

BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS

FILIPPE ANDRÉ ARAÚJO GOMES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador(a): Professora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JUNHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

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

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

À memória dos meus avós

O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Aproveito esta oportunidade para agradecer à minha orientadora, a professora Sandra Nunes, pelos conhecimentos que me transmitiu, por toda a disponibilidade demonstrada, quer para o esclarecimento de dúvidas que surgiam, quer pelo tempo dispendido nas betonagens, sendo sempre visível uma preocupação cuidada da sua parte. À engenheira Paula Silva, à Cecília Silva e ao Cláudio, pela ajuda sem a qual não seria possível realizar os ensaios e betonagens, fundamentais para esta dissertação.

Aos meus colegas, pela ajuda prestada quando algumas dúvidas foram surgindo, pois sem eles não seria possível resolver-las de forma rápida, especialmente ao Miguel Pires, pela disponibilidade em facultar os resultados e fotografias dos ensaios efectuados no âmbito da sua dissertação

Aos meus pais, pelo apoio fornecido em todas as alturas da minha vida e aos meus amigos, com especial destaque para uma amiga muito especial que ouviu com paciência, todos os meus desabafos, problemas e dúvidas na realização deste trabalho.

RESUMO

O principal objectivo do presente trabalho é aumentar o conhecimento sobre as potencialidades do betão auto-compactável reforçado com fibras (BACRF). Devido ao seu aparecimento relativamente recente, não existe ainda documentação legislativa que permita, ao meio técnico, adoptar este material como uma alternativa ao betão armado convencional.

Este trabalho engloba alguma revisão bibliográfica sobre as principais propriedades do BACRF, sendo também apresentados alguns modelos, anteriormente propostos, para a caracterização do mesmo quer no estado fresco como no estado endurecido.

Foram estudadas diversas composições de betão auto-compactável nas quais se procedeu à inclusão de diferentes tipos de fibras (plásticas e metálicas), com diferentes formas (lisas, onduladas ou com gancho na ponta) e diferentes dosagens para cada tipo. Esses estudos consistiram principalmente na caracterização do comportamento no estado fresco, relacionando os valores obtidos nos ensaios efectuados (ensaio de espalhamento, Funil V e caixa L) com as propriedades mais importantes como a viscosidade, resistência ao bloqueio, capacidade de enchimento, segregação e no estado endurecido registando os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão e no ensaio de flexão sob 3 pontos.

Os resultados obtidos foram analisados, sendo retiradas as principais conclusões sobre a influência dos diferentes tipos e dosagens de fibras no comportamento do BACRF.

Finalmente, foram produzidos e ensaiados 6 modelos de forma a simular as zonas de ancoragem de cabos de pré-esforço e foi estudada a viabilidade da substituição total ou parcial, das armaduras ordinárias de reforço destas zonas por BACRF.

PALAVRAS-CHAVE: Betão auto-compactável, fibras, estado fresco, estado endurecido, zonas de ancoragem

ABSTRACT

The main objective of the present work is to increase knowledge about the potential of using fibre reinforced self-compacting concrete (FRSCC). Due to its recent appearance, there is still a lack of information enabling most engineers to consider this material as an alternative to conventional concrete.

This paper covers literature review concerning the main properties of FRSCC and also presents some models, previously suggested, for its characterization in the fresh and in hardened states.

Several FRSCC mixtures were studied, where the material (plastic or steel fibres), the shape (smooth, wavy or hooked-end) and the dosage of fibres were varied. This study includes the characterization of the fresh state behaviour, relating the results of tests like, slump flow, V-funnel and L-Box, with the most important properties of SCC like blocking resistance, viscosity, segregation and passing ability; and the characterization of the hardened state, analyzing the behaviour of the specimens in the compression and three points bending tests.

The obtained results were analysed and the main conclusions about the influence of the different kinds and dosages of fibres in the behaviour of FRSCC were discussed.

Finally, six prismatic specimens were produced and tested to simulate the end-zone of prestressed beams in order to understand the advantages and disadvantages brought by the partial or total replacement of conventional reinforcing steel by steel fibres.

KEYWORDS: Self-compacting concrete, fibres, fresh state, hardened state, prestressed end-zones

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. Introdução	 1
1.1. ÂMBITO E OBJECTIVOS DO TRABALHO	1
1.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO	3
 2. Potencialidades do BACRF. Aplicações em engenharia civil	 7
2.1. CARACTERÍSTICAS DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL	7
2.2. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS	9
2.3. PROPRIEDADES DO BACRF	11
2.3.1. ESTADO FRESCO	11
2.3.2. INFLUÊNCIA DO TIPO E ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS	11
2.3.3. ADERÊNCIA	15
2.3.4. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO	15
2.3.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	17
2.3.6. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	17
2.3.7. MÓDULO DE ELASTICIDADE	19
2.3.8. DURABILIDADE	19
2.3.9. RESISTÊNCIA AO FOGO	20
2.3.10. RESISTÊNCIA AO IMPACTO	20
2.3.11. FLUÊNCIA E RETRACÇÃO	20
2.4. APLICAÇÃO DO BACRF AO NÍVEL DA ENGENHARIA CIVIL	21
2.4.1. APLICAÇÃO DO BACRF EM OBRAS SUBTERRÂNEAS	24
2.4.2. APLICAÇÃO EM ZONAS DE ANCORAGENS DE ELEMENTOS PRÉ-ESFORÇADOS	26
 3. Caracterização do BACRF no estado fresco	 29
3.1. MÉTODOS DE ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO BACRF	29

3.1.1. MÉTODO BASEADO NO MODELO REOLÓGICO DA PASTA DE CIMENTO	30
3.1.2. MÉTODO PROPOSTO POR TORRIJO, BARRAGÁN E ZEBRINO (2007)	32
3.1.3. MÉTODO BASEADO NO MODELO DE EMPACOTAMENTO	32
3.1.3.1. Diâmetro de espalhamento	33
3.1.3.2. Tempo de espalhamento de 500mm T_{500}	34
3.1.3.3. Conteúdo máximo de fibras	35
3.1.4. MÉTODO BASEADO NO MODELO DOS PLANOS FACTORIAIS	35
3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO	37
3.2.1. ENSAIO DE ESPALHAMENTO	38
3.2.2. ENSAIO DA CAIXA L	39
3.2.3. ENSAIO DO FUNIL V	42
3.2.4. RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO	43
3.2.5. ENSAIO DO ANEL J	43
3.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	44
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROCEDIMENTO DE AMASSADURA	44
3.3.1.1. Cimento	44
3.3.1.2. Filer calcário	45
3.3.1.3. Areia fina	46
3.3.1.4. Areia média	47
3.3.1.5. Brita	47
3.3.1.6. Superplastificante	48
3.3.1.7. Fibras	48
3.3.2. COMPOSIÇÕES ESTUDADAS	50
3.4. RESULTADOS OBTIDOS	53

4. Caracterização do BACRF no estado endurecido

4.1. COMPORTAMENTO DO BACRF NO ESTADO ENDURECIDO	57
4.1.1. MODELO PROPOSTO POR BARROS E FIGUEIRAS – (2006)	57
4.1.2. MODELO PROPOSTO POR EZELDIN E BALAGURU – (2002)	58
4.1.3. MODELO PROPOSTO POR GRÜNEWALD – (2004)	59
4.1.3.1. $f_{ctm.ax}$	60
4.1.3.2. Largura crítica da abertura da fenda (w_0)	60
4.1.3.3. Largura característica da abertura da fenda (w_c)	60

4.1.3.4. Tensão equivalente pós-fendilhação ($f_{ctm,eq,bil}$)	60
4.1.3.5. Tensão de ocorrência da primeira fenda ($s.f_{ctm,ax}$).....	60
4.1.3.6. Deslocamento com elasticidade reduzida ($\epsilon_{ct,fibras}$).....	61
4.2. RESULTADOS OBTIDOS PARA AS COMPOSIÇÕES ESTUDADAS	61
4.2.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL	61
4.2.2. ENSAIO DE FLEXÃO	62
4.3. RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DAS COMPOSIÇÕES UTILIZADAS	66
4.3.1. ENSAIO À COMPRESSÃO	66
4.3.1. ENSAIO DE FLEXÃO	71
4.4. NÚMERO DE FIBRAS QUE ATRAVESSAM A FENDA	79

5. Aplicação do BACRF em zonas de ancoragem de elementos pré-esforçados.....81

5.1. PRÉ-ESFORÇO. ZONAS DE ANCORAGENS DOS CABOS	81
5.2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DAS ZONAS DE ANCORAGEM	84
5.3. ENSAIO DOS MODELOS DAS CABEÇAS DE ANCORAGEM DOS CABOS DE PRÉ-ESFORÇO. MODELOS PRODUZIDOS E ENSAIOS REALIZADOS	86
5.3.1. MODELOS PRODUZIDOS.....	86
5.3.2. ENSAIOS REALIZADOS	88
5.4. RESULTADOS OBTIDOS	89
5.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	96

6. Conclusão.....99

6.1. VANTAGENS E CONDICIONANTES DA UTILIZAÇÃO DO BACRF. DIFERENÇAS COMPORTAMENTAIS DEVIDO AO TIPO E DOSAGEM DE FIBRAS	99
6.1.1. ESTADO FRESCO.....	99
6.1.1. ESTADO ENDURECIDO	100
6.1.3. APLICAÇÃO EM ZONAS DE ANCORAGEM DE CABOS DE PRÉ-ESFORÇO	100

BIBLIOGRAFIA	103
---------------------------	-----

1

Introdução

1.1. ÂMBITO E OBJECTIVOS DO TRABALHO

O betão auto-compactável reforçado com fibras (BACRF) insere-se no grupo de betões de elevado desempenho, trazendo grandes vantagens para o sector da construção civil. O BACRF alia as vantagens do betão auto-compactável, nomeadamente a de escoar pelos moldes devido unicamente ao peso próprio evitando assim a necessidade de vibração, que pode ser bastante difícil em zonas de acesso complicado ou com grande densidade de armadura, com a maior ductilidade, energia de fractura e resistência à tracção conferida pelas fibras, que entre outras são as principais vantagens conferidas pela adição das mesmas.

No entanto falta ainda preencher bastantes lacunas a nível normativo, que permitam que este material possa ser utilizado de um modo corrente por toda a comunidade técnica, com a confiança como são utilizados outros materiais como por exemplo o betão armado.

O betão auto-compactável (BAC) tem um aparecimento relativamente recente, pelo que apesar dos diversos estudos levados a cabo sobre este tipo de betão não há ainda uma convergência dos mesmos que permita que um código de utilização seja criado. As divergências ainda existentes em termos dos intervalos de aceitação para os ensaios habitualmente realizados para caracterizar o BAC, bem como as diferenças nas proporções dos materiais constituintes, levantam ainda muitas dúvidas para se propor uma lei universal.

A inclusão de fibras no betão por si só é igualmente um assunto de elevada complexidade, em primeiro lugar devido à diversidade dos parâmetros em que podem variar as mesmas. O material constituinte, as dimensões das fibras, a orientação e forma das mesmas, são exemplos dos diversos factores que podem interferir no comportamento do betão. Por outro lado a inclusão das fibras poderá de um modo mais ou menos acentuado alterar a distribuição dos restantes constituintes do BAC, suscitando algumas incertezas.

Ao longo das últimas décadas têm sido propostos diversos modelos, com o intuito de prever o comportamento do BACRF no que diz respeito às propriedades mais importantes, nomeadamente a viscosidade, a resistência ao bloqueio e a resistência à segregação no estado fresco, ou a resistência à compressão e à tracção no estado endurecido.

No entanto devido à grande complexidade deste assunto, esses estudos não podem ser tomados como inequívocos pois apenas um pequeno número de variantes podem ser estudados de uma só vez, na medida em que apenas um pequeno leque do tipo e de dimensões das fibras pode ser tido em conta num determinado modelo. Havendo também uma grande diversidade nas expressões propostas para caracterizar iguais parâmetros, entre os vários autores que se dedicaram a esta questão.

Para o presente trabalho foram realizados ensaios quer no estado fresco como no estado endurecido, com o intuito de alargar os conhecimentos sobre o comportamento do BACRF. De forma a comparar os resultados obtidos nos mesmos ensaios, é apresentada de forma sintética, uma revisão de diversos estudos levados a cabo por outros autores para caracterizar o BACRF. São igualmente descritas as principais características do BACRF em ambos os estados

De forma a aplicar o BACRF numa situação concreta da engenharia civil, foram estudadas as vantagens de se incluírem fibras numa aplicação de pré-esforço nomeadamente nas zonas de ancoragens de cabos de pré-esforço, sujeitas a esforços de tracção devido à aplicação de cargas concentradas. Foram então submetidos a ensaios sob a acção de uma carga concentrada prismas que simulam as zonas de ancoragem de vigas pré-esforçadas constituídos por BACRF, sendo adicionadas fibras de diferentes formas e dimensões.

Em quatro dos seis prismas ensaiados foram mantidas parte das armaduras ordinárias e em dois retiraram-se por completo as armaduras, de forma a verificar a possibilidade de reduzir ou até mesmo eliminar a presença das mesmas nas zonas de ancoragem de que habitualmente se encontram fortemente armadas.

1.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Todos os ensaios foram efectuados, utilizando os recursos do LABEST, sediado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A composição do betão auto-compactável de referência utilizada neste estudo baseou-se nos estudos efectuados no LABEST no âmbito do projecto de investigação PTDC/ECM/70693/2006.

Neste trabalho foram testados apenas três tipos diferentes de fibras, nomeadamente as fibras metálicas ZP 305 da marca Dramix com gancho na ponta; as fibras metálicas onduladas da marca Xorex; e as fibras de polipropileno lisas, Meyco FI SP 630 da marca Basf.

Estas fibras foram gentilmente cedidas pelas empresas que as distribuem. Obviamente, por esta razão teve de respeitar-se os respectivos condicionalismos relativos à pequena quantidade de fibras disponível, assim como as dimensões das fibras disponíveis no mercado português.

Na realização dos ensaios no estado fresco as limitações de alguns dos equipamentos usados para os testes de auto-compactibilidade, nomeadamente o espaçamento demasiadamente severo das barras de aço da caixa L, bem como uma largura bastante reduzida da abertura do funil V, não permitiram tirar grandes elações relativamente às propriedades por eles medidas.

Para as composições onde se incluíram fibras da Dramix utilizadas para a betonagem das vigas e dos cubos, não foi produzida uma quantidade suficiente que permitisse betonar os três cubos utilizados no ensaio de compressão, sendo apenas possível betonar um para as composições com 20, 40 e 60 kg/m³. No caso da dosagem de 60kg/m³ de fibras, houve oportunidade de betonar dois cubos adicionais aquando da betonagem dos modelos, o que fez com que houvesse algumas divergências nos resultados devido a algum erro na preparação da amassadura, pelo que os resultados dos cubos adicionais não foram apresentados no presente trabalho.

Ainda relativamente às vigas betonadas com BACRF para todas as composições estudadas, novamente por uma questão de limitação da quantidade disponível de fibras, apenas foram betonadas duas vigas para cada composição em estudo.

Por este motivo, no estudo das zonas sujeitas a cargas concentradas, devido a uma insuficiente quantidade de fibras da Dramix optou-se por usar fibras Xorex no prisma onde se excluiu totalmente a armadura ordinária.

De referir também que devido à limitação imposta pelo equipamento utilizado para o ensaio de flexão sob 3 pontos, a velocidade de deformação referida na norma não foi respeitada, sendo a utilizada ligeiramente superior.

Apesar das limitações atrás descritas, todos os ensaios efectuados forneceram informações bastante consistentes que permitem caracterizar de uma forma concisa todas as composições em estudo, quer no estado fresco como no estado endurecido.

É indicada, neste trabalho, uma referência aos ensaios realizados no âmbito da dissertação do MIEC com o título “Dimensionamento de zonas de ancoragem de cabos de pré-esforço”, uma vez que nesse trabalho foram estudados prismas sujeitos a cargas concentradas, com o intuito de igualmente se estudar as zonas de ancoragens de vigas pré-esforçadas. Nesse trabalho utilizou-se BAC sem a inclusão fibras; no entanto, na opinião do autor foi interessante comparar os resultados das diferentes soluções de armadura com os obtidos com inclusão de fibras.

1.3. ORGANIZAÇÃO

O presente trabalho encontra-se dividido em 3 partes fundamentais dentro dos quais a estrutura é semelhante. Na Figura 1.1. encontra-se esquematizada essa mesma divisão.

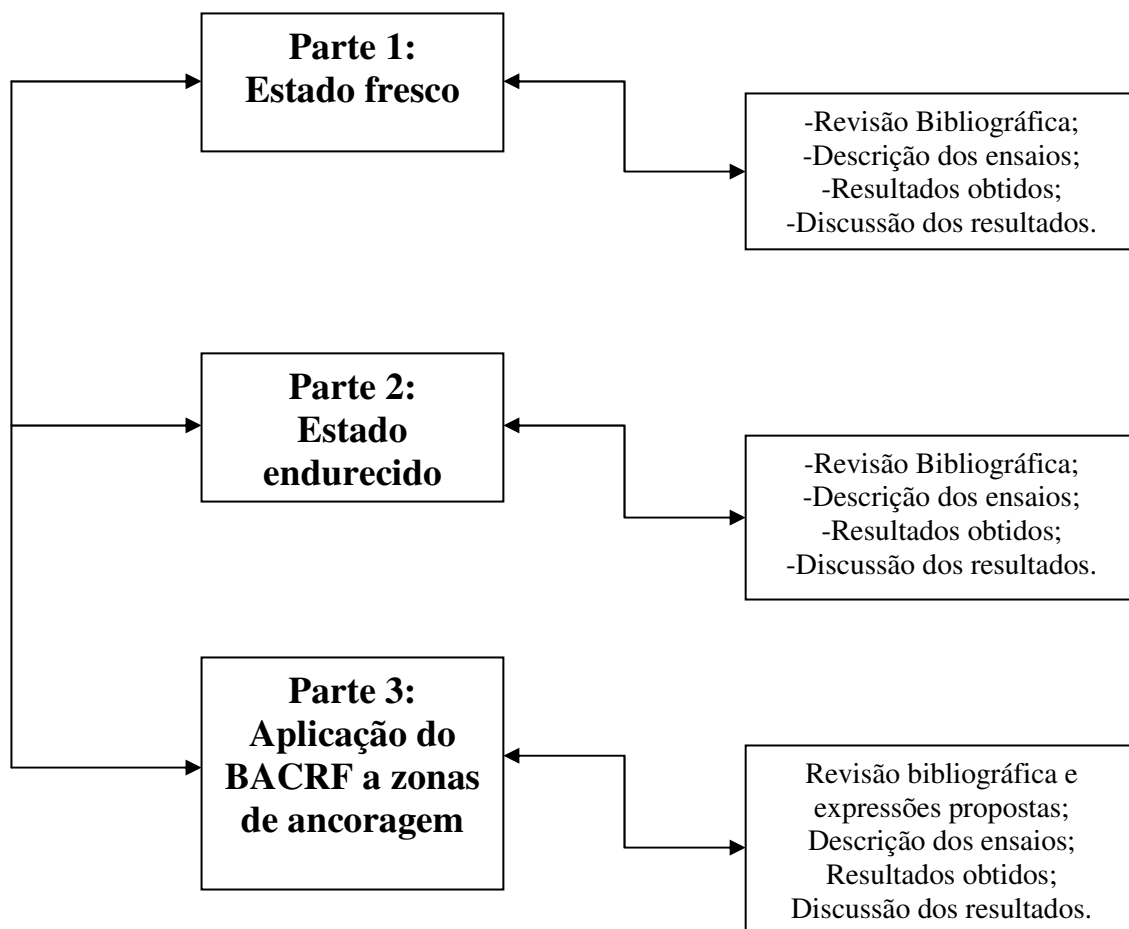


Fig. 1.1 - Identificação das partes constituintes da dissertação

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos.

O primeiro capítulo consiste na presente **Introdução**.

No segundo capítulo intitulado **Potencialidades do BACRF. Aplicações em engenharia civil**, é feita uma compilação das principais propriedades do betão auto-compactável reforçado com fibras descritas por diversos autores e entidades, servindo esta parte como que uma revisão da situação actual e dos conhecimentos sobre o BACRF, sendo como que um estado da arte. Segue-se uma parte mais específica, na qual são descritas aplicações nas quais foi adoptado o BACRF como elemento constituinte de diversas estruturas e as respectivas vantagens da utilização deste material.

No terceiro capítulo intitulado **Caracterização do BACRF no estado fresco**, é feita uma revisão bibliográfica de alguns modelos, propostos por diversos autores que se dedicaram à investigação das propriedades deste material no estado fresco, sendo referidas as principais modificações obtidas pela introdução de fibras, bem como os métodos para obtenção de composições optimizadas. É também feita uma descrição detalhada sobre os ensaios utilizados no presente trabalho, bem como os parâmetros por estes medidos no estado fresco. Por último, são apresentadas as composições estudadas, os resultados dos ensaios efectuados e a discussão dos mesmos, de forma a perceber as modificações trazidas pela adição de fibras, no estado fresco, para uma composição auto-compactável.

Segue-se o quarto capítulo denominado **Caracterização do BACRF no estado endurecido**, no qual é efectuada também uma revisão bibliográfica e feita uma interpretação dos principais parâmetros em

estudo para a caracterização mecânica do BACRF, nomeadamente a resistência à compressão e o comportamento em flexão. Segue-se, tal como no capítulo anterior, uma descrição dos ensaios efectuados e das principais propriedades avaliadas por estes. Por último os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

No quinto capítulo, **Aplicação do BACRF a zonas de ancoragens de elementos pré-esforçados**, descrevem-se os principais modos de rotura habitualmente observados em zonas sujeitas a cargas concentradas e são revistas as expressões e procedimentos de dimensionamento aplicáveis a estas zonas. Neste capítulo apresenta-se o estudo de seis modelos prismáticos destinados a simular o comportamento das zonas de ancoragem quando sujeitas à aplicação de uma carga concentrada, sendo então descrito o procedimento de ensaio, apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Finalmente, o sexto capítulo apresenta um breve resumo de todas as conclusões e observações mais relevantes retiradas na elaboração do presente trabalho.

2

Potencialidades do BACRF Aplicações em engenharia civil.

2.1. CARACTERÍSTICAS DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

O betão auto-compactável surge devido à procura contínua no sector da construção civil em eliminar a dependência e, consequentemente, os defeitos introduzidos pelo factor humano nas construções em betão.

O desenvolvimento do betão auto-compactável (BAC) foi iniciado no Japão devido a uma greve no sector da construção civil a nível dos operários. Por esta razão, de forma a eliminar a necessidade de vibração e limitar os defeitos devido a uma mão-de-obra não especializada, foi procurada uma solução que vencesse estas dificuldades – Grünewald (2004).

O BAC deve ser capaz de se escoar no interior dos moldes depositando-se de uma forma natural, sem recurso à vibração, passando pelos varões de aço e outros obstáculos exclusivamente sob a acção do peso próprio – Pereira et al. (2008). Desta forma o BAC tem que preencher os espaços de ar sem que ocorra segregação.

Como qualquer material no sector da construção civil, o BAC é obrigado a responder a um determinado nível de exigências para que seja considerado fiável, num mundo cada vez mais competitivo e preocupado com a qualidade. Essas exigências têm de ser verificadas quer no estado fresco como no estado endurecido.

No estado fresco é necessário que este material demonstre uma elevada fluidez e boa coesão entre os seus constituintes. Consequentemente, os constituintes devem ser escolhidos de um modo criterioso, de forma que algumas propriedades relacionadas com a deformação e escoamento do betão no estado fresco, como por exemplo a viscosidade, se mantenham com níveis apropriados – Dhonde et al. (2005)

Interessa portanto referir alguns dos critérios que o betão auto-compactável tem de respeitar para que possa ser adequada essa nomenclatura. Os ensaios que permitem avaliar essas propriedades são descritos no capítulo 3. Esses critérios são:

- **Capacidade de enchimento** – propriedade que determina a velocidade a que o BAC escoar quando sujeito ao peso próprio e preenche completamente os espaços no interior dos moldes, por exemplo entre as armaduras, mantendo a homogeneidade;
- **Resistência ao bloqueio** – traduz-se na capacidade do betão passar pelo congestionamento provocado pelas armaduras, proporcionando uma perfeita aderência com as mesmas, sem aplicação de energia externa;

- **Resistência à segregação** – refere-se à capacidade do BAC se manter homogéneo, resistindo à segregação e à formação de bolhas de ar, durante o transporte, colocação e cura do betão.

O betão auto-compactável, para a mesma relação água/cimento, apresenta um ligeiro aumento na tensão máxima de compressão suportada, relativamente ao betão convencional. Devido à falta de vibração, a interface entre os agregados e a pasta no estado endurecido é melhorada.

De uma forma segura pode assumir-se que a tensão máxima de tracção a que o BAC é capaz de resistir é de um modo geral igual à de um betão tradicional vibrado da mesma classe.

Quanto à microestrutura, o BAC é mais compacto em comparação com um betão convencional vibrado com a mesma relação água/cimento, como consequência a resistência à acção dos cloretos e penetração dos gases é superior no caso do BAC. Este material, devido à grande percentagem de cimento na sua composição, deverá ter um rigoroso acompanhamento no processo de cura, de forma a evitar a ocorrência de fendas devido às restrições de deformação a às variações de temperatura – The European Guidelines for Self-compacting Concrete (2005).

