guarda por ter possibilitado a realização desta dissertação.

A todos os meus colegas e amigos que me apoiaram e ajudaram, o meu obrigado.



## Resumo

É do conhecimento de muitos investigadores, que nos últimos tempos se tem intensificado a procura de uma formulação para confecção do betão auto-compactável, que permita gerar consenso e uma potencial utilização massiva do mesmo. De facto, a falta de consenso resulta da diversificação da informação relativa aos parâmetros que permitem a formulação do BAC.

Nesse sentido, surge a dissertação aqui apresentada, que pretende referir os resultados de um estudo experimental, elaborado para o desenvolvimento de um parâmetro que possa contribuir para a formulação de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA), para que possa ser utilizado no preenchimento de vazios de elementos estruturais. O método proposto é simples, e baseia-se na determinação da granulometria óptima dos materiais finos através da observação do teor de argamassa no betão fresco.

Para este estudo foram utilizadas fibras de aço com diâmetros e espessura diferenciadas, 30/0.50 e 60/0.80, que foram adicionadas ao betão em volumes de 0,5%, 1,0% e 1,5%, por forma a obter misturas óptimas de betão auto-compactável reforçado com fibras. As propriedades das misturas no estado fresco foram verificadas através dos ensaios de espalhamento, de capacidade de passagem na caixa L e de viscosidade no funil V. As propriedades no estado endurecido foram apreciadas pelos ensaios de absorção de água por capilaridade, de resistência à compressão, de resistência equivalente à tracção na flexão, de módulo de elasticidade, bem como da verificação da uniformidade da distribuição das fibras. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade do uso de uma metodologia simples para a obtenção de misturas de betão com fibras, cujas propriedades reológicas se caracterizam como auto-compactáveis. A presença de fibras de aço no betão auto-compactável, pode ser pensada como um aumento da fracção de agregados grossos, sendo portanto necessário, um aumento da fracção fina para volumes de fibras crescentes.

## Palavras-chave:

Betão auto-compactável; Método de dosagem; Fibras de aço; Propriedades Reológicas; Resistência Mecânica



## Abstract

It is known by many researchers, that has recently been intensified the search for a formula for making of self-compacting concrete in order to bring about consensus and a potential massive use of it. In fact, the lack of consensus results from the diversification of the information concerning parameters for its formulation.

It is in accordance to this, that emerges the presented thesis, intending to refer to the results of an experimental study designed to develop a parameter that can contribute to the formulation of self-compacting concrete reinforced with steel fibers, so it can be used to fill the void of structural elements. The proposed method is simple, and is based on determining the optimal size of fine materials by observing the content of the fresh concrete mortar.

For this study were used steel fibers with differentiated diameters and thickness, 30/0.50 and 60/0.80, that were added to concrete in volumes of 0.5%, 1.0% and 1.5% in order to obtain an optimal mixture of self-compacting concrete reinforced with fibers. The properties of fresh mixtures were verified through tests of slump-flow, the ability to pass in the box L and viscosity in the funnel V. The properties in the hardened state were assessed by tests of water absorption by capillarity, compressive strength, equivalent tensile strength in bending, modulus of elasticity and verification of the uniformity of distribution of fibers.

The results confirm the viability of using a simple methodology in order to obtain mixtures of fiber concrete, which rheological properties are characterized as self-compactable.

The presence of steel fibers in self-compacting concrete, can be thought of as an increased fraction of coarse aggregates and, therefore, require an expansion in the fine fraction to increased volumes of fibers.

## Keywords:

Self-compacting concrete; Mix design; Steel fibers; Rheological properties; Mechanical Strength



# Índice

## **CAPÍTULO I - Introdução**

1.1- Considerações Gerais-----	1
1.2 - Relevância do Tema-----	4
1.3 - Objectivo da Dissertação-----	4
1.4 - Estrutura da Dissertação-----	5

## **CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica**

2.1 - Introdução-----	6
2.2 - O Betão Auto-Compactável-----	6
2.3 - Propriedades do Betão Auto-Compactável no Estado Fresco-----	12
2.3.1 - Considerações Gerais-----	12
2.3.2 - Comportamento Reológico-----	13
2.3.3 - Trabalhabilidade-----	15
2.3.4 - Capacidade de Enchimento-----	16
2.3.5 - Resistência à Segregação-----	17
2.3.6 - Capacidade de Passagem-----	18
2.4 - Propriedades do Betão Auto-Compactável no Estado Endurecido-----	20
2.4.1 - Considerações Gerais-----	20
2.4.2 - Resistência à Compressão-----	20
2.4.3 - Resistência à Tracção-----	21
2.4.4 - Módulo de Elasticidade-----	21
2.4.5 - Durabilidade-----	22
2.5 - Betão Reforçado com Fibras de Aço-----	22
2.5.1 - Enquadramento-----	22
2.5.2 - A Interação Fibra-Matriz-----	26
2.5.3 - Propriedades do Betão Reforçado com Fibras no Estado Fresco-----	30
2.5.3.1- Enquadramento-----	30
2.5.3.2 -Trabalhabilidade-----	31
2.5.4 - Propriedades do Betão Reforçado com Fibras no estado Endurecido-----	31
2.5.4.1- Enquadramento-----	31
2.5.4.2 - Resistência à Compressão-----	32
2.5.4.3 - Resistência à Tracção-----	32
2.5.4.4 - Tenacidade à Flexão-----	33
2.5.4.5 - Durabilidade-----	33
2.5.4.6 - Ensaio à Flexão-----	34
2.5.4.6.1 - Ensaio segundo a ASTM C 1018-----	34
2.5.4.6.2 - Ensaio segundo o RILEM-----	36



2.6 - Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço-----	40
2.6.1 - Considerações Gerais-----	40
2.6.2 - Conhecimento Actual Sobre o BACRFA-----	40
2.6.2.1 - Enquadramento-----	40
2.6.2.2 - As Opiniões dos Investigadores-----	41

### **CAPÍTULO III - Programa Experimental**

3.1 - Introdução-----	44
3.2 - Características dos Materiais Utilizados-----	45
3.2.1 - Cimento-----	45
3.2.2 - Cinzas Volantes-----	47
3.2.3 - Superplastificante-----	48
3.2.4 - Agregados Grossos e Agregados Finos-----	48
3.2.5 - Fibras de Aço-----	50
3.3 - Método de Dosagem Aplicado ao BACRFA-----	51
3.3.1 - Considerações Gerais-----	51
3.3.2 - Etapas de Dosagem-----	52
3.4 - Avaliação das propriedades do BACRFA no Estado Fresco-----	56
3.4.1 - Considerações Gerais-----	56
3.4.2 - Ensaio de Espalhamento (Slump-Flow test)-----	56
3.4.3 - Ensaio da Caixa L ( <i>L Box</i> )-----	58
3.4.4 - Ensaio de Funil V-----	61
3.4.5- Moldagem dos Provetes-----	62
3.5- Avaliação das Propriedades do BACRFA no Estado Endurecido-----	63
3.5.1 - Ensaio de Resistência à Compressão-----	63
3.5.2 - Ensaio de Resistência à Flexão-----	65
3.5.3 - Módulo de Elasticidade-----	68
3.5.4 - Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade-----	69
3.6 - Avaliação da Distribuição das Fibras-----	71

### **CAPÍTULO IV - Resultados e Discussões**

4.1 - Misturas Finais-----	72
4.1.1 - Ensaio de BACRFA no estado fresco-----	74
4.1.1.1 - Ensaio de espalhamento (Slump-Flow)-----	74
4.1.1.2 - Capacidade de Passagem (Caixa L)-----	76
4.1.1.3 - Viscosidade pelo Funil V-----	79
4.1.2 - Ensaio de BACRFA no Estado Endurecido-----	81
4.1.2.1 - Absorção de Água por Capilaridade-----	81
4.1.2.2 - Resistência à Compressão-----	86



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

4.1.2.3 - Influência do Coeficiente de Capilaridade na Resistência à Compressão-----	87
4.1.2.4 - Resistência Equivalente à Tracção na Flexão-----	89
4.1.2.5 - Módulo de Elasticidade Secante em Compressão-----	90
4.1.2.6 - Distribuição das Fibras na Secção de Fractura-----	91

## **CAPÍTULO V - Conclusões**

5.1 - Conclusões Finais e Recomendações Futuras-----	96
--	----

<b>Referências Bibliográficas</b> -----	99
---	----

## **ANEXOS**

Anexo A.1 - Tabelas de Misturas Iniciais-----	107
Anexo A.2 - Tabelas de Contagem de Fibras na Secção de Fractura-----	109
Anexo A.3 - Absorção de Água por Capilaridade-----	112



## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Ponte Akashi-Kaikyo (Japão)-----	8
Figura 2.2 - Viga de Coroamento do edifício Alto Parque-----	9
Figura 2.3 - Modelo de Bingham-----	14
Figura 2.4 - Comportamento reológico do betão, função do tipo de aplicação-----	15
Figura 2.5 - Mecanismo de bloqueio-----	18
Figura 2.6 - Mecanismo de bloqueio-----	19
Figura 2.7 - Mecanismo de controlo de fissuração e transferência de tensões-----	23
Figura 2.8 - Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas-----	24
Figura 2.9- Gráfico carga x deflexão de prismas de concreto ensaiados á flexão, contendo volume de fibras abaixo, igual e superior ao volume crítico-----	25
Figura 2.10 - Comportamento entre fibras dúcteis e frágeis quando inclinadas em relação à superfície de ruptura-----	27
Figura 2.11 - Esquema de concentração de tensões para um betão sem reforço de fibras--	28
Figura 2.12 - Esquema de concentração de tensões para um betão com reforço de fibras--	29
Figura 2.13 - Probabilidade de intercepção da fissura em função da compatibilidade dimensional entre fibra e agregado grosso-----	30
Figura 2.14 - Curva carga x deslocamento para o betão convencional e o betão reforçado com fibras de aço-----	33
Figura 2.15 - Curva carga x deflexão tomando como referência o material elasto-plástico ideal, norma ASTM C 1018 (1994)-----	35
Figura 2.16 - Relação típica força-flecha de um ensaio de flexão-----	37
Figura 2.17 - Esquema de suporte da carga para o ensaio à flexão, segundo o RILEM-----	38
Figura 2.18 - Esquema de aplicação da carga para o ensaio à flexão segundo o RILEM-----	39
Figura 2.19 - Esquema de fibra metálica utilizada-----	40
Figura 2.20 - Fluidez não homogénea do BAC com fibras de aço: a)Impedimento da fluidez; b) concentração de partículas na região central do betão espalhado-----	42
Figura 3.1 - Conjunto de peneiros e peneirador de agregados-----	49
Figura 3.2 - Agregado grosso (Brita 6-15)-----	49
Figura 3.3 - Curvas granulométricas dos agregados-----	50
Figura 3.4 - Fibras de Aço DRAMIX ZC 60/0.80-----	51
Figura 3.5 - Sequência dos procedimentos para determinação da mistura de agregados----	53
Figura 3.6 - Ábaco de estudo da composição do betão para determinação da mistura otimizada-----	55
Figura 3.7 - Esquema de Ensaio de Espalhamento-----	57
Figura 3.8 - Início do Ensaio de Espalhamento (Slump Flow)-----	57
Figura 3.9 - Retirada do Cone, Slump Flow-----	58



Figura 3.10 - Estabilização da Mistura ( $T_{50 \text{ seg}}$ )-----	58
Figura 3.11 - Medição de $d_1$ e $d_2$ , Slump Flow-----	58
Figura 3.12 - Esquema do funcionamento da Caixa-L-----	59
Figura 3.13 - Ensaio da Caixa L (parâmetros H1 e H2)-----	60
Figura 3.14 - Ensaio da Caixa L-----	60
Figura 3.15 - Funil V-----	61
Figura 3.16 - Funil V durante o ensaio-----	62
Figura 3.17 - Moldagem dos provetes-----	63
Figura 3.18 - Ajustamento das placas da prensa do ensaio de resistência à compressão----	64
Figura 3.19 - Estado do provete após ensaio de compressão-----	64
Figura 3.20 - Esquema de suporte da carga realizado, para o ensaio à flexão-----	65
Figura 3.21 - Colocação do provete para realização do ensaio de resistência à flexão-----	66
Figura 3.22 - Equipamento digital de leitura de carregamentos e deformações-----	66
Figura 3.23 - Início da rotura do provete, transdutor-----	67
Figura 3.24 - Rotura do provete-----	67
Figura 3.25 - Proвете no final do ensaio de resistência à flexão-----	68
Figura 3.26 - Ensaio de resistência á compressão, em provetes 15x15x15cm-----	68
Figura 3.27 - Provetes envolvidos em fita isolante-----	70
Figura 3.28 - Medição da quantidade de água existente no tabuleiro, 0.5cm-----	70
Figura 3.29 - Secção de rotura dividida em células para avaliar a distribuição das fibras---	71
Figura 4.1 - Influência do Índice de Fibras no Teor de Argamassa-----	73
Figura 4.2 - Influência do Índice de Fibras no Teor de Argamassa-----	73
Figura 4.3 - Círculo não uniforme. Aglomeração de fibras no centro (mistura G; $m=3,50$ ; $SP=2,00\%$ ; $V_f=1,50\%$ )-----	75
Figura 4.4 - Influência do índice de fibras na capacidade de espalhamento-----	75
Figura 4.5 - Ligeiro bloqueio por acção das fibras de aço (mistura L; $m=5,50$ ; $SP=2,84\%$ ; $V_f=1,00\%$ )-----	77
Figura 4.6 - Bloqueio significativo ou segregação por acção das fibras de aço (mistura H; $m=3,5$ ; $SP=2,50\%$ ; $V_f=1,0\%$ )-----	77
Figura 4.7 - Influência do Índice de Fibras no Tempo $T_{40 \text{ (seg)}}$ -----	78
Figura 4.8 - Influência do Índice de Fibras na viscosidade medida pelo Funil V-----	80
Figura 4.9 - Influência do Teor de Argamassa na viscosidade medida pelo Funil V-----	80
Figura 4.10 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura E-----	82
Figura 4.11 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura F-----	82
Figura 4.12 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura G-----	83
Figura 4.13 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura H-----	83
Figura 4.14 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura I-----	84
Figura 4.15 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura J-----	84
Figura 4.16 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura L-----	85



Figura 4.17 - Comparativo entre coeficientes de absorção capilar das misturas e Desvio Padrão-----	86
Figura 4.18 - Influência do coeficiente de capilaridade na resistência à compressão-----	88
Figura 4.19 - Relação carga-flecha para diferentes volumes de fibras-----	90
Figura 4.20 - Influência da Resistência à Compressão no módulo de elasticidade secante em Compressão-----	91
Figura 4.21 - Distribuição das fibras na secção de rotura do BACRFA 0,5%-----	92
Figura 4.22 - Distribuição das fibras de 30mm na secção de rotura do BACRFA 1,0%-----	92
Figura 4.23 - Distribuição das fibras de 30mm na secção de rotura do BACRFA 1,5%-----	93
Figura 4.24 - Distribuição das fibras pelas colunas que caracterizam a secção de fractura-	94
Figura 4.25 - Corpo de prova embebido em resina-----	94
Figura 4.26 - Distribuição das fibras na secção 5-a e 5-c-----	95



## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Ensaio Mecânicos dos Ligantes-----	46
Tabela 3.2 - Ensaio Físicos dos Ligantes-----	46
Tabela 3.3 - Análise Química dos Ligantes-----	46
Tabela 3.4 - Características Químicas das Cinzas Volantes-----	47
Tabela 3.5 - Características Físicas das Cinzas Volantes-----	47
Tabela 3.6 - Características do Superplastificante-----	48
Tabela 3.7 - Características dos agregados miúdos e agregados grossos-----	50
Tabela 3.8 - Dados das composições dos betões estudados-----	54
Tabela 4.1 - Misturas Soluções Finais-----	72
Tabela 4.2 - Resultados da capacidade de espalhamento-----	74
Tabela 4.3 - Resultados da capacidade de passagem-----	76
Tabela 4.4 - Resultados viscosidade medida pelo Funil V-----	79
Tabela 4.5 - Resultados da Resistência à compressão, obtidos em 6 provetes (fibras 30/0.50)-----	87
Tabela 4.6 - Resultados da Resistência à compressão, obtidos em 6 provetes (fibras 60/0.80)-----	88
Tabela 4.7- Resultados da Resistência equivalente à tracção em flexão, obtidos em 3 provetes-----	89
Tabela 4.8 - Resultados do módulo de elasticidade secante em compressão, obtidos em 2 provetes (fibras de 60/0.80)-----	90



## Lista de Acrónimos

A.C.	Antes de Cristo
BAC	Betão Auto-Compactável
BACRFA	Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço
BRFA	Betão reforçado com Fibras de Aço
CEB-FIP	Comité Euro-International du Béton
EFNARC	European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	Linear Voltage Differential Transducer
EN	Euro Norma
SCC	Self Compacting Concrete
SP	Superplastificante
JSCE	Japan Society of Civil Engineering
ZIT	Zona Interfacial de Transição



# CAPÍTULO I - Introdução

## 1.1- Considerações Gerais

Os elevadíssimos custos de reparação e reabilitação das estruturas de betão armado e pré-esforçado, têm suscitado um interesse cada vez maior da comunidade científica, sobretudo nas questões relacionadas com a sua durabilidade.

Tem-se hoje o conhecimento, que a resistência à penetração dos cloretos, o aumento da resistência ao ataque químico e a resistência à acção do gelo/degelo, são conseguidos à custa de uma elevada densidade do betão de recobrimento.

Neste momento, todo o betão aplicado na construção civil exige a utilização de meios mecânicos para atingir grande compacidade, que seja compatível com a durabilidade e resistências requeridas.

Os padrões exigenciais, que são de cariz cada vez mais elevado, reflectem-se nos requisitos que se colocam ao betão, tendo como reflexão as dificuldades de colocação do mesmo, como é o caso da compactação em zonas densamente armadas.

Porém, a durabilidade das estruturas de betão, é em grande medida o resultado da qualidade da produção.

No decurso das últimas décadas, a necessidade da criação de novos materiais que suprimissem a dependência dos meios mecânicos, e que reduzissem ou eliminassem o ruído promovido pela compactação comumente utilizada sem que a qualidade fosse afectada, fez com que vários países desencadeassem estudos e investigações no âmbito dos betões que permitissem a aplicação em obra respeitando todas estas premissas.

Surge assim o Betão Auto-Compactável (BAC), que não obstante ser uma tecnologia emergente em Portugal, é utilizada noutros países há algumas décadas.

Como uma nova categoria de betão de elevado desempenho, o BAC deve possuir no âmago das suas propriedades, alta fluidez e coesão da massa, para que possa fluir homogeneamente no interior das cofragens, sem necessidade de qualquer tipo de vibração mecânica ou compactação, de forma a preencher todos os espaços entre armaduras, mesmo os mais recônditos ou mais densamente armados.

Tal acção ocorre apenas pelo efeito da gravidade, materializado no peso próprio do betão. A compactação inerente, deve ocorrer com a libertação de ar aprisionado durante o processo de mistura, não devendo haver segregação, e mantendo a homogeneidade do betão.

A possibilidade de redução da quantidade de armaduras ordinárias actualmente aplicadas em todas as estruturas de betão convencional, e mesmo o vislumbre da sua total substituição em alguns casos, pelo betão reforçado com fibras de aço, tem suscitado o interesse de muitos investigadores.

No entanto, as metodologias de composição do BAC não são consensuais, nem dentro do próprio meio científico, parecendo contudo existir um ponto em comum.



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

As metodologias de composição do BAC existentes, tais como as propostas por Okamura ou pela JSCE em 1998, apresentam um ponto em comum, que é o de limitar o teor de agregados grossos, bem como a sua dimensão máxima.

O facto de se imporem estes limites, surge como uma forma de garantir uma granulometria fina à mistura, que tem como principais representantes, o cimento portland, fíler e agregados finos, presentes no mesmo.

Em primeira instância, estas limitações são justificadas pela frequência de colisões e de contacto entre partículas que podem aumentar à medida que a distância relativa entre partículas diminui, nomeadamente no que diz respeito aos agregados (Nepomuceno, 2005).

Assim, na proximidade de obstáculos, quando o betão é deformado, as tensões internas aumentam, resultando no bloqueio das partículas de agregados, por acção da energia requerida para fazer fluir o concreto, que é consumida pelo aumento da tensão interna (Nepomuceno, 2005).

A trabalhabilidade do BAC é também influenciada pela quantidade de agregado grosso, e no caso da inserção de fibras, pela esbelteza das mesmas. Em consequência, para que a trabalhabilidade não seja comprometida e possa ser aumentada a percentagem de fibras, afim da obtenção de melhorias significativas no desempenho do BACRFA, a única hipótese que o permite, passa pela utilização de composições de granulometria mais fina.

Para tal, o uso de adjuvantes fluidificantes, como superplastificantes, e baixos valores da relação água/materiais finos, conferem à pasta uma alta viscosidade que pode evitar o bloqueio, e a introdução de cinzas volantes nas misturas de BAC, como material fino em substituição de cimento, pode ainda ser considerada como uma contribuição muito positiva para o desenvolvimento sustentável do betão, dado que se obtém um ganho ecológico redundante, pois são resíduos industriais.

Sendo o betão auto-compactável, um betão que trabalha com razões água/cimento menores, devido à introdução de adjuvantes superplastificantes, é retardada a necessidade de substituições e reparações, tornando a estrutura mais durável (Gomes et al, 2003).

A complexidade comportamental, aliada à ausência de directrizes para formulação de betão auto-compactável reforçado com fibras, conduziu ao estudo e investigação de um parâmetro que permita controlar as características adequadas ao betão que se pretende obter.

Assim como no betão normal, o BAC deve apresentar um desempenho idêntico ou superior no que diz respeito às suas propriedades mecânicas. Um dos artifícios utilizados para melhorar o desempenho do betão normal, é a incorporação de fibras de aço.

Sobretudo na avaliação da resistência à flexão, da tenacidade e por consequência do comportamento dúctil, a notabilidade dessa melhoria torna-se evidente.

De facto, o aumento das resistências mecânicas, propriedade do betão endurecido, é promovido pela adição de fibras de aço no betão, exigindo para isso o emprego de volumes elevados de fibras, com esbeltezas consideráveis.

É portanto recomendada a utilização de uma quantidade de fibras de dimensões adequadas e pré-definida, adicionada à mistura de forma cuidada e controlada.



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

Não obstante a inclusão de fibras no betão normal, este procedimento deve ser sempre equacionado de maneira a evitar uma redução drástica da trabalhabilidade, com o agravamento de segregação e aglomeração das fibras.

Resultado desta técnica, contrariando uma esperada melhoria, poderá ocorrer uma redução acentuada do desempenho.

Simultaneamente, a mesma preocupação se aplica ao BAC. Neste sentido, interessa averiguar no caso específico do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, se a adição destas últimas, influencia o desempenho do BAC, da mesma forma que acontece no betão normal. Na verdade, é pressuposto deste trabalho responder a algumas questões que aqui se colocam.

Os fenómenos indesejáveis ou o comprometimento do desempenho do BAC com incorporação de fibras de aço, poderão ser semelhantes ao betão normal?

Até que volume de uma determinada fibra pode ser adicionado, sem que surjam grandes dificuldades de controlo da trabalhabilidade (auto-compactabilidade)?

O desempenho do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, será semelhante ou superior ao desempenho do betão reforçado com fibras de aço?

Estas questões, explanam as preocupações que motivaram o presente trabalho, e que encontram repercussão nesta dissertação.

Será legítimo afirmar, que existe um número cada vez maior de investigadores interessados nesta matéria, patente na vasta literatura relacionada com o assunto, bem como a constatação de características e propriedades que incrementam a durabilidade das estruturas, poderá motivar a substituição do betão convencional com armaduras ordinárias, por BACRFA, num horizonte não muito longínquo, com a certeza porém que o BAC representa um marco histórico na pesquisa do betão.



## 1.2 - Relevância do Tema

De algum tempo a esta parte, a actividade de investigação relacionada com o betão auto-compactável, tem sido intensificada e orientada tendo como finalidade a aposta na melhoria da qualidade, e no aumento de vida útil das estruturas de betão. Neste domínio e tal como se pratica com o betão normal, a aposta na introdução de fibras metálicas no BAC pode resultar num contributo significativo.

De facto, a adição das fibras, pode actuar como substituto ou redutor de armaduras convencionais nas construções correntes. Tal pressuposto, faz com que o betão reforçado com fibras de aço venha tendo uma crescente utilização principalmente em pavimentos industriais e revestimento de túneis, solucionando os problemas de fissuração, conferindo vantagens acrescidas no que diz respeito ao aumento da energia de fractura e ductilidade, bem como ao aumento da resistência à fadiga e melhoria da resistência aos choques mecânicos e térmicos. Para se tirar proveito dessas vantagens, entre outras, no caso do BAC torna-se importante o controlo das suas propriedades, sobretudo no estado fresco, com a inserção de fibras metálicas. Embora exista um número significativo de estudos tendo como tema o emprego de fibras no betão normal, ainda se verificam no caso do BAC algumas lacunas ou questões que devem ser esclarecidas.

O estudo preconizado tem como objectivo trazer algumas respostas. Destas, fazem parte o estudo de dosagem do BACRFA, a adequação de misturas às propriedades que definem a auto-compactabilidade, bem como o seu comportamento mecânico. Por esta razão, este estudo mantém características actuais e de relevância considerável no que se refere à aquisição de conhecimentos tecnológicos relativos ao betão auto-compactável reforçado com fibras de aço.

## 1.3 - Objectivo da Dissertação

O objectivo deste trabalho prende-se numa primeira fase, com o entendimento do comportamento reológico do betão auto-compactável reforçado com diferentes volumes de fibras de aço.

Particularmente, espera-se que ao entender a influência da incorporação das fibras metálicas, seja possível a definição de parâmetros que auxiliem as investigações conducentes à dosagem do betão auto-compactável reforçado com fibras.



## 1.4 - Estrutura da Dissertação

No capítulo I, é efectuada uma introdução destacando as razões do surgimento e as vantagens do BAC, sendo ainda abordadas as questões associadas à introdução de fibras de aço no mesmo.

O capítulo II, apresenta as características do betão auto-compactável, e a evolução no seu conhecimento e aplicação.

São descritas as propriedades do betão no estado fresco e no estado endurecido, assim como os ensaios à flexão (ASTM e RILEM). Este capítulo está ainda reservado às características do BACRFA, e consequências da adição de fibras de aço ao betão, suas propriedades no estado fresco e endurecido.

O capítulo III, é reservado a todos os ensaios realizados, às características dos materiais, ao método de dosagem do BACRFA, às propriedades no estado fresco e endurecido, sendo ainda efectuada uma avaliação da distribuição das fibras.

No capítulo IV, surgem os resultados obtidos dos ensaios realizados e são discutidos alguns resultados do BACRFA, no estado fresco e no estado endurecido.

O capítulo V, está reservado às conclusões retiradas dos ensaios, à apresentação do parâmetro para a formulação do BACRFA, e às considerações finais.



## CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica

### 2.1 - Introdução

Em 1986, é proposto por Okamura um tipo de betão dito auto-compactável, que responderia às necessidades de desenvolvimento de um betão que permitisse a redução da mão-de-obra, e inclusive a qualificação da mesma, sem que a sua aplicação em obra fosse afectada, ou mesmo as suas propriedades mecânicas e físicas, pois não seria requerida qualquer tipo de vibração ou compactação mecânica.

Sendo esta uma nova categoria de betão de elevado desempenho, este deverá possuir características que se prendem com a alta fluidez e a moderada coesão da massa, afim de ser susceptível de fluir homoganeamente no interior das cofragens, através de secções de dimensões restritas e espaços limitados entre armaduras. Numa tentativa de maior especificidade, este betão deve conseguir preencher todos os cantos e sulcos da cofragem, mas apenas pelo esforço do seu próprio peso, isto é sem qualquer necessidade de vibração.

Podemos portanto concluir, que a sua propriedade reológica de maior relevo é a viscosidade, dependendo desta a capacidade de enchimento das cofragens deste tipo de betão e a sua auto-compactabilidade.

A utilização deste novo material, aliada à dispensa de qualquer meio de compactação ou vibração, adiciona vantagens que proporcionam a redução dos custos da obra, factor primordial para muitos promotores. O correcto envolvimento da armadura pelo material de enchimento, mesmo com elevada densidade devido à elevada fluidez do BAC, o reduzido espaço de enchimento necessário, a diminuição dos equipamentos e recursos humanos associados, a enorme diminuição no ruído inerente ao equipamento habitualmente utilizado para vibração/compactação, são sem dúvida factores a ter em conta.

As consequências da utilização massiva de vibradores de betão em obra, pelos operadores, são já conhecidas. Incluem a própria vibração transmitida ao operador, que é responsável por perturbações na circulação sanguínea, dando origem a uma doença denominada "White Finger Syndrome" (Nunes, 2001).

É provável que o desenvolvimento de 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).

### 2.2 - O Betão Auto-Compactável

O processo de globalização a que o mundo tem vindo a assistir tem permitido a engenheiros e construtores, tomar conhecimento das novidades dos tipos de betão que vêm surgindo pelo mundo, como é o caso do betão auto-compactável.



Resultado da evolução conceptual do betão convencional, surge o betão auto-compactável. Com este material que se tem revelado bastante eficaz e versátil, a aplicabilidade do mesmo introduz um apelo a novos horizontes.

O desenvolvimento tecnológico do betão enquanto material estrutural, tem tido como preocupação central o aperfeiçoamento das suas características mecânicas, e nos últimos anos, da sua durabilidade.

O betão auto-compactável, apresenta grande fluidez, tendo como característica uma alta trabalhabilidade, ou seja, é um betão muito plástico. O princípio fundamental para confecção de betões fluidos e resistentes à segregação, é o uso de adjuvantes superplastificantes ou modificadores de viscosidade, combinados com alto teor de finos, sejam eles cimento portland, adições minerais, cinzas volantes ou areia fina.

Os adjuvantes superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, sendo que os adjuvantes modificadores de viscosidade oferecem aumento na coesão, prevenindo-se com isto a exsudação e segregação no betão auto-compactável (Barros, 2009).

O aparecimento e evolução dos agentes superplastificantes, exerceu uma influência considerável no trajecto do betão, reduzindo a quantidade de água necessária tendo possibilitado um novo rumo, que se reflecte no comportamento do betão enquanto material fluido no estado fresco.

Face a esta redução de água, o aumento da compacidade é notório, e conseqüentemente todas as propriedades do material beneficiam, a melhoria da resistência, diminuição da retracção plástica, redução da permeabilidade e absorção capilar, são apenas algumas.

A avaliação do comportamento reológico do betão fresco, devido ao facto das misturas incorporarem uma variedade de materiais constituintes, cimento, agregados grossos e finos, adições e adjuvantes, e que interagem entre si, não se revela um trabalho facilitado.

Mesmo tendo conhecimento das propriedades dos elementos constituintes do betão individualmente, não é possível obter qualquer previsão sobre o comportamento reológico do betão.

Surge portanto, a necessidade de desenvolvimento de um método de composição para o BACRFA, que permita promover a demonstração do cumprimento das exigências de ductilidade e auto-compactabilidade, e que seja viável tendo em atenção critérios económicos e ambientais, mesmo com diferentes tipos de materiais constituintes, como é o caso do material utilizado no âmbito deste trabalho.

Segundo Nunes (2001), no Japão no início dos anos 80, emerge uma séria preocupação com a falta de durabilidade verificada em algumas estruturas existentes, devido à falta de homogeneidade do betão. As técnicas de compactação e colocação utilizadas, foram identificadas como as grandes responsáveis para as deficiências observadas.

Nos países orientais, o acréscimo de armadura, devido a requisitos relacionados com uma forte acção sísmica, agrava as dificuldades de compactação, e torna a actividade de vibrar betão muito mais complicada.



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

Paralelamente, tanto na indústria da construção como no mundo, tem-se vindo a verificar uma diminuição da mão-de-obra especializada, conduzindo a uma diminuição latente da qualidade da construção.

As questões ligadas à saúde dos operadores, ao meio ambiente e à segurança, são questões que cada vez mais se torna importante equacionar.

Os procedimentos habituais de colocação do betão, foram no Japão considerados cada vez mais ineficazes, inadequados para zonas urbanas com elevada densidade populacional, ineficientes e dispendiosos (Okamura, 1997). Tentando dar algum tipo de resposta a este conjunto de preocupações, é desenvolvido o betão auto-compactável (Self-compacting concrete - SCC).

Posterior ao desenvolvimento do protótipo de betão auto-compactável na Universidade de Tóquio, teve início uma intensa investigação levada a cabo em diversos locais, tendo especial relevância nas grandes empresas de construção, que possuem os seus próprios institutos de investigação. Resultante do desenvolvimento deste trabalho, o BAC (Betão Auto-Compactável) tem sido aplicado no Japão em diversas estruturas.

Em Junho de 1990, foi efectuada a primeira aplicação, num edifício, tendo depois sido utilizado nas torres de uma ponte atirantada em 1991. Em 1992, a sua aplicação generalizou-se à viga principal de uma ponte atirantada, e, desde essa altura, o Japão tem aplicado o BAC nas estruturas actuais, e tem vindo a aumentar o seu uso gradualmente (Nunes, 2001).

Em Abril de 1998, foi posta em serviço uma ponte suspensa no Japão, a ponte "Akashi-Kaikyo", Figura 2.1, com um comprimento total de 3911m, e cujo vão central constitui um dos maiores a nível mundial com 1991m. Reduzir as necessidades de mão-de-obra, racionalizar o trabalho e diminuir o tempo de construção desta gigantesca estrutura, tornou-se particularmente importante. Foi então desenvolvido um betão auto-compactável, aplicado nos maciços de ancoragem que suportam os cabos principais da ponte, e, que apresentam um comprimento de 84.5m, 63m de largura e 47.5m de altura artigo consultado em 10 Abril 2010, disponível em ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_Akashi-Kaikyo](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Akashi-Kaikyo)).



Figura 2.1 - Ponte Akashi-Kaikyo (Japão), Brown et al (1996)



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

A Akashi-Kaikyo conquistou três recordes: o de vão mais extenso, o de ponte mais alta e o de ponte mais cara (4,3 bilhões de dólares). A utilização de BAC na sua construção, permitiu uma redução no tempo de construção de 20%, e inaugurada em 1998 com 1991 metros de vão livre, consumiu nas ancoragens 290.000m<sup>3</sup> de betão (Kashima et al., 1998).

Actualmente, o Japão aplica correntemente o BAC, tendo em vista diminuir o período de construção em obras de grande dimensão.

Em França, na Espanha, na Suécia e no Brasil, o BAC, tem também a sua aplicação já bastante generalizada. É utilizado em construção de ginásios desportivos, e inclusive em moradias individuais e em prédios, bastando para tal confirmação uma breve pesquisa na internet, ou a leitura da diversa literatura que existe sobre o tema.

Em Portugal existem já alguns elementos de obra confeccionados a partir de BAC, utilizados tanto “in situ” como em pré-fabricação.

Uma das utilizações deste tipo de material, a viga de coroamento da fachada do Edifício do Alto Parque em Lisboa, executada pela empresa Engil, que tinha como principal restrição à utilização do betão normal, a aposta arquitectónica numa extrema esbelteza de uma viga com um vão de 60m apoiada praticamente nos extremos. Por condicionantes de projecto, o peso próprio admissível implicou espessuras do caixão de cerca de 10 cm, o que face aos recobrimentos necessários e à armadura, impedia a pervibração, tendo esta questão sido apanágio para o uso do BAC (Seminário Novos Desenvolvimentos do Betão, 2003).

Na Figura 2.2, apresentam-se algumas imagens da obra, onde é possível verificar a qualidade da pele do betão obtida, cumpridas que foram as regras de aplicação.



Figuras 2.2 - Viga de Coroamento do Edifício Alto Parque (**Rilem-Seminário Novos Desenvolvimentos do Betão**, Lisboa, Setembro 2003 “Betões de elevado desempenho arquitectónico”)



O termo betão auto-compactável (BAC), identifica uma categoria de betão que pode ser moldado de forma a preencher cada espaço vazio através exclusivamente do seu peso próprio, não necessitando de qualquer tecnologia de compactação ou vibração externa (Tutikian, 2004).

Descreve-se a auto-adensabilidade, termo utilizado no Brasil, do betão fresco, como a capacidade de preenchimento dos espaços vazios e o envolvimento dos varões de aço e outros obstáculos pelo material, exclusivamente através da acção da força gravitacional, mantendo uma adequada homogeneidade (Bosiljkov, 2003).

Para um betão ser considerado auto-compactável, deve apresentar três propriedades fundamentais: fluidez, coesão ou trabalhabilidade e resistência à segregação. Define-se fluidez, como a capacidade do betão auto-compactável de fluir dentro e através do molde preenchendo todos os espaços. Coesão ou trabalhabilidade, como a capacidade de escoamento pelo molde, passando por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação. Resistência à segregação, é a propriedade que caracteriza a capacidade do betão em se manter coeso ou fluir dentro dos moldes, passando ou não através de obstáculos (EFNARC, 2002).

O BAC, é um material referenciado como uma evolução tecnológica dos betões tradicionais, fruto da pesquisa aplicada, e resultado da introdução conjunta das matérias-primas básicas do betão, de adições minerais, adições de fílers ou cinzas volantes e adjuvantes químicos. O desenvolvimento destes materiais, principalmente com a descoberta da extraordinária acção de dispersão dos adjuvantes superplastificantes, e a acção coesiva dos modificadores de viscosidade, tem impulsionado esta tecnologia.

O objectivo de qualquer método de dosagem, é determinar a combinação adequada e mais económica dos constituintes do betão, com o objectivo de produzir um que possa estar próximo daquele que consiga um equilíbrio entre as várias propriedades desejadas, ao menor custo possível.

Este tipo de betão, deve estar apto a passar através das armaduras mais compactas, com uma rapidez dependente da viscosidade da mistura. Para satisfazer esta condição, o betão deve ser extremamente fluido, o que equivale a dizer, muito deformável. Esta condição, só é possível, se a razão água/cimento é elevada, ou se o betão contém um superplastificante.

Acontece, que a fluidez não é por si só a única propriedade que se procura num betão auto-compactável, pois é preciso assegurar a homogeneidade da mistura. De forma corolária, a mistura de BAC deve ser extremamente coesa e muito estável na altura da betonagem, e até ao seu estado endurecido.

Uma boa estabilidade aliada entre outras propriedades à viscosidade do betão, precisam tanto da adição de um agente de viscosidade afim de melhorar a coesão da mistura, como de aumentar o teor de materiais cimentícios e simultaneamente reduzir o teor de água presente. Esta complexidade amena, combina parâmetros diferentes para obter o nível de resistência à compressão desejado. Mas antes desta etapa, é indispensável a certeza da capacidade de enchimento destes betões, que possuem uma deformabilidade superior a um betão ordinário.



De outro modo, é necessário assegurar a estabilidade da mistura, e evitar por conseguinte a segregação. Frequentemente, estas exigências assumem a forma de compromisso. Claramente, o agente de viscosidade introduzido para melhorar a viscosidade do betão, não deve impedir a sua trabalhabilidade.

Portanto, os materiais constituintes das misturas realizadas são de extrema importância, por influenciarem além do seu grau de compactabilidade, também a qualidade do betão no estado endurecido.

Um betão auto-compactável pode ser produzido utilizando apenas o cimento como material ligante. No entanto, uma substituição parcial de cimento por uma ou pela combinação de duas ou três adições minerais com propriedades cimentíceas, pode ser vantajosa, não só sob o ponto de vista económico mas também sob o ponto de vista reológico, já que conduzem a baixos coeficientes de atrito entre as partículas, e também entre as suas partículas e as de outros componentes (Nunes, 2001).

Nepomuceno (2005), estudou misturas binárias e ternárias, obtendo resultados satisfatórios em algumas delas, sobretudo com adição de finos graníticos, oriundos da reciclagem da indústria das rochas ornamentais.

A utilização das cinzas volantes permite também a reutilização de subprodutos industriais, já que provêm da queima de carvão pulverizado ou moído, contribuindo para a eventual redução do custo do material e para um incremento da reciclagem, estando assim em consonância com as sinergias ambientais.

Nestes betões recentes e modernos, é a quantidade de superplastificante que controla a trabalhabilidade, ao contrário do que ocorre nos betões correntes, onde este papel era desempenhado pela quantidade de água presente na amassadura, atingindo-se uma viscosidade plástica adequada.

A redução de água e o aumento da quantidade de pó, pode aumentar a viscosidade e a coesão do betão auto-compactável. A adição de um superplastificante, permite então a redução de água e o consequente aumento da fluidez, perpetrando uma pequena diminuição da viscosidade.

Os superplastificantes de última geração, com capacidade de modificar consideravelmente a reologia do betão fresco, permitem por um lado uma forte redução da quantidade de água de amassadura, mas por outro lado a fluidificação é tal, que o betão reduz de forma considerável o atrito interno, tornando-se praticamente auto-nivelante e portanto capaz de se movimentar sozinho no interior do molde/cofragem e envolver de forma absoluta as armaduras existentes (Gomes, 2002).

O uso de superplastificante no betão, revelou-se um dos maiores progressos na melhoria das características do material. É hoje possível fabricar betões trabalháveis com razões água/ligante próximas do estado óptimo, e obter betões de elevada resistência, elevada fluidez e elevada durabilidade.

Há que ter em atenção, que uma elevada dosagem de superplastificante é susceptível de provocar segregação e bloqueio do fluxo da mistura.



Dos constituintes mais resistentes e duráveis do betão, os agregados são os mais evidentes. A natureza, a quantidade, a máxima dimensão e o tipo de agregados grossos, condiciona a auto-compactação do betão. Facilmente se depreenderá que o betão perde a sua capacidade de fluir através de obstáculos com o aumento da quantidade de agregados grossos e com a máxima dimensão dos agregados (JSCE, 1998).

Os agregados finos, a areia, caso a sua quantidade seja muito elevada, a quantidade de pasta entre as partículas de agregados é insuficiente reduzindo a fluidez do betão. Caso a quantidade de areia seja demasiado baixa, a constituição do esqueleto granular pode não ser suficiente para a quantidade de pasta, e poderá conduzir a exsudação ou inclusive a segregação.

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 and Petersson, 2001).

## **2.3 - Propriedades do Betão Auto-Compactável no Estado Fresco**

### **2.3.1 - Considerações Gerais**

O adequado comportamento do BAC, exige misturas com elevada fluidez e moderada viscosidade e coesão entre os componentes, a fim de garantir um fluxo contínuo e uniforme de toda a mistura, preenchendo todo o molde sem exibir segregação, e sem que se produza bloqueio entre as armaduras ou ao passar por algum obstáculo.

Essas características definem as principais propriedades a que o BAC no estado fresco deve atender.

Através da reunião das experiências de diversos autores em estudos desenvolvidos sobre o BAC, desde o início de seu desenvolvimento, a *European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* - EFNARC, entidade europeia com sede no Reino Unido, que apresenta documentos com recomendações para a produção, controle tecnológico e utilização do BAC, especifica que para um betão ser considerado auto-compactável, este deve apresentar três propriedades fundamentais: fluidez ou capacidade de preenchimento, coesão ou habilidade de passar por obstáculos e resistência à segregação (EFNARC, 2005).

É conveniente fazer distinções teóricas entre capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação.

Na prática, estas três propriedades estão inter-relacionadas. As respostas dos métodos de ensaio para uma propriedade, são bastante afectadas pelas outras propriedades do betão que está a ser testado. A tendência de segregação do betão, por exemplo, pode prejudicar a



eficiência de um ensaio para a medição da probabilidade de bloqueio da mistura (Nunes, 2001).

No caso da evidência de ocorrerem duas situações de forma isolada e independente, a baixa capacidade de passagem e inclusive a segregação ou até a combinação das duas, são susceptíveis de provocar o bloqueio do betão.

A capacidade de preenchimento está directamente ligada à habilidade de passagem (Filho, 2006).

Segundo Tutikian (2004), fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto auto-compactável de fluir dentro da cofragem, e preencher todos os espaços, somente pelo efeito de seu peso próprio.

Os mecanismos que governam esta propriedade são a alta fluidez e a coesão da mistura (Gomes, 2002).

Habilidade de passagem, é a propriedade que caracteriza a capacidade do BAC de escoar pela cofragem, passando por entre obstáculos, como: armaduras, aberturas e secções estreitas, sem obstrução do fluxo ou segregação (Tutikian, 2004; Gomes, 2002).

Os mecanismos que governam esta propriedade são a viscosidade moderada da pasta e da argamassa, e as características dos agregados, principalmente, a dimensão máxima característica do agregado grosso (Gomes, 2002).

Qualquer mudança no trajecto da fluidez das partículas de agregado, através ou em torno de um obstáculo (redução da secção ou armaduras), pode resultar na formação de um arco estável destas partículas, bloqueando a fluidez do restante do betão. O arqueamento desenvolve-se mais facilmente quando, o tamanho dos agregados é relativamente grande em relação às dimensões da abertura, quando é elevada a quantidade de agregado grosso, e quando a forma das partículas se afasta da esférica (Barros, 2009).

É também provável que o atrito entre o betão fluido, e a superfície dos obstáculos, influencie no comportamento de bloqueio e na formação do arco de agregados (Barros, 2009).

De acordo com Gomes (2002), a estabilidade ou resistência à segregação, é a propriedade que caracteriza a capacidade do BAC de evitar a segregação de seus componentes, como o agregado grosso. Tal propriedade melhora a uniformidade da mistura durante o transporte, lançamento e consolidação. O mecanismo que governa esta propriedade é a viscosidade e a coesão da mistura.

### 2.3.2 - Comportamento Reológico

As características reológicas do betão fresco, influenciam na fase de colocação e consolidação, o comportamento do betão.

O estudo da reologia do betão, é fundamental no desenvolvimento do betão auto-compactável (Skarendahl and Petersson, 2000).



Da tensão mínima necessária para que o betão possa ser um material fluido, caracterizando o seu estado fresco pela tensão de corte limite ( $\tau_0$ ) e pela viscosidade plástica ( $\mu_p$ ), que acaba por impedir o contacto entre os agregados, evitando o bloqueio representando desta forma a estabilidade da mistura, depende a deformabilidade da mesma (Barros, 2009).

Estas características assimilam o comportamento reológico dos betões auto-compactáveis, definidos numa primeira aproximação ao modelo plástico de Bingham, definido na Figura 2.3.

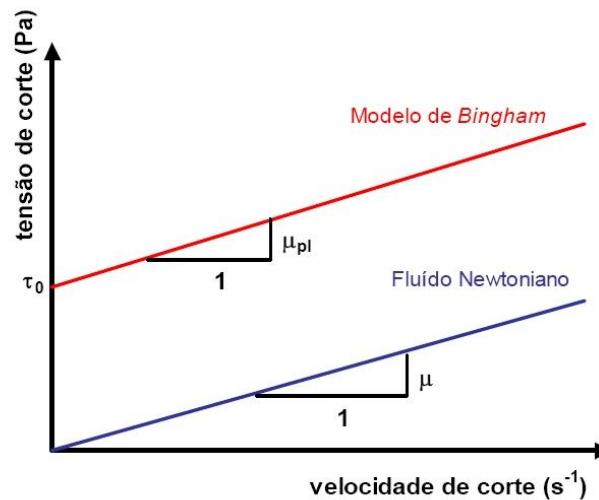


Figura 2.3 - Modelo de Bingham (Khayat et al, 2000)

De acordo com o modelo de Bingham, inicialmente é necessário aplicar uma dada tensão de corte para se iniciar o movimento ( $\tau_0$  -tensão de cedência), seguida pelo aumento da tensão de corte aplicada a uma velocidade de corte crescente (David, 1999).

É indiscutível, a influência que o atrito interno das partículas, e a quantidade de água livre presente na mistura têm na reologia do betão fresco, factores dependentes da tensão superficial e da dispersão das partículas.

No entanto, através da adição de superplastificantes, é susceptível a alteração destas características, conseguindo um empacotamento adequado das partículas finas.

Pode utilizar-se ainda um agente de viscosidade responsável por modificar principalmente a viscosidade plástica (Skarendahl and Petersson, 2001).

Se for possível manter a viscosidade relativamente baixa, sem que com isso se diminua drasticamente a resistência inicial ao movimento, então, é possível obter um material que flui facilmente, mas ao mesmo tempo suficientemente coeso. Na obtenção de um betão auto-compactável existem duas premissas que deverão ser observadas, a elevada deformabilidade da pasta ou argamassa, e a viscosidade necessária para garantir a uniforme suspensão das partículas sólidas, ou seja, a resistência à segregação entre os agregados grossos e a argamassa (Ferreira, 2001).



Na Figura 2.4, é representado o comportamento reológico do BAC, em relação a outros tipos de betão.

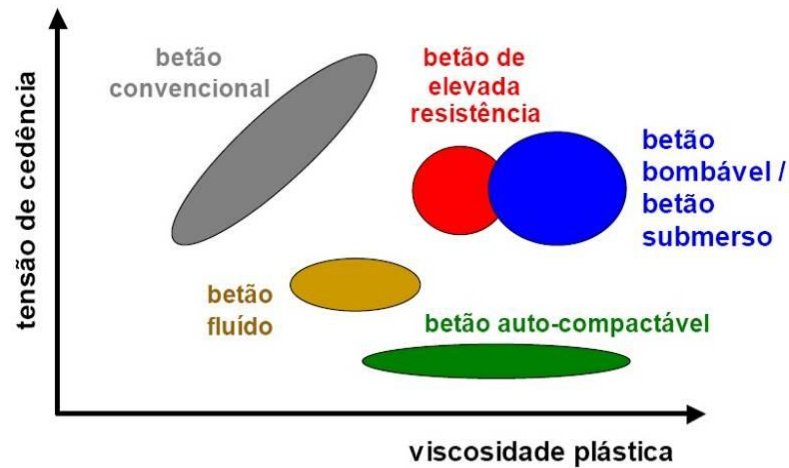


Figura 2.4 - Comportamento reológico do betão, função do tipo de aplicação (Nunes, 2001)

### 2.3.3 - Trabalhabilidade

A maior ou menor facilidade com que o betão auto-compactável é manipulado, e a maior ou menor aptidão com que este preenche todos os espaços da cofragem para os quais é previamente destinado, sem qualquer transtorno na sua homogeneidade e apenas por acção do seu peso próprio, pode definir a trabalhabilidade.

Esta pode ser controlada através de ensaios que medem as propriedades constantes nos itens seguintes, e cuja leitura vai permitir ou não, a trabalhabilidade.

A medição desta, apenas é possível em verdadeira grandeza, ou seja, só é possível dependendo das necessidades e das circunstâncias, o que pressupõe que uma mistura de BAC de características idênticas pode ter uma boa trabalhabilidade sob determinadas circunstâncias, e não noutras conjunturas mais rigorosas.

A auto-compactabilidade está intrinsecamente ligada à trabalhabilidade da mistura.

Os requisitos funcionais de auto-compactabilidade, tal como mencionado anteriormente, incluem a capacidade de enchimento, resistência à segregação e capacidade de passagem. Estes requisitos reflectem implicitamente as propriedades reológicas do material, mas avaliam simultaneamente outras propriedades do betão auto-compactável que dependem das condições específicas "in situ" (distâncias entre armaduras, taxa de armaduras, dimensões dos moldes, etc.) (Skarendhal, 2000; Kahyat and Roussel, 2000).



#### 2.3.4 - Capacidade de Enchimento

Para alcançar uma boa capacidade de enchimento, é necessário encontrar o equilíbrio entre a capacidade de deformação e a velocidade de deformação (Nepomuceno, 2005). Para tal, o betão deve ter baixo atrito entre partículas, e, uma pasta com excelente deformabilidade (Khayat and Tangtermsirikul, 2000).

A deformabilidade é caracterizada pela facilidade com que o betão preenche o interior da cofragem e envolve as armaduras (Almeida, 2007).

O equilíbrio entre a velocidade de deformação e a capacidade de deformação, reduzindo o atrito inter-partículas e pressupondo a obtenção de uma pasta com elevada deformabilidade, deve existir quando se pretende conseguir uma capacidade de enchimento adequada (Nunes, 2001).

A redução do atrito interno entre partículas na fase sólida do betão, que tem origem na presença de agregados grossos e finos e na presença de materiais finos, não se revela suficiente de per si, para que o betão alcance a auto-compactabilidade. A mistura deve apresentar também adequada deformabilidade.

Por conseguinte, com a redução do atrito entre partículas sólidas, aumenta a deformabilidade do betão.

Assegurar a elevada resistência à segregação, viscosidade moderada e paralelamente garantir elevada fluidez e baixo valor da tensão de cedência, revela-se de importância primordial.

Claro que a redução do atrito entre os agregados e as partículas de finos, tende a impor a redução na resistência à segregação.

No entanto, a redução do atrito entre as partículas de materiais finos, não se deve à custa do aumento da distância inter-partículas, por aumento do conteúdo de água na pasta (Nunes, 2001).

Para que o betão seja deformável, é premente estabelecer uma ligação directa com a deformabilidade da mistura, que passa pela dispersão das partículas de finos, permitido pela junção de superplastificantes.

Ao invés da água, que reduz a viscosidade e a tensão de cedência, a adição de um superplastificante, permite reduzir apenas a tensão de cedência, aumentando a fluidez, e proporcionando uma insignificante redução da viscosidade (Nunes, 2001).

Desta forma, pode obter-se um betão muito fluído, sem que a sua coesão seja afectada significativamente.

A deformabilidade da mistura pode ser limitada pela redução da razão água/finos, que para não ser afectada, não pode ser demasiado elevada, nem demasiado baixa, devendo ser devidamente controlada.

Uma pasta com muito baixa razão água/finos, tende a possuir elevada capacidade de deformação e baixa velocidade de deformação (Khayat and Tangtermsirikul, 2000).

Para que seja possível uma capacidade de enchimento adequada, importa considerar factores como a redução do atrito entre partículas, de forma a otimizar a granulometria da fase



sólida e minimizar a quantidade de agregados grossos, e também o aumento da deformabilidade da mistura, para controlar a razão água/finos e perpetuar a adição de superplastificante.

### 2.3.5 - Resistência à Segregação

A resistência à segregação, é a propriedade que caracteriza a capacidade do betão de manter a sua coesão ou fluir dentro dos moldes, passando através de obstáculos (EFNARC, 2002).

A segregação no betão fresco, prende-se com a falta de homogeneidade na distribuição dos seus constituintes, podendo existir alguns materiais que se aglomeram, provocando o chamado bloqueio.

Nem sempre o betão exhibe características de segregação, estando esta muitas vezes reservada a determinadas condições do movimento, como quando passa por secções com elevadas quantidades de armaduras.

De acordo com Khayat and Tangtermsirikul (2000), o betão auto-compactável, não deve manifestar tanto em repouso como em movimento, nenhum dos seguintes tipos de segregação, exsudação, segregação da pasta e agregados, segregação dos agregados grossos originando o bloqueio, distribuição irregular (não uniforme) dos poros de ar.

A redução da quantidade de água na mistura, revela-se preponderante para evitar a exsudação, que é possível limitando a razão água/finos e o conteúdo em água livre, na composição da mistura confeccionada. A adição de materiais finos com elevada superfície específica, permite que as partículas dos finos utilizadas absorvam uma maior quantidade de água, diminuindo a água livre existente, limitando assim o aparecimento da exsudação.

O aumento da viscosidade na mistura, reduz a exsudação da mesma, e esta pode ser obtida através da adição de um agente de viscosidade (Khayat and Tangtermsirikul, 2000).

Através do transporte das partículas de agregado e do transporte do ar, com a confecção de uma mistura que as consiga envolver, podem ser solucionados outros tipos de segregação, pois evita-se o deslocamento diferenciado entre fases. Isto é possível, recorrendo a uma força de interacção entre fases elevada, para a qual a coesão e o atrito imprimem um valioso contributo (Nepomuceno, 2005).

Para se alcançar adequada resistência à segregação, deve reduzir-se a separação dos sólidos, limitando o conteúdo de agregados, reduzindo a máxima dimensão dos agregados, diminuindo a razão água/finos, e introduzindo um agente de viscosidade. Simultaneamente, deve minimizar-se a exsudação, através da diminuição do conteúdo de água, da diminuição da razão água/finos, utilizando materiais finos com maiores superfícies específicas e introduzindo um agente de viscosidade (Khayat and Tangtermsirikul, 2000).



### 2.3.6 - Capacidade de Passagem

A eficiência de um BAC depende da existência simultânea de dois factores, fluidez e resistência à segregação.

Na presença de situações em que existam espaços estreitos, devido à presença de armaduras ou devido à configuração da própria cofragem, o betão deve possuir uma característica extra, capacidade para passar nesses mesmos espaços, evitando que ocorra o bloqueio dos agregados grossos (Khayat and Tangtermsirikul, 2000).

O espaçamento entre varões e o volume dos agregados grossos, deve ser compatível entre si, e equilibrar-se simultaneamente com as armaduras e as aberturas da própria cofragem.

O percurso das partículas de agregado pode ser alterado devido à existência de obstáculos, impulsionando um incremento de contactos instantâneos entre as partículas, surgindo a formação de um arco estável, que não permite que o restante da mistura possa escoar (Nepomuceno, 2005).

Quando a quantidade de agregados de grandes dimensões é elevada, desenvolve-se a formação desse arco estável.

Contudo, a formação do arco estável, também pode ocorrer se os agregados forem de menores dimensões, mas em quantidade elevada (Nepomuceno, 2005). Se a abertura for de um tamanho consideravelmente superior, quando comparado com o tamanho das partículas, tal fenómeno não se revela.

Pela observação da Figura 2.5, podemos perceber como ocorre o mecanismo de bloqueio, pela formação de um arco estável de agregados.

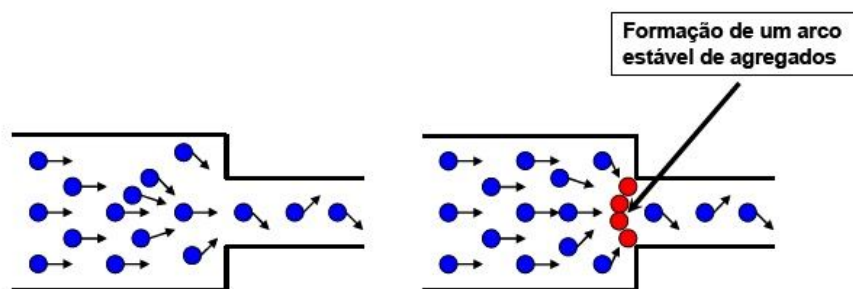


Figura 2.5- Mecanismo de bloqueio (Takada and Tangtermsirikul, 2000, adaptado), in: Barros, 2009

Numa mistura de BAC, com uma boa capacidade de enchimento e resistência à segregação, só ocorre bloqueio nas seguintes condições (Khayat and Tangtermsirikul, 2000):

- A dimensão máxima do agregado é muito grande
- O conteúdo de agregados grossos é muito elevado



Caso a mistura tenha tendência para a segregação das partículas de agregado grosso, o risco de bloqueio torna-se evidente, Figura 2.6. Perante esta situação, mesmo que a dimensão máxima do agregado não seja excessiva, pode ocorrer o bloqueio.

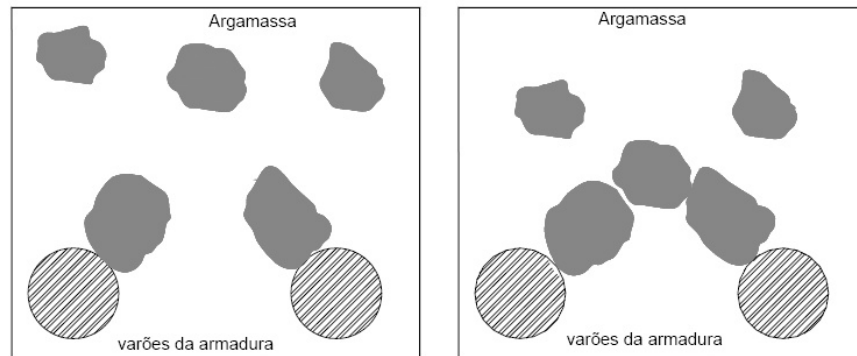


Figura 2.6 - Mecanismo de Bloqueio (Nunes, 2001)

Para determinada quantidade de agregados, o risco de bloqueio aumenta quando para um espaçamento idêntico as armaduras possuem um diâmetro maior, pois neste caso à formação dos arcos dos agregados é conferido um suporte mais estável (Nunes, 2001).

Para se alcançar uma adequada capacidade de passagem, deve ter-se em consideração os seguintes aspectos (Nunes, 2001):

**Melhorar a coesão de forma a reduzir o risco de segregação dos agregados:**

- Baixar a razão água/finos
- Introduzir agentes de viscosidade

**Compatibilizar o espaçamento livre com as características dos agregados grossos**

- Baixar o conteúdo de agregados grossos
- Baixar a máxima dimensão dos agregados



## 2.4 - Propriedades do Betão Auto-Compactável no Estado Endurecido

### 2.4.1 - Considerações Gerais

Apesar dos diversos trabalhos desenvolvidos desde a introdução do BAC na indústria da construção no início dos anos 90, relacionados com a obtenção e avaliação das propriedades no estado fresco, são as propriedades no estado endurecido que se apresentam como de importância primordial para os projectistas estruturais (Domone, 2007). Segundo Gomes et al. (2006), como os benefícios do BAC estão comumente direccionados ao estado fresco, as suas propriedades no estado endurecido têm sido menos discutidas, porém, alguns estudos têm constatado o alcance de resistências superiores do BAC comparadas com a dos betões convencionais.

O betão auto-compactável e o betão convencional, relativamente a resistências à compressão, têm propriedades comparáveis no estado endurecido. Se existirem diferenças, essas são geralmente cobertas pela adopção de coeficientes de segurança nos quais as normas de projecto são baseadas (EFNARC, 2005). Holschemacher and Klug (2002), mencionam que as razões para possíveis diferenças nas propriedades no estado endurecido entre o BAC e o betão convencional, se devem à melhor microestrutura e homogeneidade do BAC, e ao maior volume de materiais ultrafinos e utilização de adjuvantes.

Domone (2007), cita que alguns dados de resistência, como de compressão, tracção, etc., têm sido obtidos rotineiramente durante o desenvolvimento de estudos de dosagem do BAC, enquanto outras propriedades, como módulo de elasticidade, retracção, fluência, aderência ao aço e durabilidade têm frequentemente sido o objecto de investigações mais específicas.

### 2.4.2 - Resistência à Compressão

O BAC exige uma razão água/finos relativamente baixa, e uma quantidade significativa de adição de superplastificante, para que seja efectivo o alcance de combinações adequadas entre estabilidade e alta fluidez (ou reologicamente, moderada viscosidade plástica e baixa tensão de corte).

Na composição do BAC, e de uma forma geral, os finos resultam da combinação entre o cimento portland normal, e uma ou mais adições, como as cinzas volantes utilizadas neste trabalho.

É assim possibilitado que a resistência tenda a ser governada mais significativamente pelo tipo e proporção dos finos adicionados, e não tanto pela relação água/finos (Domone, 2007). Segundo Holschmacher and Klug (2002), a observação da base de dados utilizada no seu estudo permitiu concluir que após os 28 dias, as resistências à compressão do BAC e do betão convencional não apresentaram diferença significativa entre si.



Porém, nalguns casos isolados, para a mesma relação água/cimento, o BAC apresentou resistências à compressão sensivelmente superiores, apesar de que segundo os autores, actualmente, não há pesquisas suficientes que resultem em conclusões generalizadas desse facto.

No seu estudo, Gomes et al. (2006), através da observação de resultados de resistências à compressão do BAC em pesquisas de diversos autores, comparados com curvas de evolução da resistência à compressão para betões convencionais, propostas por Helene (1993) e CEB-FIP (1993), concluíram que a evolução da resistência à compressão do BAC, pode obedecer às formulações sugeridas para betão convencional.

### 2.4.3 - Resistência à Tracção

Segundo Holschemacher e Klug (2002), todos os parâmetros que influenciam nas características da microestrutura da matriz cimentícia e da zona interfacial de transição (ZIT), são de importância decisiva no que diz respeito ao comportamento à tracção.

No seu estudo, os autores descrevem que a maior parte dos valores surgidos durante a pesquisa, relativos à resistência à tracção medidas no BAC, se inserem dentro dos limites válidos para betões convencionais vibrados, com a mesma resistência à compressão, especificadas pelo CEB-FIP (1993).

No âmbito do estudo de Gomes et al (2006), onde foram utilizados dados de resistência obtidos por diversos autores, foi registada uma variação entre 8,3% e 11%, respeitante à relação entre as resistências médias de tracção e compressão ( $f_t/f_c$ ) do BAC. Se compararmos estas percentagens com as do betão convencional que se situam entre 7% e 10%, verificamos que não se apresentam muito superiores.

Em relação à resistência à tracção de um betão auto-compactável, esta é semelhante à do betão corrente, já que o volume de pasta não tem influência significativa no valor da resistência à tracção (EFNARC, 2005).

### 2.4.4 - Módulo de Elasticidade

O tipo de agregados, e o volume envolvido na composição do betão, exercem uma influência sobre o valor do módulo de elasticidade.

O aumento do módulo de elasticidade do betão, tem uma relação directa com a escolha de um agregado que possua um elevado módulo de elasticidade.

Contudo, a diminuição do módulo de elasticidade do betão, pode estar relacionada com o aumento do volume da pasta.

Em consequência, o módulo de elasticidade do BAC, é inferior ao do betão convencional vibrado, devido a ter maior volume de pasta na sua composição (EFNARC, 2005).



Em síntese, pode afirmar-se que o BAC é mais susceptível de ser mais deformável para a mesma tensão que o betão corrente vibrado, devido a possuírem maior quantidade de pasta (Nepomuceno, 2005).

#### 2.4.5 - Durabilidade

A durabilidade possui uma estreita relação com os parâmetros que pode afectar uma estrutura e como tal iniciar a propagação de acções de degradação. Os cloretos, os sulfatos, os ácidos, os álcalis e inclusive o dióxido de carbono, são susceptíveis de causar essa degradação. Por conseguinte, uma boa espessura e uma baixa permeabilidade da camada de recobrimento, são essenciais, para que se evite a ocorrência de reacções de degradação das armaduras. As regras aplicáveis aos betões convencionais também se aplicam ao BAC.

Uma deficiente compactação da camada de recobrimento, devida ao estreitamento da zona entre os varões de armadura e da cofragem, é reconhecida como sendo um factor determinante na diminuição da durabilidade da estrutura, quando exposta em ambientes agressivos (EFNARC, 2005).

O processo vibratório utilizado no betão convencional, revela-se descontínuo, pouco preciso, resultando muitas vezes num betão com diferentes permeabilidades, heterogéneo, permitindo o acesso de substâncias agressivas.

Para resolver esta situação, o BAC, ao possuir as características e propriedades adequadas, está livre destes defeitos e oferece menos pontos para a acção de substâncias que estão presentes em meios agressivos (EFNARC, 2005).

## 2.5 - Betão Reforçado com Fibras de Aço

### 2.5.1 - Enquadramento

A utilização de materiais de matriz frágil, à qual são adicionadas fibras, remonta a tempos imemoriais. A evidência mais antiga da utilização dessa técnica, remonta a 3500 A.C., quando terá sido construída uma coluna de 57 m de altura em tijolo de barro cozido ao sol, ao qual adicionaram palha. Na Roma antiga, às argamassas eram adicionadas crinas de cavalos (Evangelista, 2003).

O betão simples não armado, é um material que se reveste de grande fragilidade, que fissa facilmente, e que possui baixa resistência à tracção e baixa capacidade de extensão na tracção (ASME, 1994).

Percebendo estas fragilidades, as instituições militares, procuraram após a I guerra mundial, um material que absorvesse os impactos das explosões, e que conseguisse simultaneamente



resistir na sua essência. É nesta altura que o “boom” do desenvolvimento desta tecnologia ocorre (Evangelista, 2003).

De acordo com Evangelista (2003), da sociedade militar, para o seu uso na sociedade civil, foi um pequeno passo, e a investigação do betão reforçado com fibras tem vindo a crescer desde os anos 60. Com a introdução de pregos no betão, pode considerar-se que o primeiro material a ser usado para fibras, foi o aço.

A versatilidade de aplicação do betão em construções, tem vindo a ser alvo de sucessivas alterações, tanto na forma de aplicação, como na de produção, e inclusive na sua confecção. Estas constantes modificações, encontram eco na imutável necessidade de aperfeiçoamento das propriedades do betão, ampliando mais ainda o seu campo de utilização.

Neste âmbito, e tendo como objectivo primordial, a melhoria do seu comportamento perante os esforços de tracção, a adição de fibras afigura-se como uma alternativa bastante viável.

Fibras dispostas aleatoriamente e betão, passam a formar um material composto, em que caso as fibras sejam resistentes e adiram confortavelmente à matriz, e em quantidade suficiente, as aberturas das fissuras serão mantidas quase imperceptíveis.

A adição das fibras de aço, permitirá ao betão um incremento importante na resistência à tracção, com elevada capacidade de deformação no estágio pós-fissuração, o chamado “Strain-Softening” (ASME, 1994).

A tarefa capital da adição de fibras ao betão, deve ser a da absorção das forças libertadas quando ocorre a micro fissuração do betão, promovendo a transferência de tensões entre as duas faces, que são separadas no estágio fissurante, mecanismo demonstrado na Figura 2.7.