O betão auto-compactável foi portanto um grande avanço na indústria da construção, devido às suas características permite a construção de estruturas de elevada complexidade e geometria bastante irregular, como demonstrado na Figura 2.1. Torna-se igualmente mais fácil betonar peças fortemente armadas devido à facilidade de o betão passar pelas armaduras - Choulli et al. (2005).

No que diz respeito à indústria de pré-fabricação, este tipo de material torna-se bastante competitivo uma vez que permite reduzir o tempo e esforços, em termos de mão-de-obra, para se conceber os acabamentos dos elementos estruturais, o que traz obviamente vantagens económicas. Outro facto que revela vantagens na utilização do BAC, é a possibilidade de se eliminar o ruído excessivo provocado pela vibração do betão convencional melhorando significativamente o ambiente industrial. Por outro lado devido à utilização de moldes mais leves e com maior durabilidade, uma vez que o BAC não danifica tanto os moldes, os gastos tidos neste tipo de materiais também são reduzidos.

A melhor qualidade nos acabamentos aliada à facilidade em fabricar peças com as mais variadas formas, geometrias e percentagens de armadura, leva a que muitas indústrias tomem o BAC como uma alternativa séria na sua actividade. No entanto, têm de ser tomadas medidas de controlo de qualidade de forma a garantir que este material apresente uma qualidade indubitável – S. Santos (2008).

Devido às características atrás descritas, o BAC pode ser classificado como um betão de elevado-desempenho.

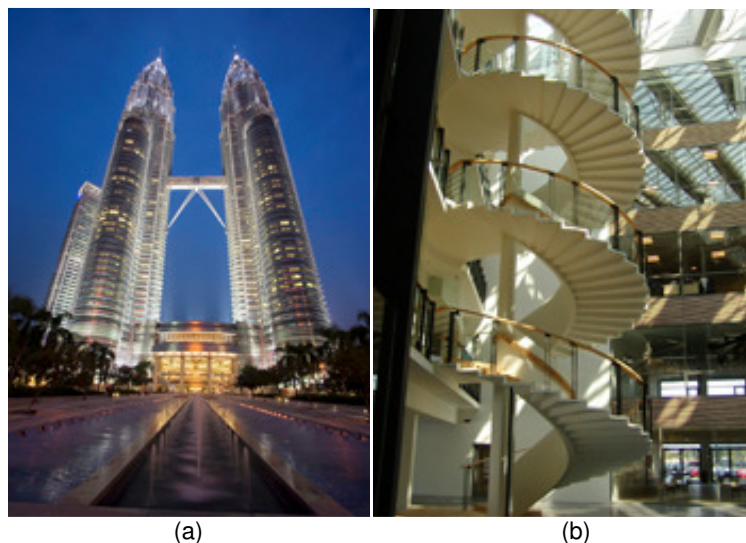


Fig.2.1 – Betão auto-compactável, aplicações estruturais; (a) – Torres Petronas (b) – Lanço pré-fabricado de escadas.

2.2. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS

A adição de fibras de aço no betão convencional é uma prática com cerca de quatro décadas – Roesler et al. (2004). No entanto, existem ainda muitas lacunas por preencher quer ao nível do conhecimento da sua influência nas propriedades resistentes das estruturas reforçadas com fibras, quer no efeito que a distribuição das mesmas tem a nível comportamental.

De facto, devido a todas estas incertezas, não há ainda uma legislação a nível europeu que permita à maior parte dos projectistas adoptar a solução de reforço com fibras com toda a confiança, como acontece com as armaduras do betão armado convencional.

A adição de fibras no betão auto-compactável traz a vantagem de se obter uma dispersão mais uniforme das fibras, o que confere às estruturas compostas por este material uma maior fiabilidade. Devido à maior compacidade do BAC, traduzida pelo aumento de partículas finas, é possível melhorar a zona de interface entre as fibras e os restantes componentes do betão – Ferrara et al. (2007)

Esta zona de interface, por si só, comanda bastante o comportamento do betão auto-compactável reforçado com fibras (BACRF) uma vez que quanto maior a aderência entre o betão e as fibras melhores os resultados a nível das propriedades estruturais. Na Figura 2.2, pode ser identificada uma imagem dessa zona de interface.

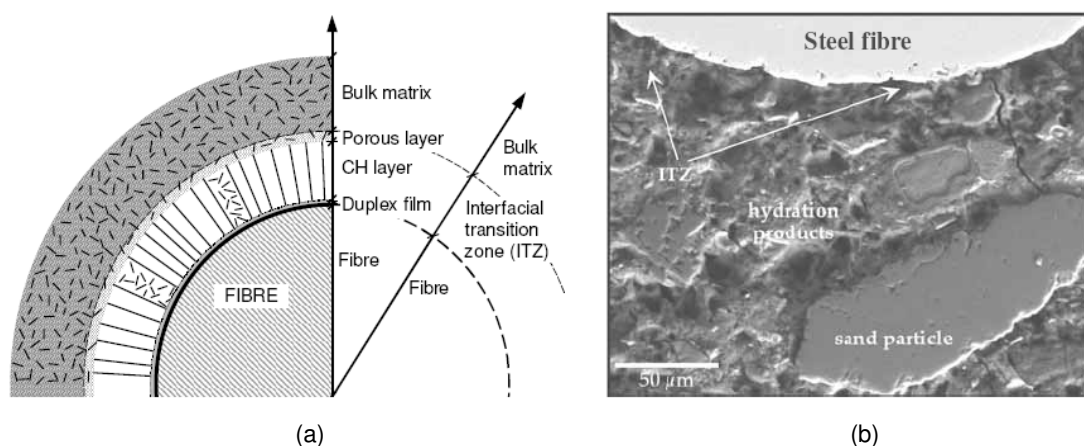


Fig.2.2 – Zona de interface; (a) – Esquema segundo Bentur (1991); (b) – Imagem obtida pela observação microscópica, Northwestern University (2005)

“When steel fibers are added to a concrete mix, they act randomly distributed and act like crack arrestors” – Barros et al. (1997).

A grande melhoria introduzida pela adição de fibras observa-se ao nível do betão endurecido. Estas levam principalmente a um aumento na rigidez pós-fendilhação e a uma maior capacidade de absorção de energia. As fibras formam uma ponte que atravessa a fenda, transfere a tensão e impede a progressão de uma forma rápida da fenda – Dhonde et al. (2005) (ver Figura 2.3). A mudança introduzida pelas fibras depende das propriedades das próprias, nomeadamente, a sua geometria, orientação, distribuição e a concentração das mesmas – Aydin (2006).

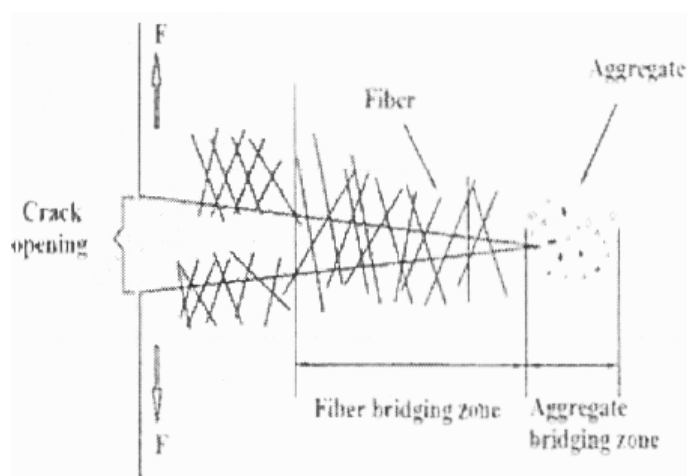


Fig. 2.3 – Efeito de “ponte” causado pelas fibras, após a abertura de uma fenda – Dhonde et al. (2005)

Para além destas características a resistência ao corte é também melhorada de um modo significativo, não obstante, as fibras providenciam um controle mais eficaz da retracção e da fluência.

Pelo que foi descrito é possível compreender que a adição de fibras confere ao BAC uma ductilidade melhorada, permite eliminar o comportamento frágil do betão sem recurso às tradicionais armaduras, conferindo uma grande capacidade de deformação às estruturas desde a formação da primeira fenda até à rotura – Santos (2008). Esta propriedade é de extrema importância em estruturas altamente hiperestáticas, dada a sua facilidade em fendilhar devido tanto ao carregamento como a acções internas como, por exemplo, as variações de temperatura.

Como as fendas ocorrem sempre pelo local mais frágil da estrutura as fibras deverão estar distribuídas de forma homogênea – Grünewald (2004).

Em suma, as fibras melhoram a capacidade de resistência aos esforços de tracção e de corte, melhoram a ductilidade, durabilidade, fadiga e retracção. Por estes motivos pode admitir-se que o BACRF é uma solução muito eficaz, visto que pode substituir parcial ou até totalmente os varões de aço utilizados tradicionalmente para melhorar as propriedades atrás descritas.

2.3. PROPRIEDADES DO BACRF

Como já foi referido, o BACRF alia as potencialidades da adição de fibras com a trabalhabilidade do betão auto-compactável, conseguindo-se uma mistura de fácil colocação, mesmo em zonas de elevado congestionamento de armaduras, sem segregação nem necessidade de vibração.

2.3.1. ESTADO FRESCO

A adição de fibras apesar de potenciar um ganho de ductilidade do betão, poderá, no entanto, propiciar situações em que esse aumento se torne incompatível com a auto-compactabilidade necessária, ocorrendo fenómenos como a segregação ou bloqueio das fibras nas armaduras. Deste modo, como se descreve adiante no presente trabalho, foi necessário realizar um estudo para encontrar a composição óptima ao nível da percentagem de fibras que conferem a trabalhabilidade necessária no estado fresco e as propriedades requeridas no estado endurecido. Há portanto que ter um cuidado redobrado quando se adicionam fibras e realizar alguns ensaios que garantam que o betão é auto-compactável antes da sua utilização em obra.

2.3.2. INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRAS E ORIENTAÇÃO

As fibras que podem ser adicionadas ao BAC podem ser de diferentes materiais como, por exemplo, aço, polimeros, vidro ou carbono – Mesquita (2008), conferindo todas elas propriedades melhoradas ao betão quando adicionadas na sua matriz cimentícia, principalmente em termos de ductilidade e capacidade de suportar carregamento, mesmo depois da ocorrência da primeira fenda – Fantilli et al. (2009)

Quanto à geometria as fibras podem ter diversas formas, por exemplo, lisas, onduladas ou com gancho na ponta, conferindo estes últimos dois tipos de fibras uma maior aderência ao betão, visto ser maior a energia necessária para conseguir um arrancamento das mesmas da matriz cimentícia – Cunha et al. (2008). Na Figura 2.4 estão ilustrados alguns tipos de fibras disponíveis.

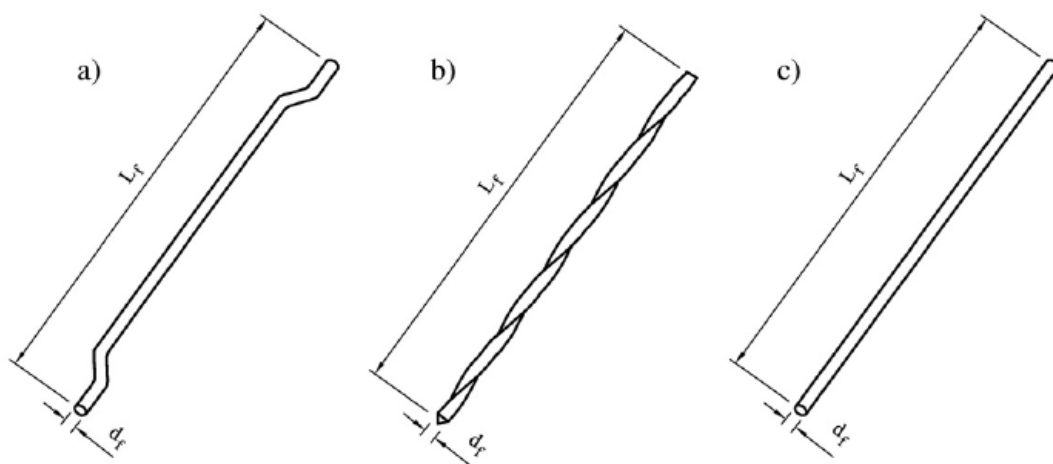


Fig. 2.4 - (a)- Fibra com gancho nas pontas; (b) – Fibra torcida com secção triangular; (c) Fibra lisa

É ainda possível fazer uma classificação das fibras, através da proporção entre diâmetro da fibra (D_f) e comprimento, “Lenght” da mesma (L_f), que se traduz na esbelteza da fibra.

Estudos levados a cabo por Gysel (2000), revelam que as fibras são tanto mais eficientes quanto mais alinhadas estiverem na direcção da tensão de tracção.

A resposta pós-fendilhação será tanto melhor quanto maior for o número de fibras que atravessam a fenda - Schönlin, (1988)

Torrijos, Barragán, Zerbino e Grünwald sugerem igualmente que a resposta mecânica dos elementos com fibras está de certo modo relacionada com a orientação das fibras e esta última com escoamento do betão para as cofragens.

O comportamento pós-fendilhação está relacionado com o número de fibras que atravessam a fenda. Estudos levados a cabo por Soroushian e Lee (1990) mostram que no betão vibrado as fibras orientam-se preferencialmente segundo planos horizontais. Quando incorporadas no betão auto-compactável a distribuição das fibras e o efeito das paredes são assuntos de alguma complexidade, que nem sempre podem ser caracterizados de um modo fácil.

Se o BAC percorrer uma distância considerável durante o escoamento antes da sua deposição nos moldes das cofragens poderá dar-se uma orientação preferencial das fibras segundo a direcção do escoamento. Nas Figuras 2.5 e 2.6 encontram-se representados exemplos de uma orientação com e sem um plano de orientação preferencial das fibras, respectivamente.

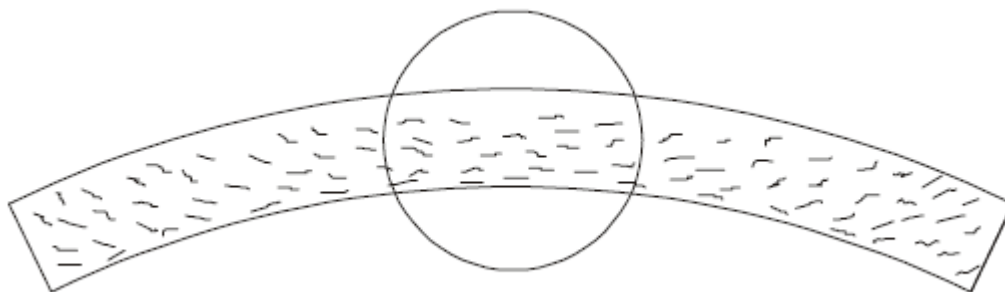


Fig. 2.5- Exemplo de uma orientação preferencial das fibras

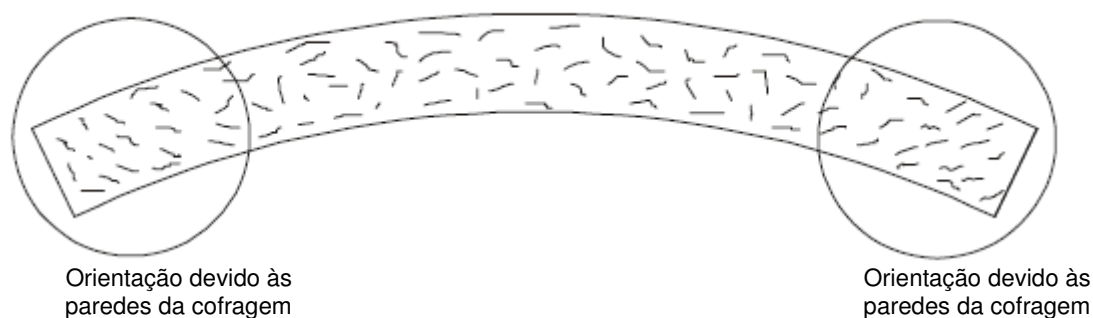


Fig. 2.6 – Exemplo de uma distribuição sem plano preferencial

Torrijos, Barragán e Zerbino (2009) efectuaram estudos sobre a influência do procedimento de betonagem no comportamento pós-fendilhação do betão, quando se procede à inclusão de fibras de aço e poliméricas de diferentes tamanhos e a sua relação com propriedades como a distribuição e orientação das fibras.

Neste estudo os autores analisam diferentes tamanhos das fibras (30, 50 e 54 mm) bem como o material constituinte das mesmas, podendo ser metálicas ou plásticas.

Foram produzidas doze vigas com dimensões 150x150x600 mm, utilizando betão auto-compactável e efectuados ensaios à flexão seguindo a norma EN 14651 para as mesmas vigas.

Das doze vigas, quatro foram betonadas a partir do centro da viga (C), noutras quatro o betão foi escoado por um tubo com 5m e 20° de inclinação (T) e nas últimas a betonagem foi efectuada com o molde na vertical (V).

Observou-se que as vigas que contêm fibras de aço de 50 mm e cuja betonagem foi efectuada com o escoamento ao longo de um tubo suportaram uma carga mais elevada no ensaio à flexão, aquando da ocorrência da primeira fenda, seguindo-se um endurecimento com uma força residual superior à força obtida na ocorrência da primeira fenda.

Para a mesma dimensão de fibras, os modelos cuja betonagem foi efectuada com o molde na vertical não registaram nenhum endurecimento após a formação da primeira fenda, sendo o valor da força no aparecimento da mesma fenda sensivelmente inferior relativamente às vigas T. Por último, as vigas betonadas a partir do centro do molde demonstram um comportamento intermédio, apresentando ainda algum endurecimento.

Para a adição de fibras de aço de 30 mm de comprimento tanto nos provetes cujo escoamento se realiza segundo o tubo como naqueles que a betonagem é realizada no centro do molde, a diferença comportamental é reduzida sendo semelhante o comportamento residual, isto é, o endurecimento após a formação da primeira fenda. Como no caso anterior, se o provete for betonado na vertical demonstra uma menor ductilidade em comparação com os dois já referidos.

No terceiro caso, quando foram utilizadas as fibras plásticas, nenhum dos três tipos de betonagem revela um endurecimento após a ocorrência da primeira fenda.

A Figura 2.7 ilustra como foram realizados os diferentes tipos de betonagens.

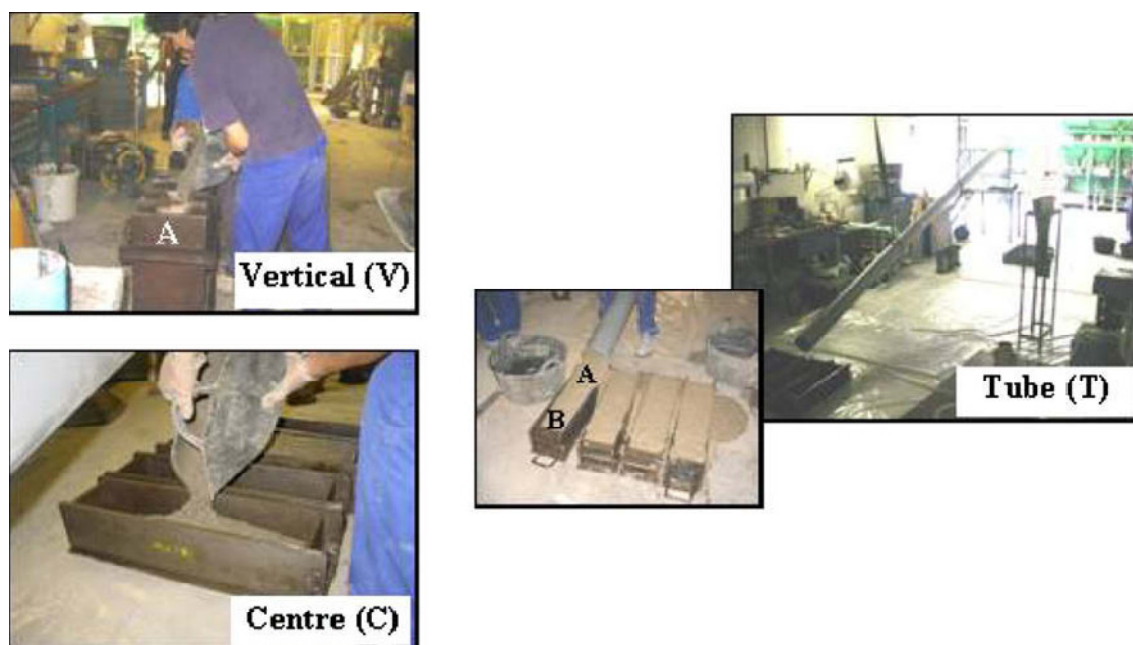


Fig. 2.7 – Betonagens realizadas para o estudo de Torrijos, Barragán e Zerbiino (2009)

Analisando agora a orientação das fibras verificou-se neste estudo que existe sempre uma orientação preferencial das fibras segundo planos horizontais. No entanto foi possível constatar que para as fibras de aço de maiores dimensões, as vigas que eram betonadas com o auxílio de um tubo (vigas T) havia uma maior densidade num plano transversal à viga. Para as vigas betonadas no centro do molde (vigas C), a densidade de fibras era maior não só no mesmo plano transversal mas também no plano longitudinal, perpendicular à face lateral da cofragem. Para o caso das outras vigas betonadas com o molde na vertical (vigas V), a maior densidade era encontrada não só no plano longitudinal perpendicular às faces, mas também no plano longitudinal paralelo às faces laterais dos moldes.

Para as fibras de dimensões mais reduzidas, as diferenças no modo de betonagem não são tão evidentes entre as vigas T e vigas C sendo, no entanto, a maior densidade encontrada no plano transversal. Para as vigas V verificou-se uma semelhança com o caso das fibras de 50 mm.

Pelo que foi descrito anteriormente, foi concluído que:

- Tal como no betão convencional vibrado para o betão auto-compactável reforçado com fibras existe uma orientação preferencial das fibras sobretudo em planos horizontais;
- O método como é feita a betonagem afecta a distribuição das fibras e a sua orientação, o que tem repercussões notórias no comportamento estrutural dos elementos;
- Nas vigas cuja betonagem foi efectuada com o provete na vertical há uma notória redução das capacidades resistentes dos elementos ensaiados;
- As fibras de maiores dimensões em que o betão é escoado ao longo de um tubo antes de se depositar no molde conferem ao elemento uma maior ductilidade bem como um endurecimento após a abertura da primeira fenda, o que se traduz numa tensão superior à que se registou aquando da abertura da mesma.

2.3.3. ADERÊNCIA

Devido ao aparecimento relativamente recente do betão auto-compactável, o estudo da interface entre a fibra e a matriz cimentícia assume como já foi referido uma importância redobrada para a caracterização do mesmo.

Esta referida interface no BACRF apresenta-se como relativamente distinta da dos betões convencionais, visto que o BAC necessita de preencher certos requisitos que já foram anteriormente descritos. Por outro lado, a baixa relação água/finos, e a diminuição da máxima dimensão de agregado bem como da relação agregado grosso/agregado fino modificam a ligação entre as fibras e a matriz - Cunha et al (2008).

O ensaio do arrancamento de uma fibra (single fibre pullout test), onde a força necessária para arrancar uma fibra embebida no BAC é monitorizada, fornece uma informação útil relativamente ao comportamento após a abertura de uma fenda, dando portanto a informação da capacidade de transferência de energia para a fibra quando se abre uma fenda. As fibras que cruzam a fenda evitam que esta se propague rapidamente oferecendo um comportamento dúctil.

Apesar de este ensaio não representar com elevada fiabilidade o comportamento de uma peça estrutural, mesmo quando a mesma está sujeita a um carregamento uniaxial, poderá ser utilizado para compreender de uma forma global o comportamento das fibras.

Outros aspectos relacionados com o ensaio como o efeito do comprimento embebido da fibra e o ângulo de inclinação da mesma são relatados no Capítulo 4.

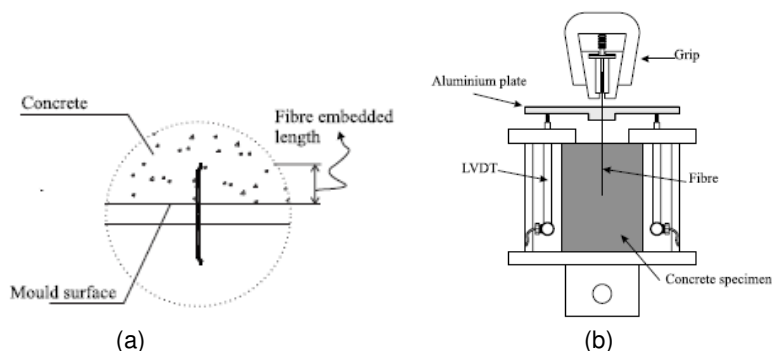


Fig. 2.8 – (a) - Exemplo de um provete para o teste de arrancamento de uma fibra; (b) – aparato experimental.

2.3.4. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

Desde o aparecimento do betão armado que os varões de aço têm como finalidade evitar a rotura prematura e frágil do betão nas zonas traccionadas das estruturas.