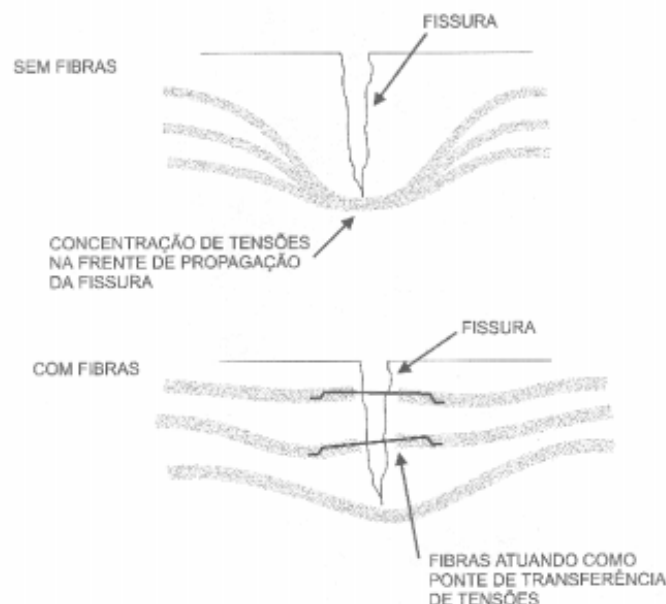


Figura 2.7 - Mecanismo de controlo de fissuração e transferência de tensões (Nunes, 2001)



Desta forma, é impedida a transformação da micro fissuração em macro fissuração, ou seja, impede o aumento da fissura formada inicialmente, mantendo a coesão do material. Deve no entanto ter-se em atenção, que a junção de fibras, não deve reduzir a trabalhabilidade do betão.

De facto um dos problemas que ocorre associado á adição de fibras de aço no betão, é o aparecimento de aglomerados de fibras, designados por ouriços, um emaranhado de fibras incapaz de se destrinçar por si só, como constatado na Figura 2.8.



Figura 2.8 - Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas (Figueiredo, 2000)

Caso estes aglomerados de fibras de aço, sejam adicionados ao betão sem qualquer preocupação em deslindar o ouriço formado, além da distribuição homogénea das fibras se revelar reduzida, o local onde o mesmo se alojar será sem dúvida um ponto fraco no betão, comprometendo seriamente a trabalhabilidade do mesmo.

A inadequada mistura do material, está indiscutivelmente ligada à formação dos aglomerados de fibras, que poderá causar graves problemas caso o betão seja projectado, podendo causar o entupimento da mangueira e inclusive o cancelamento de todo o processo.

Por conseguinte, a percentagem ou volume crítico de fibras, é o principal parâmetro a ser controlado.

A definição do volume crítico, é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Ou seja, abaixo do volume crítico no momento em que haja a ruptura da matriz ocorre necessariamente uma queda na carga que o material tem capacidade de suportar (Figueiredo, 2000).



Acima do volume crítico, o compósito continua a aceitar níveis de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura da matriz. Este conceito encontra-se ilustrado na Figura 2.9, onde se encontram apresentadas curvas de carga por deflexão em prismas de betão com fibras rompidos à flexão.

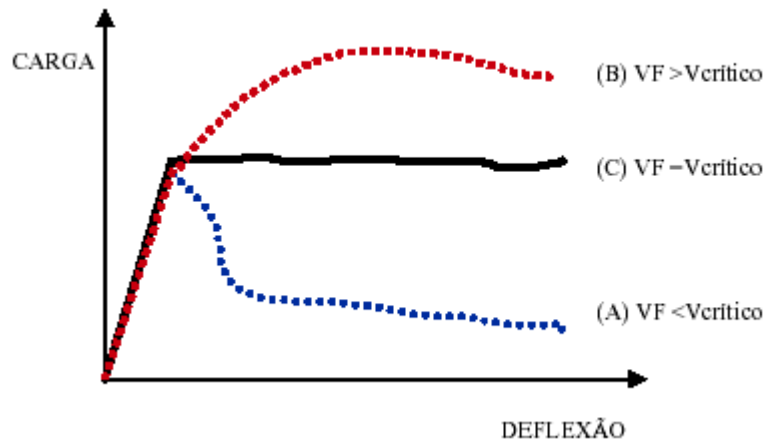


Figura 2.9 - Gráfico carga x deflexão de prismas de concreto ensaiados à flexão, contendo volume de fibras abaixo, igual e superior ao volume crítico (Figueiredo, 2000)

Existe um trecho elástico-linear inicial, correspondente ao estágio pré-fissurado da matriz do compósito, similar a um patamar de escoamento, onde se pode diferenciar o comportamento do betão reforçado com teores abaixo, acima e igual ao volume crítico, como se pode observar pela Figura 2.9.

A aplicação deste betão reforçado com fibras, tem vindo a intensificar-se, sendo muito usado em pavimentos de estradas, pátios de aeroportos e em pistas, pois permitem diminuir a espessura das lajes e reduzir a fissuração (Mindess, 2002).

Devido às propriedades que atribuem ao betão, as fibras de aço constituem uma armação muito efectiva na realização de pavimentos, lajes e em muitas das aplicações do betão projectado. Fabricadas a partir de arame trefilado, de aço de baixo teor em carbono e caracterizadas pelo alto limite elástico (800-1500 MPa), permitem habitualmente substituir totalmente a armadura tradicional do betão à base de malhas electrossoldadas e aço nervurado (Fibra de aço. Consultado a 17 Fevereiro 2010, disponível em [http://www.constructalia.com/pt\\_PT/catalogo-de-produtos](http://www.constructalia.com/pt_PT/catalogo-de-produtos)).

O Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA) é um material composto, com vantagens e propriedades específicas que representam um notável benefício para o universo da construção, se comparado com os métodos tradicionais de armadura (Fibra de aço. Consultado 17 Fevereiro 2010, disponível em [http://www.constructalia.com/pt\\_PT/catalogo-de-produtos](http://www.constructalia.com/pt_PT/catalogo-de-produtos)):



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

- Superiores propriedades mecânicas; maior resistência à flexão, tracção e resistência ao corte
- Grande capacidade para suportar cargas
- Controlo eficaz dos fenómenos de fissuração e retracção do betão
- Excelente resistência aos impactos e à fadiga
- Ductilidade
- Excelente resistência contra a corrosão
- Aplicação rápida e simples
- Substituição da malha electrossoldada, eliminando os riscos de colocação errada
- Garante um reforço homogéneo e tridimensional mais eficaz
- Melhora o comportamento e estabilidade das juntas
- Permite reduzir o número de juntas de retracção
- Não precisa de bomba, dado que, a betonagem pode ser efectuada directamente desde o camião
- Integra-se facilmente no betão, quer no local da betonagem quer na central de betão
- Se necessário, pode ser bombeado até mesmo em altas dosagens
- Não exige tratamentos especiais. Aplicam-se as técnicas tradicionais de espalhamento e acabamento
- Economia. Na maioria dos casos, para a realização de pavimentos de betão, representa uma importante poupança de materiais

As fibras podem assegurar melhor qualidade do betão em zonas de elevada concentração de armaduras de resistência ao corte, dado ser possível substituir parcialmente, estribos e cintas por fibras de aço (Barros et al, 2003).

### 2.5.2 - A Interacção Fibra-Matriz

Segundo Swamy (1976), a aderência das fibras introduzidas no betão é apenas parcial. Este fenómeno deve-se à perda de humidade durante o processo de fabricação, às alterações no volume, e, às reacções superficiais entre as fibras e a matriz, com o consequente aparecimento de tensões internas no sistema.

A aderência das fibras, produz-se através de dois tipos de fenómenos:

- Químicos, através de reacções superficiais entre o betão e as fibras
- Físicos, em que se combina a fricção com a adesão e o travamento mecânico.

As fibras de aço após serem adicionadas ao betão, promovem o aumento da resistência do compósito, dificultando a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade.



Contudo, esta questão não é tão linear, e, quando submetido a esforços de tracção, o betão que possui uma reduzida capacidade de resistência a esse mesmo esforço, possui também uma grande dificuldade de interromper a propagação das fissuras, se esse esforço lhe for aplicado.

Logo, pode-se associar a reduzida capacidade de resistência à tracção à muito maior dificuldade do betão interromper a propagação das fissuras quando é submetido a este tipo de tensão (Mehta e Monteiro, 1994).

A transversalidade da direcção de propagação de fissuras em relação à direcção principal da tensão, causa esse fenómeno, como se pode observar pela Figura 2.10.

De facto, a perda de eficiência da fibra inclinada em relação ao plano de ruptura, pode ser ainda maior para o conjunto, caso a mesma não apresente ductilidade suficiente. Isto ocorre pelo elevado nível de tensão de corte a que a fibra é submetida nesta situação. Se ela não for capaz de se deformar plasticamente, de modo a alinhar-se ao esforço principal, acaba rompendo-se por corte (Figueiredo, 2000).

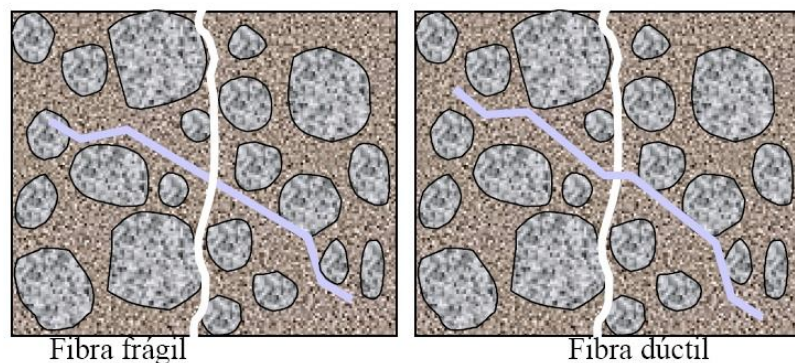


Figura 2.10 - Comportamento entre fibras dúcteis e frágeis quando inclinadas em relação à superfície de ruptura (Figueiredo, 2000)

De acordo com Figueiredo (2000), o melhor entendimento da influência que a junção das fibras exerce no desenvolvimento do betão, passa por compreender a actuação das fibras no interior da matriz, pois o betão sendo um material frágil é sempre susceptível à concentração de tensões, quando do surgimento de uma fissura e da sua propagação, que na matriz, aumenta Figura 2.11.

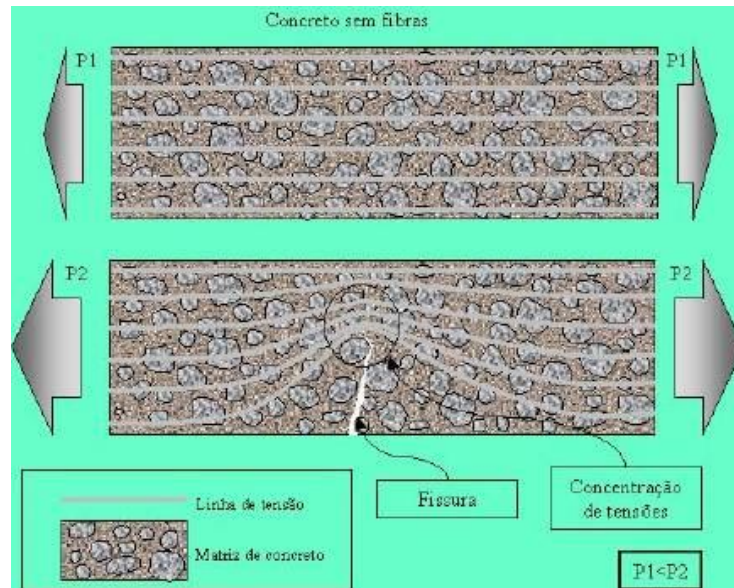


Figura 2.11 - Esquema de concentração de tensões para um betão sem reforço de fibras (Figueiredo, 2000)

Facilmente se depreenderá, que a dosagem de fibras deve estar em equilíbrio com a matriz de betão, pois o nível de tensão que as fibras conseguem transferir pelas fissuras, depende da quantidade de fibras e inclusive do seu comprimento.

Como já referido, o betão tem um comportamento marcadamente frágil, materializado no momento da ruptura do material, e, em que existe um aumento progressivo na concentração de tensões. O aparecimento de uma fissura, representa um entrave à propagação de tensões, que na Figura 2.11, se encontra representada pelas linhas de tensão (Figueiredo, 2000).

Este entrave, irá implicar que as tensões tenham a sua maior concentração na extremidade da fissura, e caso esta tensão seja superior à resistência da matriz, o material entrará em ruptura instantânea (Figueiredo, 2000).

Podemos por conseguinte afirmar, que a capacidade resistente do betão diminui com o aparecimento de fissuras. Com a adição das fibras ao betão, o comportamento frágil que o caracteriza deixa de fazer sentido, pois as fibras vão ter como função a transferência de tensões através das fissuras, diminuindo nas extremidades das fibras, a concentração de tensões.

Desta forma reduz-se a velocidade com que as fissuras se propagam, apresentando o betão alguma aptidão portante pós-fissuração, passando a concentração de tensões a ser distribuída de forma mais equilibrada (Figueiredo, 2000), como preconizado na Figura 2.12.

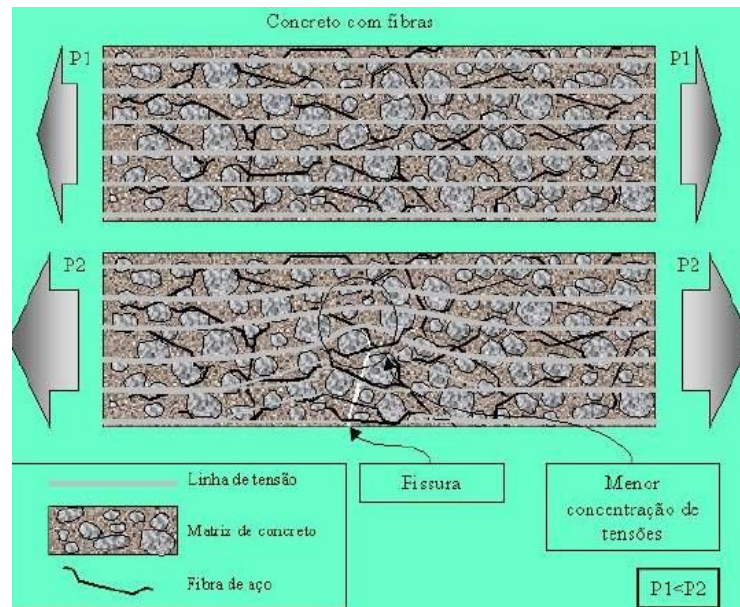


Figura 2.12 - Esquema de concentração de tensões para um betão com reforço de fibras (Figueiredo, 2000)

O aditamento de fibras à matriz de betão, vai permitir em caso de fissuração, o fechamento da mesma, pois impõe uma resistência à abertura da própria fissura, dependendo esta questão, da capacidade das fibras promoverem o efeito de interligação das partes fissuradas. Uma das vantagens do reforço proporcionado pelas fibras, é o facto de estas se distribuírem aleatoriamente no material, reforçando toda a peça, e não uma determinada posição, como ocorre com armaduras convencionais (Figueiredo, 2000).

Assim que se principia o crescimento de cada nova fissura, a área disponível de suporte de carga é reduzida, causando um aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras. Logo, a ruptura na tracção é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras, como ocorre quando o betão é comprimido (Mehta e Monteiro, 1994).

Resumidamente podemos dizer que, a principal razão pela qual se introduz fibras no betão, é devido:

- Aumento significativo da ductilidade da mistura;
- Melhor controlo da fendilhação;
- Aumento da energia de absorção;
- Maior resistência aos choques térmicos e mecânicos.

O comprimento da fibra deve ainda possuir compatibilidade dimensional com o agregado grosso, o que aumentará a probabilidade das fibras interceptarem possíveis fissuras (Barros, 2009), como representado na Figura 2.13.



Segundo Chenkui e Guofan (1995), as fibras tendem a acomodar-se na interface entre o agregado grosso e a matriz, onde há uma maior probabilidade da fissura se desenvolver.

Assim, se as fibras são muito curtas não interceptam as fissuras, e, se as fibras são muito longas, prejudicam as propriedades do betão no estado fresco, afectando consequentemente, as propriedades no estado endurecido. Desta forma, recomenda-se que a relação entre o comprimento da fibra e a dimensão máxima do agregado grosso deva estar na faixa de 1,5 a 2,0 (Barros, 2009).

Existem estudos que relatam que a máxima dimensão dos agregados não deve ser superior a 20 mm (Evangelista, 2003), porém, alguns estudos em BRFA já vêm sendo desenvolvidos com a utilização de maior agregado grosso, com dimensão máxima de 40 mm (Chenkui e Guofan, 1995).

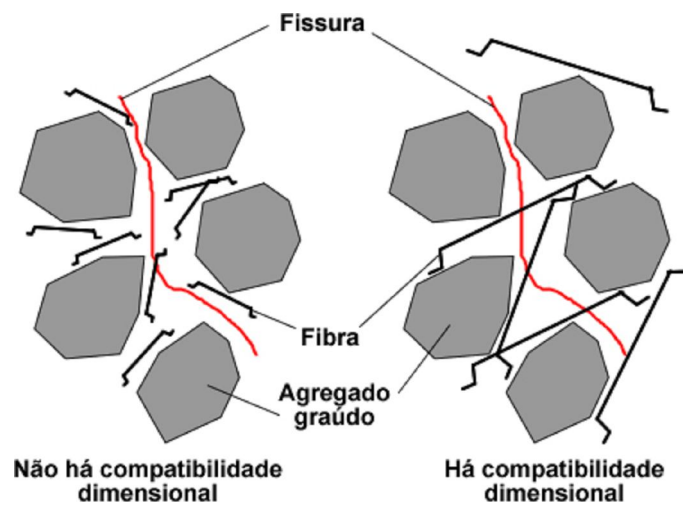


Figura 2.13 - Probabilidade de interceptação da fissura em função da compatibilidade dimensional entre fibra e agregado grosso (Barros, 2009)

### 2.5.3 - Propriedades do Betão Reforçado com Fibras no Estado Fresco

#### 2.5.3.1- Enquadramento

As propriedades do betão reforçado com fibras no estado fresco, estão directamente relacionadas com a quantidade de fibras, a sua esbelteza, a geometria e a própria composição do betão.

A forma e esbelteza das fibras, são fundamentais para a aderência ao betão.

Nas lajes, é possível fazer uso das fibras para substituir a malha electrossoldada que é usual aplicar-se, sobretudo com aplicação em pavimentos, pois a sua distribuição por toda a laje e em toda a sua espessura, permite realmente ajudar a controlar a fissuração constituindo um



obstáculo à mesma. Desta forma, são também controlados os deslocamentos das várias partes em que a laje fica dividida, contrapondo com a ocasional má aplicação da malha electrossoldada, que é colocada sobre o solo na face inferior da laje.

Podemos portanto concluir, que a adição das fibras ao betão no estado fresco, altera o comportamento do betão pós-fissuração.

Devido aos vários factores envolvidos, algumas das propriedades do betão reforçado com fibras, não são fáceis de avaliar.

### 2.5.3.2 - Trabalhabilidade

Tendo em vista a trabalhabilidade, o comportamento do betão com fibras, é em tudo semelhante ao do betão sem fibras. No entanto, durante o processo de aplicação ou vibração do betão, são essenciais cuidados especiais devido à tendência de orientação das fibras, que ocorre segundo determinadas direcções, e que são dependentes da intensidade com que é efectuada a vibração, da altura da queda do betão aquando da sua projecção, e também da estanquidade da cofragem.

Torna-se possível entender, que de facto a adição de fibras ao betão no estado fresco, interfere na trabalhabilidade, alterando as condições de consistência do betão, pois há um aumento da área superficial em que é necessária uma quantidade superior de água de amassadura.

Quanto mais pequeno for o diâmetro da fibra, mais elevada será a influência da mesma na perda da fluidez.

Deve-se considerar também que a adição de baixos teores de fibras, altera as condições de trabalhabilidade sem necessariamente reduzir a compactação do material (Ceccato et al, 1997) e (Figueiredo, 2000).

## 2.5.4 - Propriedades do Betão Reforçado com Fibras no Estado Endurecido

### 2.5.4.1- Enquadramento

As propriedades do BFRA no estado endurecido, estão relacionadas com as características comportamentais de um composto, constituído por betão e fibras.

O módulo de elasticidade e a resistência mecânica, são as duas propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao betão (Figueiredo, 2000).



#### 2.5.4.2 – Resistência à Compressão

Com a introdução de fibras no betão, não se pretende alterar a sua resistência à compressão. Contudo, e como referido anteriormente, dado que as fibras actuam como ponte de transferência de tensões através de fissuras, produzidas por esforços de tracção ou corte como ocorre no ensaio de compressão, o betão também apresentará uma melhoria quanto à tenacidade na compressão (Figueiredo, 2000).

Segundo Zangelmi Jr. (1999), e de acordo com o estudo experimental que realizou, as variações nas características elásticas nos valores de resistência do betão não são significativas, quando do incremento do teor de fibras.

Por compressão da matriz, o gasto energético pós-fissuração, denotará diferenças significativas, dependentes do direccionamento preferencial das fibras (Figueiredo, 2000).

Atis and Karahan (2009), realizaram um estudo sobre as propriedades mecânicas do betão reforçado com fibras, com cinzas volantes, em que verificaram que a adição de fibras de aço à mistura de betão, não melhorou a resistência à compressão a longo prazo, observando ainda que em geral, apenas pequenos aumentos (cerca de 10%) ocorriam na resistência à compressão, com a incorporação do teor de fibras.

De acordo com Mindess (1995), quando as fibras são empregues no betão em teores inferiores ao volume crítico, têm um efeito mínimo na resistência estática do betão, ou seja, entre outras propriedades afecta pouco a resistência à compressão.

#### 2.5.4.3 – Resistência à Tracção

Para que as fibras tenham uma influência efectiva na resistência à tracção do BRFA, independentemente do tipo de fibra aplicada, deverá esta, possuir uma resistência à tracção duas a quatro vezes superior à resistência à tracção da matriz de betão (Naaman, 2000).

Quando comparado com o betão simples, e de acordo com os dados do estudo realizado por Atis e Karahan em 2009, as fibras de aço não têm efeitos significativos na resistência à tracção do BRFA, com um volume de fibras de 0.25% e 0.5%. Contudo, as melhorias da ordem dos 15%, iniciam-se com um volume de fibras de 1.0%, sendo o incremento de melhorias ainda mais elevado, da ordem dos 30% a 66%, com 1.5% de volume de fibras.

No caso do BRFA ser submetido ao esforço de tracção, e, conseqüentemente ocorrer fissuração, as fibras impõem uma resistência à abertura da mesma, através do processo de transferência da tensão, já explanado no ponto 2.5.2.



#### 2.5.4.4 - Tenacidade à Flexão

Sendo as fibras de aço confeccionadas num material resistente e dúctil, quando se incorporam no betão, podem inibir a propagação de fissuras, e por consequência evitar a ruptura da matriz de betão, de características marcadamente frágeis (Jonhston, 1994).

Evitando a propagação de fissuras, as fibras de aço promovem o comportamento do betão como um material dúctil, observando-se um aumento da área sob a curva carga x deslocamento, como preconizado na Figura 2.14. A propriedade que esta área caracteriza, é frequentemente denominada de tenacidade, representando o trabalho de fractura ou a capacidade de absorção de energia do BRFA (Jonhston, 1994).

Poderá depreender-se, que o aumento do volume de fibras, aumentará a capacidade de absorção de energia, aumentando assim a tenacidade. Claro que deverá ter-se sempre presente, a aplicação de um volume pequeno e pré-definido de fibras, para não comprometer a trabalhabilidade do BRFA.

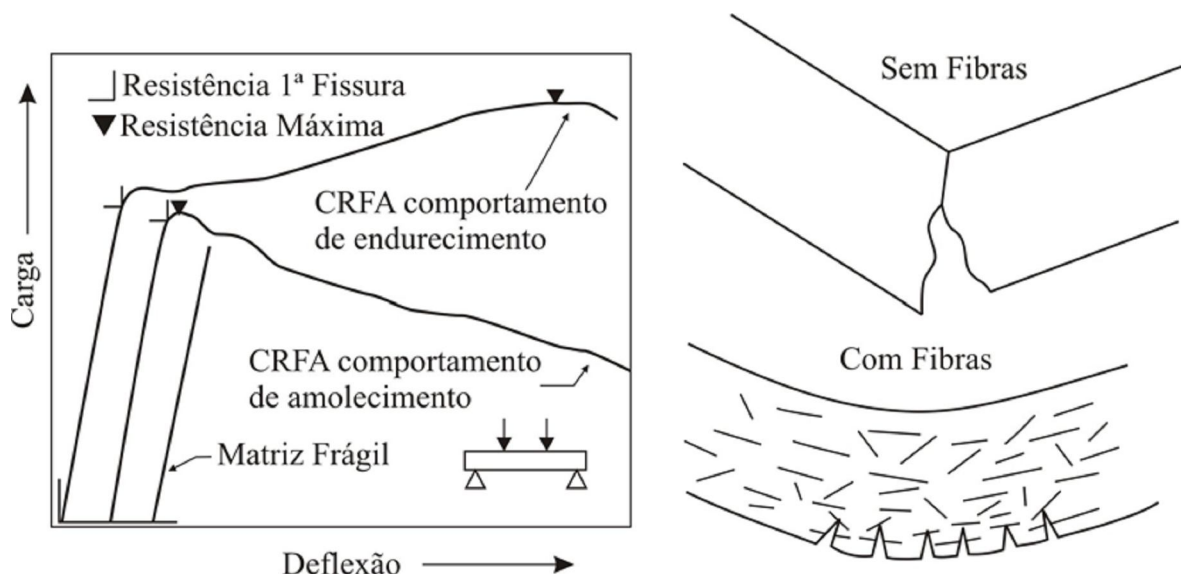


Figura 2.14 - Curva carga x deslocamento para o betão convencional e o betão reforçado com fibras de aço (Jonhston, 1994)

#### 2.5.4.5 - Durabilidade

A durabilidade do BRFA, é muitas vezes posta em causa, e segundo Figueiredo (2000), as dúvidas não estão completamente deslindadas. Com as possibilidades deste tipo de betão, em túneis e pavimentos entre outros, será natural observarem-se afloramentos de fibras oxidadas.



Parece evidente, que a corrosão das fibras está associada aos efeitos de carbonatação do próprio betão. Contudo, tendo as fibras um diâmetro diminuto, a quantidade de óxidos que se produzem, não se revela suficiente para deteriorar a superfície e danificar a superfície do betão, estando assim garantida a integridade do recobrimento e a segurança no interior do pavimento.

Segundo Helene (1986), apenas com a existência de uma diferença de potencial na armadura, devida à humidade, tensão no aço, diferenças de concentrações iónicas, ou ainda, tensão no betão, será possível haver corrosão na armadura existente no betão. Quanto menores as dimensões da armadura aplicada no betão, como é o caso das fibras que são de pequenas dimensões, maior será a dificuldade no surgimento de uma diferença de potencial (Figueiredo, 2000).

Independentemente do tipo de fibras incorporadas no betão, estas reduzem a exsudação e restringem a propagação de fissuras no betão (Tanesi, 1999).

Directamente relacionado com esta questão, está o aumento da resistência à entrada de agentes corrosivos e agressivos, com o conseqüente aumento da durabilidade da estrutura (Chanvillard et al, 1989).

#### 2.5.4.6 - Ensaio à Flexão

No caso dos betões reforçados com fibras de aço, é muito difícil realizar a determinação da tensão após a fissuração da matriz.

Diversas metodologias de ensaios de flexão têm sido propostas no sentido de quantificar o acréscimo da ductilidade que se observa quando se adiciona fibras ao betão. Como tal, surgiram diferentes parâmetros relacionados com a capacidade de absorção de energia do compósito.

De entre as várias metodologias destaca-se o método proposto pela ASTM e pelo RILEM.

##### 2.5.4.6.1 - Ensaio segundo a ASTM C 1018

A metodologia proposta pela American Society for Testing and Materials (ASTM C 1018) em 2000, para determinação da resistência à tracção na flexão do betão, é descrita de seguida:

- Estes ensaios são realizados em provetes prismáticos carregados segundo quatro cutelos com dimensões:
  - Prisma  $b=h=100$ ;
  - $L=300$ ;
  - $c=350$ ;



Os parâmetros monitorizados são: Carga X deflexão média, medida no meio vão ou nos cutelos;

- A medida da tenacidade é obtida através da relação entre a energia absorvida para valores múltiplos da deflexão da primeira fissura por esta (índices de tenacidade) e factores de resistência residual.

Os índices de tenacidade obtidos pela norma ASTM C1018, correspondem à divisão do valor obtido para a área total abaixo da curva carga X deflexão, até um determinado nível de deflexão, pela área abaixo da mesma curva até o ponto de aparecimento da primeira fissura, correlacionada ao trecho elástico. Os pontos de delimitação das áreas são definidos como múltiplos da deformação obtida até a surgimento da primeira fissura ( $\delta$ ), conforme apresentado na Figura 2.15:

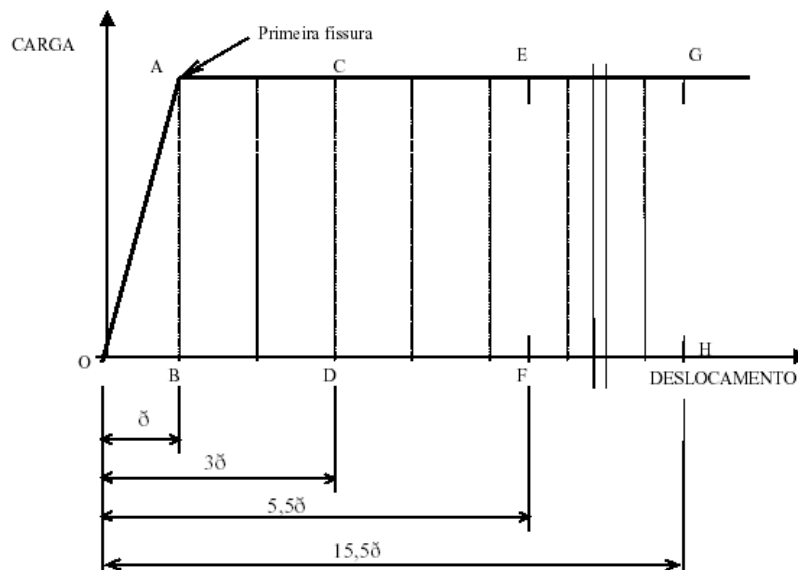


Figura 2.15 - Curva carga x deflexão tomando como referência o material elasto-plástico ideal, (norma ASTM C 1018, 1994)

Os vários índices correspondem a:

- I5 : à relação entre a área OACD e a área OAB, sendo que o ponto D corresponde a uma deflexão equivalente a três vezes a deformação da primeira fissura ( $\delta$ );
- I10 : à relação entre a área OAEF e a área OAB, sendo que o ponto F está colocado a 5,5 x  $\delta$ ;
- I30 : corresponde à relação entre a área OAGH e a área OAB, sendo que o ponto H corresponde à deflexão de 15,5 x  $\delta$ .



A ASTM C 1018, recomenda que o ponto final da deflexão e o respectivo índice, sejam seleccionados de modo a reflectir o nível de fissuração e deflexão requeridos em serviço. Estes índices de tenacidade são valores adimensionais e fornecem uma referência da proximidade do comportamento elasto-plástico perfeito do material, em relação ao comportamento elasto-plástico ideal.

A principal vantagem destes índices, é devida ao facto de avaliarem o comportamento do conjunto fibra/matriz (compósito), e apresentam como principais desvantagens uma forte dependência da determinação da deflexão onde ocorre a primeira fissura e uma grande influência da região de instabilidade pós-pico.

A partir dos índices de tenacidade ( $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{30}$ ), é possível determinar as relações de tenacidade conforme o apresentado pela norma ASTM C1018, de acordo com a equação:

$$R_{a,b} = 100 * (I_b - I_a) / (b - a)$$

em que,

$R_{a,b}$  = relação de tenacidade entre os índices com referência "a" e "b".

$I_a$  e  $I_b$  = índices de tenacidade com referência "a" e "b".

#### 2.5.4.6.2 - Ensaio segundo o RILEM

De acordo com as recomendações do Comité RILEM TC 162- TDF (2000b) apresenta-se uma metodologia de ensaio, bem como parâmetros que caracterizam a ductilidade do betão com fibras.

Os objectivos destes métodos de ensaio de dimensionamento são:

- Avaliar o limite de proporcionalidade (LOP);
- Quantificar os dois parâmetros de resistência equivalente em flexão, que identificam o comportamento do material até determinada flecha.

Numa primeira fase, foram propostos dois parâmetros, que traduzem a capacidade de absorção de energia que o material apresenta até aos dois níveis de deformação:

- $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$ , que representam respectivamente a resistência equivalente dois e três, o primeiro para verificação dos estados limites de utilização e o segundo nas verificações dos estados limites últimos.

Por último, foram propostos mais dois outros parâmetros (RILEM TC 162- TDF 2000b):

- $f_{R1}$  e  $f_{R4}$ , designados respectivamente a resistência residual à flexão um e quatro, que representam a resistência à flexão que o material oferece para dois níveis de deformação.



A capacidade de absorção de energia  $D_{BZ,2}$  e  $D_{BZ,3}$ , é igual à área sob a curva carga-flecha, até à flecha de  $d_2$  e ( $d_3$ ), e é constituída por duas partes, correspondentes à contribuição:

- Do betão simples:  $D_{BZ}^b$  (Nmm);
- Das fibras:  $D_{BZ,2}^f$  (Nmm) e  $D_{BZ,3}^f$  (Nmm)

Na Figura 2.16, representa-se uma curva típica força-flecha que se obtém de um ensaio de flexão. Nesta figura,  $F_L$  é o maior valor de carga registado até uma flecha de 0.05mm e  $\delta_L$  é a flecha correspondente ao valor de  $F_L$  (Barros et al, 2006).

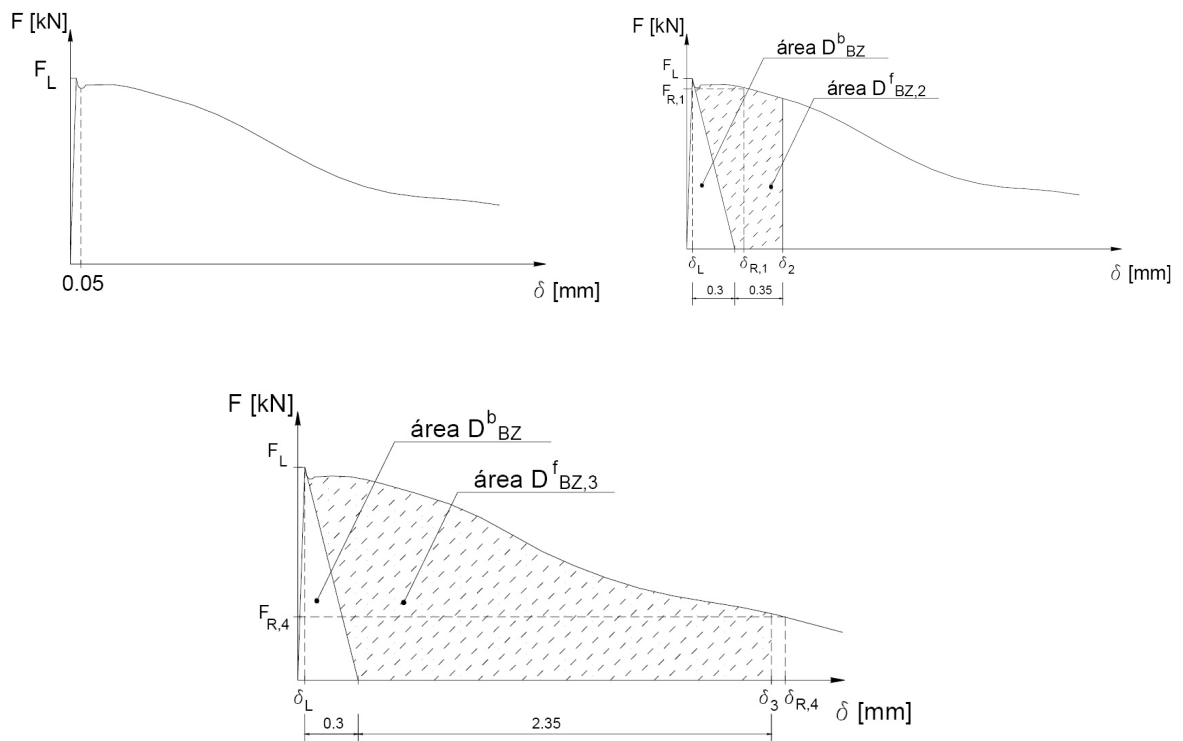


Figura 2.16 - Relação típica força-flecha de um ensaio de flexão (Barros et al, 2006)

Os parâmetros  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$ , estão relacionados com a capacidade de absorção de energia do material até à flecha  $\delta_2 = \delta_L + 0.65 = 0.75$  mm e  $\delta_3 = \delta_L + 2.65 = 2.70$  mm, respectivamente (Barros et al, 2006). A resistência equivalente em flexão pode ser determinada através dos gráficos anteriores, por meio das seguintes expressões, admitindo uma distribuição linear de tensões na secção do provete (Barros et al, 2006) e (Pereira de Oliveira et al, 2003):

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \frac{(D_{BZ,2}^f)}{0.50} \frac{L}{bh^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \frac{(D_{BZ,3}^f)}{2.50} \frac{L}{bh^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

L - comprimento do provete; b - espessura do provete; h - altura do provete



Através do seguinte modelo de cálculo, obtivemos o paço de carga utilizado:

$$\delta = (F \cdot L^3) / (48 \cdot E \cdot I) \Rightarrow F = (\delta \cdot 48 \cdot E \cdot I) / L^3$$

Sabendo que,

$$\delta = 0.2 \text{ mm/min} = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ m/min}$$

$$E = 9.5 \cdot \sqrt[3]{f_{cmj}}, \text{ em que } f_{cmj} = 24 \text{ KN}$$

$$E = 27.45 \text{ GPa}$$

$$I = bh^3 / 12 = 0.1^4 / 12 = 8.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$L = 0.45 \text{ m}$$

$$F = 24.08 \text{ KN / min}$$

$$F = 0.4 \text{ KN / seg}$$

Dimensões: 150\*150 mm (100\*100 mm), com os apoios distanciados de 450mm.

Comprimento das Fibras:  $\lambda_f < 60 \text{ mm}$

Dimensão Máxima do Inerte:  $D_{m\acute{a}x} < 32 \text{ mm}$

A análise dos resultados é feita a partir da análise de relações típicas dos ensaios de flexão, em que  $F_u$  representa a carga correspondente ao limite de proporcionalidade - força máxima registada até à flecha máxima de 0.05 mm.

Para o ensaio à flexão, a meio vão da viga, numa das suas faces laterais deve ser aplicado um entalhe com 2-3 mm de largura e 25 mm de profundidade, apresentando-se nas Figuras 2.17 e 2.18 o esquema de suporte e de aplicação da carga:

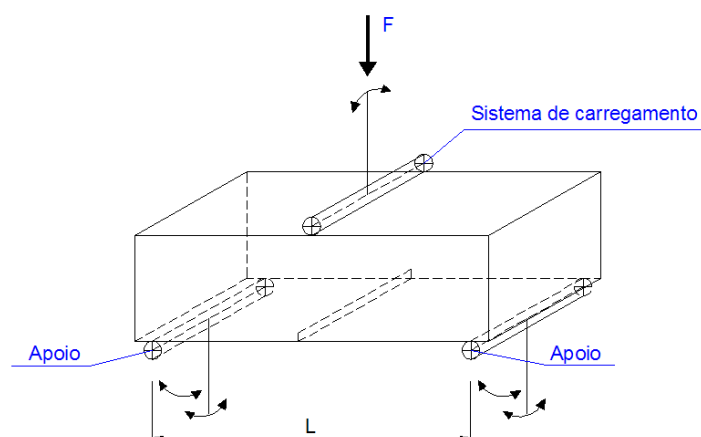


Figura 2.17 - Esquema de suporte da carga para o ensaio à flexão segundo o RILEM (TC 162-TDF 2000a)

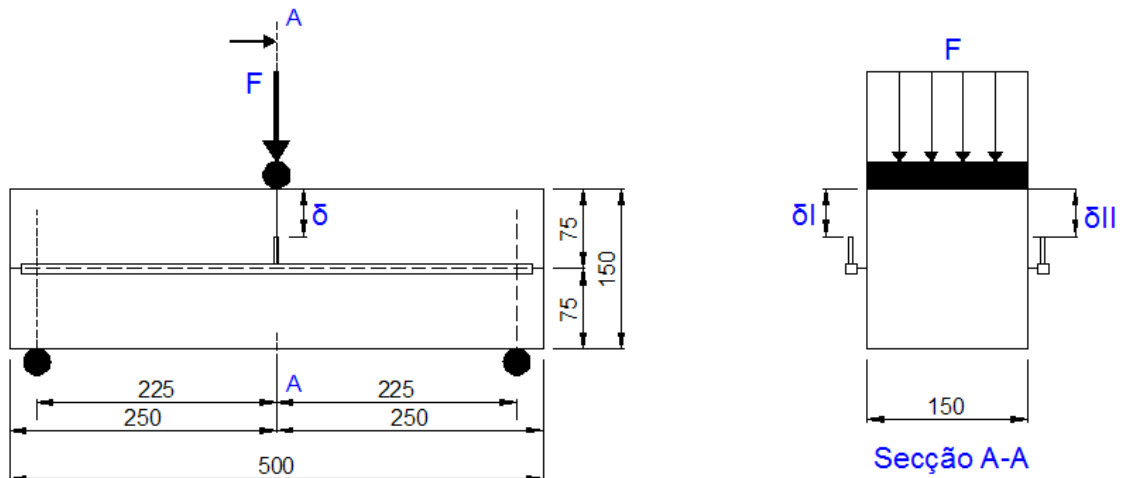


Figura 2.18 - Esquema de aplicação da carga para o ensaio à flexão segundo o RILEM (TC 162-TDF 2000a)

Para se garantir uma maior eficácia no levantamento da curva de carga X deflexão, é recomendável a utilização do controle electrónico de deslocamento através de um transdutor do tipo LVDT (Linear Voltage Differential Transducer).

Requisitos do ensaio:

- O equipamento deve permitir o controlo dos deslocamentos;
- A rigidez do sistema deve ser suficiente elevada de forma a assegurar a estabilidade do ensaio;
- A deformação deve ser medida em ambas as faces do provete ( $\delta_1$  e  $\delta_n$ );
- O transdutor de força deve ser cuidadosamente montados para minimizar o efeito da rotação;
- Os transdutores de força devem capazes de ler forças de 0.1 kN com precisão;
- Os transdutores de deslocamento devem ser capazes de ler 0.01mm com precisão.

Após a elaboração de todos os requisitos para a execução do ensaio, deve fazer-se o ensaio a uma velocidade de deformação de 0.2 mm/min até à rotura do provete, devendo ser ensaiados no mínimo 3 provetes.



## 2.6 - Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

### 2.6.1 - Considerações Gerais

O BACRFA, é um material de matriz cimentícia no qual são adicionadas pequenas fibras de aço, discretas, dispersas e aleatoriamente distribuídas. A principal função das fibras é absorver as forças libertadas na ocorrência de micro fissuração do betão, transferindo as tensões entre as duas faces agora separadas.

A possibilidade da adição de fibras metálicas nos betões, tem contribuído significativamente para a melhoria das propriedades mecânicas do betão no estado endurecido, promovendo assim uma melhoria na sua durabilidade.

Mas a percentagem de fibras, condiciona também o desempenho da mistura de betão auto-compactável, de tal maneira que caso se utilize uma elevada percentagem de fibras a mistura torna-se viscosa, contrariando a sua auto-compactabilidade.

As fibras de aço, são elementos descontínuos produzidos com uma variada gama de formatos, dimensões e mesmo de tipos de aço.

Actualmente, os desenvolvimentos nas fibras de aço, são constantes e, são facilmente perceptíveis pelas inúmeras patentes existentes. Estas variam, quer em termos de aço usado, quer em termos de processo de fabrico, quer inclusive na sua forma.

Neste estudo, utilizaram-se as fibras metálicas que a figura 2.19 documenta, tendo presente que de acordo com a esbelteza ( $l_f/d_f$ ),  $l_f$  é o comprimento e  $d$  é o diâmetro da fibra.

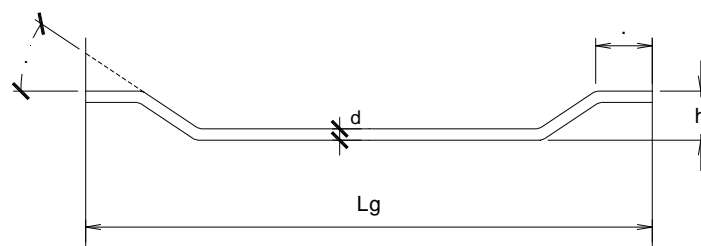


Figura 2.19 - Esquema de fibra metálica utilizada

### 2.6.2 - Conhecimento Actual Sobre o BACRFA

#### 2.6.2.1 - Enquadramento

Este item, pretende dar conta da quantidade de opiniões existentes entre os diversos investigadores, autores ou colaboradores, que tendo feito uma incursão no estudo do betão



auto-compactável reforçado com fibras de aço, possam ter contribuído para um conhecimento mais aprofundado acerca da questão, e conseqüentemente para um entendimento mais esclarecedor, que permita avaliar as vantagens ou desvantagens da utilização da incorporação das fibras no betão auto-compactável.

### 2.6.2.2 - As Opiniões dos Investigadores

Conjugando as vantagens do betão auto-compactável com as que advêm da adição de fibras a materiais de matriz cimentícia, obtém-se um material com desempenho elevado, designado de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). A utilização de fibras de aço aumenta a ductilidade do betão, retarda ao aparecimento e a propagação de fendas, aumenta significativamente a absorção de energia na fase pós-fendilhada e reduz a largura de fendas (Santos, 2000).

Segundo Pereira de Oliveira et al (2003), os volumes de fibras e a sua esbelteza ( $l_f/d_f$ ), interagem com os agregados grossos, prejudicando a mobilidade do betão. Em suma, a adição de fibras torna o betão mais susceptível aos problemas de bloqueios, aumentando a viscosidade e dificultando o alcance da auto-compactabilidade.

No entanto, a metodologia a implementar para quantificar a dosagem dos materiais constituintes deste tipo de betão, é forçosamente mais complexa do que a necessária para um betão convencional, uma vez que as exigências no estado fresco são substancialmente mais restritivas, o número de componentes é mais elevado (adjuvantes e adições em maior número), e a sensibilidade de uns à presença dos outros é elevada (Camões et al, 2004).

O betão auto-compactável reforçado com fibras metálicas é perfeitamente exequível com fibras de aço de comprimento  $l_f$  da ordem de 38 mm e com volumes máximos de fibras de 60 a 80 kg/m<sup>3</sup>. Para tornar possível o escoamento do BACRFA e garantir a estabilidade da mistura fresca, o teor de argamassa no betão deve ser maior, com um mínimo de 65%. Um teor óptimo deve ser constatado experimentalmente, uma vez que cada esbelteza e volume de fibras necessitam de um teor de argamassa mínimo para assegurar o envolvimento dos agregados grossos e das fibras, bem como para fornecer a capacidade de enchimento ao betão (Pereira de Oliveira e Castro-Gomes, 2001).

Alguns obstáculos, podem ser observados com a incorporação de fibras no betão auto-compactável, onde o mais relevante é a perturbação na habilidade do fluxo do betão no estado fresco (Camões et al, 2008).

Segundo Tviksta (2000), a dosagem de um BACRFA, pode ser obtida a partir de uma mistura de BAC já existente, devendo esta possuir preferencialmente um slump-flow entre 650 e 700mm.

Sahmaran e Yaman (2007) estudaram o comportamento no estado fresco e as propriedades mecânicas do concreto auto-compactável com adição de um alto volume de sílica activa e reforçado com fibras de aço.



Foram utilizadas cinco misturas de BAC, duas como referência, sendo uma com sílica activa, substituindo 50% da massa de cimento, e outra sem sílica activa e três misturas de CAA reforçado com fibras de aço com adição de sílica activa, sendo: uma somente com o tipo de fibra SF1 (secção transversal circular, ancoragem em gancho nas extremidades, comprimento de 30 mm e  $l/d=55$ ), uma somente com o tipo de fibra SF2 (fibra de aço recta, secção transversal circular, comprimento de 6 mm e  $l/d=37,5$ ), e outra mistura com os dois tipos de fibras, SF1 e SF2. A quantidade de fibras de aço foi constante para todas as misturas: 60  $\text{kg/m}^3$ . No caso da dosagem contendo simultaneamente SF1 e SF2 foram utilizados 30  $\text{kg/m}^3$  para cada tipo de fibra. Os autores concluíram que a adição de um alto volume de sílica activa proporcionou um aumento da trabalhabilidade característica do BAC. Por outro lado, o alto volume de sílica activa adicionado à mistura ocasionou redução da resistência à compressão, devida à baixa actividade pozolânica da sílica, sendo tal efeito parcialmente compensado pela utilização de fibras menores (SF2). Já as fibras maiores, ou seja, as fibras do tipo SF1 com ancoragem em gancho, apresentaram maior eficiência na tracção do betão. Além disso, verificaram que a geometria da fibra influencia as propriedades das misturas de BAC, não só no estado endurecido, mas também no estado fresco.

Grunewald e Walraven (2001), elaboraram um estudo com duas amostras de BAC de referência, em que constataram que com a adição das fibras, os betões auto-compactáveis apresentaram espalhamento não homogéneo (não circular), ou seja, impedimento da fluidez em algumas direcções, e concentração de partículas na região central do betão espalhado, Figura 2.20. Também verificaram que quanto mais fibras eram adicionadas, mais a deformabilidade do BAC era reduzida.

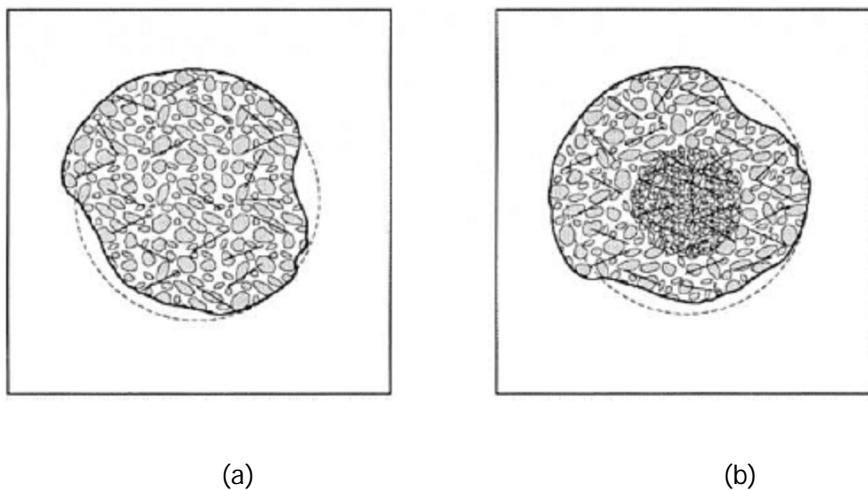


Figura 2.20 - Fluidez não homogénea do BAC com fibras de aço: a) Impedimento da fluidez; b) concentração de partículas na região central do betão espalhado (Grunewald and Walraven, 2001)

A característica da auto-compactabilidade do BACRFA, promove uma distribuição homogénea das fibras mesmo nos casos em que o volume de fibras é mais importante.



Este comportamento é singular deste tipo de betão, contrariando as distribuições de fibras que podem resultar nos betões normais reforçados com fibras compactados por vibração. Nestes é preciso compatibilizar a energia de vibração com a consistência do betão a fim de evitar a segregação das fibras. Betões auto-compactáveis reforçados com fibras de aço, são exequíveis com volumes de fibra até 1,5%. Esta constatação é indicadora da possibilidade de utilização desta tecnologia como um reforço adicional de paredes de alvenaria estrutural (Pereira de Oliveira et al, 2003).

Misturas de BACRFA são viáveis com o emprego de relações água/materiais finos em torno de 0,38, e com a utilização de superplastificantes à base de naftalenos (Pereira de Oliveira e Castro-Gomes, 2001).

Foi ainda verificado por Grunewald e Walraven (2001), que para evitar o bloqueio do betão, nos testes de passagem do BAC com fibras de aço por armaduras, os espaçamentos entre barras devem ser maiores em relação aos utilizados nos ensaios dos betões auto-compactáveis sem fibras.

Segundo Barros et al (2004), é possível conceber composições de BACRFA que reúnam as características necessárias à pré-fabricação de painéis-sandwich, tanto em termos de propriedades mecânicas em idades jovens ou menos jovens como em termos de trabalhabilidade e estabilidade da mistura enquanto no estado fresco, sem que para isso se tenha que recorrer a elevadas quantidades de cimento ou outros aditivos menos vantajosos em termos económicos e ambientais. Há, no entanto, a assinalar o extremo cuidado que se deve empregar na fase de formulação da composição, já que são inúmeros os factores que influenciam significativamente o desempenho deste tipo de material.

Altun et al. (2007), verificaram no seu estudo, sensíveis reduções nos módulos de elasticidade dos betões após a incorporação das fibras de aço.

Barros (2009), elabora um estudo em que constata com os resultados obtidos que, parte da pasta, que serviria para transportar o agregado grosso da mistura durante o fluxo do betão, é consumida no envolvimento das fibras, resultando numa menor extensão de espalhamento. Além disso, há o efeito físico das fibras no impedimento de fluxo do concreto, que causam resistência ao movimento pela engrenagem dessas com o agregado graúdo.

Segundo Gopalaratnam and Shah (1987), a eficiência das fibras de aço é tanto maior, quanto mais resistente for a micro estrutura da interface matriz-fibra, desde que não ocorra a rotura da fibra.

Através da análise de fotos de raio-X de corpos-de-prova de BACRFA, foi verificado que a distribuição das fibras é similar ao observado em BRFA (Tviksta, 2000).

Num momento da nossa história em que é recorrente a temática das catástrofes naturais, entre as quais, os sismos, e da construção sustentável, é recomendável a utilização de materiais de custo competitivo e que incluam componentes de relativo baixo valor energético na sua produção, e que tenham elevada capacidade de absorção de energia. Crê-se que o BACRFA seja um desses materiais (Camões et al, 2004).



## CAPÍTULO III - Programa Experimental

### 3.1 - Introdução

Alguns trabalhos de investigação têm testemunhado a exequibilidade do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (Groth e Thun, 2000) e (Grünwald e Walraven, 2001). Ambroise et al em 1999, determinaram um volume limite de fibras igual a  $80\text{kg/m}^3$ , sendo possível chegar-se aos  $100\text{kg/m}^3$  com fibras curtas ( $l_f=35\text{ mm}$ ).

A complexidade dos métodos propostos para a dosagem dos componentes do betão auto-compactável, bem como a ausência de uma directriz prática para a formulação de betão auto-compactável com fibras de aço, referenciado neste trabalho com as siglas BACRFA, conduziu à investigação de um parâmetro que possa servir de controlo da adequação das características do betão em causa.

A presença de fibras de aço na mistura pode ser pensada como um aumento da parcela considerada para a granulometria grossa e, deste modo, considerar que um conteúdo maior de agregados finos é necessário para volumes maiores de fibras. A dificuldade desta ideia está em estabelecer uma identidade dimensional de grão fictício para as fibras de diferentes relações entre o comprimento e o diâmetro,  $l_f/d_f$ .

Sendo assim, deve ser procurado um parâmetro que possa mensurar o estado de envolvimento tanto dos agregados grossos como das fibras de aço incorporadas à mistura.

Este parâmetro deve de forma simples e expedita, expressar uma característica reológica do betão, que deve ser confirmada com os testes adequados. Neste sentido, resolveu-se para suprimir etapas trabalhar directamente com a mistura de betão.

Propõe-se a observação de um teor óptimo de argamassa directamente na mistura de betão, durante o amassamento da mesma na betoneira, ao invés deste ser feito nas argamassas em separado.

Sabendo-se que a restrição do conteúdo de agregados grossos, como proposto nos métodos japoneses (Okamura e JSCE), é nada mais do que a definição de um teor de argamassa mínima na mistura, propõe-se que o parâmetro de controlo da composição do betão auto-compactável seja a relação de argamassa seca no betão seco. Esta é uma forma simples de apreciar o envolvimento dos grãos grossos, incluindo as fibras de aço, e de aferir um empilhamento granular adequado à fluidez desejada.

A relação de argamassa será objecto de observação nos estudos experimentais descritos a seguir.

Por forma a ser possível o relacionamento da esbelteza das fibras no comportamento do BACRFA, foram utilizadas fibras de 30mm e fibras de 60mm.



Contudo, é necessário saber de que modo os vários volumes de fibras afectam as propriedades e comportamento do BACRFA, nomeadamente a trabalhabilidade, que é a sua principal característica.

De modo a ser possível a obtenção de misturas com adequadas características de auto-compactabilidade, este estudo experimental decorre das seguintes premissas:

- Limitação do conteúdo de material grosso de modo a evitar colisões e choques entre as partículas
- Escolha de uma composição granulométrica devidamente seleccionada
- Aumento da percentagem de argamassa das misturas
- Diminuição da relação água/ materiais cimentícios
- Aumento da percentagem de superplastificante de maneira a aumentar a viscosidade da mistura

## 3.2 - Características dos Materiais Utilizados

O BAC utilizado no âmbito deste trabalho, é constituído por cimento, agregados finos e grossos, adições minerais, superplastificante e água.

### 3.2.1 - Cimento

Para realização das misturas constituintes das argamassas ensaiadas, foi utilizado um tipo de cimento designado II/B-L 32,5. A sua excelente trabalhabilidade e baixo calor de hidratação, tornam-no óptimo para este tipo de trabalho. É um cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência. Este cimento melhora a trabalhabilidade de betões e argamassas e permite uma redução da dosagem de água de amassadura. A classe 32,5 foi escolhida tendo em vista a compatibilidade da mesma com a aplicação do BACRFA como betão de enchimento em alvenarias estruturais, objecto de estudo não tratado nesta dissertação.

A massa volúmica do cimento medido em laboratório é de 3040 kg/m<sup>3</sup>. De forma a complementar a informação relativa à caracterização do cimento, apresentam-se os resultados fornecidos pelo fabricante (SECIL), relativos aos ensaios de controlo de produção na fábrica efectuados no mesmo mês em que os referidos cimentos foram produzidos. Os resultados do controlo incluem os ensaios mecânicos (Tabela 3.1), os ensaios físicos (Tabela 3.2) e os ensaios químicos (Tabela 3.3).



Tabela 3.1 - Ensaio Mecânicos dos Ligantes

LIGANTES	Ensaio Mecânicos (NP EN 196-1)				
	Idade (dias)	Resistências (MPa)			
		Flexão		Compressão	
		Mensal	Anual	Mensal	Anual
CEM II/B-L35,5N	2.00	3.30	3.90	17.10	19.20
	7.00	5.00	5.60	27.90	30.00
	28.00	6.50	6.90	38.20	39.20

Tabela 3.2 - Ensaio Físicos dos Ligantes

ENSAIOS FÍSICOS		LIGANTES	
		CEM II/B-L32,5N	
		Mensal	Anual
Peso Especifico (g/cm <sup>3</sup> )		2,97	3,02
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm	---	---
	63 µm	---	---
	45 µm	8,9	12,7
	32 µm	---	---
Superfície Especifica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) [NP EN 196-6]		4454	4617
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		26,4	26,1
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	133	129
	Fim	168	164
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		0,8	0,8
Índice de Brancura (0 a 100)		---	---
Observações: Anual - Valor médio dos últimos 12 meses			

Tabela 3.3 - Análise Química dos Ligantes

ANÁLISE QUÍMICA			LIGANTES	
			CEM II/B-L32,5N	
			Mensal	Anual
Perda ao Fogo	%	P.F.	11.00	10.70
Resíduo Insolúvel	%	RI	2.20	2.20
Óxido de Silício	%	SiO <sub>2</sub>	16.56	16.95
Óxido de Alumínio	%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.23	3.73
Óxido de Ferro	%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.64	2.68
Óxido de Cálcio	%	CaO	59.06	58.90
Óxido de Magnésio	%	MgO	3.00	2.74
Sulfatos	%	SO <sub>3</sub>	3.22	2.96
Óxido de Potássio	%	K <sub>2</sub> O	---	---
Óxido de Sódio	%	Na <sub>2</sub> O	---	---
Cloretos	%	Cl <sup>-</sup>	0.03	0.02
Cal Livre	%	---	1.20	1.23
N/D (não doseados)	%	---	0.35	1.33
Observações: Anual - Valor médio dos últimos 12 meses				



### 3.2.2 - Cinzas Volantes

As adições minerais utilizadas, neste caso cinzas volantes, foram incorporadas no betão com o intuito de reduzir o calor de hidratação e melhorar a resistência, a trabalhabilidade e a durabilidade.

Trata-se de um pó fino, contendo essencialmente partículas esféricas e vítreas, pelo que os vazios deixados na argamassa pelos outros componentes, são ocupados pelas partículas das cinzas volantes, que são ligeiramente mais pequenas que as do cimento, mas substancialmente mais finas que as de outros componentes.

Decorrente do anteriormente descrito, a substituição parcial de cimento foi conseguida através do uso de cinzas volantes, que no presente caso foi proveniente da Central Termoeléctrica do Pêgo, concelho de Abrantes. A massa volúmica das cinzas volantes é de 2380 kg/m<sup>3</sup>.

A caracterização das cinzas volantes foi complementada a partir dos ensaios de controlo de produção efectuados pelo fabricante. As Tabelas 3.4 e 3.5 resumem, respectivamente, alguns dos parâmetros químicos e físicos das cinzas volantes fornecidas.

Tabela 3.4 - Características Químicas das Cinzas Volantes

CINZAS VOLANTES	
Características Químicas	Resultados (valores médios)
Inqueimados	3,8%
Cloretos (Cl <sup>-</sup> )	0%
Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	0.65%
Cal Livre (CaO livre)	0,14%
Observação: Os resultados apresentados foram obtidos a partir de valores fornecidos pela empresa BETECNA, para 15 amostras de cinzas volantes	

Tabela 3.5 - Características Físicas das Cinzas Volantes

CINZAS VOLANTES	
Características Físicas	Resultados (valores médios)
Finura (peneiro 45µm)	14.00%
Actividade Resistente a 28 dias	0.89
Actividade Resistente a 90 dias	159.00
Estabilidade Volumétrica (Le Chatelier)	0,5mm
Observação: Os resultados apresentados foram obtidos a partir de valores fornecidos pela empresa BETECNA, para 15 amostras de cinzas volantes	



### 3.2.3 - Superplastificante

Um superplastificante constituído por carboxilatos modificados produzido pela empresa SIKA, e comercialmente designado por Sika ViscoCrete-3000, foi usado neste estudo.

Segundo o fabricante, o adjuvante Sika ViscoCrete-3000, confere uma óptima dispersão do ligante e ao mesmo tempo melhora a sua coesão, mantendo o betão com uma consistência branda. As propriedades do betão com adição de SP, podem ser resumidas como se segue:

- Extremamente alta redução da água de amassadura (resultando daí alta densidade e impermeabilidade do betão endurecido).
- Excelente fluidez (resultando daí muito menos dificuldades e esforço na betonagem, quer na colocação, quer na compactação).
- Adequado para a produção de betão autocompactável (BAC).
- Melhor comportamento à retracção e à fluência

A Tabela 3.6, resume as características do superplastificante.

Tabela 3.6 - Características do Superplastificante

SIKA VISCOCRETE 3000	
Base	Carboxilatos modificados
Aspecto	Líquido levemente amarelado
Massa Volúmica	1,05±0,02Kg/l
PH	5,0±1,0
Dosagem para SCC	1,0% a 2,0% da massa do cimento

### 3.2.4 - Agregados Grossos e Agregados Finos

Na composição dos betões constituintes das misturas utilizadas no trabalho, os agregados grossos têm origem granítica e são de dois tipos, Brita 3-6 e a Brita 6-15.

Por sua vez, os agregados finos, as areias, mais concretamente a areia 01 e a areia do Tejo, usadas na confecção das misturas inerentes a este trabalho, interferem no comportamento do betão enquanto fresco, porquanto as suas características, nomeadamente a forma das partículas e a distribuição granulométrica são factores a ter em conta.

É importante constatar, que alterações na quantidade de areia provocam alterações na porosidade e na área superficial total de agregados, pelo que a aplicação da quantidade correcta de areia na confecção de um betão auto-compactável, é um passo fundamental.



Figura 3.1 - Conjunto de peneiros e peneirador de agregados



Figura 3.2 - Agregado grosso (Brita 6-15)

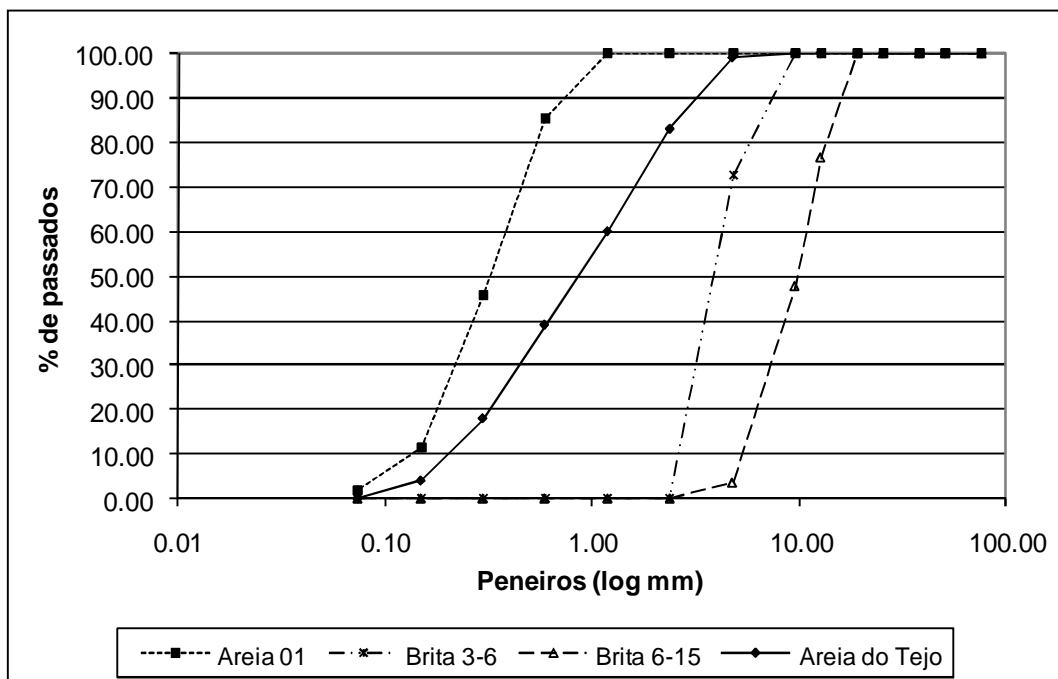
A Tabela 3.7, apresenta as características dos agregados finos e agregados grossos utilizados na confecção das misturas do betão auto-compactável:



Tabela 3.7 - Características dos agregados miúdos e agregados grossos

Material	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Areia 01	1,19	1,64	2600
Areia do Tejo	4,76	2,97	2450
Brita 3 - 6	9,52	5,24	2700
Brita 6 - 15	19,10	6,48	2700

A Figura 3.3, apresenta a curva granulométrica característica dos materiais utilizados na composição dos betões empregues neste estudo.





com esbelteza  $l_f/d_f=60$  e  $l_f/d_f=75$ , respectivamente. A tensão de cedência do aço destas fibras, é de aproximadamente 1100MPa.



Figura 3.4 - Fibras de Aço DRAMIX ZC 60/0.80

### 3.3 - Método de Dosagem Aplicado ao BACRFA

#### 3.3.1 - Considerações Gerais

A auto-compactabilidade actua indiscutivelmente como um factor benéfico nas tarefas a executar com BAC. Se se associar este factor, com a incorporação de fibras de aço no BAC, poder-se-á obter um material que possui características que permitem considerar o BACRFA, de elevado desempenho.

A implementação de uma metodologia que permita quantificar a dosagem dos materiais que constituem o BACRFA revela-se complexa, dado que o número de componentes é elevado, e as exigências no estado fresco são muito restritivas.

Resulta destas premissas a formulação de um método de dosagem que seja eficaz na confecção das misturas, que tenha em conta os factores envolvidos, e seja sensível aos mesmos, e ainda que reduza o mais possível o consumo de cimento. Como consequência, objectiva-se a aplicação de uma metodologia que se revele simples e prática para o "tecnologista".

Neste âmbito, a aferição do método de dosagem aplicado ao BACRFA é efectuada experimentalmente, e com recurso à sua caracterização reológica e mecânica, avaliando as propriedades do BACRFA, tanto no estado fresco como no estado endurecido.



### 3.3.2 - Etapas de Dosagem

Para a confecção das misturas de BACRFA, foram utilizados materiais disponíveis no mercado e já citados na secção 3.2.

Adicionando as cinzas volantes às misturas realizadas, houve a pretensão de garantir uma granulometria fina da mistura, quer limitando o conteúdo de agregados grossos, quer aumentando a proximidade das partículas em suspensão para incrementar a estabilidade da pasta, para que simultaneamente seja reduzida a quantidade de cimento.

Foi utilizada uma maneira simples de considerar as particularidades dos materiais, o uso de um método de observação directo da mistura durante o processo de amassadura, variando-se a percentagem de ingredientes no total da mistura de betão até se encontrar uma mistura que apresentasse as características de auto-compactabilidade desejadas, ou seja, que possua resistência à segregação e exsudação, espalhamento suficientemente elevado e dentro dos parâmetros considerados admissíveis, correcta velocidade de escoamento e adequada capacidade de se adaptar à passagem de obstáculos.

A metodologia utilizada neste trabalho foi exposta por Pereira de Oliveira (2000), cujas etapas são aqui transcritas.