No caso da percentagem de armadura ser menor do que uma determinada percentagem, conhecida como percentagem mínima (ρ_{min}), num carregamento de tracção uniaxial, quando a carga crítica é atingida rapidamente se desenvolve uma única fenda, neste comportamento frágil a carga que provoca a cedência das armaduras é menor do que a carga crítica, como representado na Figura 2.9 - Fantilli et al. (2008).

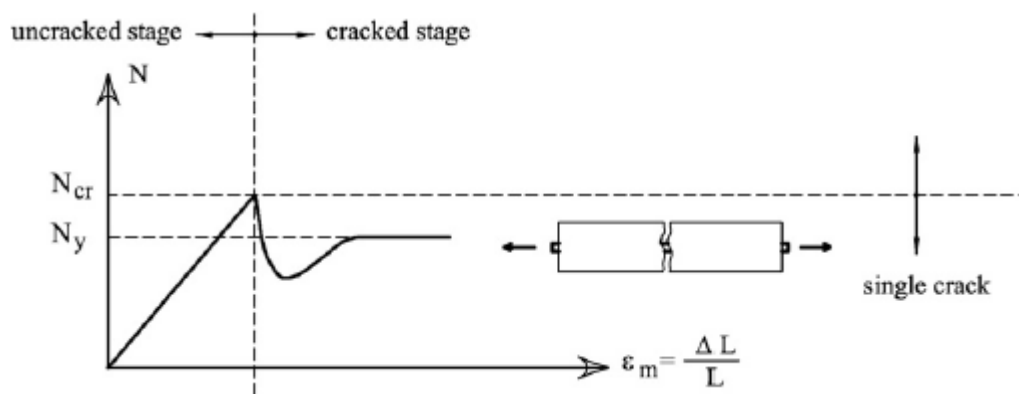


Fig. 2.9 – Comportamento frágil de um elemento de betão armado com $\rho \leq \rho_{min}$

No caso de uma percentagem de armadura superior à percentagem mínima, verifica-se que após o aparecimento da primeira fenda a extensão média ϵ_m aumenta, sendo a força uniaxial aplicada superior à força crítica a qual provoca a fendilhação do betão. Se a armadura de reforço for suficiente, formar-se-ão outras fendas até que o limite de tensão do aço seja excedido e haja uma rotura na estrutura. É então possível concluir que há um aumento da rigidez, como demonstrado na Figura 2.10.

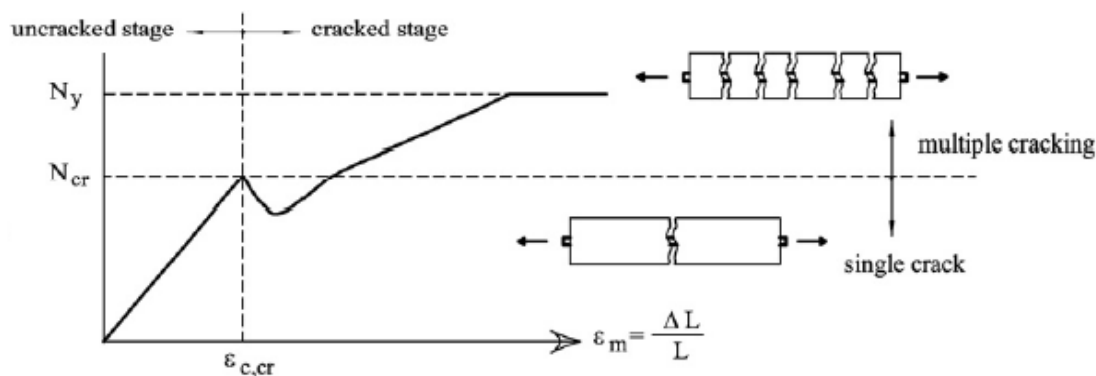


Fig. 2.10 – Comportamento dúctil de um elemento de betão armado com $\rho > \rho_{min}$

A adição de fibras ao betão é capaz de garantir estas mesmas propriedades devido à sua capacidade de fazer um efeito de ponte ao nível da fenda, atrasando assim a abertura da mesma.

Como consequência ao atrás descrito, se a percentagem de fibras a incluir no betão for a suficiente para que seja observado um comportamento dúctil, a tensão máxima suportada pelo elemento estrutural poderá ser maior do que a experimentada aquando da abertura da primeira fenda, como representado na Figura 2.11b. É ainda notório que o ramo descendente do carregamento, representado na mesma figura, tem um declive bastante menor do que no betão não armado como representado na Figura 2.11a. Estas duas figuras representam a resposta teórica para um carregamento uniaxial no qual todo o elemento está sujeito a um esforço de tracção.

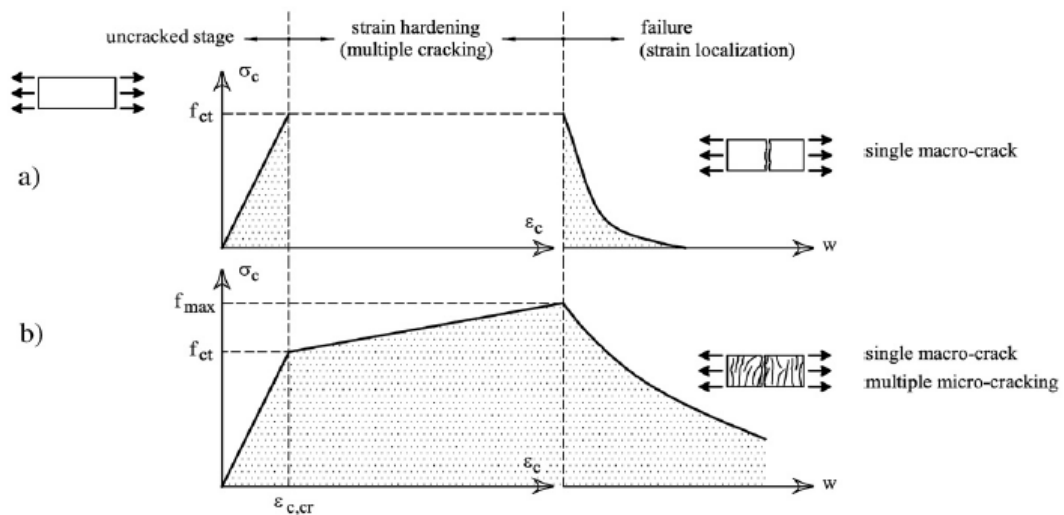


Fig. 2.11 – Resposta ao carregamento uniaxial – (a) – Betão não reforçado; (b) – Betão reforçado com fibras

2.3.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Em relação ao comportamento à compressão, diversos autores Maidl (1995); König & Kützing (1999); Sato et al. (2000) chegaram à conclusão que a adição de fibras de aço ao betão tem uma pequena influência na tensão máxima de compressão. No entanto, observa-se uma alteração no modo de rotura com a presença de fibras, depois de atingida a carga máxima verifica-se uma deformação maior sob carga constante.

Como facilmente se conclui, ao adicionar fibras a uma composição de betão auto-compactável, se este já tiver uma constituição otimizada haverá um distúrbio no seu esqueleto sólido, podendo a adição de fibras poderá causar uma variação no valor da resistência à compressão.

Haverá então que fazer alterações na composição do betão auto-compactável para que apesar da introdução de fibras este mantenha as propriedades necessárias para a sua utilização numa dada aplicação. Este assunto é tratado mais pormenorizadamente no capítulo 4.

Quando o volume de fibras é da ordem dos 1,6 a 3%, a deformação sentida antes rotura dos elementos atinge valores da ordem dos 0,012 e 0,018, respectivamente, e para as mesmas percentagens do volume de fibras as forças residuais atingem valores da ordem dos 74% e 78% relativamente à força máxima de compressão – Bencardino et al. (2007).

2.3.6. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

As fibras dependendo da quantidade, orientação e aderência, alteram a distribuição de tensões na secção sujeita a flexão, fazendo com que o eixo neutro mude a sua posição relativamente ao betão sem fibras.

Para fibras com gancho com dosagens da ordem dos 0,35%, ensaios realizados em lajes demonstram que a carga máxima de flexão é 31% superior à carga máxima de flexão para lajes sem fibras, se essa dosagem subir para os 0,50% o aumento é de 55% na força máxima de flexão – Roesler et al. (2004). Este mesmo estudo refere que a tensão de tracção máxima suportada em lajes sujeitas à flexão é ligeiramente superior à das vigas sujeitas ao mesmo tipo de carregamento. Sendo a relação entre as tensões máximas entre as lajes e as vigas 1,4 para betão sem fibras e 1,8 a 2,2 para betão com fibras.

A caracterização do comportamento à flexão do BACRF foi inicialmente tratada numa especificação do RILEM TC 162-TDF, existindo agora uma norma europeia a EN14651:2005+A1. Esta norma descreve um ensaio de flexão sob 3 pontos que permite determinar a tensão máxima no limite de proporcionalidade (f_L), assim como as tensões residuais ($f_{R,j}$), correspondentes às tensões instaladas para os deslocamentos residuais (δ_j), com $\delta_j = 0,47\text{mm}$; $1,32\text{mm}$; $2,17\text{mm}$; $3,02\text{mm}$ (ver Figura 2.12).

Dois outros parâmetros que podem ser avaliados no presente ensaio, são as tensões equivalentes $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, que se relacionam com a capacidade de absorção de energia pelo betão com fibras. Estas tensões são avaliadas para os deslocamentos $\delta_{eq,2} = \delta_L + 0.65\text{mm}$ e $\delta_{eq,3} = \delta_L + 2.65\text{mm}$. Em que δ_L é o deslocamento registado para a força máxima no limite de proporcionalidade.

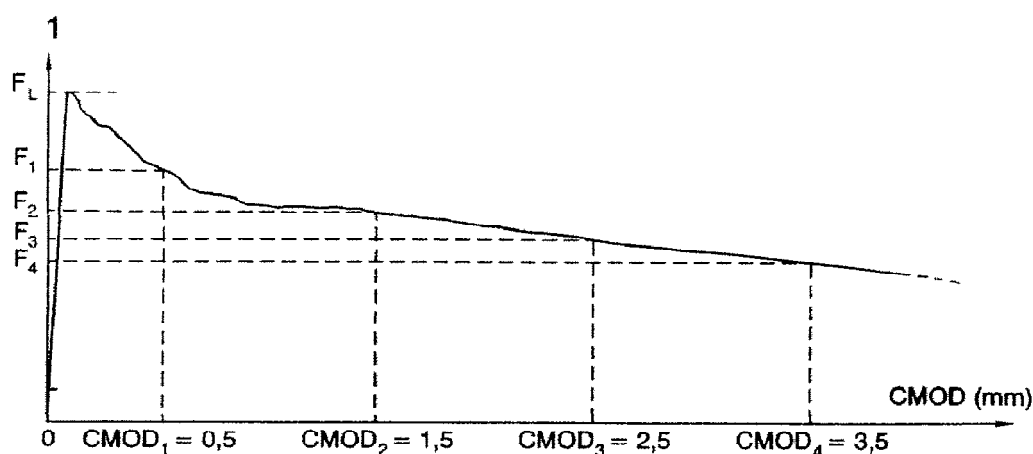


Fig. 2.12 – Gráfico retirado da norma EN14651:2005+A1, Carga Vs. CMOD

Para transformar o diagrama carga vs. CMOD (crack mouth opening displacement) no diagrama carga vs. deslocamento é necessário fazer as seguintes conversões.

Quadro 2.1 – Relação entre CMOD e δ

CMOD (mm)	δ (mm)
0,05	0,08
0,1	0,13
0,2	0,21
0,5	0,47
1,5	1,32
2,5	2,17
3,5	3,02
4	3,44

A análise deste gráfico genérico apresentado na norma revela a maior capacidade de absorção de energia dos betões quando as fibras são adicionadas.

Os parâmetros $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$ são utilizados para o dimensionamento em condições de serviço, enquanto os parâmetros $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$, são utilizados para o dimensionamento em estado limite último - Santos (2008).

2.3.7. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade do BAC poderá ser menor do que o do betão convencional, uma vez que o volume de pasta aumenta e o de agregado grosso diminui, esse facto poderá comprometer o comportamento de algumas estruturas quando são submetidas a acções como a do pré-esforço. Um acompanhamento rigoroso deverá ser levado a cabo até à altura da aplicação do pré-esforço - European Guidelines for Self Compacting Concrete (2005).

Dadas as diferenças nas propriedades mecânicas das fibras, as variadas relações L_f/d_f existentes e as diferentes quantidades que podem ser inseridas no BAC deverão ser efectuados ensaios de caracterização do módulo de elasticidade para caracterizar devidamente esta propriedade. – Jo et al. (2001).

2.3.8. DURABILIDADE

A durabilidade do betão está normalmente associada à permeabilidade da camada superficial, que deve limitar o ingresso substâncias nocivas tais como CO_2 , cloretos, sulfatos, etc.

O betão tradicional, uma vez vibrado, apresenta diferentes níveis de permeabilidade visto que o vibrador é incapaz de cumprir os seus objectivos de uma forma homogénea. Pelo contrário, o BAC ultrapassa estas dificuldades, uma vez que a permeabilidade do mesmo é potencialmente mais uniforme oferecendo menos pontos frágeis de entrada a agentes nocivos - European Guidelines for Self Compacting Concrete (2005). Por outro lado o BAC apresenta em geral uma relação água-ligante reduzida o que baixa a permeabilidade do betão.

Uma distribuição homogénea das fibras resulta numa melhor protecção contra a corrosão, uma vez que as fibras que se encontram na parte carbonatada do betão irão apresentar corrosão, no entanto as fibras envolvidas na parte sã estão salvaguardadas continuando a desempenhar a sua função.

As estruturas cujas fibras são adicionadas à sua constituição podem ser aplicadas em condições expostas a ambientes muito agressivos como representado na Figura 2.13, ou até mesmo em estruturas para indústrias nucleares, aumentando bastante o tempo de vida da mesma com uma reduzida necessidade de manutenção.

Uma estrutura de BACRF, mesmo quando aparece a micro-fendilhação, continua a ser efectiva na medida em que mantém o pH necessário para a passivação do aço - Association Française de Génie Civil (2002).



Fig. 2.13 – Exemplo de estruturas de betão corroídas pelos cloretos, retirado de Aguiar e Sousa (2009)

2.3.9. RESISTÊNCIA AO FOGO

Olhando agora para o aspecto da resistência ao fogo, uma vez que o tamanho das fibras é reduzido, o efeito de expansão provocado pelo aumento da temperatura não é significativo. Existem ainda fibras poliméricas cuja função é criar espaços para a circulação dos gases desenvolvidos pela combustão, evitando o destacamento do betão - Aagaard et al. (1996).

2.3.10. RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Todas as estruturas de engenharia civil estão sujeitas a impactos acidentais, que provocam degradação e cargas acidentais geralmente muito intensas, mas com uma duração bastante curta. São exemplos os impactos devido a abalroamentos de automóveis contra algumas estruturas próximas de vias de comunicação. Como o BACRF tem uma alta capacidade de dissipação de energia, que é de elevada importância quando um carregamento dinâmico actua, aliada ao aumento da tensão de tracção resistente e controle da abertura das fendas, providenciados pelas fibras, os danos dos impactos serão mais atenuados - Association Française de Génie Civil (2002).

2.3.11. FLUÊNCIA E RETRACÇÃO

Quanto à fluência, o BACRF tem um comportamento semelhante ao betão sem fibras, no entanto se for efectuado um tratamento de calor o BACRF apresenta valores de fluência bastante reduzidos - Association Française de Génie Civil (2002).

Uma das principais desvantagens dos materiais que contém cimento na sua composição é a sua vulnerabilidade à fendilhação. Uma das principais causas da ocorrência de fendas no período inicial da vida de uma estrutura de betão é a retracção devido à secagem. Se um elemento constituinte de uma estrutura hiperestática se encontrar em condições de movimento restringido será ainda mais provável a formação de fendas – Kwon et al. (2007).

Estes mesmos autores, na sua investigação sobre a retracção do BACRF, concluíram que para o BAC reforçado com 1% de fibras de polipropileno a abertura das fendas por retracção é de

aproximadamente metade do que o BAC sem fibras; e se o reforço for efectuado com fibras de aço reduz-se ainda mais a abertura da fenda devido à maior resistência dada por este tipo de fibras.

2.4. APLICAÇÕES DO BACRF AO NÍVEL DA ENGENHARIA CIVIL

As características únicas do betão auto-compactável reforçado com fibras fazem com que este possa ser considerado um betão de elevado-desempenho, capaz de conferir características melhoradas aos elementos estruturais construídos com este material.

Alguns exemplos, em que as fibras adquirem grande importância são – Mesquita Ferreira (2008):

- Estruturas muito esbeltas em que os varões de aço são de difícil colocação;
- Cargas locais e deformações locais muito elevadas (revestimentos em túneis, estruturas resistentes, zonas de ancoragens de pré-esforço, estruturas resistentes a explosões e estacas;
- Zonas que se encontrem submetidas a um ambiente corrosivo (zonas sujeitas à acção dos cloretos e outras substâncias nocivas, zonas sujeitas a elevados ciclos, molhagem/secagem, zonas sujeitas a acções de radiação);
- Controlo da fendilhação introduzida por humidade ou diferenças de temperatura (lajes e pavimentos);
- Zonas em que a vibração do betão constitui uma grande dificuldade.

Devido à ductilidade conferida pelas fibras, estas são de extrema importância nas zonas sísmicas devido ao atraso das roturas por corte. Em estruturas de elevada importância, que em caso de sismo deverão continuar a desempenhar as suas funções tais como hospitais, quartéis de bombeiros e edifícios de comando, aconselha-se a adição de fibras. Na Figura 2.14 é possível observar uma rotura frágil de um edifício após a ocorrência de um sismo.

Tomando em consideração o efeito dos sismos nas estruturas, podem o destacamento do betão de recobrimento em combinação com a rotura da armadura de confinamento provocar a desintegração completa do pilar quando a armadura longitudinal encurva. Pode-se esperar que a acção das fibras atribua tenacidade e evite o destacamento do betão de recobrimento, obtendo-se daí um melhor rendimento dúctil do pilar – Li (2002).



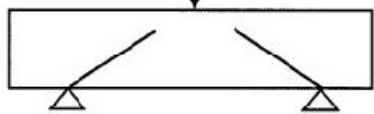
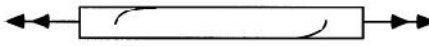
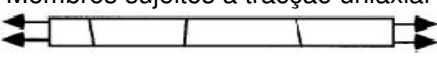
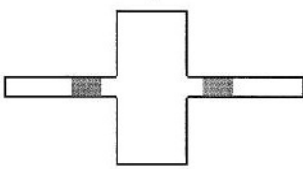
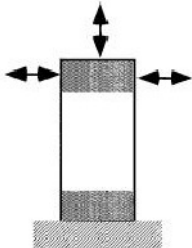
Fig. 2.14 – Rotura de uma estrutura sujeita ao sismo de Northridge em Los Angeles, em 1994

Nos Quadros 2.2 e 2.3, retirados de Li (2002) encontra-se uma síntese do motivo de aplicação das fibras em algumas estruturas, bem como os modos de rotura de alguns elementos estruturais e as vantagens relacionadas com adição de fibras.

Quadro 2.2 – Vantagens da adição de fibras em algumas estruturas

Tipo de estrutura	Vantagem da aplicação das fibras
Estruturas hidráulicas (barragens, descarregadores, etc.)	Resistência à cavitação
Pavimentos (aeroportos, auto-estradas, reforço de pavimento)	Redução da espessura do pavimento
Pisos Industriais	Resistência ao impacto e resistência ao choque térmico
Estruturas sujeitas a elevadas temperaturas; Betão refractário (fornos rotativos, incineradores municipais, produção de metal, aplicações petroquímicas)	Resistência à fissuração e destacamento, onde os ciclos térmicos e choque térmico são acções preponderantes.
Tabuleiros de pontes	Como reforço de pavimento
Cobertura com betão projectado	Estabilização de taludes e banquetas; revestimento em obras subterrâneas
Estruturas resistentes a choque	Em combinação com armadura convencional oferece resistência, à penetração.
Possível uso em estruturas sísmicas resistentes	Aumento da ductilidade atrasando a propagação de fracturas por corte

Quadro 2.3 – Modos de rotura de alguns elementos estruturais e vantagens trazidas pela adição de fibras

Membro estrutural / Esforço	Exemplos	Melhorias pela adição de fibras
Membros sujeitos a esforços de flexão 	Revestimento em: - Túneis - Vigas e Lajes	Resistência à flexão Ductilidade pré-pico e pós-pico
Membros sujeitos a esforços transversos 	- Tabuleiros de pontes - Viadutos - Cachorros	Capacidade ao corte Segurança pós-fissuração
Membros sujeitos a momento torsor 	- Tabuleiros de pontes - Viadutos - Postes	Capacidade à torção Segurança pós-fissuração
Membros sujeitos a tracção uniaxial 	- Pavimentos	Aumento do espaçamento entre juntas
Ligações pilar-viga 	- Estruturas porticadas	Resistência sísmica Reduz densidade de armadura
Pilares 	- Pilares em edifícios - Pilares em pontes e viadutos	Resistência sísmica Reduz destacamento do betão e melhora o confinamento

2.4.1. APLICAÇÕES DO BACRF EM OBRAS SUBTERRÂNEAS

Outra aplicação em que o betão auto-compactável reforçado com fibras pode ser de grande utilidade é nas obras subterrâneas. Quer pela utilização do betão projectado com fibras, betonado “in situ”, quer na utilização de painéis de BACRF pré-fabricados. A Figura 2.15 ilustra um exemplo de uma obra subterrânea.



Fig. 2.15 – Imagem de um túnel do metro de São Paulo na fase de construção

Nas estruturas cuja construção envolve escavação de maciços rochosos o fenómeno dos impulsos das terras tem de ser tratado com algum pormenor. Como é sabido o terreno rochoso na primeira fase antes da escavação encontra-se em estado de repouso, estando portanto instalado o impulso horizontal de maior intensidade. Quando se procede à escavação e se colocam os elementos constituídos com BACRF, o impulso verificado deixa de ser o de repouso tendo um valor mais reduzido do que o primeiro, no entanto, numa fase inicial, devido aos elementos não serem infinitamente rígidos, dão-se pequenos deslocamentos que permitem chegar ao valor do impulso activo, mais reduzido, mas ao qual os elementos estarão sujeitos durante o seu funcionamento. A ductilidade conferida pelas fibras ao betão permite suportar as deformações do terreno, permitindo que a estrutura continue a suportar carregamentos. A Figura 2.16 demonstra que para pequenos deslocamentos, o impulso activo é atingido.

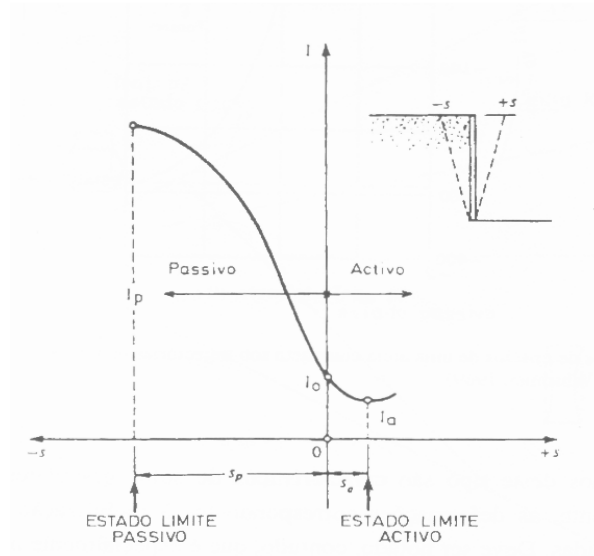


Fig. 2.16 – Experiências de Terzaghi a propósito das deformações associadas aos estados activo e passivo

No caso da utilização de betão projectado reforçado com fibras, uma vantagem evidente pode ser traduzida pela melhor adaptação à geometria do terreno, não havendo portanto espaços vazios os quais são problemáticos devido à possível deposição de água, como ilustrado na Figura 2.17.

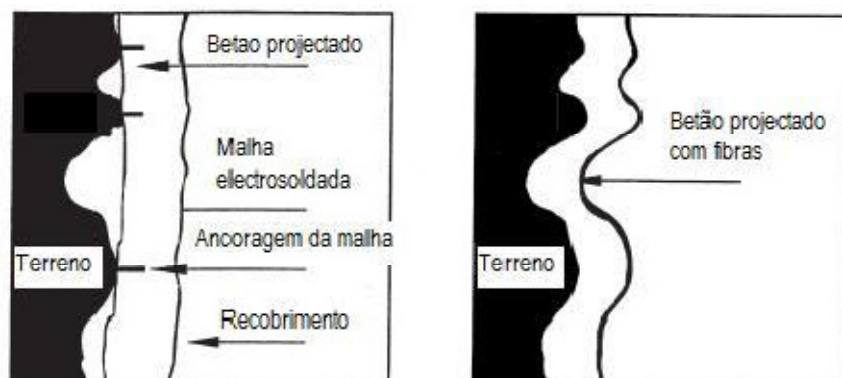


Fig. 2.17- Comparação de revestimento a betão projectado e malha electrosoldada (a) vs. lining de betão projectado com fibras (b); retirado de Vandewalle (1998).