Etapa a :

Conhecida a composição granulométrica dos agregados, determina-se a mesma composição para diferentes teores de mistura de agregados miúdos/agregados grossos.

Etapa b:

Determina-se a área específica das misturas (SE<sub>agr.</sub>) com o auxílio do método de Loundon. Como o método supõe que os grãos sejam partículas esféricas, o cálculo aproximado é obtido tomando em conta a forma dos grãos e os vazios entre os mesmos. Para tal correcção, aplica-se uma expressão empírica proposta por Powers (Powers, 1968). Para maior simplicidade e aproximação, neste trabalho procedeu-se a determinação da baridade das misturas, substituindo a área específica dos grãos das misturas de agregados, sendo a baridade reveladora de um volume de vazios no interior de determinado volume que condiciona os agregados.

Etapa c:

A partir da tendência de menor vazio, tendo em vista uma minimização da pasta, determina-se a mistura correspondente, ver Figura 3.5.

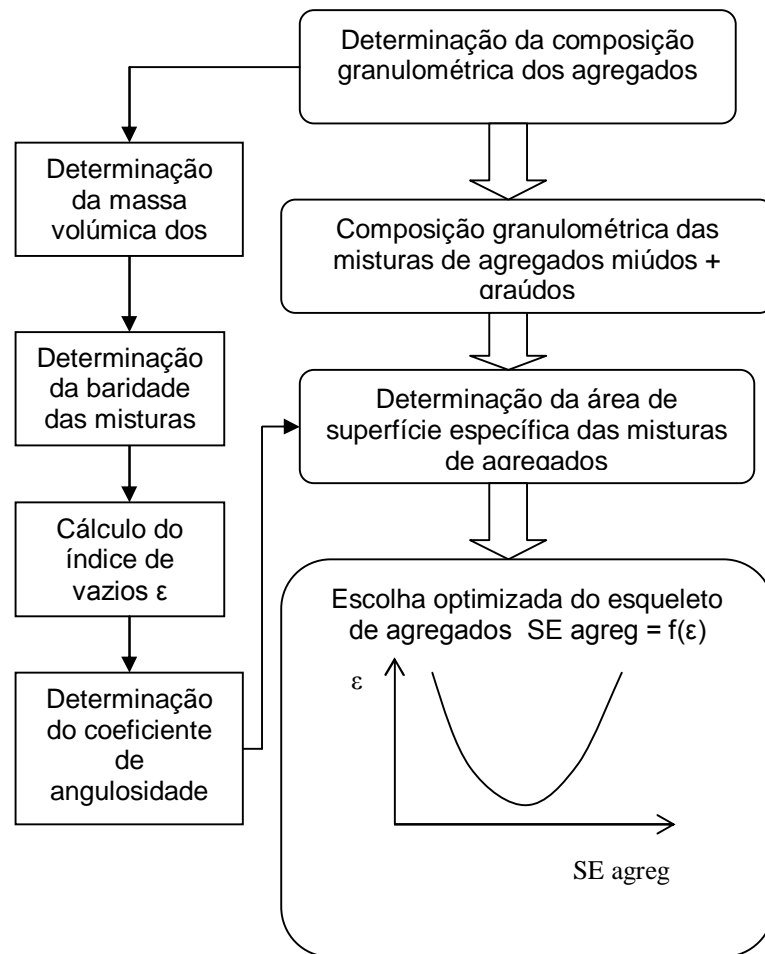


Figura 3.5 - Sequência dos procedimentos para determinação da mistura de agregados (Pereira de Oliveira, 2000)

Etapa d:

A mistura escolhida deverá ser ajustada, tendo em vista um teor de pasta ou argamassa necessária para a consistência desejada. O ajustamento é realizado experimentalmente, com um betão cujo conteúdo de cimento tenha relação com a resistência pretendida, ou no mínimo, 400 kg de cimento por  $m^3$  de betão.

O ajustamento do “traço piloto” (composição inicial) da optimização, deve prover um conteúdo de argamassa no betão suficiente para evitar a sua segregação, e conferir a auto-compactabilidade. Este ajustamento é efectuado tendo em conta os resultados dos ensaios descritos no item 3.4.



Etapa e:

Uma vez fixada a composição do “traço piloto” e portanto o seu teor de argamassa,

$$A_s = \frac{1+a}{1+m} \times 100 \quad (1)$$

onde, a e m são respectivamente a proporção, em massa, de agregados finos (miúdos) e do total de agregados, ensaiam-se no mínimo mais dois traços: uma mistura mais rica em cimento, e uma mistura mais pobre, sendo:

$$1 : m-1 \quad 1:m \quad 1:m+1$$

O mesmo teor de argamassa ( $A_s$  %) é imposto para as demais misturas do estudo de composição, o que significa que qualquer uma das misturas atenderá aos critérios de trabalhabilidade desejada. Para diferentes conteúdos de cimento em betões da mesma família, a relação água/materiais secos (H%) será a mesma, devendo se necessário, ser corrigido o conteúdo de adjuvante.

$$H(\%) = \frac{x}{1+m} \times 100 \quad (2)$$

Para determinação da resistência mecânica, geralmente aos 28 dias, são moldados provetes, apresentando a Tabela 3.8, uma síntese dos resultados até aqui obtidos.

Tabela 3.8 - Dados das composições dos betões estudados

Misturas	1 : m <sub>-1</sub>	1: m	1 : m <sub>+1</sub>
Cimento (kg)	1,00	1,00	1,00
Areia (kg)	a <sub>-1</sub>	a	a <sub>+1</sub>
Brita (kg)	p <sub>-1</sub>	p	p <sub>+1</sub>
Relação água/cimento (kg/kg)	x <sub>-1</sub>	x	x <sub>+1</sub>
Massa volúmica do betão (kg/m <sup>3</sup> )	Y <sub>-1</sub>	Y	Y <sub>+1</sub>
Conteúdo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>-1</sub>	C	C <sub>+1</sub>
Resistência à compressão aos j dias (MPa)	fcj <sub>-1</sub>	fcj	fcj <sub>+1</sub>



Etapa f:

Os resultados obtidos no estudo da composição do betão auto-compactável podem ser tratados com base nas seguintes leis:

- 1) Resistência à compressão ( $f_{cj}$ ) x relação água/cimento ( $x$ )

$$f_{cj} = \frac{A}{B^x} \quad (3)$$

- 2) Relação água/cimento ( $x$ ) x total de agregados ( $m$ )

$$m = a + b \cdot x \quad (4)$$

- 3) Total de agregados ( $m$ ) x conteúdo de cimento ( $C$ )

$$C = \frac{1}{a' + b' \cdot m} \quad (5)$$

- 4) A partir destas relações, e com os dados experimentais do estudo da composição dos betões, a mistura solução otimizada para uma resistência mecânica desejada, será obtida através de interpolação gráfica, como se indica na Figura 3.6:

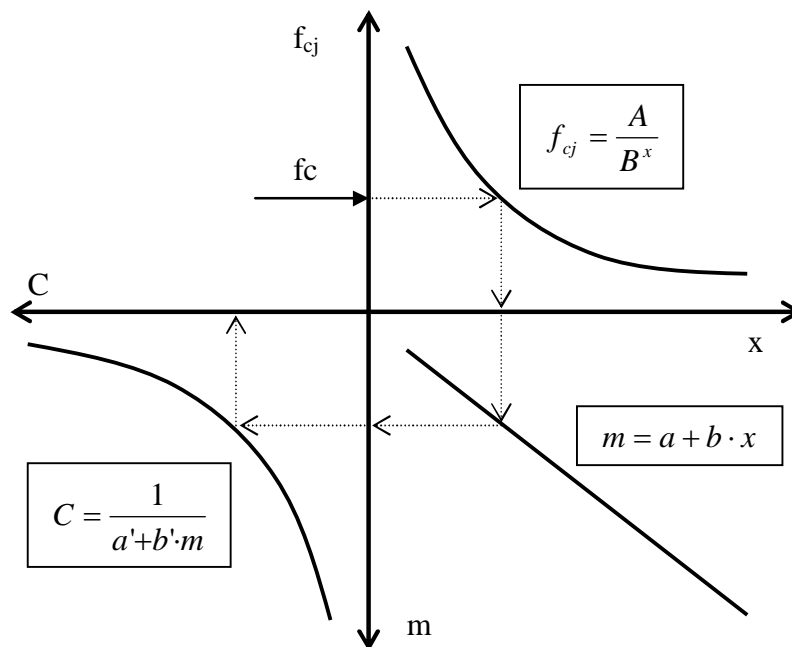


Figura 3.6 - Ábaco de estudo da composição do betão para determinação da mistura otimizada (Pereira de Oliveira, 2000)



### 3.4- Avaliação das Propriedades do BACRFA no Estado Fresco

#### 3.4.1 – Considerações Gerais

A trabalhabilidade do BAC pode ser verificada através de vários métodos, que não obstante serem dominantes nos trabalhos realizados pelo mundo da investigação, não se encontram ainda normalizados.

Para avaliação das propriedades do BACRFA, foram utilizados ensaios que reúnem o consenso da maioria dos investigadores: Ensaio de Espalhamento (Slump Flow), Ensaio da Caixa L (L-Box) e Funil V, a seguir descritos.

As amassaduras de betão reforçado com fibras de aço usadas nos ensaios realizados, foram obtidas colocando todos os ingredientes necessários numa misturadora de eixo basculante (betoneira). Foram adicionados no tambor da betoneira, a brita, a areia, o cimento e as cinzas volantes, tendo-se colocado também cerca de 80% da água de amassadura. Após este procedimento, a betoneira foi colocada em serviço durante 1min e 30seg, findo o qual foram adicionados a restante água, o superplastificante e as fibras metálicas, continuando a misturadora em serviço durante mais 3min e 30seg.

#### 3.4.2 – Ensaio de Espalhamento (Slump-Flow test)

O ensaio de espalhamento, ou método da fluidez do tronco de cone, permite a avaliação da deformabilidade do BACRFA no estado fresco, a partir da observação da velocidade de deformação e diâmetro de espalhamento, apenas por acção do peso próprio.

Para a realização deste ensaio, é necessário possuir alguns acessórios primordiais á sua realização. Coloca-se um molde tronco cónico ou cone de Abrams, semelhante ao apresentado na Figura 3.7, sobre uma superfície metálica lisa com espessura de 2mm, onde se encontra desenhado um círculo com 50cm de diâmetro.

Numa segunda fase, a placa metálica foi colocada sobre uma superfície plana e nivelada, que neste caso foi o próprio pavimento do laboratório.

Com um pano húmido foi humedecida a placa metálica a utilizar, e o próprio cone, tendo-se colocado o cone no centro da placa.

O tronco cónico é cheio de betão auto-compactável obtido com a mistura realizada na primeira fase, sem interferência de qualquer energia de compactação, nivelando-se o topo do cone, sendo o mesmo retirado de forma rápida e cuidadosa, e sempre na vertical.

Deixa-se a pasta espalhar durante o tempo necessário para que o betão espalhado atinja 50cm de diâmetro, cronometrando-se o tempo em segundos, e medindo-se os diâmetros finais da argamassa em duas direcções perpendiculares,  $d_1$  e  $d_2$ . Para que o betão possa atingir 50cm ( $T_{50}$ ) de diâmetro, deverão ser necessários 1 a 2seg (Sonebi et al., 2000), tempo necessário para que a deformação da pasta estabilize, ou seja, para que não haja aumento do



diâmetro. Neste ensaio deve também ser verificada a homogeneidade no bordo do círculo formado.

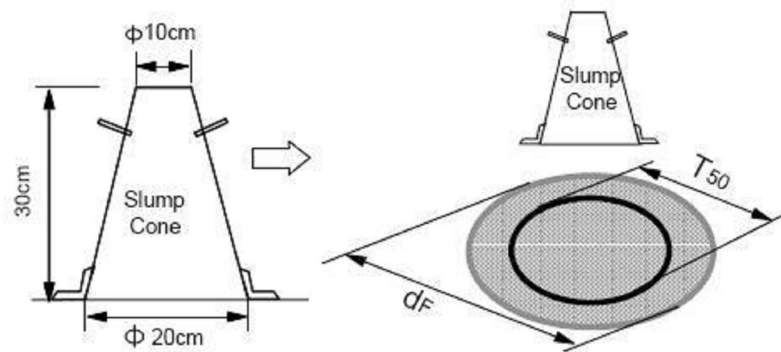


Figura 3.7 - Esquema de ensaio de espalhamento (Santos, 2000)

O tempo final de espalhamento ( $T_{final}$ ), foi medido desde o levantamento da totalidade do cone até ao final do espalhamento do betão auto-compactável, em segundos e com um cronómetro.

Medidos  $d_1$  e  $d_2$ , determina-se a média designada por Diâmetro de Espalhamento ou *Slump Flow*. De acordo com a EN 206-9, o *Slump Flow* deve ter um valor compreendido entre 550 e 850mm.



Figura 3.8 - Início do ensaio de espalhamento (Slump Flow)



Figura 3.9 - Retirada do cone, Slump Flow



Figura 3.10 - Estabilização da mistura (T50 Seg)



Figura 3.11 - Medição de  $d_1$  e  $d_2$ , Slump Flow

### 3.4.3 - Ensaio da Caixa L (*L Box*)

O ensaio da Caixa L, utilizado por Peterson et al., (1996), Sedran e De Larrard (1999) e por Bartos e Grauers(1999), permite avaliar a auto-compactibilidade do BACRFA no estado fresco. O utensílio principal é uma caixa em forma de L, na qual está inserido 1 varão em ferro de 12mm, e que visa avaliar a capacidade de enchimento e a tendência de bloqueio do betão



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

auto-compactável. A restrição de apenas um varão, quer simular em verdadeira grandeza as condições de aplicação deste betão em paredes de alvenaria estrutural.

Esta auto-compactabilidade, é portanto verificada pela capacidade de passar entre as armaduras, que funcionam como varões de obstáculo, sem que ocorra bloqueio.

Para a realização deste ensaio, a mistura de betão é realizada como explicado anteriormente, recorrendo a uma misturadora de eixo basculante.

Inicialmente, procede-se ao humedecimento das paredes interiores da caixa com um pano húmido, após o que o BACRFA é vertido para dentro da caixa, à razão de aproximadamente 12 litros de betão até atingir o topo da mesma, deixando-se repousar cerca de 1min.

O tempo de repouso da amostra, permite avaliar a estabilidade da mesma, ou seja a sua segregação.

Passado o período de repouso, rasa-se o topo da caixa e procede-se à abertura da comporta, deixando-se o betão escoar na parte horizontal da caixa, cujo funcionamento se pode observar na Figura 3.12.

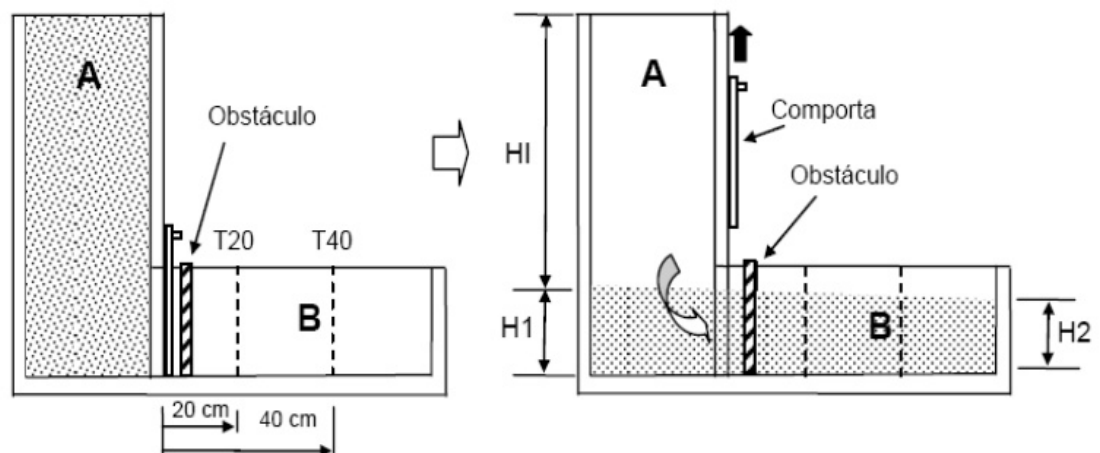


Figura 3.12 - Esquema do funcionamento da Caixa-L (Nepomuceno, 2005)

Inicia-se então a cronometragem do tempo que o betão leva a atingir uma distância de escoamento de 20cm e 40cm, no interior da parte horizontal da caixa, medindo-se no final e depois de cessar o movimento do betão com uma fita métrica, as alturas  $H_1$  e  $H_2$ , altura do betão no início e no fim da caixa, respectivamente, bem explicito na Figura 3.13. Paralelamente, é cronometrado o tempo necessário que o betão demorou a percorrer 40cm ( $T_{40\text{seg}}$ ).



A relação obtida entre  $H_1/H_2$ , designada por coeficiente de bloqueio, é usada para avaliação da capacidade de passagem do betão auto-compactável através de espaços estreitos, é calculada e deve ser da ordem dos 80%.

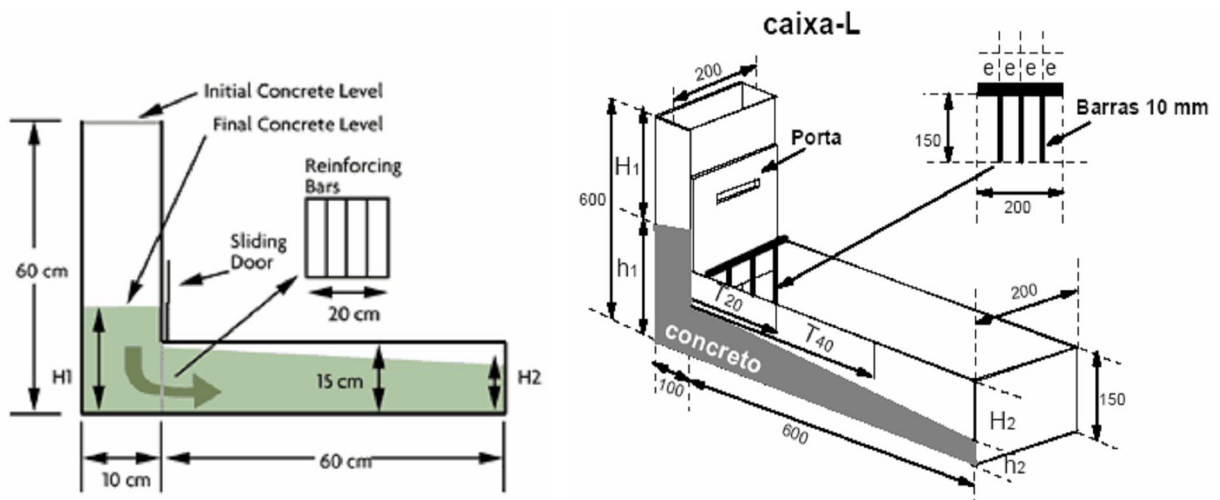


Figura 3.13 - Ensaio da Caixa L (parâmetros  $H_1$  e  $H_2$ ) (Gomes et al, 2003)

O ensaio da caixa L, além de avaliar a auto-compactabilidade do BACRFA, permite também ter noção da estabilidade da amostra e da resistência ao bloqueio, como se pode ver na Figura 3.14.

Os resultados obtidos a partir deste ensaio, excepto algumas excepções, estão relacionados com os resultados obtidos no ensaio de espalhamento, reflectindo também a capacidade de deformação do betão (Skarendahl and Petersson, 2001).



Figura 3.14 - Ensaio da Caixa L



### 3.4.4 - Ensaio de Funil V

O ensaio do Funil V, é mais um dos ensaios que permite avaliar a auto-compactibilidade do BACRFA no estado fresco, através da fluidez determinada pelo ensaio de extensão de fluxo e funil V, o que envolve a viscosidade, possibilitando a avaliação directa do BACRFA.

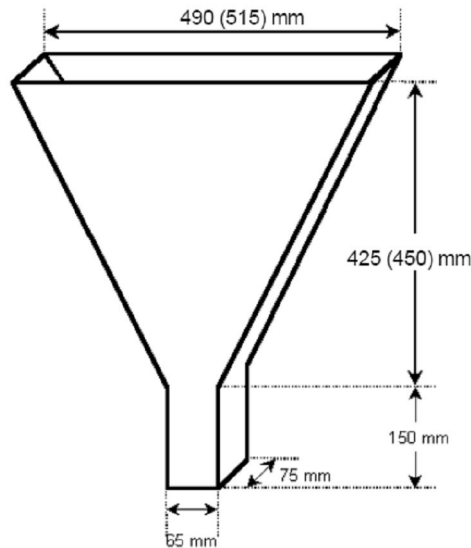


Figura 3.15 - Funil V (Nunes, 2001)

Para a realização deste ensaio, enche-se um funil em forma de V (Figura 3.15), com cerca de 12 litros de betão fresco, e cronometra-se o tempo, em segundos, que o betão leva a escoar do funil, na sua totalidade.

Um tempo de escoamento de 10seg para o betão auto-compactável, é considerado apropriado (Ozawa et al., 1994).

A parte mais estreita do funil e o prolongamento do tempo de escoamento, pode dar algumas indicações acerca da susceptibilidade da mistura ao bloqueio, ou acerca da segregação da mesma, quando o betão é impedido de passar através dessa mesma secção.

Mede-se o tempo desde que a comporta do funil é aberta, até ao escoamento total do betão auto-compactável,  $T_{\text{funil seg}}$ .

A Figura 3.16 ilustra o escoamento do betão do Funil V.



Figura 3.16 - Funil V durante o ensaio

A partir dos resultados do ensaio, obtém-se o tempo de fluidez em segundos, e a velocidade relativa do escoamento  $R_c$  dada pela seguinte expressão (EFNARC, 2005; Nepomuceno, 2005):

$$(R_c = 10 / t)$$

A máxima dimensão do agregado grosso, faz depender o significado destes valores. Contudo, a deformabilidade do betão também afecta o tempo de fluidez.

#### 3.4.5 - Moldagem dos Provetes

A ruptura de provetes de betão auto-compactável, é o ensaio mais importante para atestar a qualidade do mesmo. A preparação do provete deve ser feita adequadamente, evitando que resultados falsos causem problemas tanto para o proprietário da obra, como para os profissionais responsáveis pela execução e controle da obra.

A principal ferramenta na preparação dos provetes que irão ser utilizados nos ensaios, é a sua moldagem.

Após a amassadura das misturas, o betão auto-compactável reforçado com fibras foi colocado em moldes de (15 x 15 x 15)cm e em moldes de (10 x 10 x 60)cm, permanecendo durante 24 horas à temperatura ambiente e ao ar livre, num espaço protegido de qualquer interferência ambiental exterior, e num local livre de vibrações, precedendo a desmoldagem.

O endurecimento do betão, permite a desmoldagem, operação efectuada após as 24h, sendo os provetes colocados dentro de água num tanque de cura, a uma temperatura de aproximadamente 21°C, até à data prevista para a realização do ensaio.



Figura 3.17 - Moldagem dos Provetes

### **3.5- Avaliação das Propriedades do BACRFA no Estado Endurecido**

#### **3.5.1 - Ensaio de Resistência à Compressão**

A adição de fibras ao betão auto-compactável, não tem como objectivo alterar a sua resistência. Dos vários estudos efectuados sobre a junção de fibras ao betão auto-compactável, em termos de resistência à compressão, não existe um consenso entre os resultados.

A falta de indicações sobre as dosagens correctas dos componentes de um betão auto-compactável, poderá ser a causa.

Os ensaios de determinação da resistência à compressão foram realizados segundo o procedimento descrito na especificação do LNEC E226 (1968). A carga foi aplicada a uma velocidade de 10 kN/s.

Foram utilizados os provetes cúbicos com aresta de 15 cm.



Figura 3.18 - Ajustamento das placas da prensa do ensaio de resistência à compressão



Figura 3.19 - Estado do provete após ensaio de compressão



### 3.5.2 - Ensaio de Resistência à Flexão

O ensaio de flexão visa determinar qual a tensão que provoca a ruptura do provete, quando submetido a esforços flectores. O módulo de resistência à flexão, é determinado segundo a expressão abaixo:

$$R = 3PL/2bd^2$$

R = tensão de ruptura na flexão (MPa)

P = força de ruptura (KN)

L = distância entre os cutelos de reacção (m)

b = largura do corpo de prova (m)

d = espessura do corpo de prova (m)

Na Figura 3.20 apresenta-se o esquema de suporte da carga para o ensaio à flexão realizado neste trabalho, e na Figura 3.21 surge um dos provetes ensaiados à flexão, e cujos resultados são lidos no equipamento da Figura 3.22.

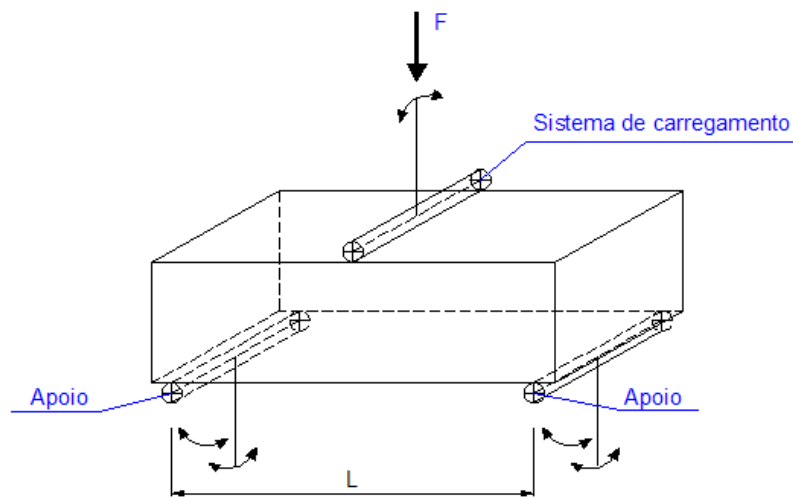


Figura 3.20 - Esquema de suporte da carga realizado neste trabalho, para o ensaio à flexão

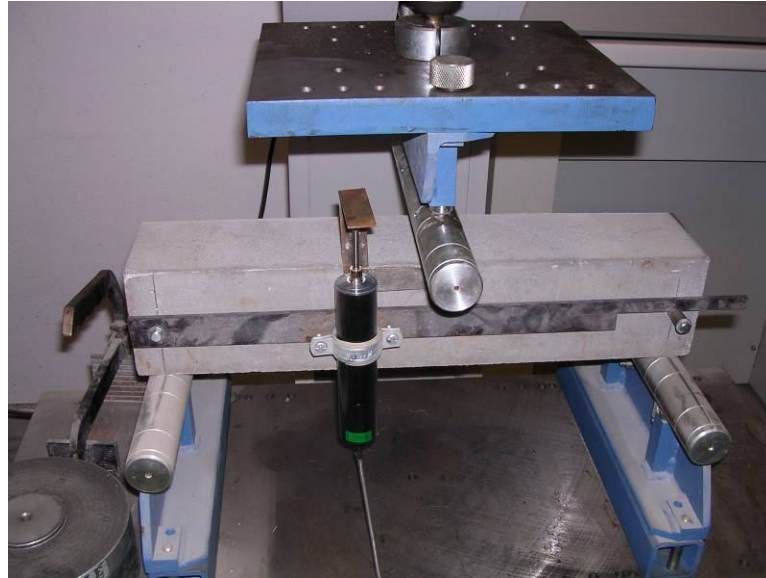


Figura 3.21 - Colocação do provete para realização do ensaio de resistência à flexão

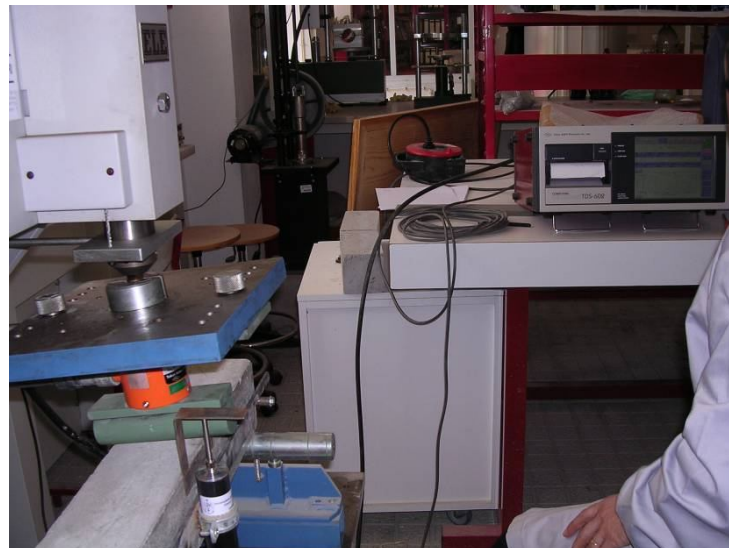


Figura 3.22 - Equipamento digital de leitura de carregamentos e deformações

Como já referido, a meio vão da viga, numa das suas faces laterais deve ser aplicado um entalhe com 2-3 mm de largura e 25 mm de profundidade, como mostram as figuras 2.18 e 2.19. No entanto, neste trabalho, tal não foi executado, tendo em conta que neste estudo não foi feito o acompanhamento da abertura de fendas, uma vez que se optou pela identificação do comportamento do betão através das leituras de carga x flecha. Foi executado o esquema da Figura 3.20.



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

Para se garantir uma maior eficácia no levantamento da curva de carga x deflexão, foi realizado o controlo electrónico de deslocamento através de um transdutor, acoplado ao provete, método já explicado anteriormente e como mostra a figura 3.23, do tipo LVDT (Linear Voltage Differential Transducer).



Figura 3.23 - Início da rotura do provete com transdutor acoplado



Figura 3.24 - Rotura do provete

A proposta do RILEM TC 162-TDF (2000), recomenda que a direcção do carregamento no ensaio de flexão seja ortogonal à direcção de betonagem do provete, o que neste estudo foi cumprido.



Figura 3.25 - Provete no final do ensaio de resistência à flexão

### 3.5.3 - Módulo de Elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade do BACRFA foi realizada de acordo com a especificação LNEC E397 (1993) para as misturas com as fibras de 60mm. As leituras necessárias foram efectuadas com o auxílio de um dispositivo fixado ao provete, e que permite a leitura das deformações através de um extensómetro, ver Figura 3.26.



Figura 3.26 - Ensaio de resistência à compressão, em provetes 15x15x15cm



### 3.5.4 - Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Para medir a absorção por capilaridade dos provetes de betão, adoptou-se o procedimento descrito na especificação LNEC E 393 (1993). A absorção de água por capilaridade é calculada dividindo o aumento de massa ao fim de intervalos de tempo pré-determinados, pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água.

Após o primeiro estágio, a pesagem dos provetes, estes são envolvidos em fita isolante, tendo o cuidado de envolver a parte que fica em contacto com a água em mais uma camada de fita isolante, por forma a impedir o excessivo humedecimento da base do corpo de prova, ver Figura 3.27.

Os provetes foram colocados num tabuleiro, previamente preparado e com uma altura de água que permita submergir os mesmos em 0.5cm, ver Figura 3.28.

Após o condicionamento adequado do provete, uma vez em contacto com a água, foram efectuadas leituras de pesagem dos provetes aos 28 dias.

Antes da pesagem dos provetes, são limpos com um pano húmido, por forma a retirar o excesso de água existente.

Para determinar a absorção de água por capilaridade, é calculado o aumento de massa, reflectido no peso do provete,  $(M_i - M_0)$  dividindo-o pela área da face inferior que esteve em contacto com a água. Estas premissas traduzem-se na seguinte fórmula:

$$W / A = K_c t$$

Onde:

W = a quantidade de água absorvida (kg);

A = a secção do provete em contacto com a água (m<sup>2</sup>);

t = tempo (min);

k = coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade do provete (kg/m<sup>2</sup>/min<sup>1/2</sup>).

Os resultados são apresentados em curva, kg/m<sup>2</sup> versus  $\sqrt{t}$ . Efectua-se o melhor ajuste de uma recta aos pontos obtidos. O declive da recta corresponde ao coeficiente de absorção capilar,  $K_c$  (kg/m<sup>2</sup>/min<sup>1/2</sup>).



Figura 3.27 - Provetes envolvidos em fita isolante



Figura 3.28 - Medição da quantidade de água existente no tabuleiro, 0.5cm



### 3.6 - Avaliação da Distribuição das Fibras

Barros et al (2002), observaram que o betão normal reforçado com fibras de aço pode apresentar segregação das fibras, caso não haja compatibilidade entre a sua consistência e a energia de vibração utilizada para a compactação do mesmo.

Uma vez que a alta fluidez do BACRFA pode ser favorável à segregação de fibras de aço durante o processo de colocação do betão, provocada pela elevada massa volúmica do aço, aplicou-se uma metodologia de observação da distribuição das fibras (Amorim, 2002).

De modo a avaliar a homogeneidade da distribuição das fibras, foi calculada a percentagem de fibras em cada uma das colunas da secção de rotura do provete ensaiado para as várias misturas estudadas.

A secção do provete após a rotura foi dividida em colunas (C) e linhas (L) para a contagem das fibras em cada célula, como se apresenta na Figura 3.29. Cada uma das dezasseis células possui dimensões de 2,5 x 2,5 cm.

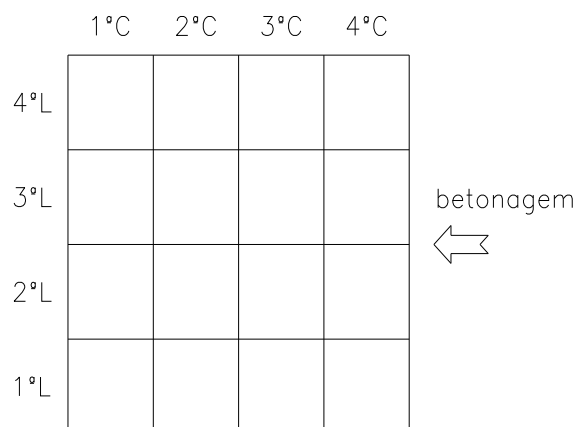


Figura 3.29 - Secção de rotura dividida em células para avaliar a distribuição das fibras (Pereira de Oliveira et al, 2003)

Para efeito da determinação do número de fibras, considerou-se o critério de uma fibra se o comprimento embebido da fibra fosse superior a aproximadamente 10mm. Para o caso contrário considerou-se meia fibra.

A adopção deste critério, segundo Amorim (2002), prende-se ao facto de se admitir que o reforço da fibra é mobilizado na sua quase totalidade para um comprimento embebido ( $b_f$ ) superior a 10 mm. Embora neste trabalho a contagem das fibras tenha a simples intenção de verificar a homogeneidade da mistura, ou seja da distribuição das fibras, considerou-se apropriado a adopção do critério citado.



## CAPÍTULO IV - Resultados e Discussões

### 4.1 - Misturas Finais

Numa primeira fase, trabalharam-se misturas com determinados teores de argamassa, percentagens de água e superplastificante. Contudo, no decorrer dos trabalhos, verificou-se a necessidade de proceder a correcções nos seus teores.

Há que ter em atenção, que o processo de ajuste de quantidades é iniciado com um determinado teor de argamassa, acrescentando-se esse mesmo teor até o betão fresco atingir um comportamento adequado quanto à sua auto-compactabilidade.

Os ensaios Slump-Flow (determinação da classe de espalhamento), Caixa-L (determinação da classe de capacidade de passagem) e Funil V (determinação da classe de viscosidade) realizados ao betão no estado fresco, atestam esse comportamento.

Apresentam-se de seguida as tabelas com as misturas finais para as fibras de 30mm e para as fibras de 60mm, com os diferentes teores.

Tabela 4.1 – Misturas Soluções Finais

	Proporções em Massa (C: C <sub>v</sub> : a: b)	m	W/C <sub>m</sub>	Características das Fibras				Sp (%)	A <sub>s</sub> (%)
				l <sub>f</sub> (mm)	d <sub>f</sub> (mm)	V <sub>f</sub> (%)	(l <sub>f</sub> /d <sub>f</sub> )xV <sub>f</sub> (%)		
Mistura A	1: 0.15: 1.78: 1.72	3.50	0.40	30.00	0.50	0.00	0	2.00	63
Mistura B	1: 0.15: 2.00: 1.50	3.50	0.40	30.00	0.50	0.50	30	2.50	68
Mistura C	1: 0.30: 2.06: 1.44	3.50	0.40	30.00	0.50	1.00	60	2.50	70
Mistura D	1: 0.50: 2.15: 1.35	3.50	0.40	30.00	0.50	1.50	90	2.50	73
Mistura E	1: 0.15: 2.00: 1.50	3.50	0.40	60.00	0.80	0.50	37.50	2.00	68
Mistura F	1: 0.30: 2.06: 1.44	3.50	0.38	60.00	0.80	1.00	75.00	2.00	70
Mistura G	1: 0.50: 2.25: 1.25	3.50	0.35	60.00	0.80	1.50	112.50	2.00	75
Mistura H	1: 0.15: 2.10: 1.40	3.50	0.39	60.00	0.80	1.00	75.00	2.50	70
Mistura I	1: 0.15: 2.245: 1.255	3.50	0.38	60.00	0.80	1.00	75.00	3.00	73
Mistura J	1: 0.30: 2.76: 1.74	4.50	0.69	60.00	0.80	1.00	75.00	2.00	70
Mistura L	1: 0.30: 3.46: 2.03	5.50	0.69	60.00	0.80	1.00	75.00	2.84	70

C - Cimento tipo II 35,5; C<sub>v</sub> - Cinza Volante; a - areia; b - agregado grosso; m - agregado total; W/C<sub>m</sub> - água / materiais finos; Sp – Superplastificante; V<sub>f</sub> – Volume de fibras; A<sub>s</sub> – Teor de argamassa

Nas Figuras 4.1 e 4.2, é apresentada a tendência da evolução do teor de argamassa necessária, para os diferentes índices de fibras utilizados neste estudo.

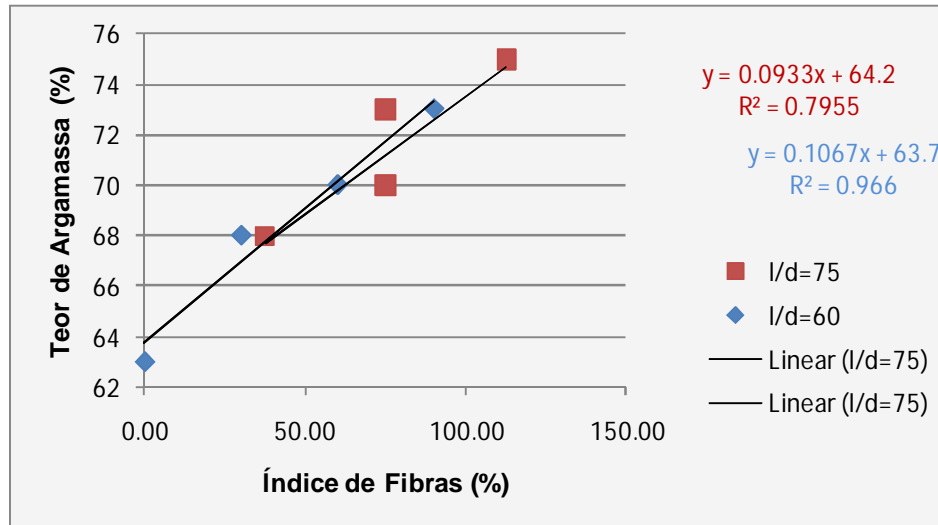


Figura 4.1 - Influência do Índice de Fibras no Teor de Argamassa

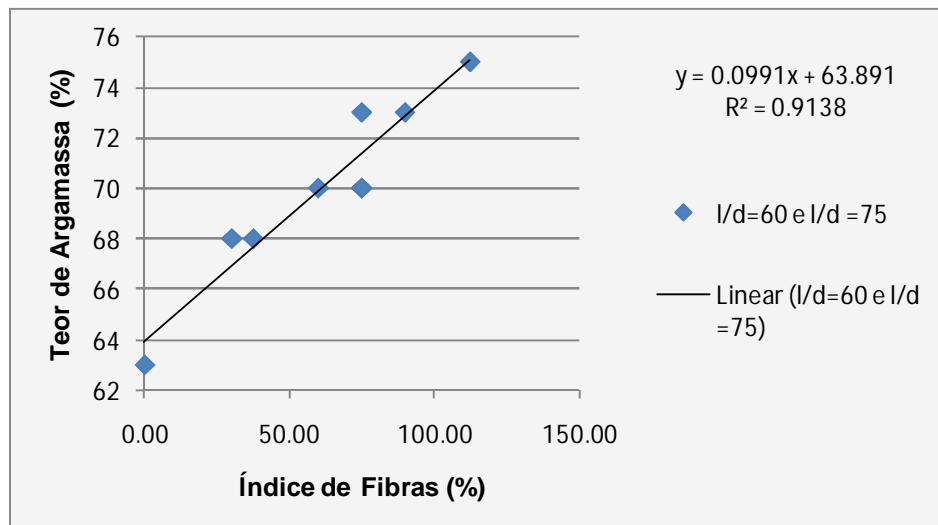


Figura 4.2 - Influência do Índice de Fibras no Teor de Argamassa

Podemos observar pelas linhas de tendência, que a mudança da esbelteza das fibras ( $l_f/d_f$ ) para um mesmo volume, não exigiu um acréscimo significativo de argamassa. No entanto, constata-se que o aumento do volume de fibras, que é responsável por dobrar ou mesmo triplicar o valor do índice de fibras, exige um acréscimo considerável do teor de argamassa.

Portanto, a procura do teor ótimo de argamassa no BACRFA, é uma etapa importante no estudo de dosagem, o que valida também esta relação como um parâmetro de aplicação no estudo particular de misturas auto-compactáveis reforçadas com fibras de aço.



#### 4.1.1 - Ensaio de BACRFA no estado fresco

##### 4.1.1.1 - Ensaio de espalhamento (Slump-Flow)

De acordo com a norma EN 206-9, a escoabilidade do BAC, deve ser medida por meio do ensaio de espalhamento. Nesta norma, são definidas as classes de espalhamento e as classes de viscosidade dos resultados individuais obtidos pelo ensaio de capacidade de espalhamento. Os valores limites para a classe de espalhamento (SF) são expressos em mm e são os seguintes:

SF1 - 550 a 650, SF2 de 660 a 750 e SF3 de 760 a 850.

De acordo com a norma citada, a especificação duma classe de espalhamento poderá ser substituída por um valor pretendido.

Esta classificação não é aplicável ao betão com a máxima dimensão do agregado excedendo 40 mm. A Tabela 4.2. apresenta os resultados obtidos pelo ensaio de espalhamento para todas as misturas estudadas.

Tabela 4.2 - Resultados da capacidade de espalhamento

		Slump-Flow			
		T50 (S)	Classe de Viscosidade	Df (mm)	Classe de Espalhamento
Fibras 30/0.50	Mistura A	1'00"	VS1	765	SF3
	Mistura B	1'38"	VS1	735	SF2
	Mistura C	1'85"	VS1	730	SF2
	Mistura D	1'02"	VS1	760	SF3
Fibras 60/0.80	Mistura E	1'00"	VS1	740	SF2
	Mistura F	2'14"	VS2	720	SF2
	Mistura G	1'73"	VS1	790	SF3
	Mistura H	2'97"	VS2	640	SF1
	Mistura I	4'39"	VS2	605	SF1
	Mistura J	4'07"	VS2	620	SF1

Observa-se que para as misturas com fibras curtas (misturas A, B, C e D), nas quais possuem a mesma relação W/Cm, mesmo m e percentagens de SP semelhantes, as classes de espalhamentos estão entre SF2 e SF3. Já nas misturas com fibras longas, com excepção da mistura G, as classes de espalhamento conseguidas são SF1 e SF3. Confirma-se aqui uma evidente influência do tamanho das fibras, bem como do próprio volume das mesmas. Aliás, as misturas H, I e J têm o mesmo volume de fibras, 1,0%, e fazem parte da mesma classe. Percebe-se pelos resultados de espalhamento mostrados na tabela 4.2. para as misturas D e G, que o aumento do volume de fibras imprime à mistura um efeito de massa, que em condições de ajuste do teor de argamassa para evitar a segregação acentuada, resulta num aumento do diâmetro final de espalhamento, daí essas misturas se situarem na classe SF3.



Figura 4.3 - Círculo não uniforme. Aglomeração de fibras no centro (mistura G; m=3,50; SP=2,00%; Vf=1,50%)

Como exemplo de ajustamento das misturas de BACRFA, durante o estudo de dosagem, cita-se o caso da mistura G. Nesta mistura, verificou-se de início que a mesma se apresentava demasiado fluida, e com sinais evidentes de segregação acentuada. Para a adequação da mistura, optou-se por corrigir o teor de argamassa, o qual foi aumentado para um teor "satisfatório" de 75%. Ou seja, embora no ensaio de espalhamento da mistura com este teor, ainda se tenha observado como se mostra na Figura 4.2, uma ligeira aglomeração de fibras no centro do círculo, e também uma ligeira não uniformidade do círculo de espalhamento final, considerou-se esta satisfatória. Este estado de satisfação é resultado de uma melhoria substancial na coesão e na viscosidade da mistura em relação às anteriormente testadas. Não obstante, considera-se que misturas de BACRFA com volumes elevados de fibras longas são difíceis de serem trabalhadas.

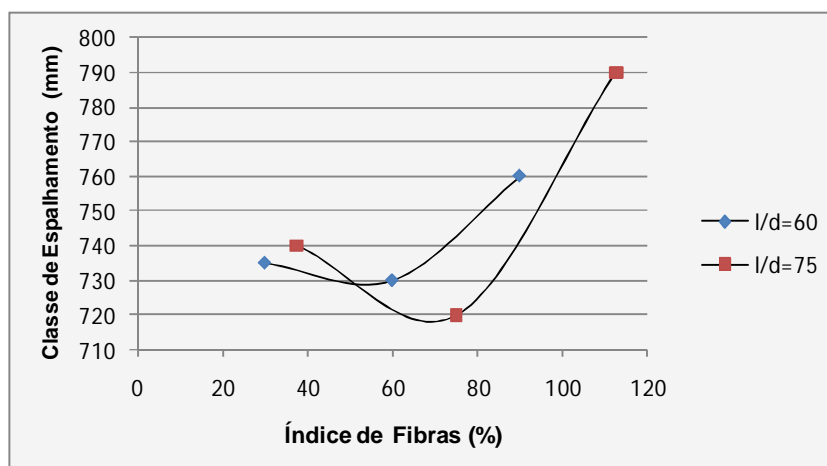


Figura 4.4 - Influência do índice de fibras na capacidade de espalhamento



A constatação anterior pode ser melhor entendida pelo que se ilustra na Figura 4.3. Ou seja, no caso do BACRFA, o aumento do volume de fibras se o teor de argamassa for adequado para evitar a segregação, acarreta também um acréscimo do peso próprio da mistura, o que contribui para o aumento do diâmetro de espalhamento. O acréscimo do índice de fibras leva a classes de espalhamento mais elevadas, sendo mais evidente nesse acréscimo a contribuição do volume de fibras.

#### 4.1.1.2 - Capacidade de Passagem (Caixa L)

Para se determinar a capacidade de passagem do BAC, utilizou-se o ensaio de capacidade de passagem, de acordo com as premissas da EN 206-9.

A norma EN 206-9, à semelhança do que ocorre para o ensaio de espalhamento, define a classe de capacidade de passagem (PL) para o ensaio de capacidade de passagem na caixa L. Essa classe de capacidade de passagem, é definida por siglas aplicadas a intervalos numéricos, e que a seguir se exemplificam. Há a referir que os valores de intervalos apresentam como unidade de medida, mm, e os valores associados são valores limites para resultados individuais.

Desta forma,  $PL1 \geq 0,80$  com 2 varões. Não obstante, o ensaio da classe de capacidade de passagem ter sido realizado apenas com um varão, por pretender simular as paredes de alvenaria estrutural, foi utilizada a nomenclatura PL1 constante na norma EN 206-9, por ser a que mais se aproxima do efectivamente realizado.

Na norma EN 206-9, é ainda referido que a especificação duma classe de capacidade de passagem, poderá ser substituída por um valor mínimo alternativo.

Na Tabela 4.3 apresentam-se os resultados referentes ao ensaio citado, realizado como descrito no capítulo III.

Tabela 4.3 – Resultados da capacidade de passagem

		Caixa L		
		H1/H0	T40 (S)	Classe de Capacidade de passagem
Fibras 30/0.50	Mistura A	0.88	-----	----
	Mistura B	1.00	1'00"	PL1
	Mistura C	1.00	2'00"	PL1
	Mistura D	0.90	2'13"	PL1
Fibras 60/0.80	Mistura E	1.00	1'27"	PL1
	Mistura F	1.00	1'78"	PL1
	Mistura G	1.00	0'63"	----
	Mistura H	0.82	1'84"	PL1
	Mistura I	0.80	2'76"	PL1
	Mistura J	0.74	1'83"	PL1
	Mistura L	0.70	1'90"	PL1



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

Observa-se pelos resultados da Tabela 4.3 que as misturas indiferentemente das suas dosagens, são todas classificadas na classe PL1. É evidente que os resultados deste ensaio, dependem primeiro da restrição que se impõe na caixa para a passagem da mistura, e em segundo das características da própria mistura. Neste estudo, a restrição adoptada foi a de apenas um varão central.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, pode-se observar o bloqueio que ocorre atrás da armadura da caixa L, com a formação de uma barreira, sendo claro o papel desempenhado pelas fibras de aço no processo. Considera-se assim, que houve um bloqueio dos agregados facilitando a segregação do betão. É evidente que quando se menciona o bloqueio de agregados, se insere aqui a participação das fibras longas ( $l_f = 60 \text{ mm}$ ).



Figura 4.5 - Ligeiro bloqueio por acção das fibras de aço  
(mistura L;  $m=5,50$ ;  $SP=2,84\%$ ;  $V_f=1,00\%$ )



Figura 4.6 - Bloqueio significativo ou segregação por acção das fibras de aço  
(mistura H;  $m=3,5$ ;  $SP=2,50\%$ ;  $V_f=1,0\%$ )



Os bloqueios observados, durante o estudo de dosagem, nas misturas L e H, poderão estar relacionados com a correcção de água efectuada às misturas, que no caso da mistura H foi de 0,14 kg e, no caso da mistura L foi de 0,69 kg, como se pode observar por análise dos quadros das misturas iniciais (anexo I) e finais.

Predominantemente, os trabalhos mais recentes com fibras longas, confirmam a dificuldade de otimizar as misturas de BACRFA.

A figura 4.7, permite observar a influência do índice de fibras na caixa L. Pela análise do gráfico, verifica-se que o aumento do índice de fibras, não significa um aumento no tempo da caixa L.

Porém, para cada esbelteza de fibras ( $l_f/d_f$ ), há um aumento máximo do termo  $T_{40seg}$ , seguido de uma redução, que é resultado do maior peso do betão, incorporado pelo acréscimo do volume de fibras. Este comportamento, evidencia mais uma vez, o efeito provocado no betão fresco pelo aumento da massa do mesmo.

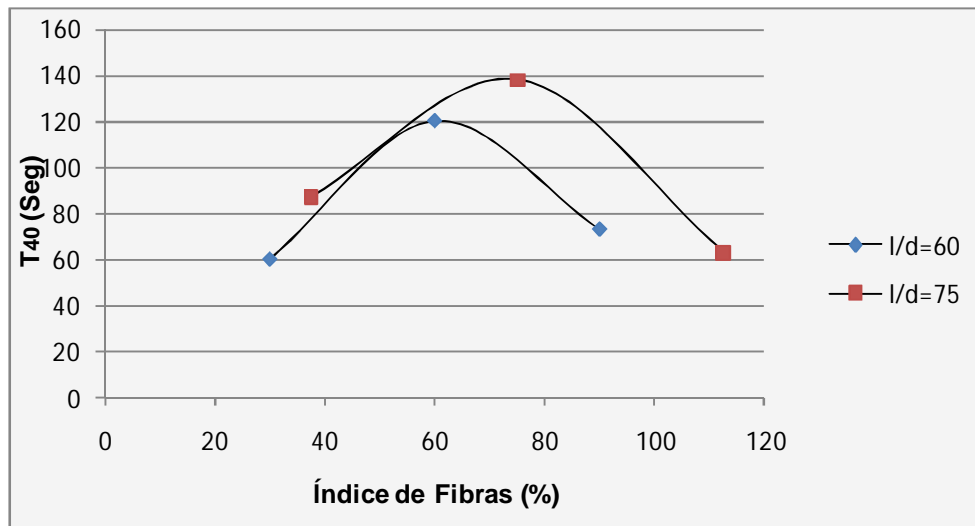


Figura 4.7 - Influência do Índice de Fibras no Tempo T40 (Seg)

Os valores da relação  $H_1/H_0$  apresentados na Tabela 4.3, indicam que as misturas não causam nenhum bloqueio, à excepção das misturas J e L, que causaram um ligeiro bloqueio. Todas as misturas finais do estudo de dosagem, apresentaram características de auto-compactabilidade mesmo com adições elevadas de fibras de aço, ou seja 120 kg de fibras de aço por metro cúbico de betão ( $V_f = 1,5\%$ ).



#### 4.1.1.3 – Viscosidade pelo Funil V

A viscosidade do BACRFA foi medida pelo ensaio do Funil V, de acordo com o preconizado na EN 206-9. A Tabela 4.4, apresenta os resultados conseguidos com o ensaio de viscosidade medida pelo Funil V, cuja descrição e método estão patentes no capítulo III.

Tabela 4.4 – Resultados da viscosidade medida pelo Funil V

		Funil V	Classe de Viscosidade
		Tseg	
Fibras 30/0.50	Mistura A	2'73"	VF1
	Mistura B	3'22"	VF1
	Mistura C	4'02"	VF1
	Mistura D	3'36"	VF1
Fibras 60/0.80	Mistura E	2'74"	VF1
	Mistura F	3'91"	VF1
	Mistura G	3'41"	VF1
	Mistura H	5'00"	VF1
	Mistura I	5'52"	VF1
	Mistura J	3'65"	VF1
	Mistura L	2'84"	VF1

Na norma EN 206-9, é também definida a classe de viscosidade (VF) para o funil V, como valores limite para resultados individuais, não sendo a classificação aplicável ao betão com a máxima dimensão do agregado excedendo 22,4 mm. Apresentam-se por conseguinte, as classes consideradas, obtidas nos ensaios realizados, de acordo com a EN 206-9, sendo que os valores são em segundos.

Desta forma, a classe de viscosidade VF1 representa valores inferiores a 9 seg ( $VF1 < 9,0$ ).

A especificação duma classe de espalhamento poderá ser substituída por um valor pretendido (EN 206-9).

A Figura 4.8, mostra a influência do volume de fibras e do teor de argamassa, na velocidade do escoamento do betão através do funil V.

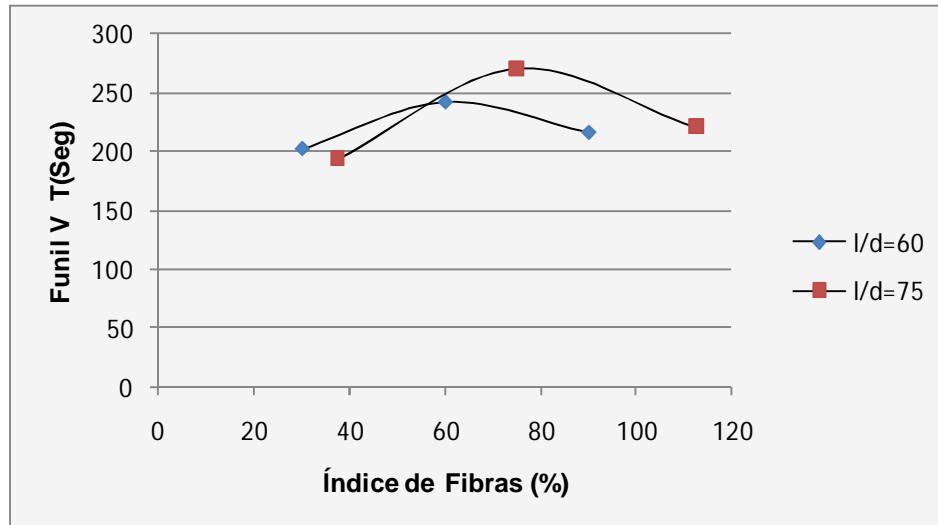


Figura 4.8 - Influência do Índice de Fibras na viscosidade medida pelo Funil V

Verifica-se pelos resultados da Figura 4.8, que o tempo de fluidez medido no funil V, tende a aumentar quando o índice de fibras cresce, embora seja possível especular que possíveis volumes elevados de fibras, se não favorecerem o bloqueio do escoamento pelo funil, podem também pelo efeito de gravidade diminuir o tempo escoamento.

Pode por conseguinte afirmar-se, que o incremento do índice de fibras é responsável por um comportamento típico. Este comportamento é representado numa primeira fase pelo aumento do tempo de escoamento devido ao efeito de imbricamento do crescente volume de fibras. Numa segunda fase, a continuidade do acréscimo de volume de fibras, provoca o aumento de massa, facilitando assim, o escoamento.

A Figura 4.9, mostra a influência directa do teor de argamassa na viscosidade medida pelo funil V.

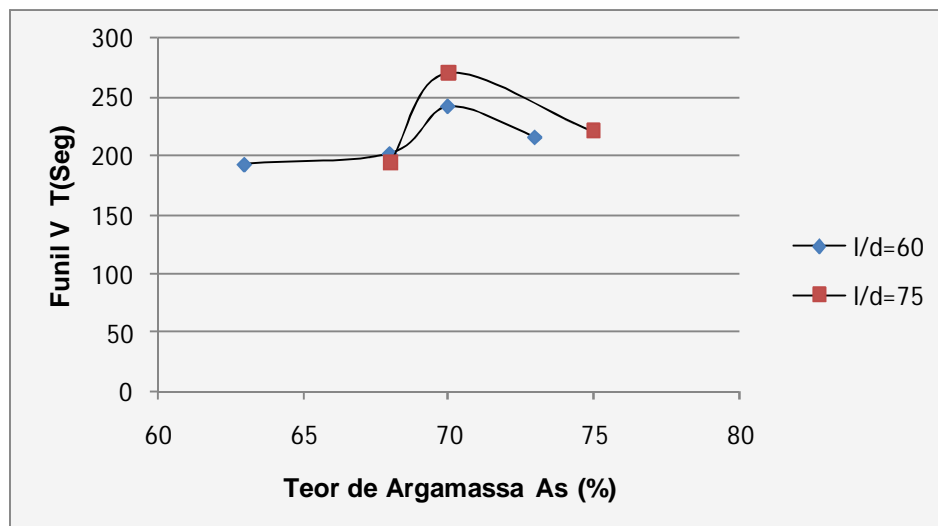


Figura 4.9 - Influência do Teor de Argamassa na viscosidade medida pelo Funil V



Analisando os resultados, da Figura 4.9, verifica-se que para assegurar a auto-compactabilidade do BACRFA, é necessário utilizar teores de argamassa de 68% a 75%.

Em relação à auto-compactabilidade do BACRFA, pode concluir-se que o teor de argamassa independentemente do valor da esbelteza das fibras, aumenta com o volume destas últimas. Implica isto, a existência de uma relação directa, relacionada com as fibras e misturas estudadas, entre o teor de argamassa e o índice de fibras, tal como se elucida na Figura 4.1.

Misturas com maiores volumes de fibras, exigem teores de argamassa mais elevados para o envolvimento das fibras, promovendo assim o escoamento do BACRFA, tal como se demonstrou na Figura 4.9.

Neste estudo, a aplicação do parâmetro, índice de fibras  $(l_f/d_f)*V_f$ , atestou ser um bom indicador da influência da esbelteza das fibras e do seu volume, na mistura.

Particularmente, pode verificar-se medindo propriedades como a capacidade de espalhamento e a capacidade de escoamento, que esse índice exerce uma influência significativa nestas propriedades, traduzida por um acréscimo dos valores mensurados.

No caso da capacidade de espalhamento, antes de atingir o valor máximo, já atribuído ao efeito de aumento da massa, a influência do índice de fibras passa por um valor mínimo. Tal significa não haver linearidade na correlação capacidade de espalhamento/índice de fibras.

No caso da capacidade de escoamento, tanto no tempo  $T_{40seg}$  como no Funil V, a influência do índice de fibras também é do tipo não linear, mas com um valor máximo seguido de um decréscimo, que também identifica a acção do aumento de massa.

## 4.1.2 - Ensaio de BACRFA no Estado Endurecido

### 4.1.2.1 - Absorção de Água por Capilaridade

Os resultados aqui apresentados derivam da execução do ensaio de absorção de água por capilaridade, de acordo com o descrito no capítulo III.

A sucção ou absorção capilar 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 (Nunes, 2001).

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 (Nunes, 2001).

Apresentam-se de seguida os resultados do coeficiente de absorção capilar obtidos até às 72 horas no ensaio de absorção de água por capilaridade, para as misturas com fibras. O tempo é apresentado na forma de raiz quadrada em minutos, nas Figuras 4.10 a 4.16. Nos gráficos estão ilustrados os valores individuais dos provetes e o seu valor médio.



**Mistura E:**

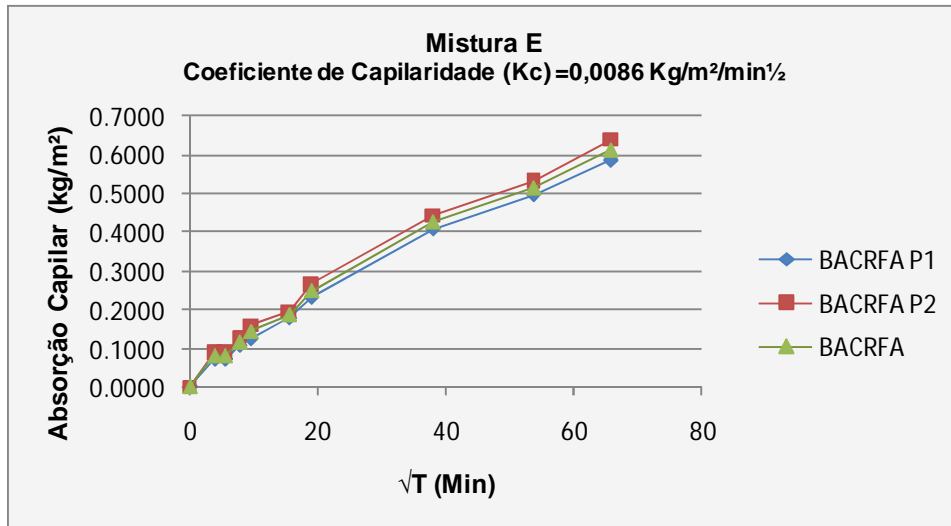


Figura 4.10 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura E

**Mistura F:**

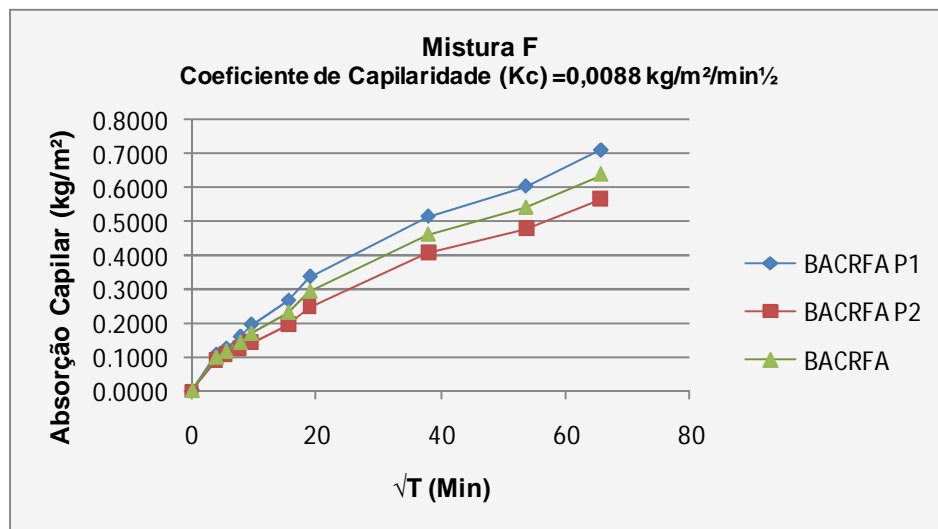


Figura 4.11 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura F



**Mistura G:**

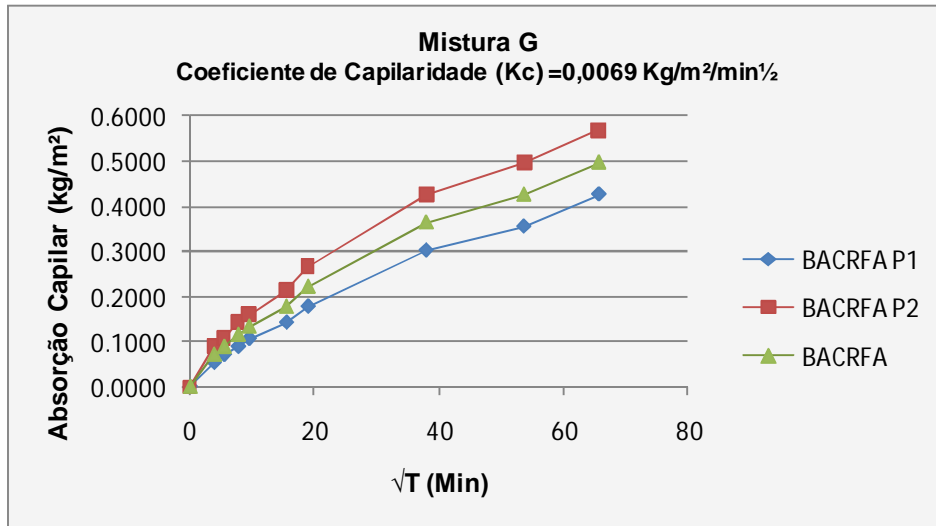


Figura 4.12 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura G

**Mistura H:**

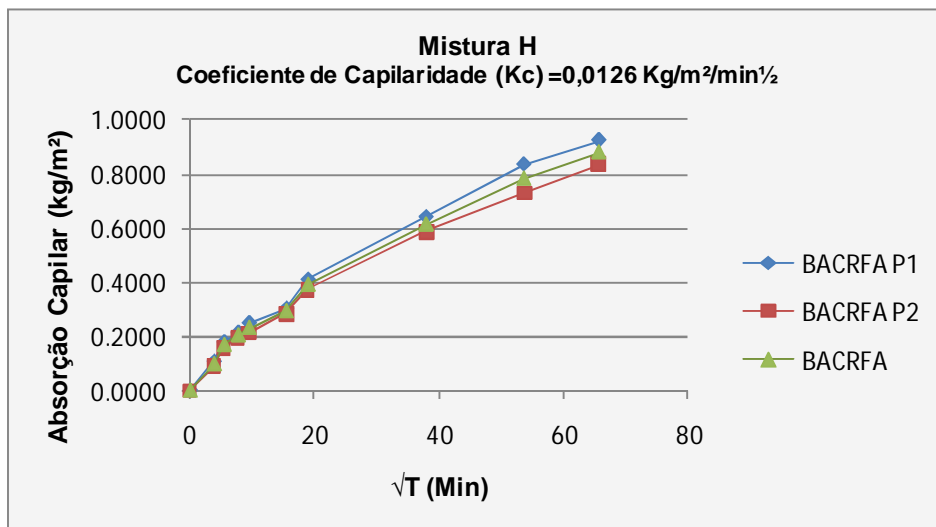


Figura 4.13 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura H



**Mistura I:**

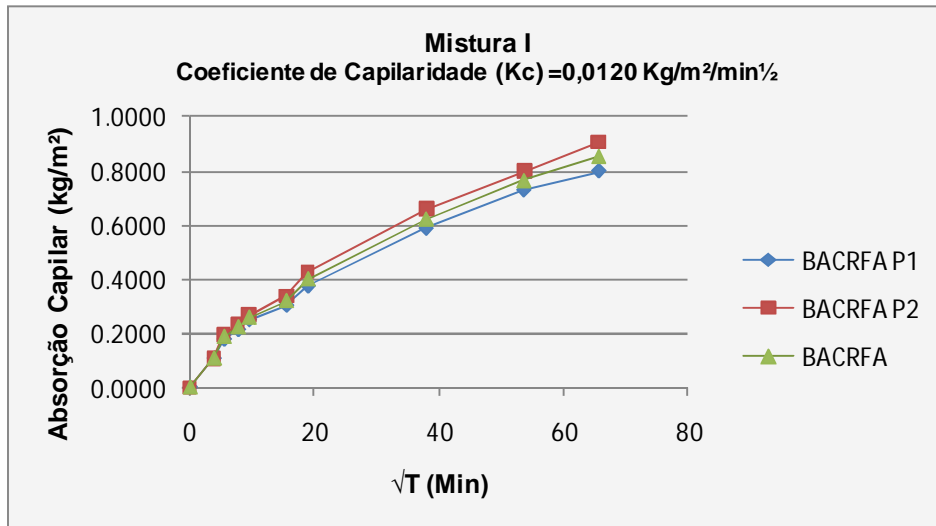


Figura 4.14 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura I

**Mistura J:**

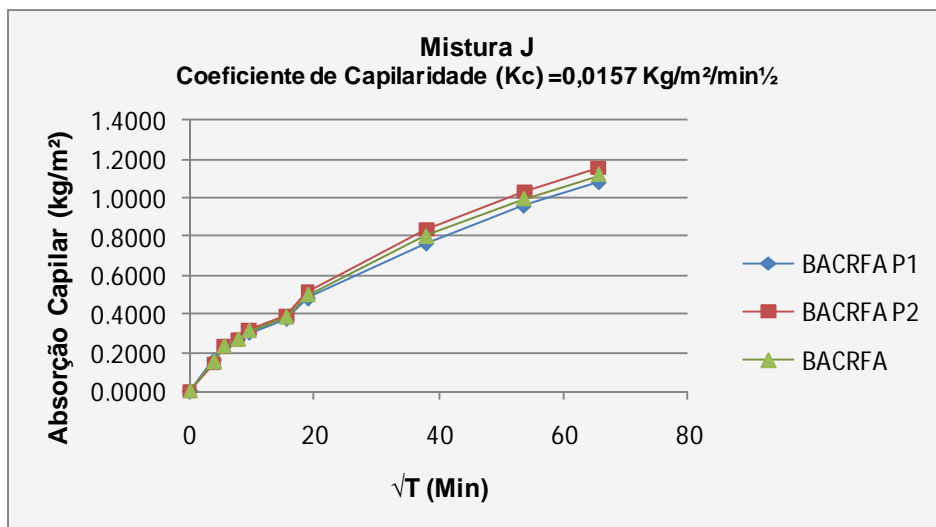


Figura 4.15 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura J



**Mistura L:**

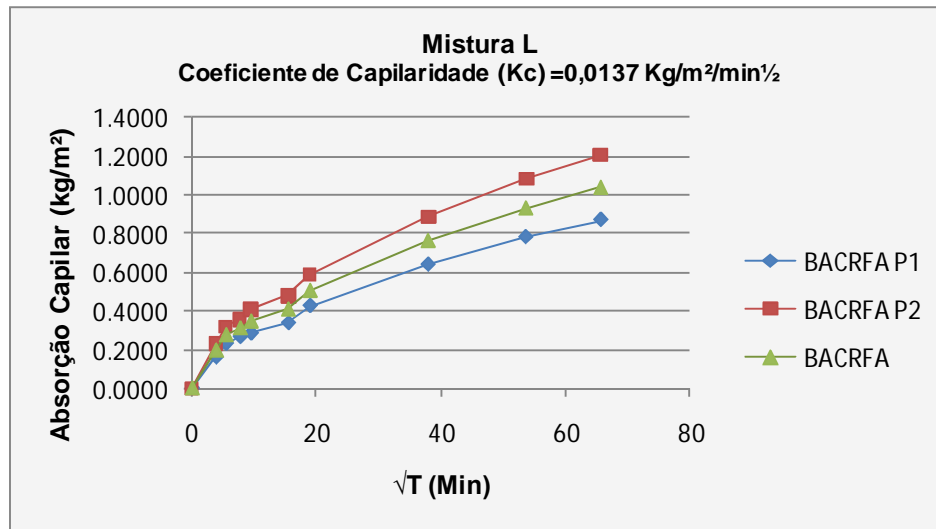


Figura 4.16 - Coeficiente de Capilaridade ( $K_c$ ) - Mistura L

Analisando os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 4.10 a 4.16, pode referir-se que após 15 minutos, o acréscimo da absorção de água adquire uma característica linear. Observa-se também que as dispersões dos valores individuais entre provetes são maiores, quando para uma mesma proporção de agregados, se aumenta o volume de fibras (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12).