O carregamento exercido é suportado pela existência da malhassol no betão convencional. No entanto os esforços desenvolvidos não são facilmente localizáveis, pelo que se torna quase impossível colocar a malhassol de um modo perfeitamente localizado. Com uma distribuição homogénea das fibras qualquer que seja a localização dos esforços a resistência da estrutura estará salvaguardada.

Por outro lado, ao evitar ou reduzir a necessidade de armadura convencional, esta solução torna-se muito competitiva, facilitando e reduzindo o tempo necessário para a execução das obras deste tipo.

Na indústria da pré-fabricação, como já foi referido, a aplicação do BACRF traz a vantagem de eliminar os ruídos e aumentar a segurança dos operários envolvidos. A opção de construção de estruturas subterrâneas, como por exemplo túneis com BACRF em que os painéis são prefabricados, traz não só uma vantagem económica significativa como uma muito maior facilidade de execução no local da obra.

É, no entanto, necessário um controle rigoroso para evitar a danificação destes elementos, quer no transporte, quer na colocação dos mesmos, uma vez que a ocorrência de fendas poderá conduzir ao mau funcionamento destas estruturas.

Na Figura 2.18 está esquematizada a forma deste tipo de painéis constituintes de um túnel.

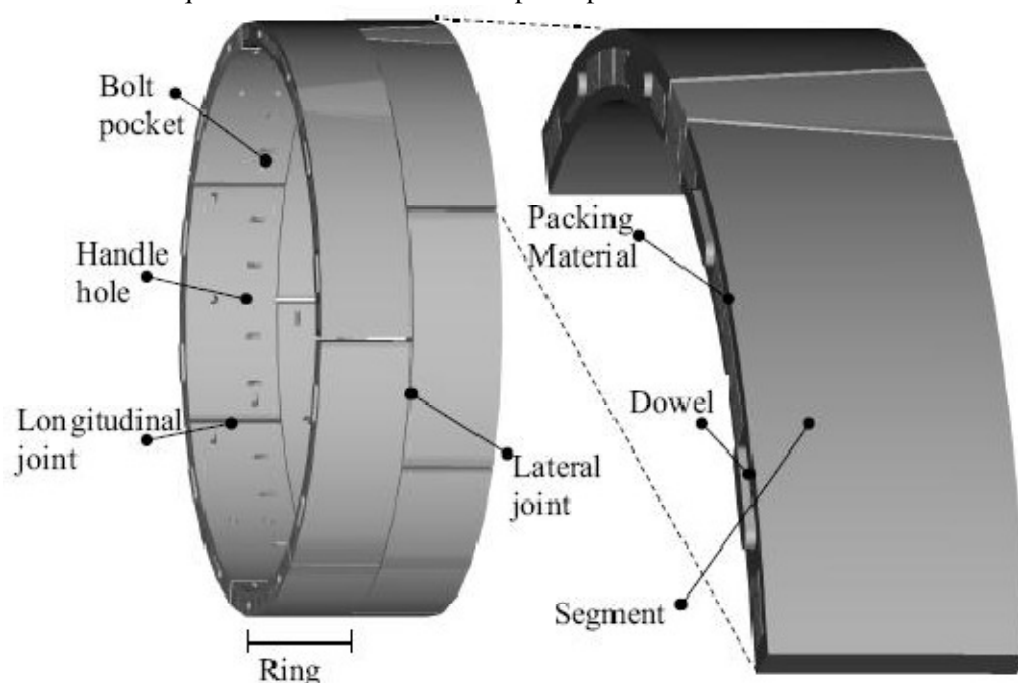


Fig. 2.18 – Terminologia de revestimento. Retirado de Blom (2002)

2.4.2. APLICAÇÃO EM ZONAS DE ANCORAGEM DE ELEMENTOS PRÉ-ESFORÇADOS

O pré-esforço surge devido ao avanço tecnológico e à necessidade de se construir vencendo vãos cada vez maiores. Na construção pré-esforçada, os varões de aço são traccionados tendo por isso de resistir a tensões muito elevadas, com o intuito de controlar a deformação e aumentar a carga resistente das estruturas, sendo os cabos de pré-esforço dimensionados nas grandes obras de arte de forma a suportar pelo menos o peso próprio, que em geral em neste tipo de obras como por exemplo pontes, é a maior carga a que estão sujeitas - Dhonde et al (2005).

Devido a estas vantagens, as estruturas pré-esforçadas tornaram-se uma das soluções preferenciais, quando se trata de construir viadutos em obras rodoviárias e mesmo em pontes cujos vãos têm um grande comprimento.

As zonas de ancoragem, em particular, estão sujeitas à carga concentrada devido ao pré-esforço, às deformações devido às variações de temperatura e à fluência, todas estas acções são responsáveis pela ocorrência de fendilhação. Estas fendas se permitirem a entrada de água e outros agentes nocivos poderão para além do aspecto pouco saudável da estrutura, provocar a corrosão da armadura de pré-esforço.

Para evitar as fendas formadas na zona de ancoragem é geralmente necessário proceder ao reforço das mesmas com uma grande densidade de armadura, como é demonstrado na Figura 2.19. Geralmente com uma percentagem quase igual à percentagem máxima de armadura permitida para um elemento de betão armado (4,2%).



Fig. 2.19 – Armadura de extremidade de uma viga I pré-esforçada (Dhonde, Mo e Hsu, 2005)

Como alternativa, pode ser adoptada uma solução em que sejam incorporadas fibras no betão, de forma a substituir de uma forma parcial, ou até em alguns casos totalmente, os varões de aço presentes nestas zonas de ancoragem, evitando a abertura e propagação de fendas.

Devido às difíceis condições de colocação e vibração do betão e à existência, quer dos cabos de pré-esforço, quer de armaduras de reforço, parece lógico que um betão que se compacte de uma forma autónoma seja a solução mais prática para este tipo de estruturas.

O betão auto-compactável reforçado com fibras será sempre uma escolha competitiva que melhora o desempenho, diminui a mão-de-obra e cumpre as exigências neste tipo de zonas.

No Capítulo 5 os modos de rotura das zonas de ancoragem e as vantagens de adição de fibras nestas zonas são discutidos e analisados com mais pormenor.

É possível então concluir que as fibras são uma adição eficaz à matriz cimentícia e que para ambas as situações atrás referidas apresentam vantagens óbvias. Uma vantagem adicional, já apresentada, é traduzida na limitação da fendilhação, o que pode ser de elevada importância para evitar a infiltração da água ou de outros elementos que podem ser nocivos para as armaduras ou mesmo para as fibras distribuídas pelo betão.

3

Caracterização do BACRF no estado fresco.

3.1. MÉTODOS DE ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO BACRF

A inclusão de fibras no betão auto-compactável tem que respeitar um compromisso para responder a determinadas exigências, quer no estado endurecido como no estado fresco.

Relativamente ao estado fresco a introdução de fibras no betão altera, como seria de esperar, a trabalhabilidade e as características reológicas do betão. O tipo de fibra, a composição da mistura, o processo de mistura e a técnica de compactação, determinam o conteúdo máximo de fibras a incluir. É de todo benéfica uma distribuição homogénea das fibras para otimizar o comportamento do BACRF – Grünewald (2004).

Quatro razões fundamentais, afectam a trabalhabilidade do betão, quando as fibras são incluídas, são elas:

- A forma alongada das fibras comparada com a forma, mais ou menos esférica dos agregados, sendo a área da superfície das fibras superior, para o mesmo volume;
- A rigidez de algumas fibras transforma a granulometria enquanto algumas mais flexíveis preenchem o espaço entre grãos. As fibras rígidas afectam o posicionamento de algumas partículas aumentando a porosidade;
- O material constituinte, por exemplo, das fibras metálicas tem características diferentes dos outros materiais;
- Algumas fibras onduladas ou com ganchos nas pontas aumentam a fricção entre estas e os agregados.

A adição de fibras no betão auto-compactável pode tirar a vantagem do seu elevado desempenho no estado fresco, atingindo-se uma dispersão mais uniforme das mesmas. A maior compacidade do BAC devido ao aumento de partículas finas melhora a zona de interface entre as fibras e o betão – Ferrara et al. (2007).

Segundo Johnston (1996) e Vandewalle (1993), é recomendável que o comprimento das fibras seja 2 a 4 vezes superior à máxima dimensão dos agregados; sendo a dimensão máxima dos últimos no BAC reduzida em cerca de 10% relativamente à do betão convencional.

A Figura 3.1 esquematiza, o efeito do tamanho dos agregados na distribuição das fibras.

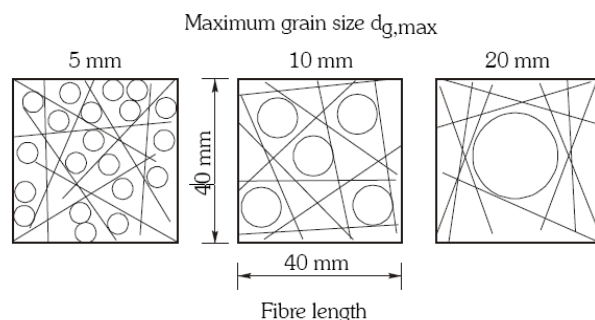


Fig. 3.1 – Efeito das dimensões dos agregados na distribuição das fibras

Outro aspecto fundamental, que é relacionado com a auto-compactibilidade, é a relação entre o comprimento das fibras e o seu diâmetro (L_f/D_f).

Segundo a norma Norte-Americana (ACI544,1993), 2% do volume total de betão é considerado o volume máximo de fibras de aço que pode ser incluído no betão.

São seguidamente descritos alguns modelos que permitem otimizar a constituição do BACRF, de modo a que as propriedades do betão auto-compactável se mantenham com níveis apropriados, mesmo com a introdução de fibras. Procurou-se descrever aqueles cuja utilização prática se torne mais evidente.

3.1.1. MÉTODO BASEADO NO MODELO REOLÓGICO DA PASTA DE CIMENTO

Torrijo, Barragán e Zebrino (2009) estudaram o efeito da introdução de fibras numa composição de betão auto-compactável. A abordagem utilizada consistiu, sinteticamente, em recorrer ao conceito de diâmetro equivalente das fibras com base na sua área específica, podendo estas ser tomadas como um agregado adicional.

Foram efectuados testes de forma a avaliar a influência das fibras, quer nos espaços vazios entre partículas e espaçamento entre elas, quer na quantidade mínima de pasta de cimento que confere a trabalhabilidade necessária.

Para uma dosagem de superplastificante próxima dos 0.5%, estes autores estimaram através da relação água/cimento o resultado do diâmetro de espalhamento da pasta medido com um mini-cone, através da seguinte expressão:

$$MCF = 69,2 + 687,5.w/c \quad (3.1)$$

Onde: MCF = Diâmetro de espalhamento da pasta usando o mini-cone [mm];
w/c = Relação água/cimento [-].

A viscosidade aparente pode ser estimada através da expressão 3.2

$$VA = 0,0063.(w/c)^{-4.2} \quad (3.2)$$

Onde: VA = Viscosidade aparente da pasta [Pa];
w/c = Relação água/cimento [-].

Sabendo o resultado entre o rácio das expressões 3.1 e 3.2 e sabendo o valor médio do espaçamento entre agregados, é possível classificar o betão como auto-compactável, caso o valor das duas variáveis caia na zona da Figura 3.2 identificada como tal.

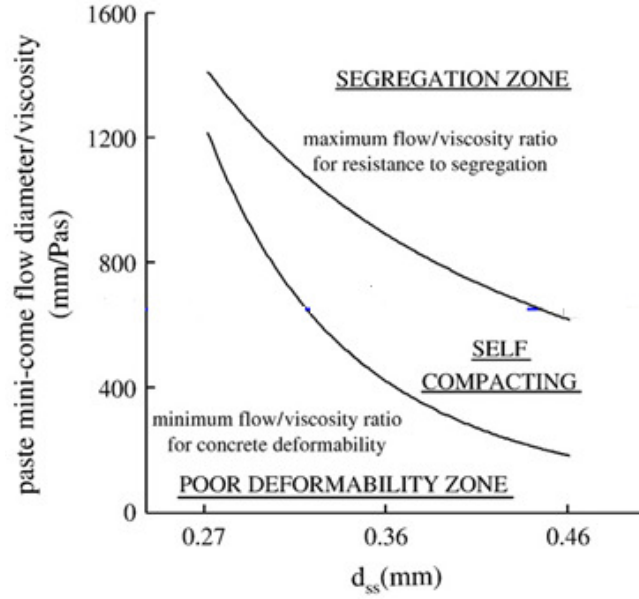


Fig. 3.2 – Curvas de definição da zona auto-compactável, retirado de Ferrara et al (ANO).

O espaçamento médio entre agregados, d_{ss} , pode ser obtido pela expressão 3.3:

$$d_{ss} = d_{av} \left[\sqrt[3]{1 + \frac{V_{pasta} - V_{vazios}}{V_{betão} - V_{pasta}}} - 1 \right] \quad (3.3)$$

Com:

$$d_{av} = \frac{\sum_i d_i m_i + d_{eq-fibras} m_{fibras}}{\sum_i m_i + m_{fibras}} \quad (3.4)$$

$$d_{eq-fibras} = \frac{3L_f}{1 + 2 \frac{L_f}{d_f}} \frac{\gamma_{fibras}}{\gamma_{agregados}} \quad (3.5)$$

Onde: d_{av} = Diâmetro equivalente médio das partículas sólidas [mm];
 m_i = Massa da fracção i de agregados [kg];
 d_i = Diâmetro da fracção i de agregados [mm];
 $d_{eq-fibra}$ = Diâmetro equivalente das fibras [mm];
 m_{fibras} = Massa das fibras [kg];
 γ_{fibras} = Massa volúmica das fibras [kg/m³];
 γ_{agreg-} = Massa volúmica dos agregados [kg/m³].

3.1.2. MÉTODO PROPOSTO POR TORRIJO, BARRAGÁN (2007)

Estes autores no seu estudo referem as modificações induzidas pela adição de fibras nas propriedades do BAC, nomeadamente, na viscosidade e na tensão de cedência.

A viscosidade plástica pode ser entendida como a velocidade de deformação de um corpo; sendo a tensão de cedência, que está intimamente ligada com o atrito interno e a coesão, uma medida da força necessária para romper essa estrutura interna e iniciar o escoamento.

O modelo “Bingham” sugere que para o cálculo da tensão de cedência se utilize a expressão representada em 3.6:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (3.6)$$

Onde: τ = Tensão de corte [Pa];
 τ_0 = Tensão de cedência [Pa];
 μ = Viscosidade plástica [Pa/s];
 $\dot{\gamma}$ = Taxa de deformação [1/s].

Segundo os mesmos autores, se a viscosidade é reduzida o valor de τ_0 tem de aumentar; por outro lado, se o valor da viscosidade aumenta o valor da tensão de cedência tem de diminuir para que o betão seja considerado auto-compactável.

Foi estudado o efeito da adição de duas dosagens diferentes de fibras, 25 e 50 kg/m³, verificando-se que para a adição da 25kg/m³ de fibras os valores de τ tendem para zero, o que é um valor usual para os betões auto-compactáveis sem adição de fibras, havendo apenas um ligeiro aumento no valor da tensão mínima para se iniciar o movimento (τ_0). No caso da adição de 50kg/m³, esta tendência já não se verifica sendo o aumento do valor τ_0 mais significativo; por outro lado, os valores da viscosidade são também superiores.

A adição de 25kg de fibras por m³ de betão apresenta igualmente valores mais reduzidos relativamente à resistência ao bloqueio.

Por outro lado, foi também verificado que o grau de auto-compactabilidade medido neste caso pelo diâmetro de espalhamento sofre uma grande redução caso o ensaio seja efectuado passado algum tempo após o final da amassadura, o que leva a concluir que será necessário controlar o tempo que decorre desde a amassadura e a colocação do BACRF nas cofragens.

3.1.3. MÉTODO BASEADO EM MODELOS DE EMPACOTAMENTO

Este modelo foi proposto por Grünwald na sua dissertação intitulada “*Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete*” (2004)

Neste trabalho procedeu-se a um estudo experimental das características do BACRF no estado fresco transpondo os resultados experimentais de modo a encontrar um modelo fiável para conseguir uma composição optimizada relativamente aos componentes da mistura, variando a quantidade de fibras.

O autor, após os ensaios realizados aquando da adição de fibras, deduziu um conjunto de expressões que permitem prever o efeito de tais adições nas propriedades do BAC, no estado fresco.

Seguidamente apresentam-se as mais importantes para o estudo em causa, visto terem directamente a ver com os parâmetros medidos na preparação do BACRF para o presente trabalho.

É importante acrescentar que, em algumas expressões, uma das variáveis é o valor da densidade de empacotamento. A densidade de empacotamento em misturas polidispersas pode ser obtida experimentalmente ou analiticamente, tal como exposto em Grünwald (2004).

3.1.3.1. Diâmetro de espalhamento

O diâmetro de espalhamento pode ser obtido da seguinte forma:

$$DE = (6,75 + SFF) \cdot \frac{1}{0,250} \quad (3.7)$$

Com:

$$SFF = MS \cdot \left(\frac{\phi}{\phi^*} \right)_g^{-1} \quad (3.8)$$

$$\left(\frac{\phi}{\phi^*} \right)_g = -3,08 \cdot RPL + 0,953 \quad (3.9)$$

$$\Gamma = \frac{V_e}{Grãos \sum_{i=1}^n n_{g,i} \cdot s_{g,i} \cdot d_{g,i} + Fibras \sum_{i=1}^n n_{f,i} \cdot s_{f,i} \cdot d_{f,i}} \quad (3.10)$$

$$V_e = V_{fluido} - \left(\frac{V_{sólido}}{PD_{(g;p)}} - V_{sólido} \right) \quad (3.11)$$

Onde: DE = Diâmetro de espalhamento [mm]
 SFF = Factor diâmetro de espalhamento [-]
 MS = Diâmetro de espalhamento da pasta usando o mini-cone [mm];
 $(\phi/\phi^*)_g$ = Conteúdo em sólidos normalizado (fibras e agregados) [-];
 RPL = Espessura relativa da camada de pasta;
 Γ = Espessura da camada relativa de fluido circundante [-];
 V_e = Volume de excesso de fluido em torno dos grãos do agregado [mm³];
 V_{fluido} = Volume de fluido [pasta cimento (incl. ar) - RPL ou água (excl. ar) - RWL] [Vol. %];
 $V_{sólido}$ = Volume de sólidos [Vol. %];
 PD = Densidade de empacotamento; PD_g - dos agregados – RPL; PD_p - da pasta RWL;
 $n_{g,i}$ = Número de grãos do grupo i [-];
 $s_{g,i}$ = Área específica dos grãos do grupo i [mm²];
 $d_{g,i}$ = Diâmetro dos grãos do grupo i [mm];
 $n_{f,i}$ = Número de fibras do grupo i [-];
 $s_{f,i}$ = Área específica da uma fibra do grupo i [mm²];
 $d_{f,i}$ = Diâmetro equivalente das fibras do grupo i [mm].

Por outro lado, uma vez medidos os resultados do diâmetro de espalhamento obtidos nos ensaios e normalizando-os com os valores obtidos para BAC de referência, sem fibras, é possível obter a equação que melhor se adapta a esses pontos. A equação 3.12 é aquela que melhor se adapta aos valores dos diâmetros de espalhamento normalizados, correlacionando-os com um factor de influência (IF). Combinando a equação 3.12 com a equação 3.7, é possível prever os valores do diâmetro de espalhamento para o BACRF.

$$DDE = 36,1.IF^3 + 19,5.IF^2 - 3,61.IF \quad (3.12)$$

Com:

$$IF = \left(\frac{\phi}{\phi^*} \right)_g \cdot \frac{1}{FT_p} \quad (3.13)$$

Onde: DDE = Declive do diâmetro de espalhamento normalizado [-];
 IF = Factor de influência [-];
 FT_p = Tempo de escoamento da argamassa no funil [s].

3.1.3.2. Tempo de espalhamento de 500 mm (T₅₀₀)

Este parâmetro pode segundo o mesmo autor, ser obtido de um modo aproximado usando a expressão 3.14.

$$T_{500} [s] = 1,33 + 19,2.10^{-3}.VP_{BACRF} [Pa.s] \quad (3.14)$$

Com:

$$VP_{BACRF} = VP_F + V_f \cdot \frac{L_f}{d_f} \cdot VP_F^{1,19} \quad (3.15)$$

$$VP_F [Pa.s] = 172 - 1670.FVP \quad (3.16)$$

$$FVP = RWL \cdot \left(\frac{\phi}{\phi^*} \right)_p^{-1} \quad (3.17)$$

$$\left(\frac{\phi}{\phi^*} \right)_p = -3,87.10^{-3}.RWL + 0,996 \quad (3.18)$$

Onde: VP_{BACRF} = Viscosidade plástica do BACRF [Pa.s];
 VP_F = Viscosidade de plástica do BAC tendo em conta a adição de fibras nos restantes parâmetros [Pa.s];
 FVP = Factor de viscosidade plástica [-];
 L_f = Comprimento da fibra;
 D_f = Diâmetro da fibra;
 FVP = Factor de viscosidade plástica;
 (φ/φ*)_p = Conteúdo normalizado de pasta de cimento;
 RWL = Espessura da camada relativa de água.

3.1.3.3. Conteúdo máximo de fibras

O conteúdo máximo de fibras é um factor de extrema importância visto que para manter a auto-compactabilidade é necessário limitar o mesmo. Grünewald propõe o seguinte método para a obtenção do máximo conteúdo em fibras.

$$FMF = \frac{0,781 - MFC}{0,211} \quad (3.19)$$

Onde: FMF = Factor máximo de fibras ($V_f L_f / d_f$) [-];
MFC = Conteúdo máximo de fibras [-]

A forma de obter o conteúdo máximo de fibras é uma modificação do conceito CBI (Risk of blocking), no qual se utiliza o rácio entre o comprimento da fibra e o espaçamento entre barras existentes na caixa L.

Substituindo agora o espaçamento entre barras pelo diâmetro médio do agregado é possível calcular o conteúdo máximo de fibras numa mistura, cruzando o rácio entre L_f (comprimento das fibras) e D_{af} (diâmetro médio do agregado), com os segmentos de recta apresentados na Figura 3.3

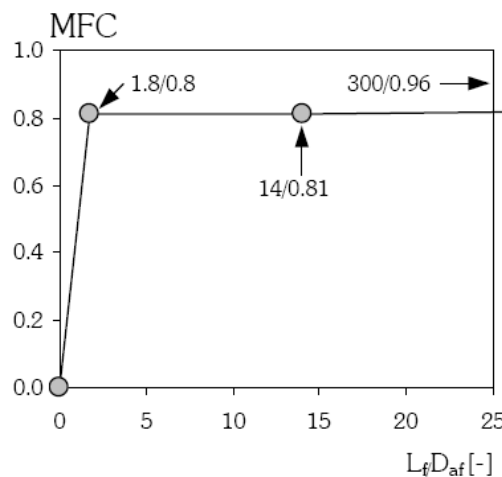


Fig.3.3 – Relação entre L_f/D_{af} e MFC

A recta definida pela equação 3.19, cria um espaço abaixo do qual o betão é auto-compactável e acima do qual deixa de o ser.

3.1.4. MODELO BASEADO NO MÉTODO DOS PLANOS FACTORIAIS

Este modelo é baseado num método estatístico apresentado em Montgomery (2001).

Este método tem como principal intuito prever os efeitos dos diferentes parâmetros da composição nas propriedades do betão nos estados fresco e endurecido.

Os resultados numéricos são fornecidos a partir da informação recolhida por um conjunto de resultados experimentais, cuidadosamente programados segundo um plano factorial. Posteriormente, com o auxílio de ferramentas e modelos estatísticos, é possível estabelecer as relações entre variáveis de entrada (parâmetros da composição) e as variáveis de saída (propriedades da mistura no estado fresco e endurecido).

Na Figura 3.4 está explicado resumidamente o procedimento a adoptar.