Observou-se ainda que quando o teor de agregados totais é acrescido em misturas com o mesmo  $V_f$ , há uma tendência de aumento na dispersão dos resultados, situação bem patente na comparação dos resultados das Figuras 4.13 a 4.16.

A Figura 4.17, apresenta os coeficientes de capilaridade médios determinados apenas para todas as misturas de fibras longas estudadas, não tendo sido feito este estudo para fibras curtas.

Tendo em conta o desvio padrão mostrado na figura pelas barras, observa-se que existem dois grupos que apresentam entre si, resultados significativamente diferentes. Destaca-se o grupo formado pelas misturas E, F, e G, que apresenta valores de coeficientes mais baixos e semelhantes entre si.

O grupo formado pelas misturas H, I, J e L, apresenta valores mais elevados. Analisado este grupo, testemunham-se as diferenças significativas apenas da mistura J em relação às restantes, podendo afirmar-se que as misturas H, I e L, não diferem entre si.

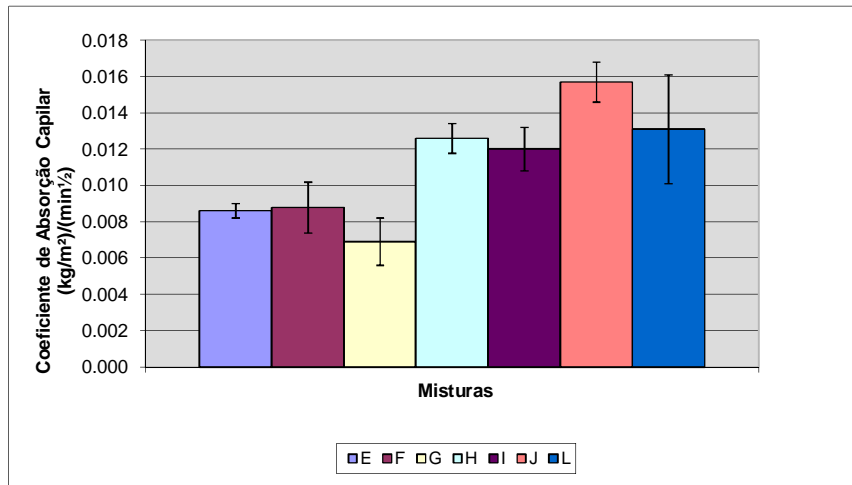


Figura 4.17 - Comparativo entre coeficientes de absorção capilar das misturas e Desvio Padrão

Os valores superiores evidenciados pelo segundo grupo de misturas (misturas H, I, J e L), podem ser decorrentes do facto destas misturas serem confeccionadas com o mesmo  $l/d$  e  $V_f$ , portanto mesmo índice de fibras, e apresentarem entre si diferentes valores da razão  $w/cm$  e diferentes valores de agregados totais. É neste grupo facilmente perceptível, que o aumento do teor de agregados totais combinado com o acréscimo da relação  $W/Cm$ , são responsáveis pelo aumento de poros capilares.

Exercendo uma análise comparativa dos resultados entre grupos, percebe-se uma maior evidência dos parâmetros  $m$  e  $W/Cm$ , influenciando os valores dos coeficientes de capilaridade.

Valores baixos de  $m$ , significam maior conteúdo de materiais finos, o que conjuntamente com baixos valores de  $w/cm$ , contribuem para a formação de uma estrutura de betão com porosidade capilar reduzida. Tratando-se de betão auto-compactável, não se pode negligenciar também a contribuição do superplastificante.

Se por um lado a identificação neste estudo do efeito isolado dos parâmetros  $m$ ,  $W/Cm$  e  $SP$ , revela alguma dificuldade tendo em vista o número de resultados, por outro lado identifica-se com maior facilidade que o efeito da variação de  $V_f$  não é significativo no valor do coeficiente de capilaridade (examinem-se os resultados das misturas E, F e G).

#### 4.1.2.2 - Resistência à Compressão

Os valores obtidos de Resistência à Compressão, resultam da realização dos ensaios como descrito no capítulo III.



Os valores apresentados na Tabela 4.5, vaticinam que no caso das fibras curtas, não há influência significativa do aumento do volume de fibras na resistência à compressão. No caso de fibras longas, observa-se o mesmo comportamento, porém quando se mantém o mesmo volume de fibras, a resistência varia significativamente com o aumento da proporção dos agregados totais.

Tabela 4.5 - Resultados da Resistência à compressão, valores médios obtidos em 6 provetes (fibras de 30/0.50)

		Resistência à Compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Vf (%)	
Fibras 30/0.5	Mistura A	28.00	1.20	0.00	
	Mistura B	28.00	0.14	0.50	
	Mistura C	26.00	0.49	1.00	
	Mistura D	27.00	0.90	1.50	
Fibras 60/0.80	Mistura E	22.50	0.30	0.50	
	Mistura F	27.30	0.40	1.00	
	Mistura G	29.60	0.90	1.50	
	Mistura H	20.00	0.90	1.00	
	Mistura I	20.60	0.80	1.00	
	Mistura J	15.70	0.20	1.00	
	Mistura K				
	Mistura L	12.00	0.20	1.00	

#### 4.1.2.3 - Influência do Coeficiente de Absorção Capilar na Resistência à Compressão

De forma a ser possível a percepção da influência que a absorção capilar poderá exercer na resistência à compressão média aos 28 dias, correlacionou-se esta com o coeficiente de capilaridade. Recorda-se que o coeficiente de capilaridade é influenciado pela estrutura porosa do betão, levando a pensar na existência de uma correlação do coeficiente de capilaridade com a resistência à compressão.

Os valores são apresentados na Tabela 4.6 e a correlação pode ser visualizada na Figura 4.18.



Tabela 4.6 – Resultados do Coeficiente de Capilaridade e da Resistência à compressão, (fibras de 60/0.80)

	Resistência à Compressão média (MPa)	Coeficiente de Capilaridade (kg/m <sup>2</sup> /min <sup>1/2</sup> )
Mistura E	22.50	0.0860
Mistura F	27.30	0.0880
Mistura G	29.60	0.0690
Mistura H	20.00	0.0126
Mistura I	20.60	0.0120
Mistura J	15.70	0.0157
Mistura L	12.00	0.0137

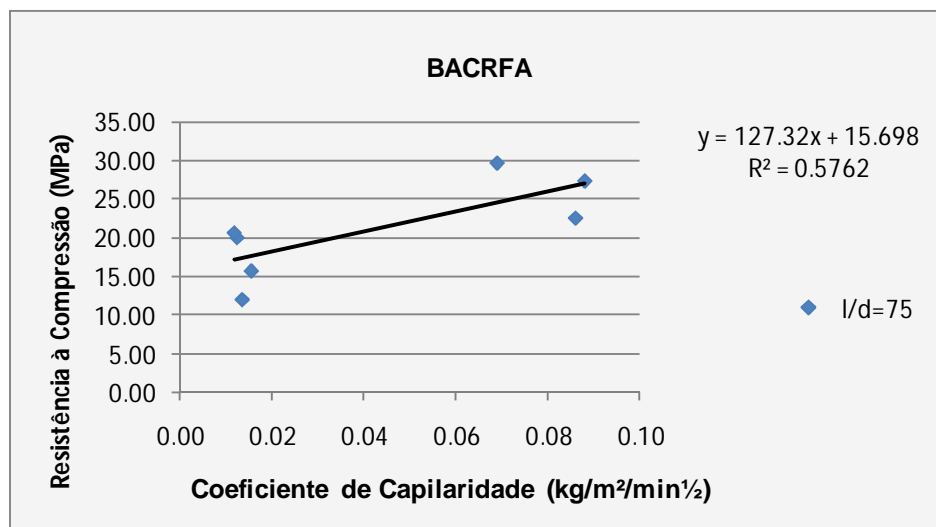


Figura 4.18 - Influência do coeficiente de capilaridade na resistência à compressão

Como se pode verificar na Figura 4.18, para misturas com menor coeficiente de capilaridade, também há uma tendência de diminuição da resistência à compressão.

A correlação é perfeitamente lógica, uma vez que betões menos resistentes possuem maior volume de vazios e uma menor percentagem de poros capilares. Esta hipótese é cada vez mais verdadeira para o caso do betão auto-compactável, em que as misturas têm grau de compactação definido pelo seu peso próprio e pelas suas propriedades reológicas.



#### 4.1.2.4 – Resistência Equivalente à Tracção na Flexão

Os valores obtidos para as resistências equivalentes à flexão, determinadas de acordo com a recomendação RILEM TC 162-TDF (2000), são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resistência equivalente à tracção na flexão, Valores médios obtidos em 3 provetes

		Vf (%)	Módulo de Rotura à Flexão (MPa)	$f_{eq,2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{eq,3}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Fibras 30/0.50	Mistura A	0.00	-----	-----	-----
	Mistura B	0.50	3.65	2.98	2.51
	Mistura C	1.00	6.42	6.48	5.84
	Mistura D	1.50	7.5	12.12	6.97
Fibras 60/0.80	Mistura E	0.50	2.11	3.11	1.01
	Mistura F	1.00	6.28	6.48	5.54
	Mistura G	1.50	9.23	4.73	8.51
	Mistura H	1.00	-----	-----	-----
	Mistura I	1.00	-----	-----	-----
	Mistura J	1.00	2.41	2.56	2.97
	Mistura L	1.00	2.30	2.84	2.50

Os valores de resistências, apresentados na Tabela 4.16, são valores médios obtidos em 3 provetes ensaiados para cada mistura.

Comparando os resultados das misturas F, J e L, nas quais se variou o parâmetro m, agregado total, pode concluir-se que o conteúdo de materiais cimentícios exerce influência nos resultados das resistências equivalentes,  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  (determinadas de acordo com o descrito no capítulo III). Com o aumento de m, verifica-se uma nítida tendência da redução da resistência equivalente à tracção.

Para a série de misturas com fibras l/d=60, os valores indicam que as resistências equivalentes à tracção na flexão,  $f_{eq,2}$ , aumentam cerca de 100% para cada 0,5% a mais no volume de fibras. Para a série de fibras longas l/d=75, os resultados seguiram uma tendência de aumento da resistência equivalente, excepto para o valor de  $f_{eq,2}$  da mistura G.

A Figura 4.19 apresenta curvas típicas força-flecha obtidas nos ensaios das vigas de BACRFA, e, ilustra o desempenho das misturas com o aumento do volume de fibras.

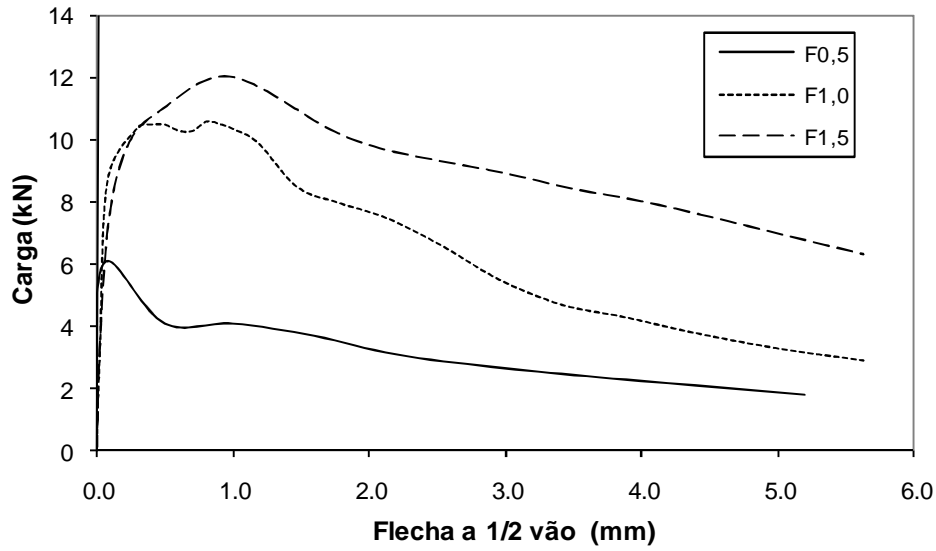


Figura 4.19 - Relação carga-flecha para diferentes volumes de fibras

#### 4.1.2.5 - Módulo de Elasticidade Secante em Compressão

A Tabela 4.8, apresenta os resultados do módulo de elasticidade secante do betão.

Tabela 4.8 - Resultados do módulo de elasticidade secante em compressão. Valores médios obtidos em 2 provetes (fibras de 60/0.80)

	Módulo Elasticidade Secante em Compressão (GPa)	V <sub>f</sub> (%)
Mistura E	26.29	0.50
Mistura F	28.45	1.00
Mistura G	23.61	1.50
Mistura H	-----	1.00
Mistura I	22.93	1.00
Mistura J	22.19	1.00
Mistura L	19.43	1.00

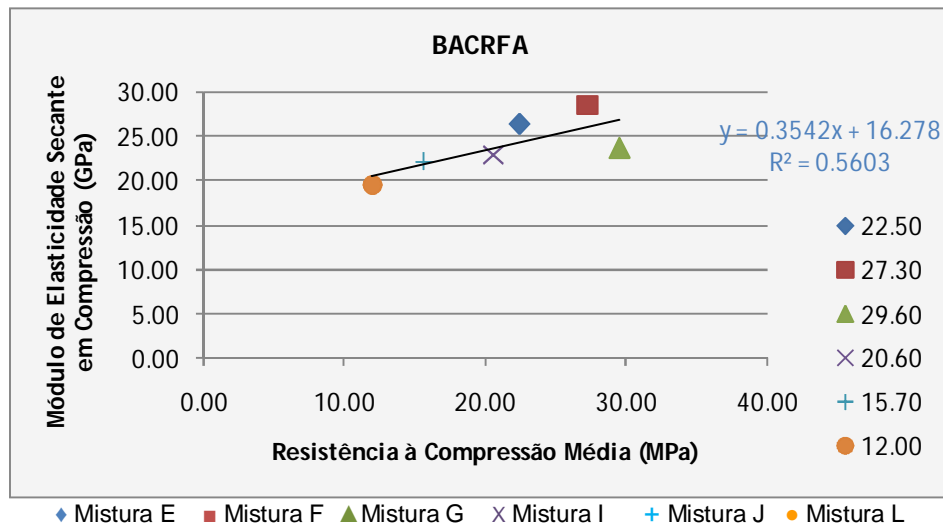


Figura 4.20 - Influência da Resistência à Compressão no Módulo de Elasticidade Secante em Compressão

Como se pode observar na Figura 4.20, é licito referir que à medida que a resistência à compressão aumenta, o módulo de elasticidade também aumenta. Na mistura G, não obstante se verificar um aumento na resistência à compressão, o módulo de elasticidade diminui. Por esta razão, a correlação apresentada para as duas propriedades é relativamente baixa.

Na Tabela 4.8, pode também observar-se que para um índice de fibras constante, o módulo de elasticidade também tende a diminuir.

Percebe-se que no grupo das misturas I, J e L, a variação do parâmetro agregado total  $m$ , é também significativamente influente no resultado do módulo de elasticidade.

Portanto, a influência do agregado total embora seja o parâmetro mais influenciador dos valores registados, não pode ser dissociado de outros parâmetros, nomeadamente do índice de fibras e da razão  $W/Cm$ .

No entanto, a linha de tendência apresentada na Figura 4.20, ainda que tenha uma correlação relativamente baixa não está alheia ao facto geralmente observado por outros autores para betões normais e leves, como no caso de Kurugöl et al (2008), de que o módulo de elasticidade tende a aumentar com o aumento da resistência à compressão.

#### 4.1.2.6 - Distribuição das Fibras na Secção de Fractura

As Figuras 4.21 a 4.22, ilustram a distribuição das fibras em provetes tipo, para os volumes de fibras de 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente.

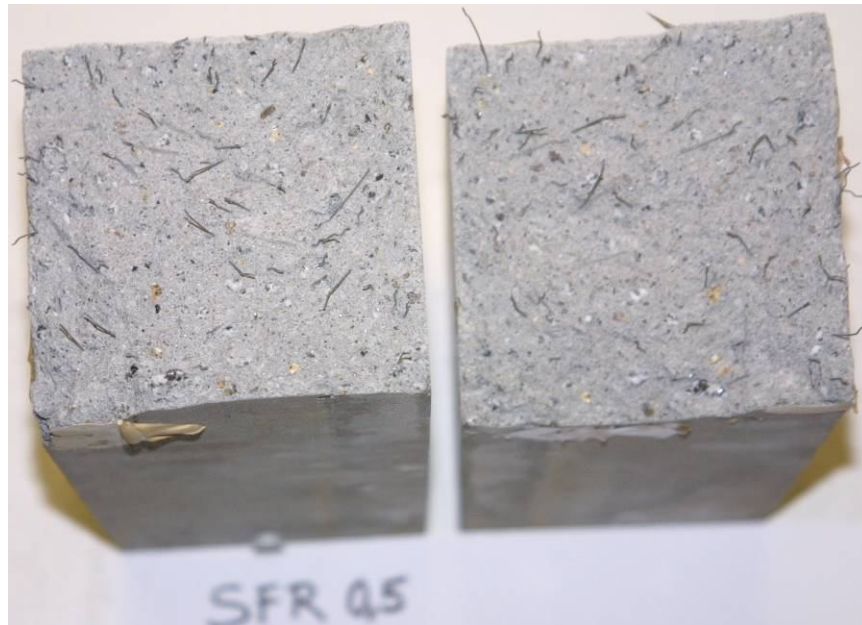


Figura 4.21 - Distribuição das fibras na secção de rotura do BACRFA 0,5%



Figura 4.22 - Distribuição das fibras de 30mm na secção de rotura do BACRFA 1,0%

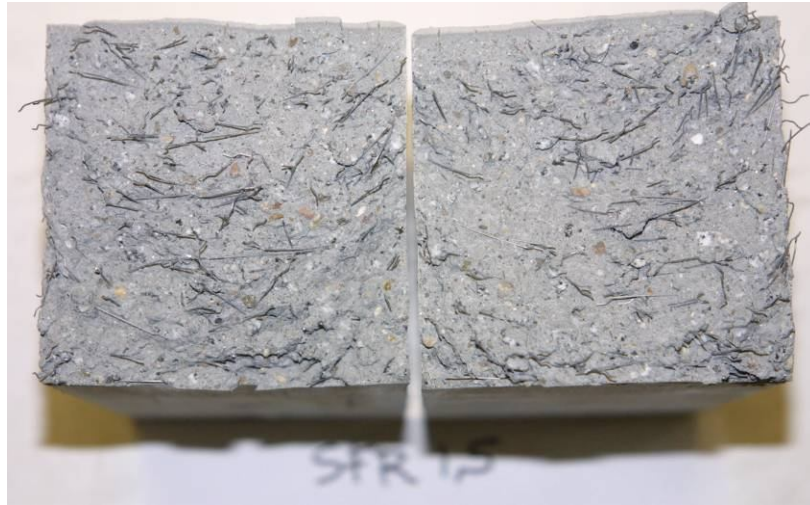


Figura 4.23 - Distribuição das fibras de 30mm na secção de rotura do BACRFA 1,5%

Analisados os resultados obtidos, verifica-se que a distribuição das fibras segue uma tendência aleatória. Parece legitimada a conclusão da existência da distribuição homogénea das fibras, promovida pela característica de auto-compactação do BACRFA, mesmo nos casos em que o volume de fibras é considerado elevado. Este comportamento é singular deste tipo de betão, contrariando as distribuições de fibras que podem resultar nos betões normais reforçados com fibras compactados por vibração. Estes carecem de compatibilização entre a energia de vibração e a consistência do betão a fim de evitar a segregação das fibras.

Os resultados obtidos por Amorim (2002), atestam a necessidade desse compromisso, energia de vibração x consistência do betão, caso contrario esta inadequação trará efeitos nefastos nos resultados da resistência à flexão.

A Figura 4.24 apresenta os valores médios de percentagens de fibras, para os seus diferentes volumes, observados nas colunas, verificando-se que não houve alteração significativa no conteúdo de fibras no sentido da betonagem.

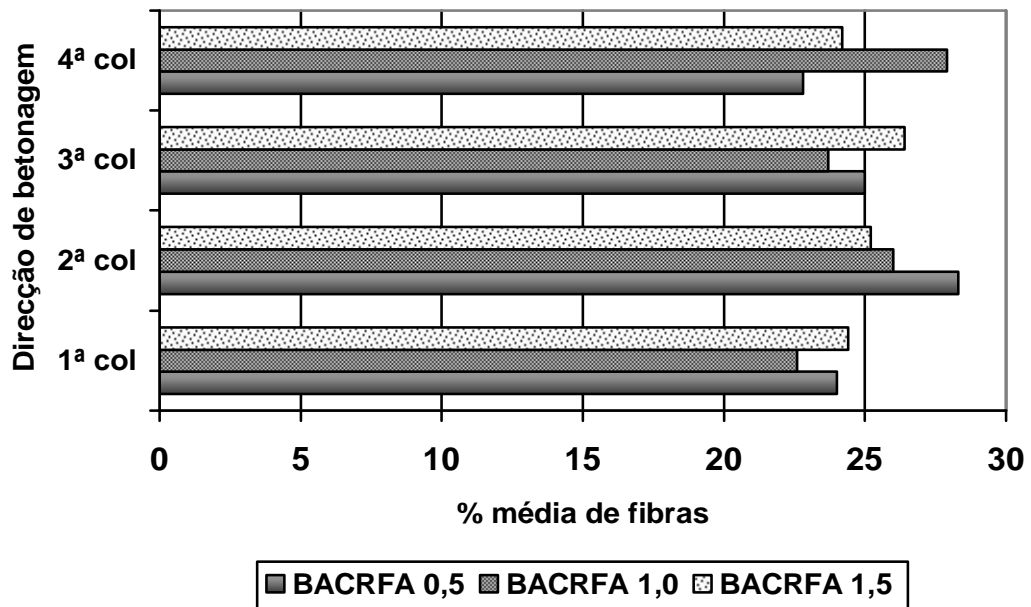


Figura 4.24 - Distribuição das fibras pelas colunas que caracterizam a secção de fractura

A técnica de análise de imagens, obtidas por meio digital, para a apreciação da distribuição das fibras na direcção perpendicular à secção de fractura, também foi um método utilizado. A Figura 4.25 apresenta uma secção transversal cortada após impregnação de resina. Esta lâmina (secção transversal) cortada, compreende uma zona equidistante da fissura sob deflexão máxima do provete prismático. A Figura 4.26, apresenta uma secção onde é possível a leitura do número de fibras, realizada digitalmente por renderização dos pontos onde as mesmas se localizam. Os valores médios encontrados nas secções confirmaram a distribuição homogénea das fibras nessa direcção.

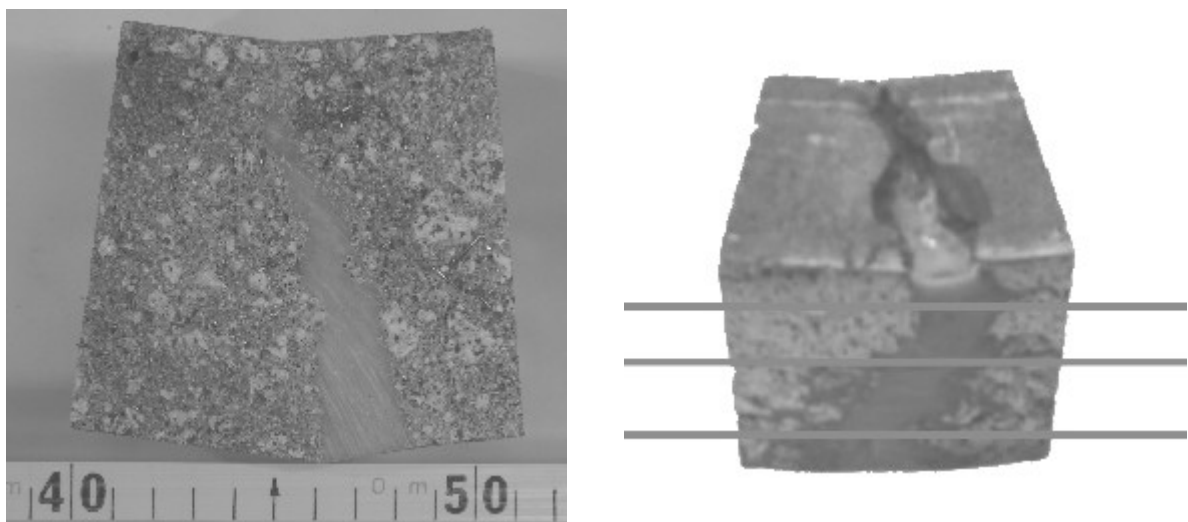


Figura 4.25 - Provete embebido em resina

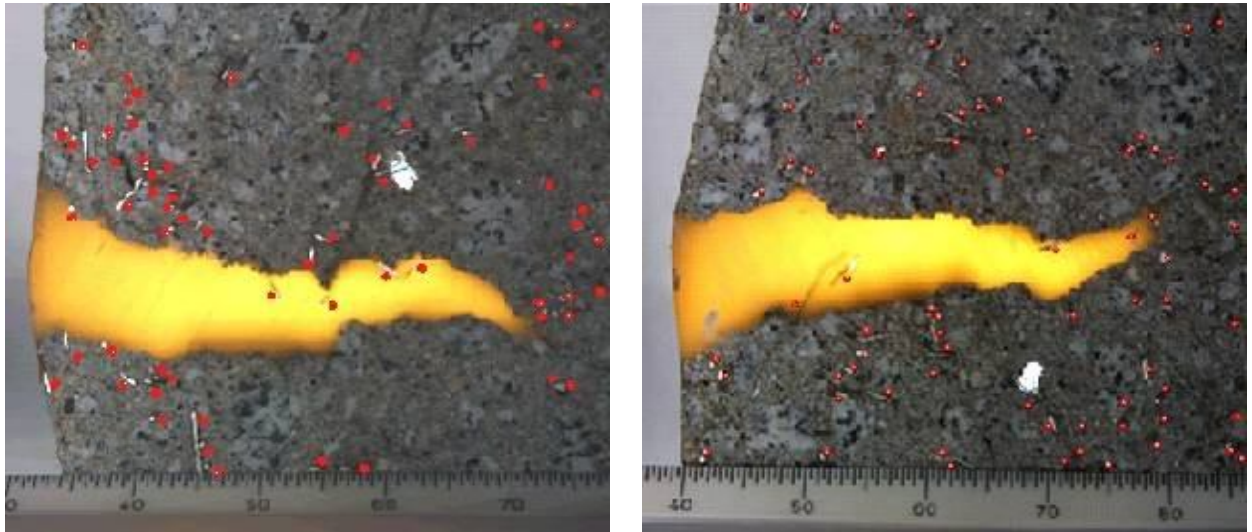


Fig. 4.26 - Distribuição das fibras na secção 5-a e 5-c

Esta constatação leva à conclusão, de que o BACRFA se mantém homogéneo durante a sua produção, não sofrendo segregação das fibras.



## CAPÍTULO V - Conclusões

### 5.1 - Conclusões Finais e Recomendações Futuras

Em relação à auto-compactabilidade do BACRFA, pode concluir-se que o teor de argamassa, independentemente do valor da esbelteza das fibras, cresce com o volume das mesmas. Tal premissa significa que existe uma relação directa para as fibras e misturas estudadas, entre o teor de argamassa e o índice de fibras, tal como elucidado na Figura 4.1. Misturas com maiores volumes de fibras, exigem teores de argamassa mais elevados para o envolvimento das mesmas, promovendo assim o escoamento do BACRFA, tal como demonstrado na Figura 4.8.

Neste estudo, a aplicação do parâmetro índice de fibras  $(l_f/d_f)*V_f$ , demonstrou ser um bom indicador da influência da esbelteza das fibras e do seu volume na mistura.

Particularmente, pode ser verificado ao serem medidas propriedades como a capacidade de espalhamento e a capacidade de escoamento, que há uma influência marcante desse índice, traduzida por um acréscimo dos valores medidos.

No caso da capacidade de espalhamento, antes de atingir o valor máximo já atribuído ao efeito de acréscimo de massa, a influência do índice de fibras passa por um valor mínimo, o que significa não haver linearidade na correlação da capacidade de espalhamento e índice de fibras.

No caso da capacidade de escoamento, tanto no tempo  $T_{40seg}$  como no Funil V, a influência do índice de fibras também é do tipo não linear, mas com um valor máximo, seguido de um decréscimo que também identifica a acção do aumento de massa.

O BACRFA permite uma maior homogeneização ou distribuição mais uniforme das fibras, e também uma orientação mais efectiva, segundo a direcção do escoamento da betonagem, devido às suas propriedades reológicas no estado fresco.

Assim como Kurugöl et al (2008), neste estudo percebeu-se também que o espalhamento do betão reforçado com fibras diminui, à medida que o acréscimo de agregados totais e do índice de fibras se tornam evidentes.

Quanto às propriedades do BACRFA no estado endurecido, observou-se que a inserção de fibras curtas tem pouca influência na variação da resistência à compressão. No caso de fibras longas, observa-se o mesmo comportamento, porém quando se mantém o mesmo volume de fibras, a resistência varia significativamente com o aumento da proporção de agregados totais.

Observou-se uma nítida tendência da redução da resistência equivalente à tracção com o aumento do agregado total  $m$  nas misturas. Para a série de misturas com fibras curtas, as resistências equivalentes à tracção na flexão,  $f_{eq,2}$ , aumentam cerca de 100% para cada 0,5% a mais no volume de fibras. Para a série de fibras longas, os resultados também seguiram uma tendência de aumento da resistência equivalente, porém, não com a mesma grandeza.



Quando se mantém o agregado total  $m$ , constante, verificou-se que com o acréscimo de fibras de aço ao BAC aumenta inegavelmente a resistência do mesmo, não obstante alguma variação da razão  $W/Cm$ . Quando o volume de fibras se mantém constante e havendo um aumento dos agregados totais, a resistência à compressão diminui abruptamente, bem como o módulo de elasticidade, e isto mantendo a razão  $W/Cm$  com o mesmo valor. Tal comportamento poderá significar uma maior influência dos agregados totais,  $m$ , na composição do BACRFA, pois ainda que o índice de fibras mais elevado aumente a resistência à compressão, devido ao efeito das fibras que cosem a micro fissuração interna, o aumento do agregado total  $m$ , provoca uma maior fragilidade na resistência da matriz.

Kurugöl et al (2008), perceberam no estudo que realizaram para betões normais, que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento do índice de fibras. Este factor foi corroborado no presente trabalho. No mesmo estudo realizado pelos mesmos autores, foi observado que o módulo de elasticidade do betão leve reforçado com fibras de aço diminui com o aumento da quantidade de agregados totais. No presente trabalho foi observado exactamente o mesmo em relação ao BACRFA.

Da análise dos resultados dos ensaios realizados em fase experimental, constata-se um valioso contributo no entendimento dos parâmetros influenciadores dos resultados obtidos. É indiscutível a influência dos agregados totais na resistência à compressão e no módulo de elasticidade. Da mesma forma, é indiscutível a influência do índice de fibras no espalhamento e trabalhabilidade do BACRFA.

A literatura existente referente ao BACRFA evidencia a enorme quantidade de métodos que permitem uma abordagem ao estudo das composições do BACRFA. Não obstante o grande e crescente número de investigadores que se tem debruçado sobre esta área, continua sem ser consensual uma dosagem concreta dos diferentes componentes que constituem o BACRFA.

Pretende assim, o presente trabalho ser uma contribuição relevante para a revelação de um parâmetro que auxilie a formulação de misturas de BACRFA.

Em síntese, esta contribuição é também enriquecida com as respostas às questões formuladas no Capítulo I. Ou seja, o BACRFA tem uma vantagem em relação ao BRFA, por ser capaz de melhor distribuir as fibras na sua massa durante a colocação do betão. O BACRFA, possibilita a incorporação de volumes importantes de fibras de aço sem apresentar nenhum problema de bloqueio ou segregação. As grandezas limites de volumes de fibras, revelam um tecto máximo de 1,5% para as fibras curtas e 1,0% para as fibras longas. Pode por conseguinte deduzir-se a partir dos resultados deste estudo, que o BACRFA tem um desempenho no mínimo semelhante ao BRFA, se não mais relevante ainda.