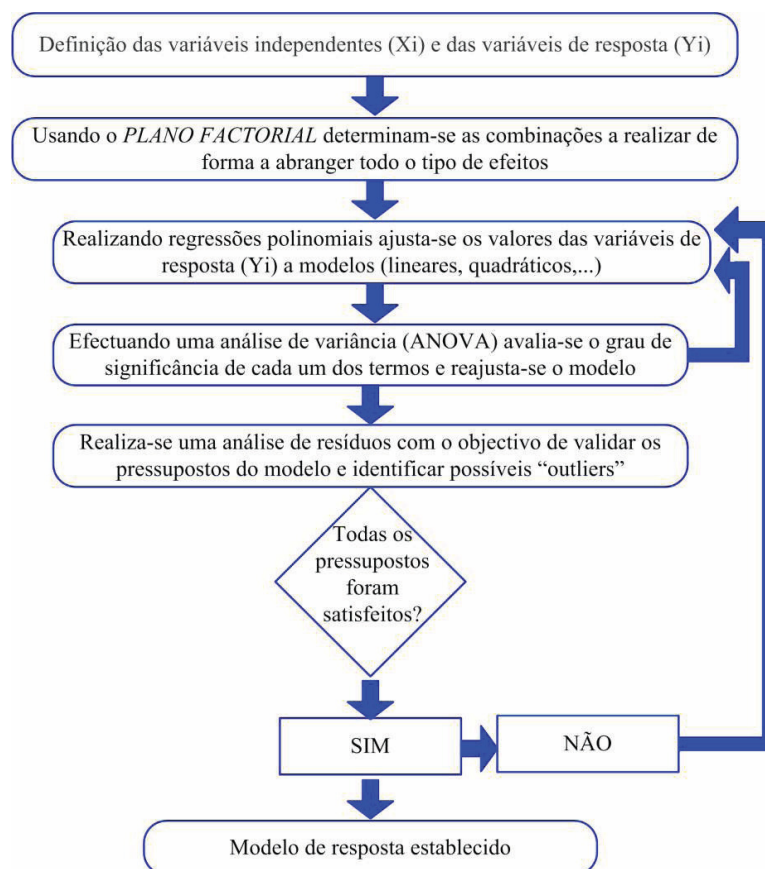


Fig. 3.4 - Procedimento para definição de modelos de resposta a partir de experiências conduzidas segundo um plano factorial – (2006)

Para se entender o plano factorial tome-se por exemplo o caso em que existem k parâmetros em estudo, cada um com apenas com dois níveis. O nível “alto” e “baixo”, ou a “presença” ou “ausência” de um parâmetro são codificados como +1 e -1 respectivamente. O desenvolvimento completo deste plano requer 2^k experiências. A Figura 3.5 exemplifica um plano factorial 2^2 .

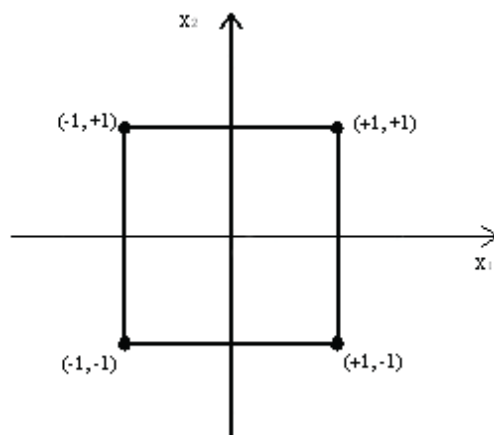


Fig. 3.5 – Plano factorial para $k=2$

O plano factorial 2^k é particularmente vantajoso num estado inicial do trabalho pois permite estimar o número de experiências a efectuar, de modo a tirar conclusões sobre o efeito isolado de cada um dos parâmetros.

Se a este tipo de planos forem adicionados pontos axiais e pontos centrais resulta um plano designado Plano Factorial Aumentado, “Central Composite Design”, que permite considerar modelos de segunda ordem. Na Figura 3.6, está representado o CCD.

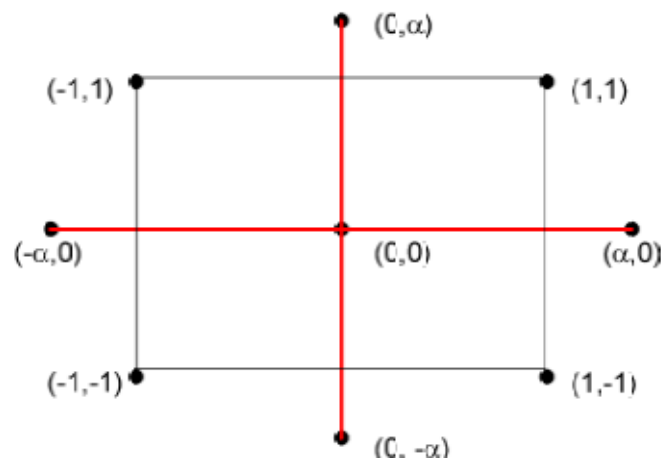


Fig 3.6 – Central Composite Design para $k=2$, retirado de S. Nunes (2008).

O tratamento matemático a dar aos resultados das experiências para se obterem os modelos de resposta não se encontra no âmbito do presente trabalho pelo que não será apresentado.

O diâmetro de espalhamento, o tempo de escoamento no funil V, o bloqueio no ensaio da caixa L e a resistência à compressão são exemplos típicos das variáveis de resposta habitualmente estudadas.

A razão água/cimento, a quantidade de agregado grosso, a quantidade de superplastificante, são exemplos de variáveis de entrada. A quantidade de fibras a incluir na mistura pode ser também considerada uma variável de entrada como propõem Sanjuán e Moragues (1996), no seu estudo “Polypropylene-fibre-reinforced mortars mixes: Optimization to control plastic shrinkage”.

3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO

Nesta secção são descritos os ensaios que permitem, no estado fresco, classificar um betão como auto-compactável, bem como a sua relação com alguns dos parâmetros exigidos para a classificação deste tipo de betão. Interessa referir que em geral apenas um dos ensaios não é suficiente para caracterizar um betão como auto-compactável, pelo que se realizam dois ou mais, do conjunto de ensaios descritos em seguida. O Quadro 3.1 relaciona o tipo de ensaio com a propriedade que é melhor avaliada pelo mesmo.

Quadro 3.1 – Relação entre tipo de ensaio e as propriedades avaliadas, European Guidelines for Self Compacting Concrete (2005)

Propriedades	Método(s) de teste preferencial
Capacidade de enchimento	Diâmetro de espalhamento
Viscosidade	T_{500} ; diâmetro de espalhamento; Funil V
Capacidade de passagem/resistência ao bloqueio	Caixa L
Segregação	Ensaio de resistência à segregação

3.2.1. ENSAIO DE ESPALHAMENTO

Este ensaio encontra-se descrito na norma EN 12350 8.

O princípio consiste em encher com betão fresco o cone de Abrams, estando este pousado sobre uma placa metálica. Quando o cone é levantado, mede-se o tempo decorrido até que o betão fresco se espalhe formando um círculo com 500 mm de diâmetro, sendo obtido assim o valor de T_{500} . Depois de o betão espalhar completamente o diâmetro de espalhamento é medido segundo duas direcções perpendiculares entre si, tomando-se a média destes diâmetros como o valor final do diâmetro de espalhamento.

O material utilizado para este ensaio é unicamente o cone de Abrams e a placa metálica onde estão gravadas as marcas correspondentes aos diâmetros de 200 e 500mm, tal como esquematizado na Figura 3.7.

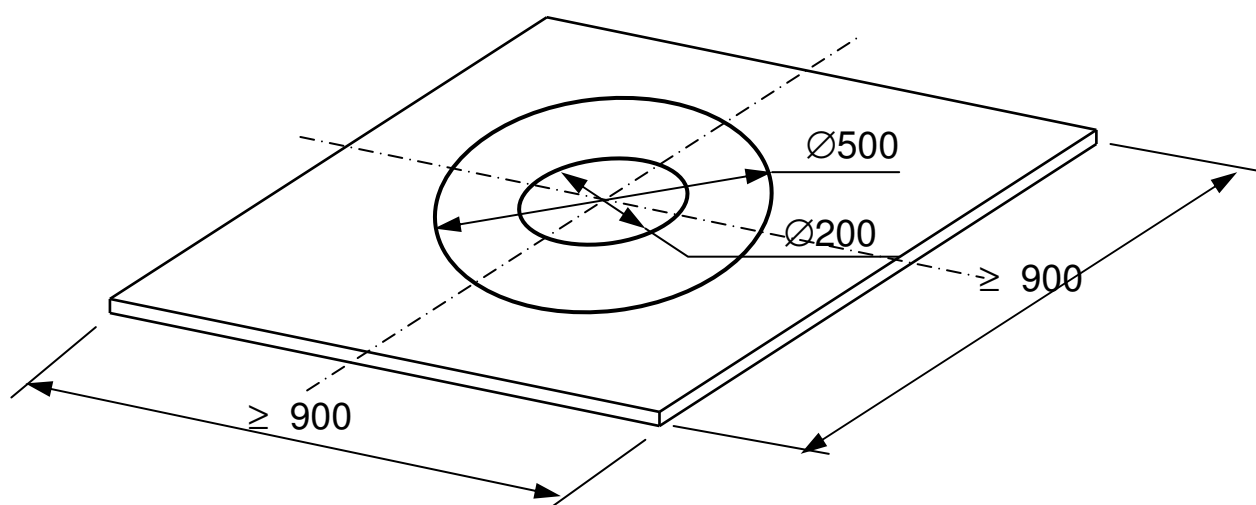


FIG. 3.7 – Placa metálica utilizada para os testes do diâmetro de espalhamento e T_{500}

Segundo a mesma norma, o cone deve ser colocado sobre a marca dos 200 mm, em seguida deve ser completamente cheio com o betão fresco. O cone não deverá ser mantido nesta situação por mais de 30 segundos, antes deste tempo, deverá ser levantado na vertical de forma a não interferir com o escoamento.

O tempo T_{500} deve ser imediatamente medido desde que o cone é levantado, até o betão atingir o círculo correspondente aos 500mm.

Durante este ensaio deverá ainda observar-se se há ou não sinais de segregação.

Na Figura 3.8 é mostrada uma imagem do aspecto final da amostra de betão após a realização deste ensaio.



Fig. 3.8 – Ensaio de espalhamento de BAC com fibras plásticas

3.2.2. ENSAIO DA CAIXA L

Este ensaio encontra-se descrito na norma EN 12350 10.

O princípio consiste em deixar escoar livremente o betão pelos espaços existentes entre as barras de aço, existentes na caixa L e medir as alturas finais do betão nas extremidades da parte horizontal da caixa.

O único instrumento necessário para realização deste ensaio é a caixa L, que pode ser constituída por 2 barras de 12 mm de diâmetro espaçadas de 59 mm, ou por 3 barras de 12 mm de diâmetro afastadas de 41 mm, existe ainda uma variante da caixa L de uso particularmente indicado quando na composição são adicionadas fibras, apenas constituída por uma barra de 12 mm de diâmetro e duas aberturas de 94mm cada. A Figura 3.9 ilustra os diferentes tipos de variantes para a caixa L.

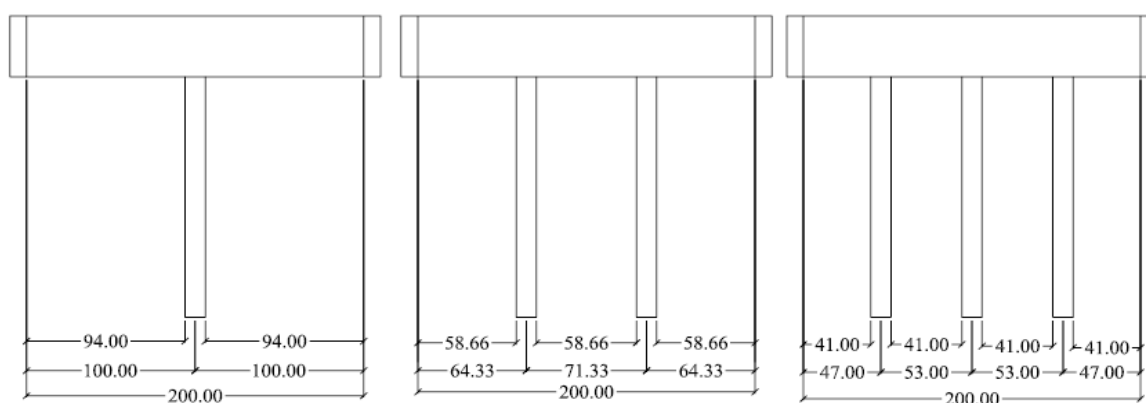
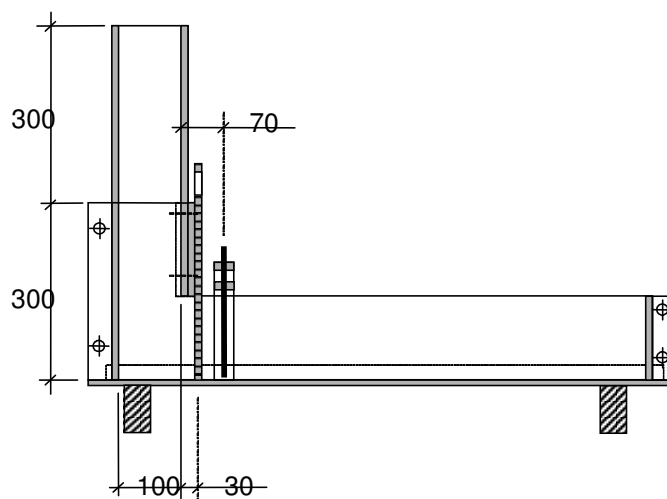
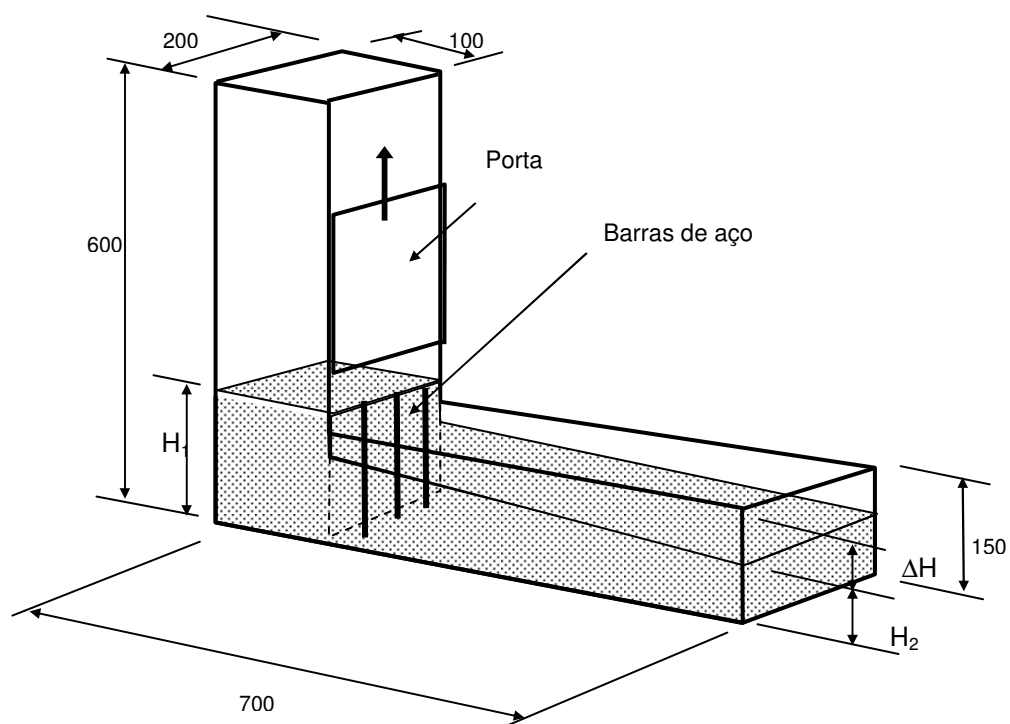


Fig. 3.9 – Configuração das barras utilizadas na caixa L

A caixa L tem uma comporta que abre na vertical deixando que o betão escoe e passe pelas barras de ferro.

A Figura 3.10 esquematiza a forma e dimensões da caixa L.



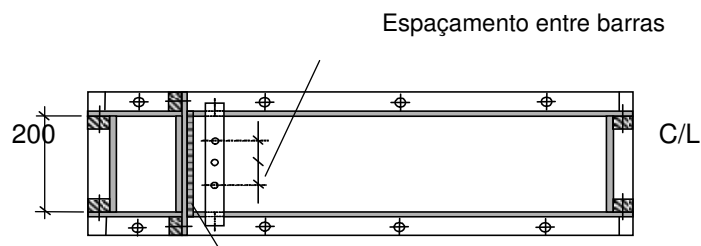


Fig. 3.10 – Dimensões e forma da caixa L

A caixa L deve ser colocada numa superfície horizontal; seguidamente o betão deverá preencher a parte de cima da caixa, deixando-o assentar durante aproximadamente 60 segundos e registando algum sinal de segregação.

A porta que impede o movimento deverá ser aberta de uma única vez. Quando o movimento parar devem ser efectuadas 3 medições da altura de betão, nas duas zonas atrás e à frente das armaduras. Essas 3 medições de cada uma das alturas são igualmente espaçadas ao longo da dimensão lateral da caixa. Fazendo-se depois a média dos valores obtidos é possível caracterizar a altura de betão para cada uma das zonas descritas. Sendo H1 a altura antes das barras e H2 a altura depois das barras, a capacidade de passagem (PA) pode ser obtida utilizando a expressão 3.20:

$$PA = H2 / H1 \quad (3.20)$$

Na Figura 3.11 é possível observar uma imagem do equipamento existente no LABEST/FEUP. De notar que este equipamento dispõe de 3 varões de 12 mm com um afastamento de cerca de 41 mm entre si, ou seja, corresponde à situação mais exigente.



Fig. 3.11 – Ensaio da caixa L para o BAC de referência (sem fibras)

3.2.3. ENSAIO DO FUNIL V

O ensaio encontra-se descrito na norma EN 12350 9.

O princípio deste ensaio consiste em registar o tempo que o betão demora a escoar por um funil em forma de V. Esse tempo, depois de medido e registado toma a designação de tempo de escoamento do funil V.

Para este ensaio é apenas necessário um funil metálico com a forma e dimensões definidas na Figura 3.12. Este funil, na parte inferior, tem na sua constituição um pequeno mecanismo que, quando aberto permite o escoamento do betão de forma à realização do ensaio. De notar que nos estudos de betão com fibras, por vezes adoptam-se funis com dimensões superior às descritas na norma, em particular uma maior dimensão da abertura de saída, podendo esta ser aumentada para 75mm.

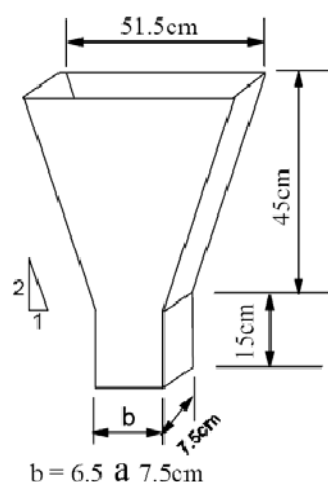


Fig. 3.12 – Funil V

O procedimento consiste em encher o compartimento superior com betão com o dispositivo de saída fechado, depois de 10 segundos colocar um recipiente por baixo e abrir o compartimento deixando que o betão escoe livremente. Medir o tempo desde a abertura do dispositivo até ser possível visualizar o recipiente em baixo do funil e arredondar à casa do 0,1 segundo mais próximo, sendo então obtido o tempo de escoamento do funil V.

Na Figura 3.13 é possível verificar uma fotografia do ensaio descrito.



Fig. 3.13 – Ensaio do funil V, para o BAC sem fibras (composição de referência)

3.2.4. RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO

O ensaio encontra-se descrito na norma EN 12350 11.

O princípio consiste em deixar a amostra repousar durante 15 minutos, notando alguma separação da água dos restantes constituintes. A parte de cima da amostra é colocada num peneiro de 5 mm de abertura; após 2 minutos, a quantidade de betão que passa pela abertura é pesada.

O indicador de segregação é então calculado como uma proporção da quantidade que passa pelo peneiro.



Fig. 3.14 – Ensaio da resistência à segregação

3.2.5. ENSAIO DO ANEL J

O ensaio encontra-se descrito na norma EN 12350 12.

O ensaio é alternativo ao da caixa L e consiste em deixar escoar o betão no estado fresco por um anel, que contem varões de aço de 12 ou 16 mm com um espaçamento de 41 ou 56mm, sendo o último espaçamento mais vantajoso quando se trata de betão auto-compactável reforçado com fibras, para evitar o bloqueio das mesmas no anel.

Depois do escoamento se concluir deverá ser medida a altura de betão na parte interior e exterior do anel. Fazendo a diferença entre estas duas alturas é possível caracterizar mais um parâmetro, que dá informação útil sobre a auto-compactibilidade do betão, designado como BJ.

Na Figura 3.15 é possível observar uma fotografia do ensaio descrito.

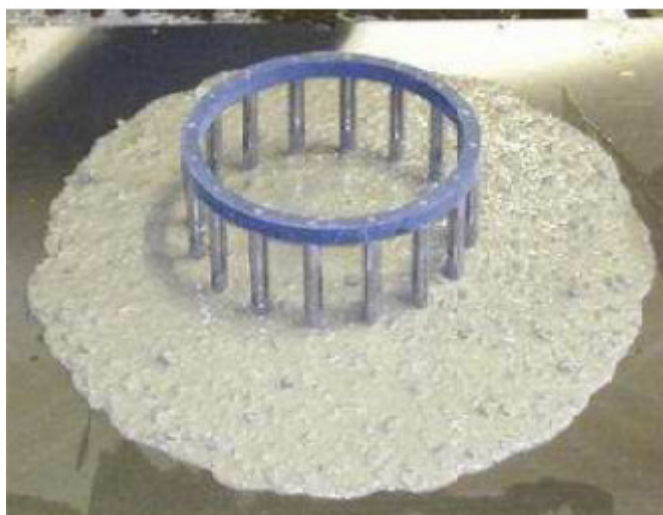


Fig. 3.15 – Ensaio do anel J, retirado de Nunes (ANO)

O Quadro 3.2 apresenta os intervalos de aceitação para os resultados dos ensaios descritos anteriormente para que o betão seja considerado auto-compactável.

Quadro 3.2 – Intervalos de aceitação para os resultados dos diferentes ensaios

Ensaio:	Valores medidos no ensaio:	Intervalos de aceitação:	Classe de consistencia
Espalhamento	Diâmetro de espalhamento (mm)	550-650	SF1
		660-750	SF2
		760-850	SF3
	T500 (s)	 2	VS1
		3-6	VS2
		>6	VS3
Funil V	Tempo de passagem no funil V	<9	VF1
		9-25	VF2
Caixa L	Rácio das alturas	 0,8 com 2 barras	PL1
		 0,8 com 3 barras	PL2

3.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

Apresentam-se de seguida os materiais utilizados no presente trabalho, assim como as suas principais características e propriedades.

3.3.1.1. Cimento

Neste estudo foi utilizado cimento CEM I 42.5 R fornecido pela SECIL produzido na fábrica do Outão. No Quadro 3.3 apresentam-se os resultados do controlo estatístico fornecido pela SECIL.

Quadro 3.3 – Caracterização do cimento (valores típicos)

Ensaio	
Ensaio químico	
SiO ₂	19,82 %
Al ₂ O ₃	4,22 %
Fe ₂ O ₃	3,40 %
CaO total	62,66 %
MgO	2,21 %
SO ₃	3,47 %
Perda ao fogo	3,0 %
Cloretos	0,03 %
Cal livre	1,28 %
Resíduo insolúvel	1,1 %
Ensaio físico	
Massa volúmica	3010 kg/m ³
Superfície específica (Blaine)	4112 kg/m ³
Resíduo 45 µm	2 %
Água na pasta normal	28,7 %
Tempo início de presa	127 min
Tempo fim de presa	162 min
Expansibilidade	0,7 mm
Ensaio mecânico	
Resist. flexão 2 dias	6,1 MPa
Resist. flexão 7 dias	7,8 MPa
Resist. flexão 28 dias	8,9 MPa
Resist. compressão 2 dias	33,4 MPa
Resist. compressão 7 dias	46,6 MPa
Resist. compressão 28 dias	58,1 MPa

3.3.1.2. Filer calcário

Como adição mineral utilizou-se filer calcário BETOCARB P1 – OU, da Comital. No Quadro 3.4 apresentam-se as características deste material, segundo a ficha técnica deste produto (fornecido pela Comital).

Quadro 3.4 – Caracterização do filler calcário

Ensaio químico	
CaCO ₃	99 %
MgCO ₃	0.3 %
Fe ₂ O ₃	0.02 %
Insolúveis em HCl	0.2 %
Sulfatos solúveis em ácido	< 0.05 %
Cloretos	< 0.001 %
Enxofre total	< 0.04 %
Ensaio físico	
Massa volúmica	2680 kg/m ³
Densidade aparente	900 kg/m ³
Teor de humidade	0.1 %
Azul de metileno	0.06 g/100g
Partículas < 2 mm	100 %
Partículas < 125 µm	99 %
Partículas < 63 µm	85 %

3.3.1.3. Areia fina

Usou-se uma areia fina natural, proveniente das dunas de Ovar. Na Figura 3.16 apresenta-se a curva granulométrica (análise realizada no LABEST) em termos de passados acumulados e no Quadro 3.5 apresentam-se as restantes características da areia fina (fornecidas pelo produtor).

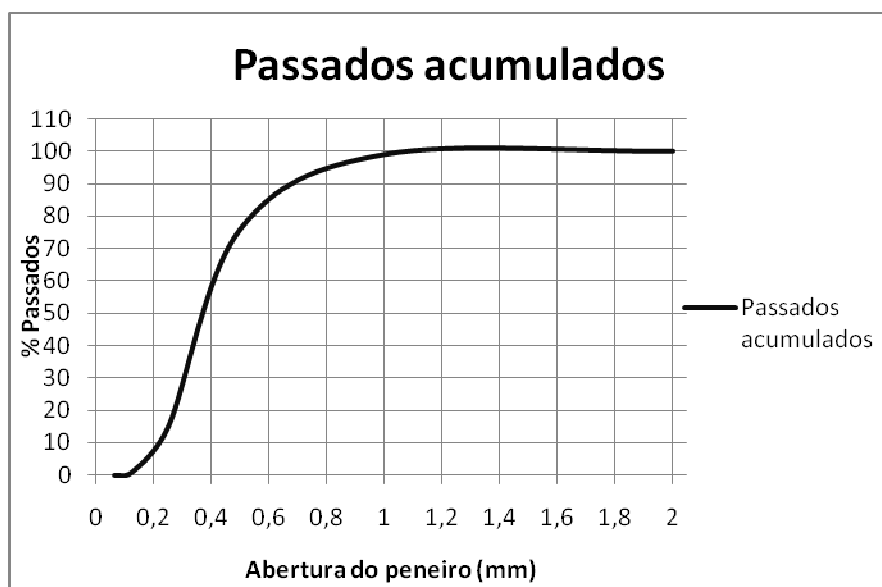


Fig. 3.16 – Curva granulométrica (areia fina)

Quadro 3.5 – Caracterização da areia fina

Massa volúmica (kg/m ³)	2630
Absorção (%)	0,2
Baridade não compactada (kg/m ³)	1599
Baridade compactada (kg/m ³)	1690

3.3.1.4. Areia média

Usou-se uma areia média natural, proveniente do rio Tejo. Na Figura 3.17 apresenta-se a curva granulométrica (análise realizada no LABEST) em termos de passados acumulados e no Quadro 3.6 apresentam-se as restantes características da areia fina (fornecidas pelo produtor).

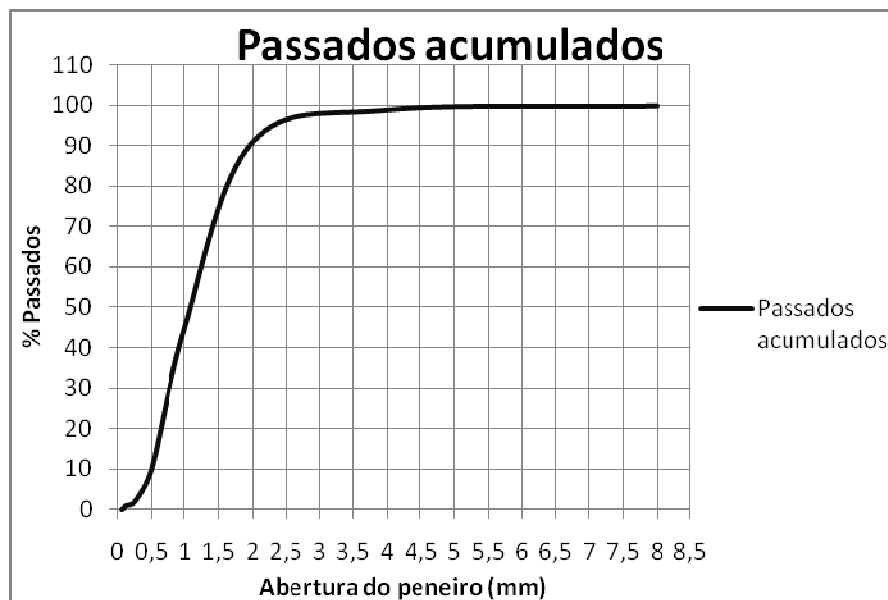


Fig. 3.17 – Curva granulométrica (areia média)

Quadro 3.6 – Caracterização da areia média

Massa volúmica (kg/m^3)	2620
Absorção (%)	0,4
Baridade não compactada (kg/m^3)	1533
Baridade compactada (kg/m^3)	1638

3.3.1.5. Brita

Usou-se uma brita calcária lavada proveniente de Leiria. Na Figura 3.18 apresenta-se a curva granulométrica (análise realizada no LABEST) em termos de passados acumulados e no Quadro 3.7 apresentam-se as restantes características da areia fina (fornecidas pelo produtor).

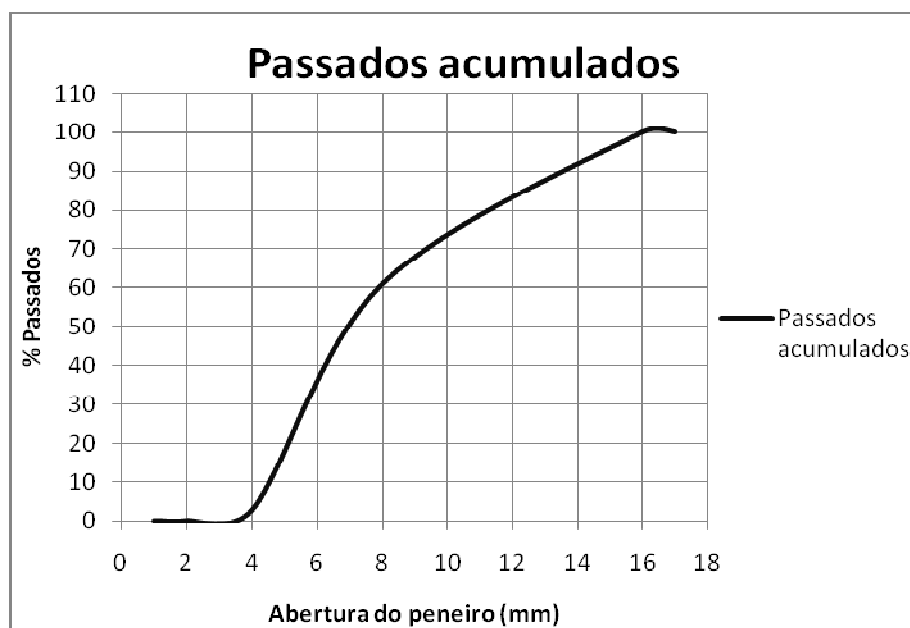


Fig. 3.18 – Curva granulométrica (brita)

Quadro 3.7 – Caracterização da brita	
Massa volúmica (kg/m^3)	2680
Absorção (%)	1,4
Baridade não compactada (kg/m^3)	-
Baridade compactada (kg/m^3)	1380

3.3.1.6. Superplastificante

Neste trabalho foi usado o superplastificante Viscocrete 3006 da Sika. As propriedades deste adjuvante podem ser facilmente consultadas na ficha técnica do fornecedor. Contudo, apresenta-se no Quadro 3.8 as informações mais relevantes.

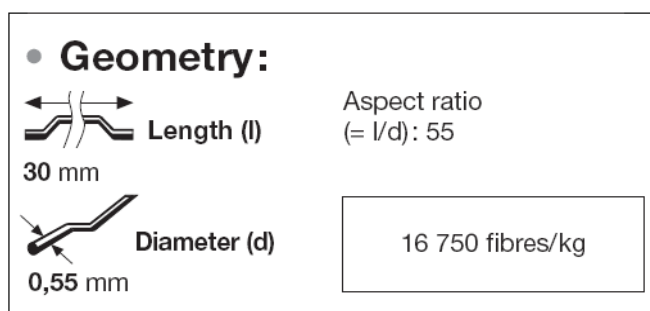
Quadro 3.8 – Propriedades principais dos superplastificantes	
Designação	Viscocrete 3006
base	policarboxilatos modificados
aspecto	líquido levemente amarelado
peso específico	$1,05 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$
teor de sólidos	$18,0 + 1,8\%$
pH	$4,5 \pm 1,0$ $< 0,1\%$
dosagem recomendada	1,0% a 2,0% sobre o peso do cimento

3.3.1.7. Fibras

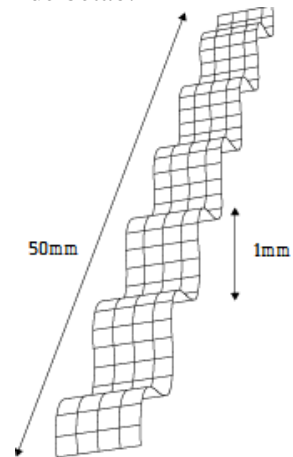
As fibras utilizadas neste estudo foram:

- **Fibras Dramix® - ZP305 (com gancho nas extremidades)**, com 30mm de comprimento da fibra e massa volúmica de 7850 kg/m^3 , com as quais se fizeram três amassaduras: 20kg de fibras por m^3 de betão, 40kg de fibras por m^3 de betão e 60kg de fibras por m^3 de betão. Na Figura 3.19 (a) está esquematizada a geometria deste tipo de fibra;

- **Fibras Xorex (onduladas)**, com 50 mm de comprimento e massa volúmica de 7850 kg/m³, com as quais se fizeram igualmente 3 amassaduras: 30kg de fibras por m³ de betão, 40kg de fibras por m³ de betão e 60kg de fibras por m³ de betão. Na Figura 3.19 (b) está esquematizada este tipo de fibra;
- **Fibras Meyco fib SP 630 (polipropileno) da Basf**, com massa volúmica de 900 kg/m³ e 30mm de comprimento. Devido à sua constituição plástica a quantidade destas fibras, por m³ de betão, tem de ser bastante inferior às duas composições com fibras metálicas. Desta forma, recorrendo ao aconselhamento dos fabricantes foram efectuadas 2 amassaduras com: 3,07kg de fibras por m³ de betão, 4,60 kg de fibras por m³ de betão.



(a)



(b)

Fig. 3.19 – Fibras metálicas utilizadas; (a)- Dramix® ZP305; (b) Xorex

Na Figura 3.20 ilustra os 3 tipos de fibras utilizados onde é possível visualizar as diferenças entre as mesmas.

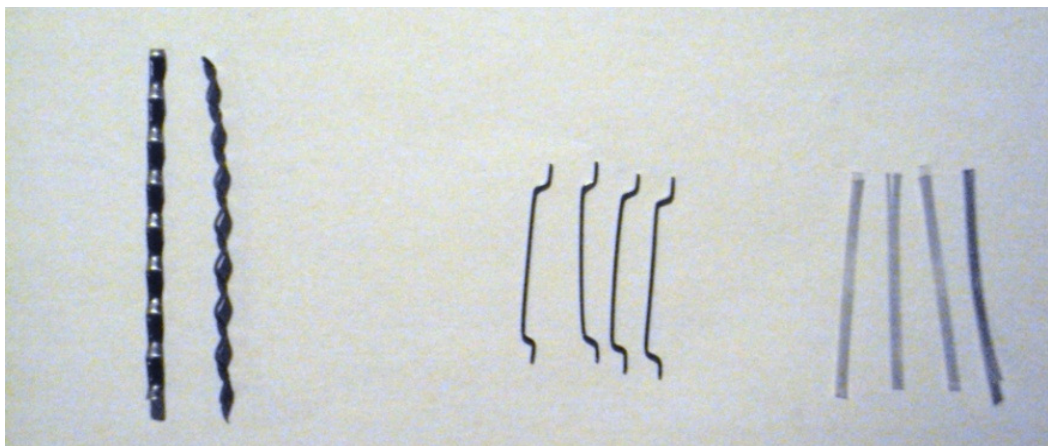


Fig. 3.19 – Fibras utilizadas nas amassaduras: Xorex (à esq.); Dramix (ao centro) e Meyco (à dir.)

A composição de referência baseou-se em estudos anteriores realizados no LABEST nos quais se chegou a uma mistura que garante que o betão produzido é auto-compactável, isto é, os valores obtidos para os ensaios descritos na secção 3.2 são respeitados.

Apenas os ensaios da caixa L, diâmetro de espalhamento, T₅₀₀ e funil V foram efectuados, dando o conjunto destes quatro a garantia de uma composição auto-compactável.

De forma a produzir os provetes necessários para os ensaios no estado endurecido, 2 prismas com $0,15 \times 0,15 \times 0,6$ (m), para caracterizar o comportamento ao momento flector e 3 cubos com $0,15 \times 0,15 \times 0,15$ (m), para caracterizar a resistência à compressão. Foram produzidos 43 litros de betão em cada amassadura, admitindo uma percentagem de 15% para perdas generalizadas no processo. No entanto, para o estudo da inclusão de fibras Dramix apenas foram efectuadas amassaduras de 32,5 litros, tendo sido por isso possível betonar apenas 1 cubo de betão, com excepção da composição com 60kg/m^3 de fibras, onde numa fase posterior foi possível betonar os 2 cubos em falta.

Para a produção dos provetes foram utilizados os recursos do LABEST, situado na Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. A betoneira utilizada encontra-se representada na Figura 3.21.



Fig. 3.21 – Betoneira utilizada para a produção das amassaduras.

O procedimento de amassadura utilizado foi o descrito no Quadro 3.9

Quadro 3.9 – Procedimento para a amassadura do BAC

Passo	1	2	3	4	5
	Juntar:	Misturar 2,5min	Aguardar 2,5min	Juntar:	Misturar 5min
	Areia média			Cimento	
	Areia fina			Filer calcário	
	Brita			3/4 água (água 2)	
	1/4 água (água 1)			Superplastificante	

3.3.2. COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

No Quadro 3.10 está representado o volume que cada constituinte do BAC entra na produção de cada m^3 .

Quadro 3.10 – Composição de referência

Constituinte	massa/m ³ betão (kg/m ³)	Volume/m ³ betão (-)
Cimento (CEM I 42,5 R)	400,00	0,1329
Filer calcário (Comital)	180,00	0,0672
Superplast. (Viscocrete 3006)	6,00	0,0056
Brita	840,00	0,3134
Aria fina	395,00	0,1502
Areia média	395,00	0,1508
Água 1	40,00	0,0400
Água 2	120,00	0,1200

A abordagem adoptada para a inclusão de fibras consistiu em substituir o volume de agregado grosso por um igual volume de fibras, por cada m³ de betão, avaliando-se posteriormente as conseqüentes alterações em termos do estado fresco. Ao retirar agregado grosso e substituí-lo por fibras, como é compreensível, introduz-se alguma perturbação na composição do BAC devido à forma alongada das fibras ser bastante distinta da forma mais ou menos esférica da brita. Como tal, de forma a preencher os vazios introduzidos seria plausível proceder à inclusão de uma maior quantidade de agregado fino.

De forma a facilitar o escoamento seria também aconselhável rever a razão água/cimento, garantindo que as fibras fiquem totalmente envoltas pela pasta de cimento.

Este tipo de abordagem é bastante útil pela sua simplicidade; ao modificar apenas a quantidade de agregado grosso permite um controle mais rigoroso no que diz respeito às diferenças introduzidas pela adição de fibras nas propriedades do material, uma vez que mais nenhum constituinte é modificado.

A introdução de fibras no BAC foi efectuada manualmente na fase final da amassadura, após a adição de todos os restantes constituintes.

Seguidamente são apresentadas as composições utilizadas, no que diz respeito à quantidade dos seus constituintes para a realização das diferentes amostras de BACRF. No Quadro 3.11 estão apresentadas as 3 composições utilizando fibras Dramix, no Quadro 3.12 as 3 composições utilizando as fibras Xorex e finalmente no Quadro 3.13 as 2 composições com fibras Meyco.

Quadro 3.11 – Composições para o BACRF (Dramix)

Quantidade de fibras	20kg/m ³ (Vf=0.25%)	40kg/m ³ (Vf=0.51%)	60kg/m ³ (Vf=0,76%)
Constituinte	massa/m ³ betão (kg/m ³)	massa/m ³ betão (kg/m ³)	massa/m ³ betão (kg/m ³)
Cimento (CEM I 42,5 R)	400	400	400
Filer calcário (Comital)	180	180	180
Superplastificante (Viscorete 3006)	6	6	6
Brita	833,17	826,34	819,52
Aria fina	395	395	395
Areia média	395	395	395
Água 1	40	40	40
Água 2	120	120	120
Fibras Dramix	20	40	60

Quadro 3.12 – Composições para o BACRF (Xorex)

Quantidade de fibras	30kg/m ³ (Vf=0.25%)	40kg/m ³ (Vf=0.51%)	60kg/m ³ (Vf=0,76%)
Constituinte	massa/m ³ betão (kg/m ³)	massa/m ³ betão (kg/m ³)	massa/m ³ betão (kg/m ³)
Cimento (CEM I 42,5 R)	400	400	400
Filer calcário (Comital)	180	180	180
Superplastificante (Viscorete 3006)	6	6	6
Brita	829,76	826,34	819,52
Aria fina	395	395	395
Areia média	395	395	395
Água 1	40	40	40
Água 2	120	120	120
Fibras Xorex	30	40	60

Quadro 3.13 – Composições para o BACRF (Meyco)

Quantidade de fibras	3.07kg/m ³ (Vf=0.34%)	4.6kg/m ³ (Vf=0.51%)
Constituinte	massa/m ³ betão (kg/m ³)	massa/m ³ betão (kg/m ³)
Cimento (CEM I 42,5 R)	400	400
Filer calcário (Comital)	180	180
Superplastificante (Viscorete 3006)	6	6
Brita	833,15	826,34
Aria fina	395	395
Areia média	395	395
Água 1	40	40
Água 2	120	120
Fibras Meyco	2,3	4,6

3.4. RESULTADOS OBTIDOS

No Quadro 3.14 estão representados os resultados dos ensaios efectuados para cada uma das composições em estudo.

Quadro 3.14 – Resultados dos ensaios no estado fresco para as diferentes composições estudadas

Composição	T ₅₀₀	Espalhamento			T funil V	Caixa L		
	T ₅₀₀ (s)	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{espalhamento} (mm)	T funil V (s)	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	H ₂ /H ₁ (-)
Referência (S/fibras)	2,21	770	725	747,5	13,17	94	75,5	0,803192
Dramix (20kg/m ³)	2,33	700	735	717,5	14,39	103,5	71,5	0,690821
Dramix (40kg/m ³)	2,46	750	735	742,5	49,9	Bloqueou nos varões		
Dramix (60kg/m ³)	3,67	700	700	700	Bloqueou (+1min)	Bloqueou nos varões		
Xorex (30kg/m ³)	3,58	600	560	580	22,4	Bloqueou nos varões		
Xorex (40kg/m ³)	3,27	700	670	685	Bloqueou (+1min)	Bloqueou nos varões		
Xorex (60kg/m ³)	3,15	650	680	665	Bloqueou (+1min)	Bloqueou nos varões		
Meyco (3,07kg/m ³)	2,76	665	665	665	26,5	Bloqueou nos varões		
Meyco (4,60kg/m ³)	8,9	590	590	590	Bloqueou (+1min)	Bloqueou nos varões		

Como é possível observar pela análise do quadro quase todas as composições bloquearam nos varões no ensaio da caixa L. Como já foi referido anteriormente, o espaçamento dos varões poderá ser alargado para que seja possível um controle relativamente a este ensaio quando são adicionadas fibras, sem que todas as composições falhem no teste. As fibras formam os designados “ouriços” junto aos varões, que impedem que o escoamento se faça de uma forma contínua.

As composições com maior quantidade de fibras apresentaram também um bloqueio no funil V, pelo que uma abertura mais alargada no fundo do funil seria também desejável para que este ensaio permitisse distinguir as diversas composições.

Como as fibras Dramix têm 30mm de comprimento e as fibras Xorex 50mm e tendo equipamentos do LABEST/FEUP, as dimensões mais severas, 41mm entre barras na caixa L e 65mm na parte inferior do funil V, não é de estranhar os bloqueios nestes ensaios.

Para a composição de BACRF com fibras Xorex (30kg/m³), os resultados do diâmetro de espalhamento não são fidedignos, pelo que se supõe que algum erro terá ocorrido na preparação desta composição.

Pelo que foi descrito, para garantir as propriedades necessárias para que uma composição seja auto-compactável o ensaio T₅₀₀ e diâmetro de espalhamento são aqueles que, para o presente estudo, têm uma maior expressão.

Seguidamente apresenta-se um estudo da zona em que a adição de fibras permite que o betão mantenha as características de auto-compactabilidade.

Deste modo são relacionados os valores do ensaio T_{500} e do diâmetro de espalhamento para cada uma das adições de fibras e comparados com a composição de referência.

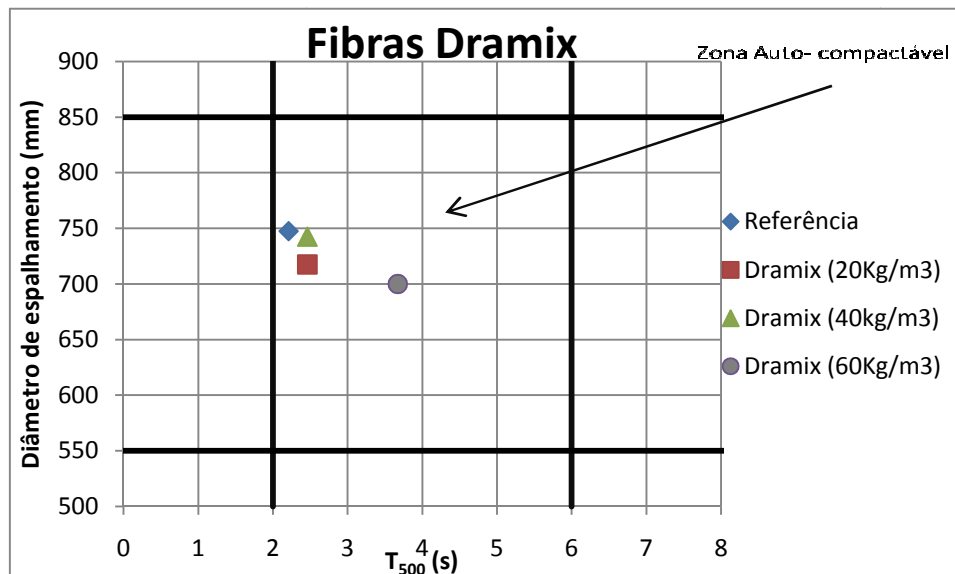


Fig. 3.22 - Identificação da zona auto-compactável (fibras Dramix)

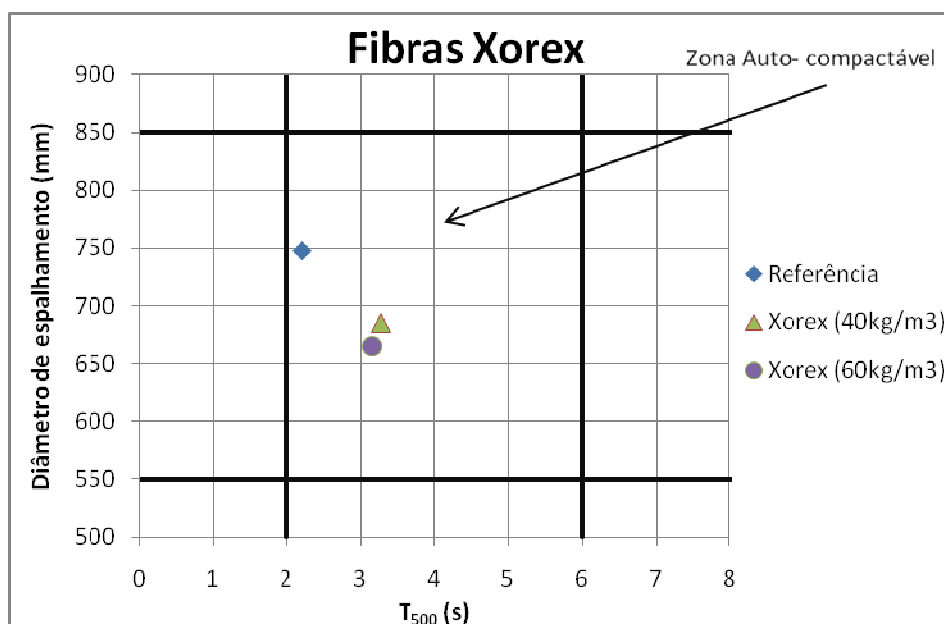


Fig. 3.23 – Identificação da zona auto-compactável (fibras Xorex)

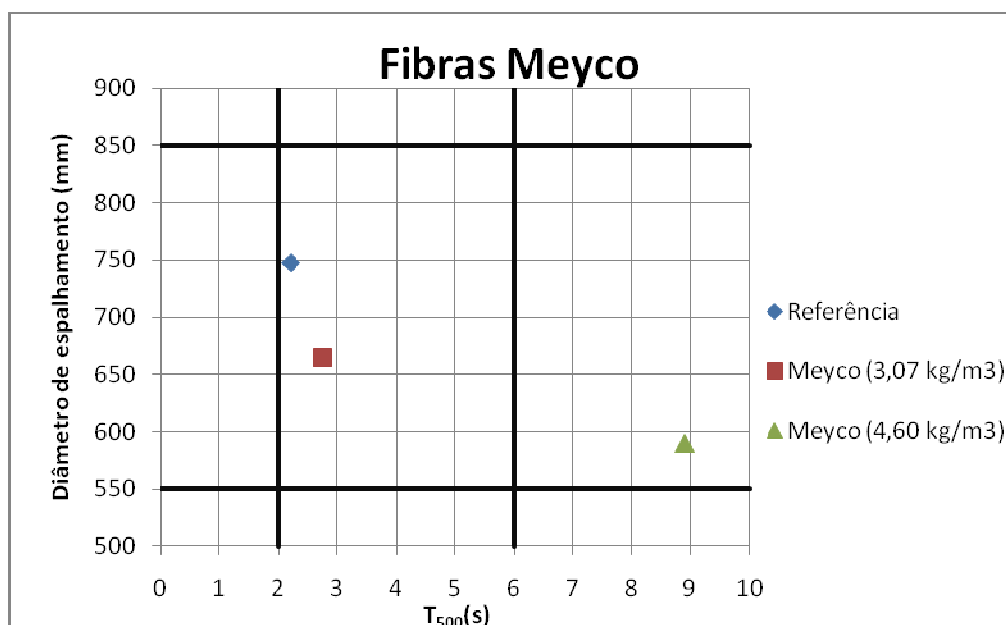


Fig. 3.24 – Identificação da zona auto-compactável (fibrasMeyco)

Pela observação das 3 figuras anteriores é possível concluir que relativamente aos parâmetros medidos por estes dois ensaios, nomeadamente, a capacidade de enchimento e a viscosidade, todas as composições com excepção das fibras Meyco com uma composição de 4,60 kg/m³, respeitam os valores limite, pelo que poder-se-á referir que a auto-compactabilidade é respeitada para aplicações onde não existam exigências de resistência ao bloqueio demasiado restritivas.