Finalmente, no sentido de promover uma investigação mais orientada para as questões que surgiram com o presente trabalho, enunciam-se algumas recomendações futuras que poderão melhor elucidar a influência dos parâmetros necessários à dosagem de BACRFA.



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

De forma a verificar o ocorrido na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, seria recomendável a confecção de algumas misturas com o mesmo índice de fibras, variando os agregados totais, e a confecção de outras em que se mantém constante o valor de agregados totais, aumentando em 50% o índice de fibras, a fim de ser avaliado qual a sua influência e qual o parâmetro que contribui para a alteração de resultados, verificando-se se algum se destaca ou se é a combinação de vários parâmetros.



## Referências Bibliográficas

Almeida, E. (2007) - "Avaliação do Efeito de um Adjuvante Redutor de Retracção no Betão Auto-Compactável", «Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade do Algarve».

Altun, F.; Haktanir, T. e Ari, K. (2007)- "Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams", in «Construction and Building Materials, Vol. 21», pp. 654-661.

Ambroise, J., Rols, S. e Pera, J., (1999)- "Properties of Self-Levelling Concrete Reinforced by Steel Fibres", Proceedings of the Third International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W. Reinhardt and <sup>a</sup>E. Naaman, Germany, pp 9-17.

American Society of Mechanical Engineers (ASME) (1994)- "Fibre Reinforced Concrete - Myth and Reality Advances", in «Cement and Concrete».

Amorim, J.A., (2002)- "Betão de custo competitivo reforçado com fibras de aço para pavimentos industriais", «Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade do Minho», Portugal

Association Française de Génie Civil, (2000)- Bétons auto-plaçants: Recommandations provisoires, Documents Scientifiques et Techniques, Juillet 2000, 63 p

Atis, Cengiz Duran & Karahan Okan (2009)- "Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete".

Barros, Alexandre R. (2009)- "Avaliação do Comportamento de Vigas de Concreto Auto-Adensável reforçado com Fibras de Aço", «Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Alagoas», Maceió

Barros, J.A.O., Antunes, J.A.B e Amorim, J.A.S.B.A. (2002)- "Eficácia de fibras discretas de aço no reforço à flexão de elementos de betão", Congresso Nacional da Engenharia de Estruturas, Lisboa, pp 283-292.

Barros, J.A.O., Pereira, E.B., Ribeiro, A.F. e Antunes J.A.B., (2004)- "Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precasted sandwich panels - experimental and numerical research", in «Workshop of 6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB 2004, 24-25», September, (artigo convidado).

Barros, J.A.O., Ribeiro, A.F., Cunha, V.M.C.F. e Antunes, J.A.B., (2003)- "Fibras de aço no reforço ao corte de vigas de betão armado", in «Seminário sobre Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras», Eds. J. Barros, P. Rossi e B. Massicotte, Guimarães, p. 7.1-7.32, 28 Novembro.

Barros, A.O.J., Pereira E. N.B., Santos P.F. Simão, Lourenço, A.P. Lúcio, (2006)- "Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras - do laboratório à aplicação real".

Bartos, P. J. M. (2000)- "Measurements of Key properties of fresh self-compacting concrete, in «CEN/STAR PNR Workshop», Paris

Bartos, P. J. M. & Grauers, M. (1999) - "Self-Compacting Concrete", in «Concrete, Vol. 33, No.4», pp. 9-13.



## Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

Bosiljkov, V. B., (2003)- "SCC Mixed With Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler, in «Cement and Concrete Research, n33», pp 1279-1286.

Camões, A. F., Barros, J. A., e Pereira, E. N. (2004)- "Painéis Aligeirados em Betão Autocompactável Reforçado com Fibras de Aço" - Encontro Nacional de Betão Estrutural 2004.

Camões, A.; Barros, J. A. O. e Pereira, E. N. B.; (2008)- "Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: experimental research and numerical simulation", in «Journal of Materials in Engineering Civil, Vol. 134, nº 8», pp. 1310-1321.

Camões, A., Barros, J. A., e Pereira, E. N. (2004) - "Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço - Método de Conceção e Propriedades Mecânicas".

Ceccato, M. R.; Nunes, N. L.; e Figueiredo, A. D. (1997)- "Estudo do controle da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço", in: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle da Qualidade - CONPAT 97. Porto Alegre, Brasil. 21 a 24 de Outubro. Volume II. **Anais**. p.539-46.

Chanvillard, G. ; Aitcin, P.C. e Lupien, C. (1989)- "Field evaluation of steel fiber reinforced concrete overlay with various bonding mechanisms", in «Transportation Research Board, 1226», pp. 48-56.

Chenkui, H., e Guofan, Z. (1995)- "Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete Containing Larger Coarse of Aggregate", in «Cement and concrete composites 17», Elsevier Science Ltd, pp. 199-206.

Comité Euro-International du Béton (1993) - CEB-FIP Model Code 1990. London, Thomas Telford.

David, J. (1999)- "Betão Auto-compactável: Um Material Novo Para a Pré-Fabricação", 3as Jornadas de Estruturas de Betão, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, pp. 97-110.

Domone, P. L. (2007)- "A review of the hardened mechanical properties of selfcompacting concrete", in: «Cement and Concrete Composites, Vol. 29», 2007, p. 1-12.

Especificação LNEC E226-1968 - Betão: Ensaio de Compressão

Especificação LNEC E393-1993 - Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade

Especificação LNEC E397-1993 - Betões: Determinação do módulo de elasticidade

European Committee for Standardization (2010)- «Testing Fresh Concrete, part 8:Self Compacting Concrete - Slump-flow test». EN 12350-8

European Committee for Standardization (2010)- «Testing Fresh Concrete, part 9:Self Compacting Concrete - V-funnel test». EN 12350-9

European Committee for Standardization (2010)- «Testing Fresh Concrete, part 10:Self Compacting Concrete - L box test». EN 12350-10

European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), (2002) - "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", February.

European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC) (2005)- "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete- Specification, Production and Use", May.



Evangelista, L. M. R. (2003)- "Betão reforçado com fibras de aço - aplicação em pavimentos industriais", Construlink Press No 11. Disponível em: [http://www.construlink.com/Homepage/2003\\_ConstrulinkPress/Monografias.php](http://www.construlink.com/Homepage/2003_ConstrulinkPress/Monografias.php). Acedido em: 15 de Fevereiro de 2010.

Ferreira, R. M. (2001)- "Betão Autocompactável: Metodologia de Composição", «Dissertação de Mestrado apresentada à UMinho». Guimarães, Julho.

Figueiredo, A. D. (2000)- "Concreto com Fibras de Aço", in: ISSN 0103-9830 - BT/PCC/260, São Paulo.

Filho, F. M. A. (2006)- "Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis", «Dissertação de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo».

Gava, G. P. (2006)- "Análise Teórica-Experimental do Comportamento à Flexão de Vigas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço", «Dissertação de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina», Agosto.

Gomes, P. C. C., (2002)- "Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete", «Dissertação de Doutorado apresentada à Universidade de Barcelona».

Gomes, P. C. C.; Cavalcanti, D. J. H.; Barros, A. R.; Barboza, A. S. R. e Lima, F. B. (2006) - "Propriedades mecânicas de concreto auto-adensável, in: «XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural», 10 f. XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Campinas.

Gomes, P. C. C.; Gettu, R. e Agulló, L. (2003)- "Uma nova metodologia para abtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais", in «V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto», a, pp. 1-14

Gopalaratnam, V.S. & Shah, S.P. (1987)- "Failure mechanisms and fracture of fibre reinforced concrete". *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, edited by S.P. Shah and G.B. Batson, SP-105, ACI, pp.1-26.

Groth, P., & Thun, H.(2000)- "Influence of Steel Fiber Reinforcement on the workability of Self-Compacting Concrete", in «concrete Science and Engineering» Vol 2, June, pp. 65-70.

Grünewald, S. & Walraven, J.C., (2001)- "Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete", in «Cement and Concrete Research, 31», pp 1793-1798

Helene, P. R. L. (1986)- "Corrosão em armaduras para concreto armado", PINI Editora. São Paulo.

Helene, P. R. L. (1993)- "Proposta apresentada em reunião da comissão de revisão da NBR 6118", 2 f.

Holschemacher, K. & Klug, Y. (2002)- "A database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC", in: «LACER, nº 7», pp. 123-134.

Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (1998)- «Method of tests for steel fiber reinforced concrete», part III-2

Jonhston, C. D. (1994)- "Fibre-reinforced cement and concrete", in «Malhotra, V. M. *Advances in Concrete Technology - Second Edition*», Ottawa, Canada: CANMET.



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.

Khayat, K. H. (1999)- "Workability, Testing and Performance of self-Consolidating Concrete", in «ACI Material Journal», vol. 96, N3, May-June, pp. 346-353.

Khayat, K. H., & Roussel, Y. (2000)- "Testing and Performance of Fiber reinforced, Self-Consolidating Concrete".

Khayat, K. & Tangtermsirikul, S. (2000)- "Fresh Concrete Properties (Background Document)", in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23- 3, p. 17-22.

Kurugöl, Sedat; Tanaçan Leyla e Ersoy, Halit Yasa (2008)- Young's modulus of fiber-reinforced and polymer-modified lightweight concrete composites.

Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M.,(1994)- "Concreto: microestrutura, propriedades e materiais", 3ª edição, IBRACON

Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. (1994)- "Concreto: estruturas, propriedades e materiais", Editora Pini, São Paulo, 573 p.

Mindess, S. (1995)- "Fibre reinforced concrete: challenges and prospects", in: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials. Toronto, Canada. Proceedings. pp.1-12.

Naaman, A. E.(2000)- "Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead", in: «Fibre reinforced concretes (FRC) - BEFIB'2000». Proceedings...Edited by P. Rossi and G. Chanvillard. pp. 65-85

Nepomuceno, M. C. S. (2005)- "Metodologia para a Composição de Betões Auto-Compactáveis", «Dissertação de Doutoramento apresentada na Universidade da Beira Interior». Covilhã.

Nunes, S. C. B. (2001)- "Betão Autocompactável: Tecnologia e Propriedades", «Dissertação de Mestrado apresentada na FEUP». Porto, 2001

Okamura, H. (1997)- "Ferguson Lecture for 1996: Self-compacting high-performance concrete", *Concrete International, ACI*, Vol. 19, nº 7, pp. 50-54.

Ozawa, K., Sakata, N. e Okamura, H.(1994)- " Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete Using the Funnel Test". *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 490, pp. 71-80

Pereira de Oliveira, L. A. (2001)- "A formulação do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço". In Branco F. et al (eds), *Construção 2001: Por uma construção sustentável*; Proc. Nation.Congress, Lisbon, 17-19 December 2001. pp 463-470

Pereira de Oliveira, L.A. (2000)- "Optimização da Composição do Betão Auto-Compactável", in «Encontro Nacional: Betão Estrutural 2000», Porto, ISBN:972-752-043-X, Nov. 2000, p.65-74

Pereira de Oliveira, L.A. & Bernardo, L (2004)- "Resistência e ductilidade em flexão de paredes de alvenaria armadas e preenchidas com betão auto-compactável reforçado com fibras de aço", in «Actas do congresso Betão Estrutural BE 2004», Porto, V.1, 669-676.

Pereira de Oliveira, L. A., Carreiro, P. S., e Pericão, Mafalda S. (2003)- "The Steel Fibers Self-compacting Infill contribution on the ductility of concrete masonry wall", Dec-UBI.



Pereira de Oliveira, L. A. & Castro-Gomes, J. P., (2001)- "A influência do Teor de Argamassa na Viscosidade do Betão Auto-Compactável Reforçado Com Fibras de Aço". ,Engenharias 2001, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Novembro, pp. 309-313.

Pereira de Oliveira, L. A., Gomes, J. P. C., e Pereira, Cristiana N. G. (2003) - "Influência de Adições Minerais na Absorção Capilar de Betões Auto-Compactáveis". Covilhã, UBI.

Petersson, O.; Billberg, P e Bui, V. K. (1996)- "A model for Self-Compacting Concrete", in «Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete», Paisley, June, Ed. Bartos PJM, Marrs DL, and Cleland DJ, E&FN Spon; London, p 484-492.

Powers, T.C. (1968)- "The properties of fresh concrete", John Wiley Sons Inc., USA.

RILEM, S. N. (2003)- "Betões de Elevado Desempenho Arquitectónico", «Seminário novos Desenvolvimentos do Betão», Setembro.

Rilem TC 162-TDF Committee. (2002)- "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Recommendations for bending test. Materials and Structures", 33p (1-2), 2000, 3-5.

Rilem TC 162-TDF Committee. 2000a- "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete". Recommendations for  $\sigma - \epsilon$  design method. Materials and Structures, 33 (3) 75 81.

Rilem TC 162-TDF Committee. 2000b- "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete". Recommendations for bending test. Materials and Structures, 33 (1-2) 3-5.

Sahmaran, M. & Yaman, I. O. (2005)- "Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash". Construction and Building Materials. Vol. 21. p. 150 - 156.

Santos, S. F., (2000)- "The Bending and Shear Behaviour of Laminar Structures of High Performance Fibre Reinforced Concrete", «Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade do Minho».

Sedran, T. & De Larrard, F. (1999)- "Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model". Proc. 1st Intl. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Eds. A.Skarendahl y Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, França, pp. 321-332.

SIKA. - Sika, Viscocrete 3000, Ficha Técnica, Versão nº4, Edição Julho 2003.

Skarendahl, A. (2000)- "Definitions and Development Objectives (Background Documents)", in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23- 3, p. 3-13.

Skarendahl, A. (2000)- "Early Age and Hardened Properties (Background Document)", in «Self Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23-3, p. 43-46.

Skarendahl, Å. & Petersson, O. (ed), (2001)- "Self-Compacting Concrete", State-of-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Report 23, RILEM Publications S.A.R.L. 154p.

Sonebi, M., Bartos, P. J. M., Zhu, W., Gibbs, J. e 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, disponível em <http://scc.ce.luth.se>, 16-01-2010 10:30h.

SWAMY, R.N. (1975)- "Fibre Reinforcement of Cement and Concrete. Materials and Structures", Research and Testing (RILEM, Paris), nº.48, May-June, pp.235-254

Tanesi, J., (1999)-"A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração", «Dissertação apresentada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo».



Takada, K.; Tangtermsirikul, S.(2000)- "Testing of fresh concrete", In: Self- Compacting Concrete: State-of- the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC. Ed.: Skarendahl, Å.; Petersson, Ö., RILEM Publications, S.A.R.L, Cachan, pp. 20-34.

TESTING-SCC PROJECT - Self-Compacting Concrete (2005)- "Measurement of properties of fresh self-compacting concrete". Final Report. Project Co-ordinator: ACM Centre, University of Paisley, UK. September.

Tutikian, Bernardo F. (2004)- "Método para Dosagem de Concretos Auto-Adensáveis", «Dissertação de Mestrado apresentada á Universidade Federal do Rio Grande do Sul», Agosto.

Tviksta, L. (2000)- "End product. In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self-compacting concrete". Task 9, pp. 1-48.

Zangelmi Jr., E. (1999)- "Caracterización del Comportamiento de Hormigones de Altas Prestaciones com y sin Fibras Metálicas a Compresión Uniaxial", «Dissertação de Doutoramento apresentada à Universidade Politècnica da Catalunya. Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Caminos, Canals i Ports», Barcelona, Abril.



## **ANEXOS**



## **Anexo A.1 - Tabelas de Misturas Iniciais**



Tabela A.1.1 - Misturas Soluções Iniciais

	Proporções em Massa (C: C <sub>v</sub> : a: b)	m	W/C <sub>m</sub>	Características das Fibras				Sp (%)	A <sub>s</sub> (%)
				l <sub>f</sub> (mm)	d <sub>f</sub> (mm)	V <sub>f</sub> (%)	(l <sub>f</sub> /d <sub>f</sub> )xV <sub>f</sub> (%)		
Mistura A	1: 0.15: 1.78: 1.72	3.50	0.40	30.00	0.50	0.00	0	2.00	63
Mistura B	1: 0.15: 2.00: 1.50	3.50	0.40	30.00	0.50	0.50	25	2.50	68
Mistura C	1: 0.30: 2.06: 1.44	3.50	0.40	30.00	0.50	1.00	50	2.50	70
Mistura D	1: 0.50: 2.15: 1.35	3.50	0.40	30.00	0.50	1.50	75	2.50	73
Mistura E	1: 0.15: 2.00: 1.50	3.50	0.40	60.00	0.80	0.50	37.50	2.00	68
Mistura F	1: 0.30: 2.06: 1.44	3.50	0.38	60.00	0.80	1.00	75.00	2.00	70
Mistura G	1: 0.50: 2.15: 1.35	3.50	0.38	60.00	0.80	1.50	112.50	2.00	73
Mistura H	1: 0.15: 2.10: 1.40	3.50	0.38	60.00	0.80	1.00	75.00	2.00	70
Mistura I	1: 0.15: 2.245: 1.255	3.50	0.38	60.00	0.80	1.00	75.00	2.00	73
Mistura J	1: 0.30: 2.76: 1.74	4.50	0.38	60.00	0.80	1.00	75.00	2.00	70
Mistura L	1: 0.30: 3.46: 2.04	5.50	0.38	60.00	0.80	1.00	75.00	2.00	70

C - Cimento tipo II 35,5; C<sub>v</sub> - Cinza Volante; a - areia; b - agregado grosso; m - agregado total; W/C<sub>m</sub> - água / materiais finos; Sp - Superplastificante; V<sub>f</sub> - Volume de fibras; A<sub>s</sub> - Teor de argamassa



## **Anexo A.2 - Tabelas de Contagem de Fibras na Secção de Fractura**



Tabela A.2.1 - Distribuição média das fibras na secção de fractura - CP. BAC 0,5% V1

	Célula 1ª coluna	Nº de fibras	Célula 2ª coluna	Nº de fibras	Célula 3ª coluna	Nº de fibras	Célula 4ª coluna	Nº de fibras	Total de fibras	Fibras (%)
4ª linha	1.00	3.00	2.00	14.00	3.00	10.00	4.00	10.00	37.00	27.40
3ª linha	5.00	8.00	6.00	9.00	7.00	4.00	8.00	8.00	29.00	21.50
2ª linha	9.00	5.00	10.00	10.00	11.00	9.00	12.00	6.00	30.00	22.20
1ª linha	13.00	14.00	14.00	10.00	15.00	11.00	16.00	4.00	39.00	28.90
Total de fibras		30.00		43.00		34.00		28.00	135.00	
Fibras (%)		22.20		31.80		25.20		20.80		

Tabela A.2.2 - Distribuição média das fibras na secção de fractura - CP. BAC 0,5% V2

	Célula 1ª coluna	Nº de fibras	Célula 2ª coluna	Nº de fibras	Célula 3ª coluna	Nº de fibras	Célula 4ª coluna	Nº de fibras	Total de fibras	Fibras (%)
4ª linha	1.00	4.00	2.00	5.00	3.00	7.00	4.00	5.00	21.00	22.60
3ª linha	5.00	9.00	6.00	4.00	7.00	4.00	8.00	3.00	20.00	21.50
2ª linha	9.00	5.00	10.00	6.00	11.00	7.00	12.00	6.00	24.00	25.80
1ª linha	13.00	6.00	14.00	8.00	15.00	5.00	16.00	9.00	28.00	30.10
Total de fibras		24.00		23.00		23.00		23.00	93.00	
Fibras (%)		25.80		24.70		24.70		24.70		

Tabela A.2.3 - Distribuição média das fibras na secção de fractura - CP. BAC 1,0% V3

	Célula 1ª coluna	Nº de fibras	Célula 2ª coluna	Nº de fibras	Célula 3ª coluna	Nº de fibras	Célula 4ª coluna	Nº de fibras	Total de fibras	Fibras (%)
4ª linha	1.00	9.00	2.00	6.00	3.00	8.00	4.00	13.00	36.00	16.00
3ª linha	5.00	17.00	6.00	19.00	7.00	18.00	8.00	15.00	69.00	30.70
2ª linha	9.00	15.00	10.00	16.00	11.00	14.00	12.00	14.00	59.00	26.20
1ª linha	13.00	15.00	14.00	19.00	15.00	12.00	16.00	15.00	61.00	27.10
Total de fibras		56.00		60.00		52.00		57.00	225.00	
Fibras (%)		24.90		26.70		23.10		25.30		



Tabela A.2.4 - Distribuição média das fibras na secção de fractura - CP. BAC 1,0% V4

	Célula 1ª coluna	Nº de fibras	Célula 2ª coluna	Nº de fibras	Célula 3ª coluna	Nº de fibras	Célula 4ª coluna	Nº de fibras	Total de fibras	Fibras (%)
4ª linha	1.00	22.00	2.00	18.00	3.00	23.00	4.00	25.00	88.00	28.80
3ª linha	5.00	18.00	6.00	24.00	7.00	16.00	8.00	25.00	83.00	27.10
2ª linha	9.00	12.00	10.00	17.00	11.00	20.00	12.00	19.00	68.00	22.20
1ª linha	13.00	10.00	14.00	18.00	15.00	15.00	16.00	24.00	67.00	21.90
Total de fibras		62.00		77.00		74.00		93.00	306.00	
Fibras (%)		20.30		25.20		24.20		30.40		

Tabela A.2.5 - Distribuição média das fibras na secção de fractura - CP. BAC 1,5% V5

	Célula 1ª coluna	Nº de fibras	Célula 2ª coluna	Nº de fibras	Célula 3ª coluna	Nº de fibras	Célula 4ª coluna	Nº de fibras	Total de fibras	Fibras (%)
4ª linha	1.00	24.00	2.00	24.00	3.00	24.00	4.00	20.00	92.00	24.40
3ª linha	5.00	23.00	6.00	33.00	7.00	24.00	8.00	19.00	99.00	26.30
2ª linha	9.00	22.00	10.00	24.00	11.00	25.00	12.00	27.00	98.00	26.00
1ª linha	13.00	18.00	14.00	26.00	15.00	31.00	16.00	13.00	88.00	23.30
Total de fibras		87.00		107.00		104.00		79.00	377.00	
Fibras (%)		23.10		28.40		27.60		21.00		

Tabela A.2.6 - Distribuição média das fibras na secção de fractura - CP. BAC 1,5% V6

	Célula 1ª coluna	Nº de fibras	Célula 2ª coluna	Nº de fibras	Célula 3ª coluna	Nº de fibras	Célula 4ª coluna	Nº de fibras	Total de fibras	Fibras (%)
4ª linha	1.00	38.00	2.00	22.00	3.00	24.00	4.00	30.00	114.00	24.20
3ª linha	5.00	29.00	6.00	39.00	7.00	36.00	8.00	40.00	144.00	30.60
2ª linha	9.00	29.00	10.00	28.00	11.00	28.00	12.00	30.00	115.00	24.40
1ª linha	13.00	25.00	14.00	14.00	15.00	30.00	16.00	29.00	98.00	20.80
Total de fibras		121.00		103.00		118.00		129.00	471.00	
Fibras (%)		25.70		21.90		25.10		27.40		



### **Anexo A.3 - Absorção de Água por Capilaridade**



Contribuição para a Formulação do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço

A tabela A.3.1, apresenta os resultados obtidos por média com leituras executadas em dois provetes.

Tabela A.3.1 - Média de Resultados Gerais das leituras efectuadas, com base em 2 provetes (fibras 60/0.80)

	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (Kg/m <sup>2</sup> )									
	0 min	15 min	30 min	1 hora	1h 30min	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Mistura E	1566	1570.5	1570.5	1572.5	1574.0	1576.5	1580.0	1590.0	1595.0	1600.5
Mistura F	1550.0	1555.5	1556.5	1558.0	1559.5	1563.0	1566.5	1576.0	1580.5	1586.0
Mistura G	1617.5	1621.5	1622.5	1624.0	1625.0	1627.5	1630.0	1638.0	1641.5	1645.5
Mistura H	1595.0	1600.5	1604.5	1606.5	1608.0	1611.5	1617.0	1629.5	1639.0	1644.5
Mistura I	1565.5	1571.5	1576.0	1578.0	1580.0	1583.5	1588.0	1600.5	1608.5	1613.5
Mistura J	1511.5	1520.0	1524.5	1526.5	1529.0	1533.0	1539.5	1556.5	1567.5	1574.5
Mistura L	1535	1546	1551	1553	1554.5	1558	1563.5	1578	1587.5	1593.5

Nos quadros seguintes, apresentam-se os resultados obtidos nas leituras efectuadas no ensaio de absorção por capilaridade, para as várias misturas em que se utilizaram fibras 60/0.80.

**Mistura E:**

Tabela A.3.2 - Resultados da absorção de água por capilaridade obtidos em 2 provetes aos 28 dias (fibras 60/0.80)

Tempo	Tempo (min)	Raíz Tempo	Massa dos prismas (kg)		Absorção kg/m <sup>2</sup>		Média
			1	2	1	2	
0min	0	0	0.1577	0.1555	0.0000	0.0000	0.0000
15min	15	3.872983	0.1581	0.156	0.0711	0.0889	0.0800
30min	30	5.477226	0.1581	0.156	0.0711	0.0889	0.0800
1h	60	7.745967	0.1583	0.1562	0.1067	0.1244	0.1156
1h30min	90	9.486833	0.1584	0.1564	0.1244	0.1600	0.1422
4h	240	15.49193	0.1587	0.1566	0.1778	0.1956	0.1867
6h	360	18.97367	0.159	0.157	0.2311	0.2667	0.2489
24h	1440	37.94733	0.16	0.158	0.4089	0.4444	0.4267
48h	2880	53.66563	0.1605	0.1585	0.4978	0.5333	0.5156
72h	4320	65.72671	0.161	0.1591	0.5867	0.6400	0.6133
		<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>	0.0056	0.0056			



**Mistura F:**

Tabela A.3.3 - Resultados da absorção de água por capilaridade obtidos em 2 provetes aos 28 dias (fibras 60/0.80)

Tempo	Tempo (min)	Raíz Tempo	Massa dos prismas (kg)		Absorção kg/m <sup>2</sup>		Média
			1	2	1	2	
0min	0	0	0.1535	0.1565	0.0000	0.0000	0.0000
15min	15	3.872983	0.1541	0.157	0.1067	0.0889	0.0978
30min	30	5.477226	0.1542	0.1571	0.1244	0.1067	0.1156
1h	60	7.745967	0.1544	0.1572	0.1600	0.1244	0.1422
1h30min	90	9.486833	0.1546	0.1573	0.1956	0.1422	0.1689
4h	240	15.49193	0.155	0.1576	0.2667	0.1956	0.2311
6h	360	18.97367	0.1554	0.1579	0.3378	0.2489	0.2933
24h	1440	37.94733	0.1564	0.1588	0.5156	0.4089	0.4622
48h	2880	53.66563	0.1569	0.1592	0.6044	0.4800	0.5422
72h	4320	65.72671	0.1575	0.1597	0.7111	0.5689	0.6400
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>			0.0056	0.0056			

**Mistura G:**

Tabela A.3.4 - Resultados da absorção de água por capilaridade obtidos em 2 provetes aos 28 dias (fibras 60/0.80)

Tempo	Tempo (min)	Raíz Tempo	Massa dos prismas (kg)		Absorção kg/m <sup>2</sup>		Média
			1	2	1	2	
0min	0	0	0.1638	0.1597	0.0000	0.0000	0.0000
15min	15	3.872983	0.1641	0.1602	0.0533	0.0889	0.0711
30min	30	5.477226	0.1642	0.1603	0.0711	0.1067	0.0889
1h	60	7.745967	0.1643	0.1605	0.0889	0.1422	0.1156
1h30min	90	9.486833	0.1644	0.1606	0.1067	0.1600	0.1333
4h	240	15.49193	0.1646	0.1609	0.1422	0.2133	0.1778
6h	360	18.97367	0.1648	0.1612	0.1778	0.2667	0.2222
24h	1440	37.94733	0.1655	0.1621	0.3022	0.4267	0.3644
48h	2880	53.66563	0.1658	0.1625	0.3556	0.4978	0.4267
72h	4320	65.72671	0.1662	0.1629	0.4267	0.5689	0.4978
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>			0.0056	0.0056			



**Mistura H:**

Tabela A.3.5 - Resultados da absorção de água por capilaridade obtidos em 2 provetes aos 28 dias (fibras 60/0.80)

Tempo	Tempo (min)	Raíz Tempo	Massa dos prismas (kg)		Absorção kg/m <sup>2</sup>		Média
			1	2	1	2	
0min	0	0	0.1619	0.1571	0.0000	0.0000	0.0000
15min	15	3.872983	0.1625	0.1576	0.1067	0.0889	0.0978
30min	30	5.477226	0.1629	0.158	0.1778	0.1600	0.1689
1h	60	7.745967	0.1631	0.1582	0.2133	0.1956	0.2044
1h30min	90	9.486833	0.1633	0.1583	0.2489	0.2133	0.2311
4h	240	15.49193	0.1636	0.1587	0.3022	0.2844	0.2933
6h	360	18.97367	0.1642	0.1592	0.4089	0.3733	0.3911
24h	1440	37.94733	0.1655	0.1604	0.6400	0.5867	0.6133
48h	2880	53.66563	0.1666	0.1612	0.8356	0.7289	0.7822
72h	4320	65.72671	0.1671	0.1618	0.9244	0.8356	0.8800
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>			0.0056	0.0056			

**Mistura I:**

Tabela A.3.6 - Resultados da absorção de água por capilaridade obtidos em 2 provetes aos 28 dias (fibras 60/0.80)

Tempo	Tempo (min)	Raíz Tempo	Massa dos prismas (kg)		Absorção kg/m <sup>2</sup>		Média
			1	2	1	2	
0min	0	0	0.1533	0.1598	0.0000	0.0000	0.0000
15min	15	3.872983	0.1539	0.1604	0.1067	0.1067	0.1067
30min	30	5.477226	0.1543	0.1609	0.1778	0.1956	0.1867
1h	60	7.745967	0.1545	0.1611	0.2133	0.2311	0.2222
1h30min	90	9.486833	0.1547	0.1613	0.2489	0.2667	0.2578
4h	240	15.49193	0.155	0.1617	0.3022	0.3378	0.3200
6h	360	18.97367	0.1554	0.1622	0.3733	0.4267	0.4000
24h	1440	37.94733	0.1566	0.1635	0.5867	0.6578	0.6222
48h	2880	53.66563	0.1574	0.1643	0.7289	0.8000	0.7644
72h	4320	65.72671	0.1578	0.1649	0.8000	0.9067	0.8533
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>			0.0056	0.0056			



**Mistura J:**

Tabela A.3.8 - Resultados da absorção de água por capilaridade obtidos em 2 provetes aos 28 dias (fibras 60/0.80)

Tempo	Tempo (min)	Raíz Tempo	Massa dos prismas (kg)		Absorção kg/m <sup>2</sup>		Média
			1	2	1	2	
0min	0	0	0.1499	0.1524	0.0000	0.0000	0.0000
15min	15	3.872983	0.1508	0.1532	0.1600	0.1422	0.1511
30min	30	5.477226	0.1512	0.1537	0.2311	0.2311	0.2311
1h	60	7.745967	0.1514	0.1539	0.2667	0.2667	0.2667
1h30min	90	9.486833	0.1516	0.1542	0.3022	0.3200	0.3111
4h	240	15.49193	0.152	0.1546	0.3733	0.3911	0.3822
6h	360	18.97367	0.1526	0.1553	0.4800	0.5156	0.4978
24h	1440	37.94733	0.1542	0.1571	0.7644	0.8356	0.8000
48h	2880	53.66563	0.1553	0.1582	0.9600	1.0311	0.9956
72h	4320	65.72671	0.156	0.1589	1.0844	1.1556	1.1200
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>			0.0056	0.0056			

**Mistura L:**

Tabela A.3.9 - Resultados da absorção de água por capilaridade obtidos em 2 provetes aos 28 dias (fibras 60/0.80)

Tempo	Tempo (min)	Raíz Tempo	Massa dos prismas (kg)		Absorção kg/m <sup>2</sup>		Média
			1	2	1	2	
0min	0	0	0.1525	0.1545	0.0000	0.0000	0.0000
15min	15	3.872983	0.1534	0.1558	0.1600	0.2311	0.1956
30min	30	5.477226	0.1538	0.1563	0.2311	0.3200	0.2756
1h	60	7.745967	0.154	0.1565	0.2667	0.3556	0.3111
1h30min	90	9.486833	0.1541	0.1568	0.2844	0.4089	0.3467
4h	240	15.49193	0.1544	0.1572	0.3378	0.4800	0.4089
6h	360	18.97367	0.1549	0.1578	0.4267	0.5867	0.5067
24h	1440	37.94733	0.1561	0.1595	0.6400	0.8889	0.7644
48h	2880	53.66563	0.1569	0.1606	0.7822	1.0844	0.9333
72h	4320	65.72671	0.1574	0.1613	0.8711	1.2089	1.0400
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>			0.0056	0.0056			



A figura A.3.3.1, apresenta os coeficientes de capilaridade médios determinados apenas para todas as misturas de fibras longas estudadas, não tendo sido feito este estudo para fibras curtas.

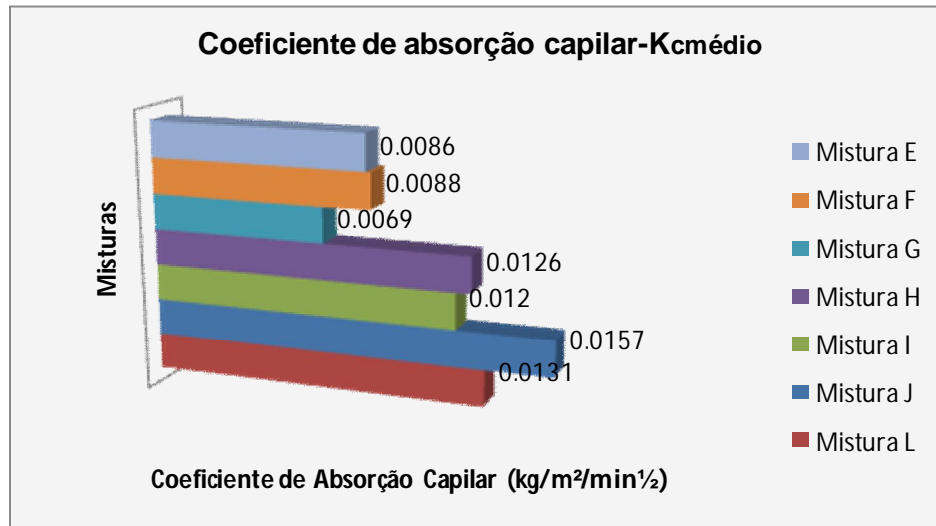


Figura A.3.3.1 - Comparativo entre coeficientes de absorção capilar das misturas ( $K_c$  médio)