É possível concluir, em primeiro lugar, que a adição de fibras no betão não se comporta de um modo linear, como é possível verificar para as diferentes dosagens e tipo de fibras utilizadas neste trabalho, não há uma proporcionalidade entre a quantidade de fibras adicionadas e os resultados dos ensaios. Para uma determinada dosagem mais elevada de fibras, os valores dos ensaios alteram-se mais acentuadamente do que para composições com dosagens mais baixas, relativamente à amostra de referência. Essas alterações traduzem-se num aumento dos valores do T_{500} e diminuição dos valores do diâmetro de espalhamento.

Este facto é visível para as composições usando fibras da Dramix onde para quantidades de 20 e 40 kg/m³ de fibras os valores T_{500} e diâmetro de espalhamento são bastante próximos entre si e próximos dos valores da amostra de referência, sem fibras. No entanto, há uma grande diferença quando se procede à introdução de 60 kg/m³, onde a auto-compatibilidade é já mais afectada.

Nas fibras plásticas esse salto nos valores dos ensaios é igualmente muito pronunciado, especialmente na composição com 4,6kg/m³ onde o valor do T_{500} é muito superior ao da composição com 3,07 kg/m³, que por sua vez está próximo da amostra de referência, o valor do diâmetro de espalhamento tem, no entanto, uma redução mais gradual.

Na introdução de fibras Xorex, as diferenças relativamente à composição de referência são logo notadas desde o estudo das primeiras dosagens, havendo para composições com quantidade mais baixa de fibras, uma diferença já mais acentuada relativamente à composição de referência, para os ensaios em questão, sendo as diferenças mais atenuadas entre composições com 40 e 60 kg/m³ de fibras, do que com a mesma quantidade de fibras Dramix.

Como é possível verificar pela análise das Figuras 3.22 e 3.23, a grande diferença entre as fibras Xorex e Dramix, a nível dos resultados obtidos nos ensaios, é sobretudo para dosagens mais baixas de fibras, uma vez que para dosagens mais elevadas os valores do T_{500} e diâmetro de espalhamento são próximos. Não obstante, apesar dessa proximidade, é igualmente visível que para a dosagem mais elevada as fibras Xorex provocam uma redução mais acentuada no diâmetro de espalhamento, enquanto as fibras Dramix aumentam o valor do T_{500} .

Devido às diferenças na secção e nas dimensões das fibras, apresentando as fibras da Xorex valores francamente superiores, conclui-se que para quantidades mais baixas estas introduzem maiores perturbações na matriz cimentícia do que as fibras da Dramix. Para composições mais elevadas, devido ao grande número de fibras deste tipo introduzidas, o efeito é similar à introdução da mesma quantidade de fibras Xorex.

As fibras plásticas não são uma boa alternativa para este estudo, pois provocam um aumento drástico da viscosidade do BAC.

Na Figura 3.25 está representado o efeito que a adição de elevadas percentagens de fibras provoca no ensaio de espalhamento. Como é possível verificar no centro do espalhamento existe um amontoado de fibras que significa uma perda de trabalhabilidade do betão.



Fig. 3.25 – Ensaio de espalhamento para a composição com fibras Xorex (60kg/m^3)

4

Caracterização do BACRF no estado endurecido

4.1. COMPORTAMENTO DO BACRF NO ESTADO ENDURECIDO.

As fibras conferem um aumento de ductilidade ao betão e um ganho da energia de fractura, em peças de betão sujeitas a esforços de tracção. A capacidade das fibras, após a abertura da primeira fenda, de transferirem a tensão e controlarem a abertura da fenda é uma das principais vantagens da sua inclusão.

Como a abertura da fenda se processa sempre pela parte mais frágil do elemento as fibras deverão estar homogeneamente distribuídas. A orientação e o número de fibras que atravessam uma fenda são também responsáveis pelas diferenças a nível do comportamento mecânico do BACRF.

Devido ao que foi descrito anteriormente, associado também a um ganho na resistência à fadiga provocado pela adição de fibras, estas podem ser consideradas como uma boa alternativa à substituição quer parcial, quer em alguns casos total, da armadura de reforço do betão armado convencional, armaduras essas que eliminam igualmente o comportamento frágil do betão quando submetido a esforços de tracção.

São seguidamente apresentados alguns modelos que permitem prever o comportamento do betão reforçado com fibras quando sujeito a carregamento de compressão e tracção tendo em conta a inclusão das fibras na matriz cimentícia. Apresenta-se também um modelo aproximado que permite prever o comportamento pré e pós-fendilhção de elementos constituídos com BACRF, o que é de extrema utilidade caso se queira proceder a uma análise numérica não-linear, nomeadamente, uma análise usando elementos finitos.

4.1.1. MODELO PROPOSTO POR BARROS E FIGUEIRAS - (2006)

O intuito deste estudo foi estabelecer uma relação entre a tensão e a extensão para o esforço de compressão, sendo então possível prever uma lei comportamental que traduzisse o comportamento do betão com fibras à compressão.

Para descrever o comportamento à compressão simples do betão reforçado com fibras (betão convencional) estes autores propõem que se utilize a expressão apresentada em 4.1.

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}{(1-p-q) + q \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right) + p \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^{(1-q)/p}} \quad (4.1)$$

Com:

$$q = 1 - p - \left(\frac{E_{c1}}{E_{ci}}\right) p + q \in]0,1[, \frac{1-q}{p} > 0 \quad (4.2)$$

Para fibras 30/.50:

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{c10} + 0,0002W_f \quad (4.3)$$

$$p = 1,0 - 0,919 \exp(-0,394W_f) \quad (4.4)$$

Para fibras 60/.80:

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{c10} + 0,00026W_f \quad (4.5)$$

$$p = 1,0 - 0,722 \exp(-0,144W_f) \quad (4.6)$$

$$E_{ci} = 21,500[f_{cm}/10]^{1/3} \quad (4.7)$$

$$E_{c1} = f_{cm} / \varepsilon_{c1} \quad (4.8)$$

Onde: σ_c = Tensão de compressão do betão reforçado com fibras [MPa];

ε_{c10} = Extensão correspondente à tensão máxima [2.2×10^{-3}];

W_f = Percentagem do peso das fibras [-].

4.1.2. MODELO PROPOSTO POR EZELDIN E BALAGURU – (2002)

Estes dois autores propõem que a curva tensão vs. extensão para betão reforçado com fibras seja obtida com o auxílio da equação 4.9 na qual se utiliza um parâmetro β que traduz o comportamento do ramo descendente do gráfico do carregamento.

$$\sigma = f_{cf} \cdot \frac{\beta \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}}\right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}}\right)^\beta} \quad (4.9)$$

Com:

$$f_{cf} = f_c + 3,51RI \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 446 \times 10^{-6} RI \quad (4.11)$$

Para fibras com gancho na ponta:

$$\beta = 1,093 + 0,7132.RI^{-0.926} \quad (4.12)$$

$$RI = W_f \cdot L_f / D_f \quad (4.13)$$

Onde: f_c = Tensão máxima de compressão do betão sem fibras [MPa];
 ε_{co} = 0.002 [-];
 f_{cf} = Tensão de compressão no pico, do betão reforçado com fibras [MPa];
 ε_{pf} = Extensão correspondente à tensão de compressão de pico [-];
 RI = Índice de reforço devido à adição de fibras [-].

4.1.3. MODELO PROPOSTO POR GRÜNEWALD – (2004)

Na sua dissertação Grünwald utiliza o modelo proposto por Kooiman e faz algumas alterações para o BACRF. Na Figura 4.1 são apresentados os diagramas tensão vs. extensão e tensão vs. dimensão da fenda que combinados permitem prever o comportamento das estruturas de BACRF tendo em conta a ductilidade conferida pela adição de fibras, quando as mesmas estruturas estão sujeitas a esforços de tracção.

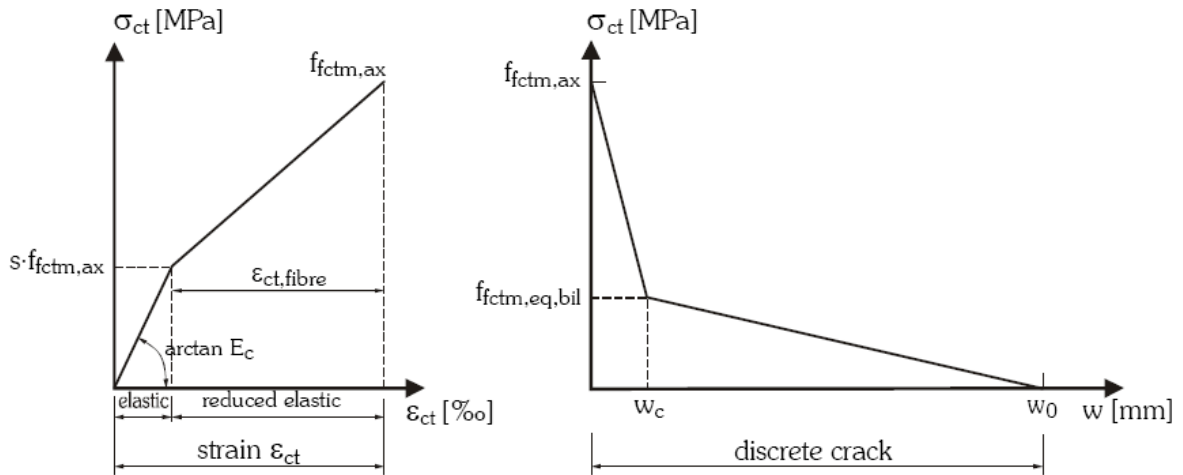


Fig. 4.1 – Combinação do diagrama Tensão vs. deslocamento com diagrama tensão vs. abertura da fenda

Este modelo consiste em três partes, a primeira que tem em conta o comportamento elástico da viga, uma segunda, na qual se verifica uma redução da elasticidade mas mesmo assim com comportamento linear e uma terceira que define o comportamento após a abertura da fenda.

Os parâmetros necessários para utilização do modelo são:

4.1.3.1. $f_{fctm,ax}$

$$f_{fctm,ax} = \frac{A - 0,465}{1,13} \quad (4.14)$$

Com:

$$A = \eta_{\phi} \cdot \left(f_{fctm,spl} + (f_{fctm,spl} - f_{ctm,spl}) \left(V_f \cdot \frac{L_f}{d_f} \right) \right) \quad (4.15)$$

Onde: $f_{fctm,ax}$ = Tensão de tracção uniaxial, segundo Kooiman 0,7-0,8 $f_{fctm,spl}$ (0,7 fibras 30mm; 0,8 fibras 60mm) [MPa];
 $f_{fctm,spl}$ = Tensão média de tracção que provoca a rotura dos cubos de 150mm de BACRF [MPa];
 $f_{ctm,spl}$ = Tensão média de tracção que provoca a rotura dos cubos de 150mm de betão [MPa];
 $V_f \cdot L_f / d_f$ = Factor de influência das fibras;
 η_{ϕ} = Número de orientação (para o caso 1D; 0 para orientação perpendicular à da tensão e 1 para a orientação da tensão de tracção).

4.1.3.2. Largura crítica da abertura da fenda (w_0)

$$w_0 = (0,187 + 3,52 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L_f}{d_f}) \cdot L_f \cdot \eta_{\phi} \quad (4.16)$$

4.1.3.3. Largura característica da abertura da fenda (w_c)

$$w_c = \frac{0,494}{d_f} e^{0,0359 \cdot L_f} \quad (4.17)$$

4.1.3.4. Tensão equivalente pós-fendilhação ($f_{fctm,eq,bil}$)

$$f_{fctm,eq,bil} = MFF \cdot \eta_{\phi} \cdot FEF \quad (4.18)$$

Com:

$$MFF = V_f \cdot \frac{L_f}{d_f} \cdot \alpha_f \quad (4.19)$$

$$\alpha_f = PD_p \cdot \frac{\beta_f}{w/c} \quad (4.20)$$

Onde: MFF = Factor mecânico das fibras [MPa];
 PD_p = Densidade de empacotamento da pasta [-];
 β_f = Factor que traduz a inclusão de fibras na diferença dos valores da tensão que inicia o escoamento [MPa] (1,9 para fibras lisas e 2,3 para fibras com gancho) [-];
FEF = Factor de eficiência (Dramix 0.912) [-].

Nota: Segundo Kooiman, este valor seria de 20-35 % de $f_{fctm,ax}$

4.1.3.5. Tensão de ocorrência da primeira fenda ($s \cdot f_{fctm,ax}$)

O autor propõe com base nos estudos efectuados que se tome um valor de 40% do valor de $f_{ctm,spl}$.

4.1.3.6. Deslocamento com elasticidade reduzida ($\epsilon_{ct, fibras}$)

$$\epsilon_{ct, fibras} = 0.184 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{L_f}{d_f} \right)^{2.31} \quad (4.21)$$

4.2. PROPRIEDADES ESTUDADAS

No presente trabalho, em termos de betão endurecido, estudou-se o comportamento do betão auto-compactável reforçado com fibras por intermédio de ensaios de compressão uniaxial, em cubos de 150 mm de aresta, e ensaios de flexão sob 3 pontos, realizados em prismas com dimensões de 150×150×600 mm. O objectivo principal destes ensaios consistiu em caracterizar as principais alterações introduzidas pela inclusão dos diferentes tipos de fibras, em diferentes dosagens, numa composição de BAC de referência.

4.2.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

O ensaio de compressão uniaxial foi conduzido segundo a norma EN NP 12390-3. Este ensaio permite obter a resistência à compressão do betão a partir da força máxima de rotura. Para este ensaio usou-se a prensa hidráulica da série 315 MTS, disponível no Laboratório de Estruturas (ver Figura 4.2). Os ensaios foram levados a cabo com controlo de deslocamentos, impondo-se uma velocidade constante de 0.02 mm/s. Ao realizar o ensaio com controlo de deslocamento pode obter-se a relação carga-deslocamento, não apenas até à carga máxima, mas também após o pico de carga (ramo de amolecimento). A aquisição dos valores da força e deslocamento ao longo do ensaio foi efectuada com uma frequência de 1 vez por segundo. Tal como se pode visualizar na Figura 4.2, para este ensaio foram utilizados provetes cúbicos com 150 mm de aresta.



Fig. 4.2 – Equipamento utilizado para o ensaio à compressão

O procedimento de ensaio consiste essencialmente em:

- Remover o excesso de humidade da superfície do cubo;
- Limpar todas as superfícies da máquina em contacto com o provete;
- Posicionar os provetes de modo a que a carga seja aplicada perpendicularmente à direcção de moldagem;
- Centrar o provete relativamente ao prato inferior;
- Aplicar a carga até se atingir a rotura do provete.

No final do ensaio é necessário avaliar se o tipo de rotura obtido é satisfatório. Na Figura 4.3 estão representados os tipos de rotura satisfatórios para este tipo de ensaio (MR1, MR2 ou MR3).

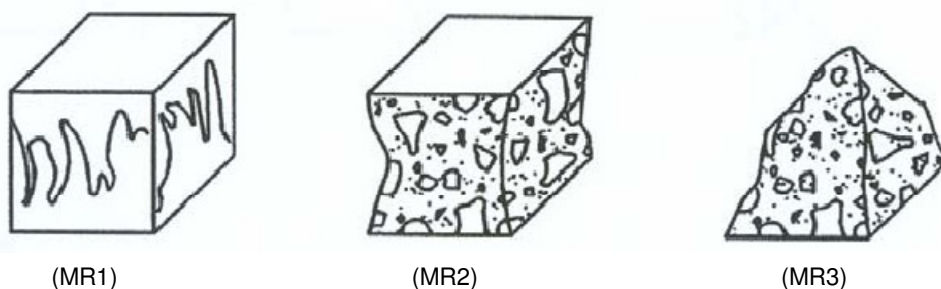


Fig. 4.3 – Tipos de rotura satisfatórios para o ensaio de compressão em provetes cúbicos

Seguidamente é possível obter o diagrama força vs. deslocamento para este tipo de carregamento e calcular a resistência do betão à compressão, aplicando a expressão 4.22.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.22)$$

Onde: f_c = resistência à compressão [MPa];
 $F_{máx}$ = força máxima obtida [kN];
 A_c = Área da secção transversal do carregamento [mm²].

4.2.2. ENSAIO DE FLEXÃO

No presente trabalho utilizou-se o ensaio de flexão sob 3 pontos descrito na norma EN 14651:2005 para caracterizar o comportamento à tracção, em flexão, do BACRF. Com excepção do procedimento de compactação dos provetes e da velocidade de deformação no controlo do ensaio, os restantes procedimentos adoptados na preparação dos provetes e na execução dos ensaios, foram os que a norma indica.

De entre os moldes prismáticos de aço disponíveis no Laboratório de Estruturas seleccionou-se aquele que apresentava dimensões mais próximas das recomendadas pela norma EN 14651:2005, ou seja, $L=600\text{mm}$ e $b=d=150\text{ mm}$, sendo a distância entre apoios de 500 mm. Visto tratar-se de betões auto-compactáveis os provetes foram betonados sem o recurso a vibração, ou seja, apenas sob a acção do peso próprio. Tal como indicado na norma foi realizado um entalhe nos provetes a meio de uma das faces laterais maiores (que fica localizado sob o ponto de aplicação da carga concentrada), com uma largura e altura de aproximadamente 5 e 25 mm, respectivamente, e que atravessa todo o provete (ver Figura 4.4).



Fig. 4.4 – Pormenor do entalhe realizado nos provetes

O ensaio de flexão sob 3 pontos permite determinar a relação força-flecha a meio vão, até uma flecha de cerca de 3 mm. Na Figura 4.5 está identificado o aparato experimental, sendo os deslocamentos registados através de um transdutor externo de 50 mm de curso. O transdutor externo encontra-se acoplado a uma barra apoiada em dois pontos, localizados na intercepção do eixo longitudinal do prisma com os alinhamentos verticais sobre os apoios, tal como se ilustra na Figura 4.6. Com este procedimento pretendia-se evitar o registo de deslocamentos parasitas. Para se obter uma resposta total força-flecha, os ensaios foram realizados com controlo de deslocamento (transdutor interno). Contrariamente ao indicado na norma adoptou-se uma velocidade constante de 0,05 mm/s ao longo de todo o ensaio, que era a velocidade mínima permitida pelo sistema utilizado. No entanto, isto tornou o tempo de ensaio demasiado elevado, por isso é recomendável que se adopte dois regimes de velocidade de deformação.

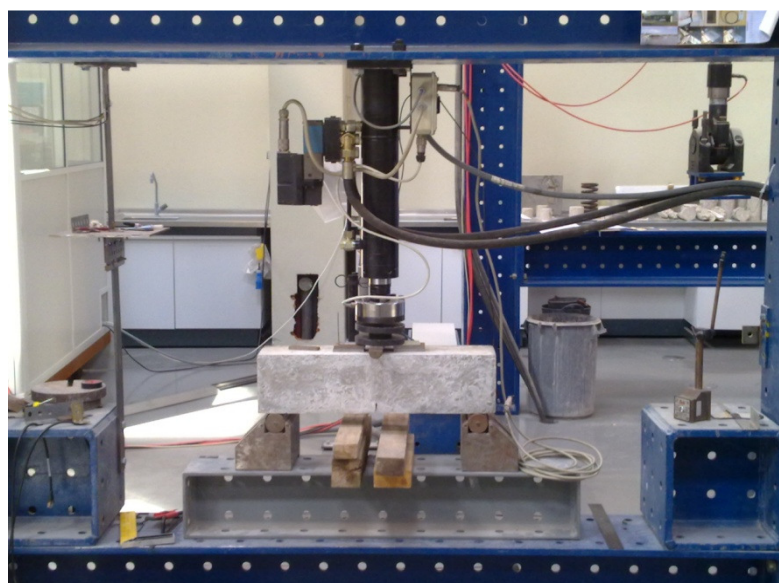


Fig. 4.5 – Estrutura utilizada para o ensaio de flexão e actuador

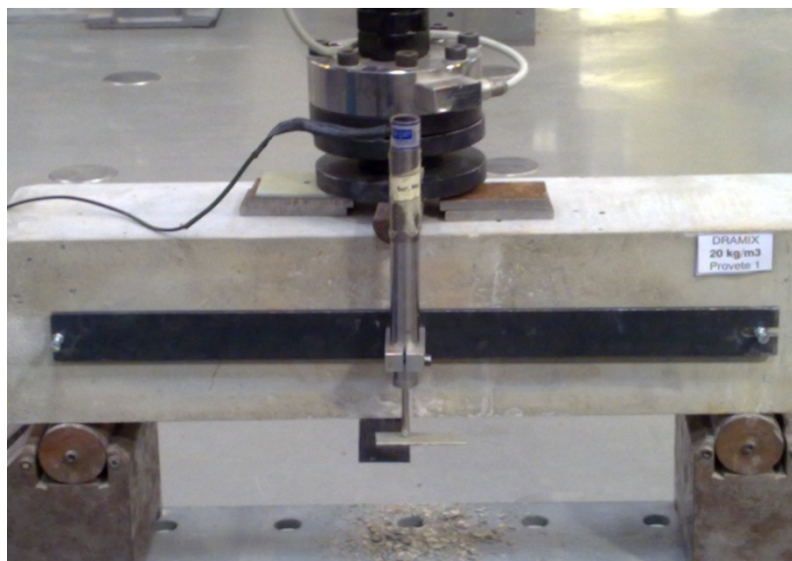


Fig. 4.6 – Pormenor do provete sobre os apoios e sistema de medição do deslocamento vertical a meio vão

Com base na relação força-flecha obtém-se a força correspondente à transição da fase não fendilhada para a fase fendilhada do betão, que coincide em geral com o primeiro pico na curva, tal como indica a Figura 4.7 (na norma EN 14651:2005 esta força é designada por limite de proporcionalidade, F_L). Na Figura 4.8 apresenta-se a forma de se obter a força F_L para diversas configurações do diagrama força - flecha.

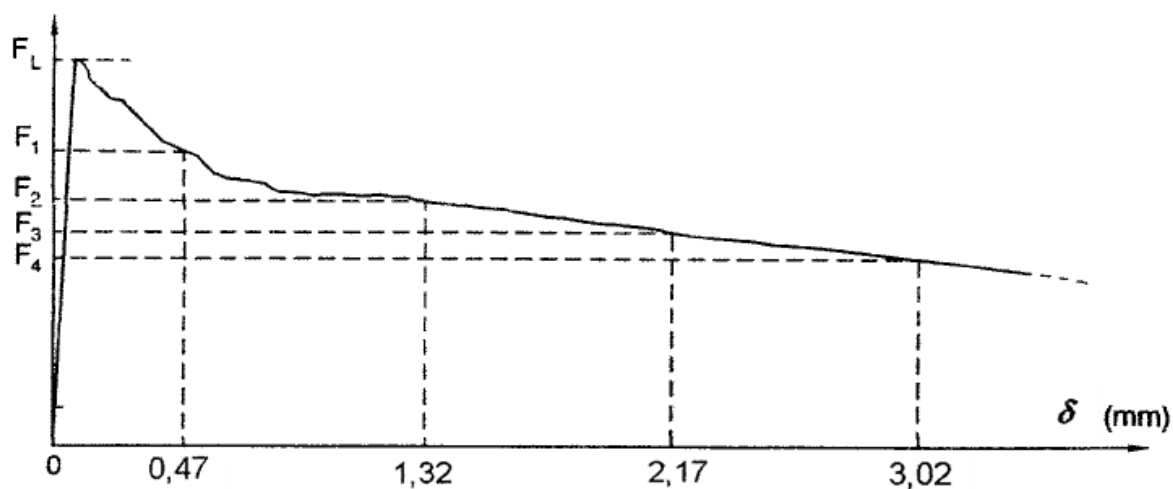
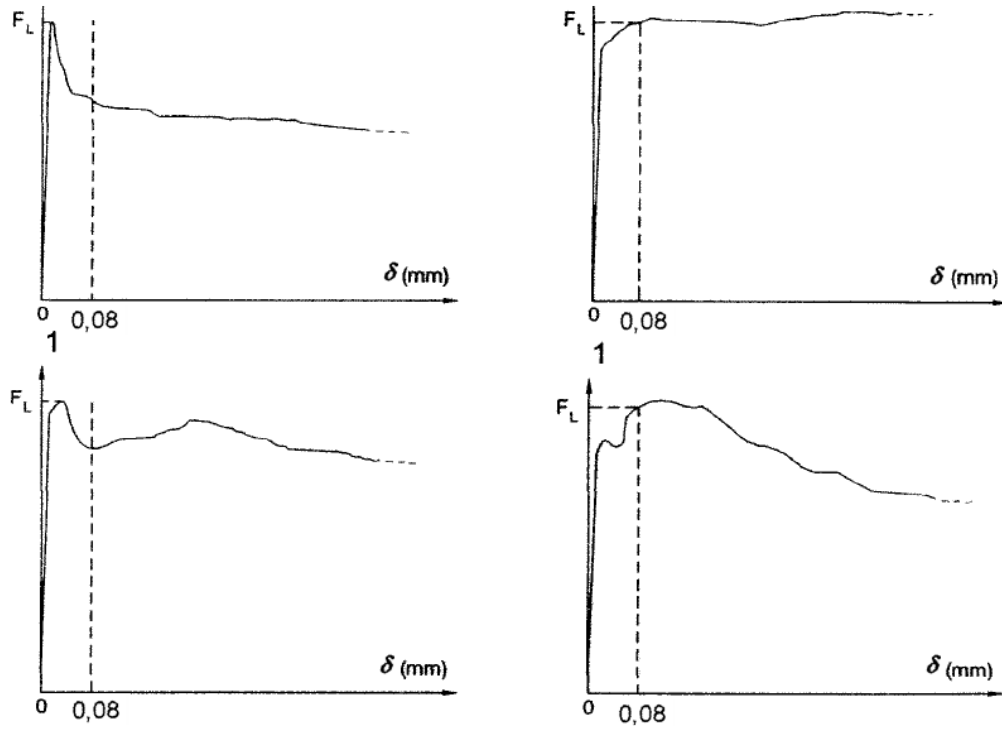


Fig. 4.7 – Diagrama força vs. flecha obtido a partir do ensaio à flexão sob 3 pontos


 Fig. 4.8 – Exemplificação de diversos tipos de diagrama força vs. flecha e F_L

O valor da tensão para o limite de proporcionalidade pode ser obtida utilizando a expressão 4.23:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (4.23)$$

Onde: $f_{ct,L}^f$ = tensão no limite de proporcionalidade [MPa];
 F_L = valor da força para o limite de proporcionalidade [kN].
 l = distância entre apoios [mm];
 b = largura do prisma [mm];
 h_{sp} = altura do prisma descontada da altura do rasgo [mm].

A norma EN 14651:2005 indica ainda que se determinem com base na relação força-flecha, os valores das resistências residuais em flexão correspondentes aos deslocamentos $\delta_j = 0,47; 1,32; 2,17; 3,02$ mm, usando a seguinte expressão:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (4.24)$$

Onde: $f_{R,j}$ = tensão residual correspondente a $\delta = \delta_j$ ($\delta_j = 0,47; 1,32; 2,17; 3,02$ mm) [MPa];
 F_j = valor da força correspondente de $\delta = \delta_j$ ($\delta_j = 0,47; 1,32; 2,17; 3,02$ mm) [kN].

4.3. RESULTADOS OBTIDOS PARA AS COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da caracterização do betão endurecido, nomeadamente, os resultados do ensaio à compressão simples e do ensaio à flexão sob 3 pontos, dos provetes correspondentes às composições do BAC de referência e BACRF apresentadas no Capítulo 3. Todos os provetes foram retirados dos moldes 24 horas após a betonagem e mantidos numa câmara húmida (Temperatura = 20°C; HR=95-98%) até à idade de ensaio. Dado que este estudo tinha em vista uma aplicação de BACRF em cabeças de ancoragem de pré-esforço, os ensaios de caracterização do betão endurecido foram todos realizados passados 7 dias após a betonagem.

4.3.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO

Na Figura 4.9 apresentam-se os gráficos força-deslocamento correspondentes à composição de BAC de referência (apresentada no capítulo 3) e no Quadro 4.1 os resultados da força máxima e da correspondente tensão de compressão. Atendendo ao valor médio obtido para a resistência à compressão, em cubos, o BAC de referência pode ser classificado como um C50/60.

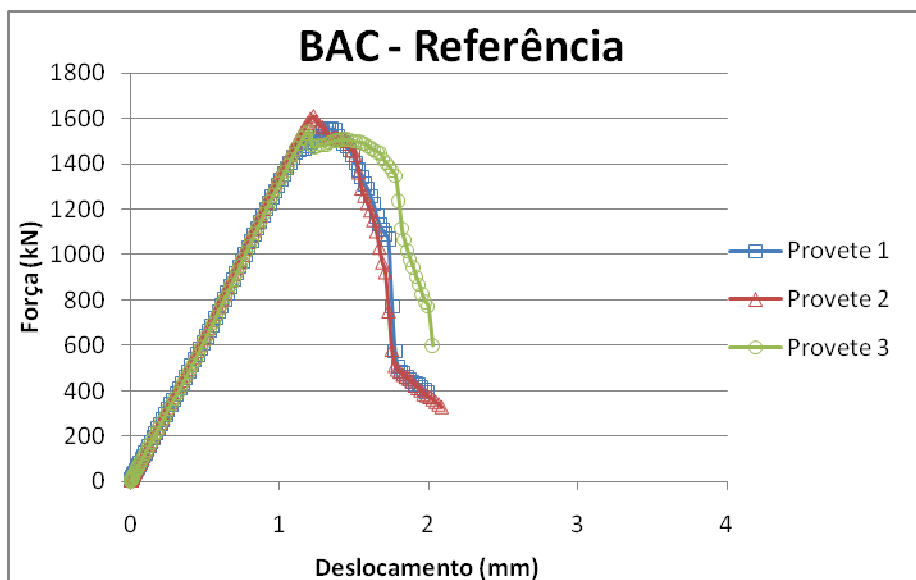


Fig. 4.9 – Diagrama força vs. deslocamento para a composição de referência

Quadro 4.1 – Resistência à compressão para a composição de referência de BAC.

$F_{m\acute{a}x.}$ (kN)	f_c (MPa)	$f_{cm, cubos}$ (MPa)	Desvio padrão (Mpa)	Coef. variação (%)
1554,03	69,07	69,75	1,63	2,3
1611,33	71,62			
1542,78	68,57			

Tal como foi referido anteriormente, foram estudadas 3 composições com adição de fibras Dramix em 3 dosagens distintas (20, 40 e 60 kg/m³), ver secção 3.3. Os correspondentes gráficos força-deslocamento obtidos no ensaio de compressão são apresentados na Figura 4.10, sendo também apresentado o gráfico obtido para um dos provetes betonados com a composição de referência. Uma vez que a forma do gráfico e o campo de valores obtidos entre os provetes de referência são em tudo

similares, para efeitos comparativos sobre o ganho com a inclusão de fibras apresenta-se apenas 1 das curvas nas Figura 4.10. A tensão máxima de compressão é indicada no Quadro 4.2. No caso destas composições apenas foi possível ensaiar 1 provete por composição, no entanto, atendendo à pequena dispersão encontrada nos resultados de todas as outras caracterizações da resistência à compressão julga-se que se pode considerar este resultado como representativo.

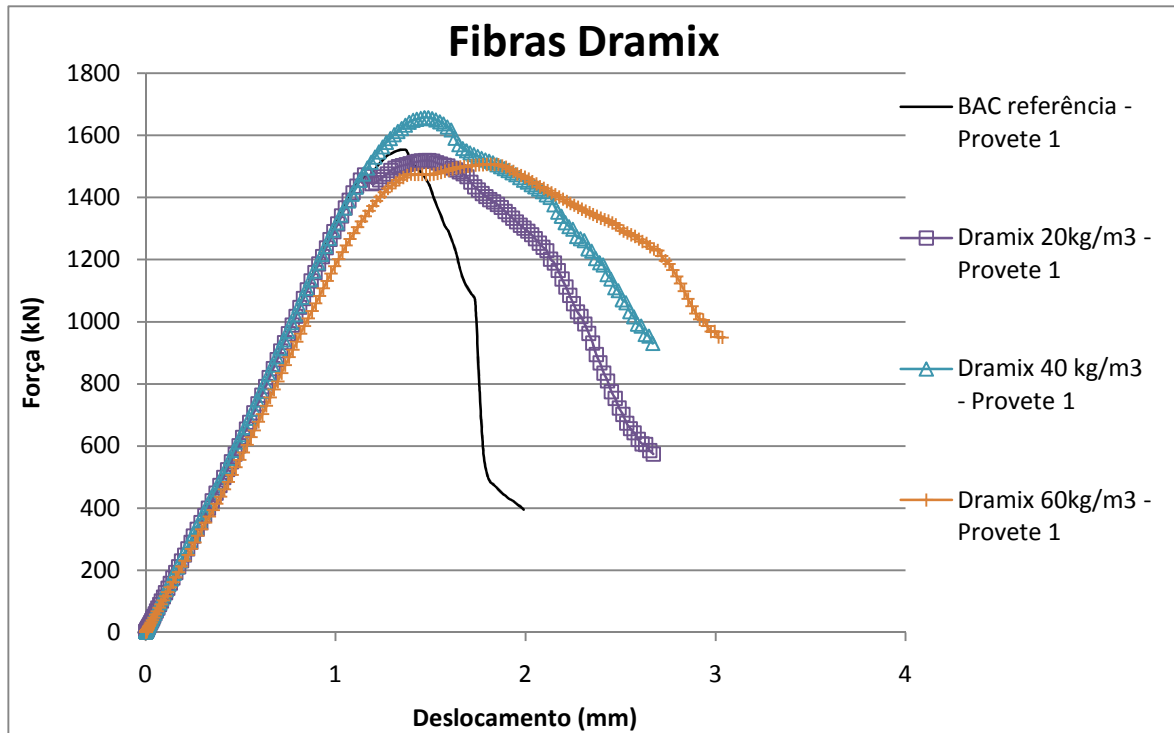


Fig. 4.10 – Diagrama força vs. deslocamento para composições com fibras Dramix

Quadro 4.2 – Resistência à compressão para as composições de BACRF com fibras Dramix

Dosagem (kg/m ³)	F _{máx.} (kN)	f _c (MPa)
20	1518,77	67,5
40	1656,79	73,64
60	1506,62	66,96

No que respeita às fibras Xorex foi estudada a adição de 30, 40 e 60 kg/m³, os respectivos diagramas força-deslocamento são apresentados nas Figuras 4.11 a 4.13 e os resultados da tensão máxima de compressão são sumariados no Quadro 4.3.

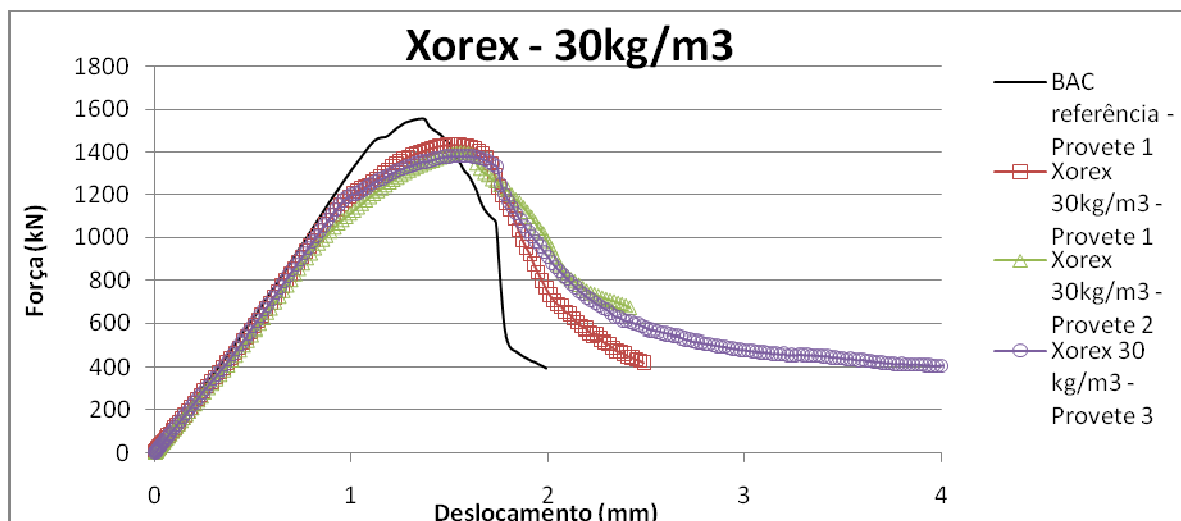


Fig. 4.11 – Diagrama força vs. deslocamento para as fibras Xorex (30kg/m³)

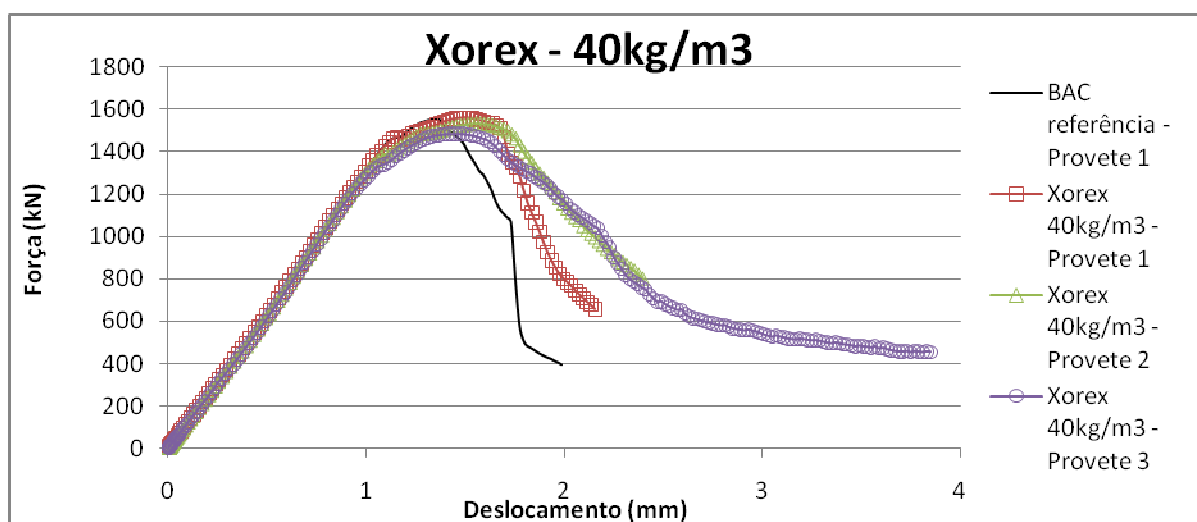


Fig. 4.12 – Diagrama força vs. deslocamento para as fibras Xorex (40kg/m³)

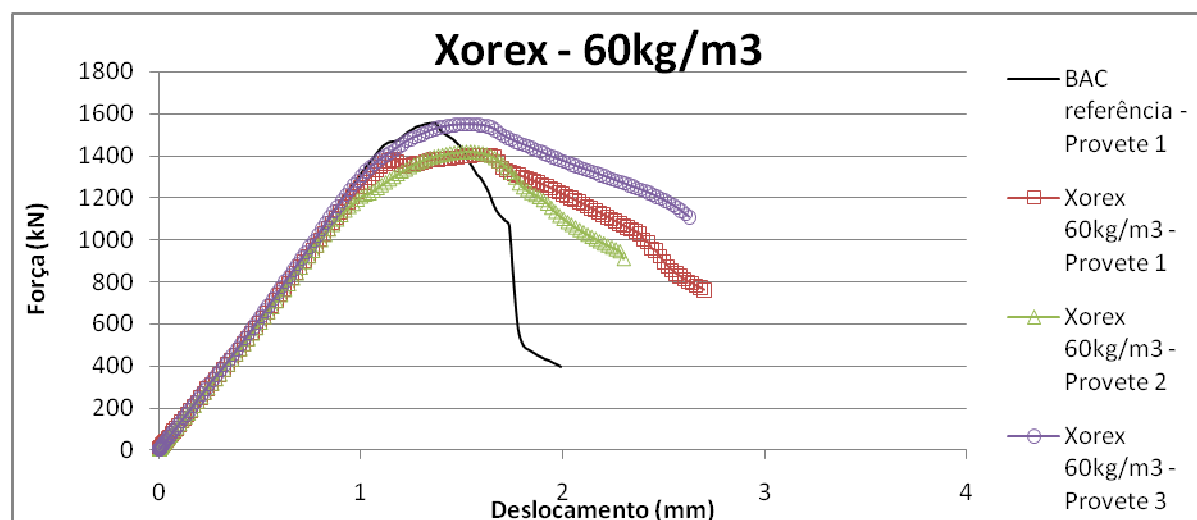


Fig. 4.13 – Diagrama força vs. deslocamento para as fibras Xorex (60kg/m³)

Quadro 4.3 – Resistência à compressão para as composições de BACRF com fibras Xorex

Dosagem (kg/m ³)	F _{máx.} (kN)	f _c (MPa)	f _{cm, cubos} (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef.variação (%)
30	1432,81	63,68	62,37	1,18	1,9
30	1396,05	62,05			
30	1381,22	61,39			
40	1559,77	69,32	67,78	1,7	2,5
40	1531,39	68,06			
40	1484,06	65,96			
60	1404,34	62,41	64,76	3,6	5,5
60	1417,75	63,01			
60	1549,28	68,86			

De forma similar, nas Figuras 4.14 e 4.15 e no Quadro 4.4 apresentam-se os resultados dos ensaios à compressão das composições incluindo fibras plásticas Meyco em dosagens de 3,07 e 4,6kg/m³.

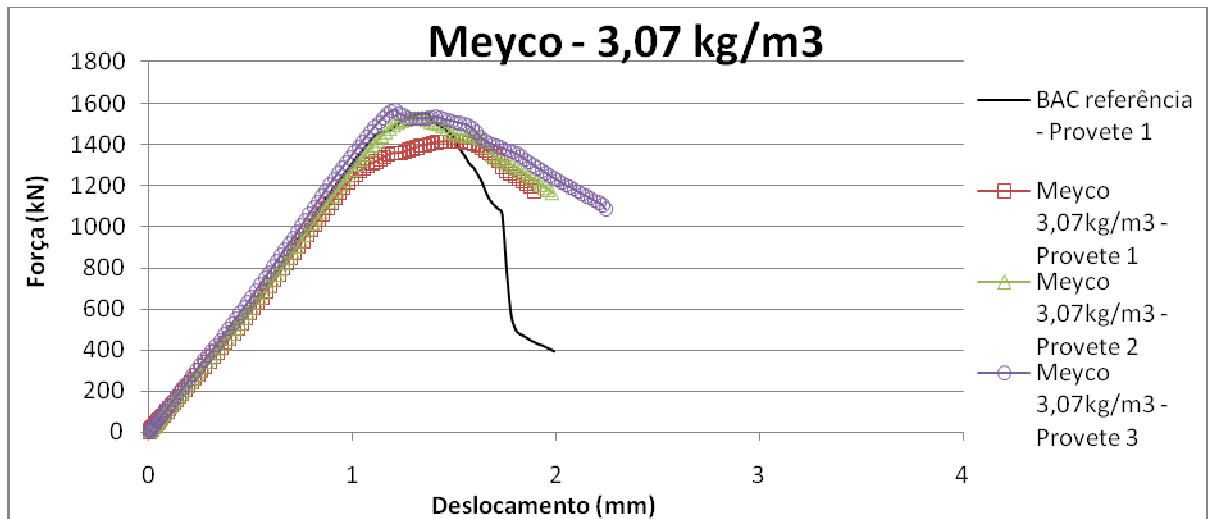


Fig. 4.14 – Diagrama força vs. deslocamento para as fibras Meyco (3,07 kg/m³)

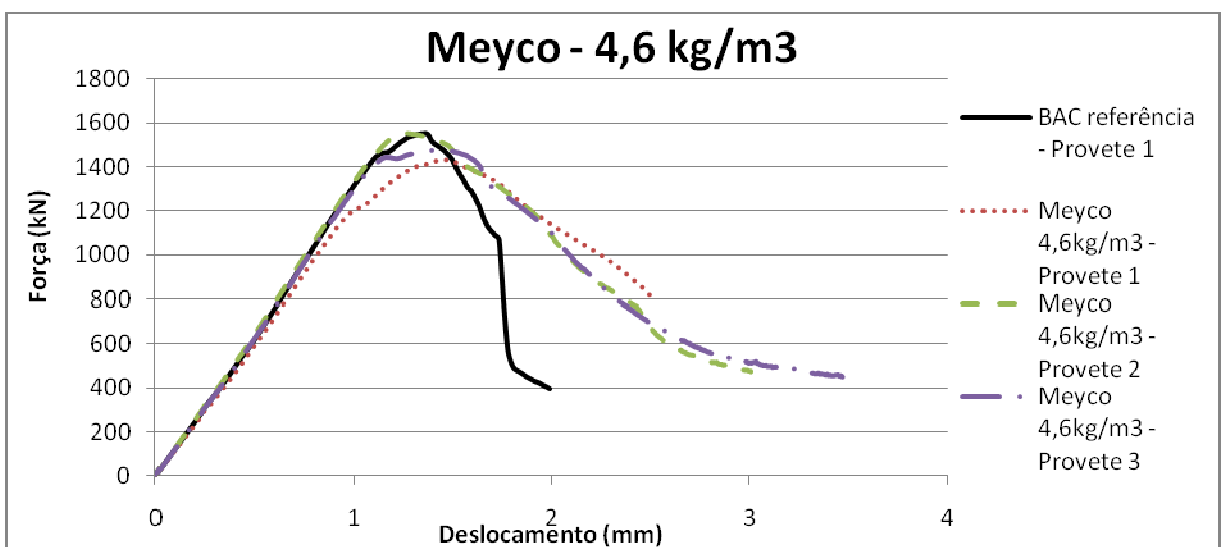


Fig. 4.15 – Diagrama força vs. deslocamento para as fibras Meyco (3,07 kg/m³)

Quadro 4.4 – Resistência à compressão para as composições de BACRF com fibras Meyco

Dosagem (kg/m ³)	F _{máx.} (kN)	f _c (MPa)	f _{cm,cubos} (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. variação (%)
3,07	1415,39	62,91	66,96	3,59	5,4
3,07	1534,35	68,19			
3,07	1569,75	69,77			
4,6	1431,45	63,62	66,13	2,79	4,2
4,6	1555,58	69,14			
4,6	1476,99	65,64			

No Quadro 4.5 está indicada a variação da tensão de compressão máxima obtida para o BACRF, para cada tipo e dosagem de fibras, relativamente à composição de referência. Verifica-se que não há uma variação muito significativa do valor da resistência de compressão máxima e que em geral, as composições experimentaram uma diminuição no valor da tensão máxima de compressão, o que pode ser explicado pela redução da quantidade de agregado grosso, relativamente à composição de referência e pela perturbação introduzida pela adição de fibras ao esqueleto sólido formado pelos agregados.

Quadro 4.5 – Variação da tensão de compressão máxima relativamente à composição de referência

Composição:	f _{cm} [Mpa]	Variação da tensão (%)
Referência	69,75	0
Dramix 20kg/m3	67,5	-3,23
Dramix 40kg/m3	73,64	5,58
Dramix 60kg/m3	66,96	-4,00
Xorex 30kg/m3	62,37	-10,58
Xorex 40kg/m3	67,78	-2,82
Xorex 60kg/m3	64,76	-7,15
Meyco 3,07 kg/m3	66,96	-4,00
Meyco 4,6 kg/m3	66,13	-5,19

Pela análise das Figuras 4.9 a 4.15, onde estão representadas as curvas força-deslocamento dos cubos com fibras e dos cubos de referência, observa-se que a adição de fibras aumenta a ductilidade do betão havendo um maior desenvolvimento do ramo de amolecimento (pós-pico), cuja inclinação depende do tipo de fibra e respectiva dosagem. Para o caso das fibras Dramix, observa-se claramente que com o aumento da percentagem de fibras na mistura a rotura torna-se mais dúctil, havendo sempre um ganho mesmo para as dosagens mais baixas, relativamente à composição sem fibras (referência). Para o caso das composições com fibras Xorex, verifica-se que o ganho de ductilidade apenas foi mais pronunciado para a dosagem mais elevada de fibras, sendo para as dosagens mais baixas o diagrama bastante similar com a amostra de referência relativamente ao ramo de amolecimento. Por sua vez para a inclusão de fibras Meyco, é visível que em ambas as dosagens o ramo descendente é muito idêntico, havendo quase o mesmo ganho de ductilidade em ambas relativamente à amostra de referência.

As diferenças nos modos de rotura podem observar-se também nas fotografias dos provetes no final do ensaio de compressão apresentadas na Figuras 4.16a e 4.16b. No caso dos provetes do BAC de referência o modo de rotura foi o MR3, representado na Figura 4.3. Após o pico de carga, as camadas laterais da zona central do provete destacaram-se e a capacidade de carga passou a ser garantida fundamentalmente pelo contacto entre os cones de extremidade do provete e pelo atrito entre as superfícies de rotura. No final do ensaio observou-se que as superfícies de rotura se apresentavam relativamente lisas dado que estas atravessaram os agregados.

Por outro lado, alguns provetes reforçados com fibras desenvolveram um modo de rotura semelhante ao MR1, também identificado na Figura 4.3. Após o pico de carga desenvolveram-se fendas na zona central do provete, essas fendas longitudinais provocadas por um esforço de tracção localizado são como que “cozidas” pelas fibras homogeneamente distribuídas, que impedem que a fenda se expanda evitando assim a desagregação completa do material.

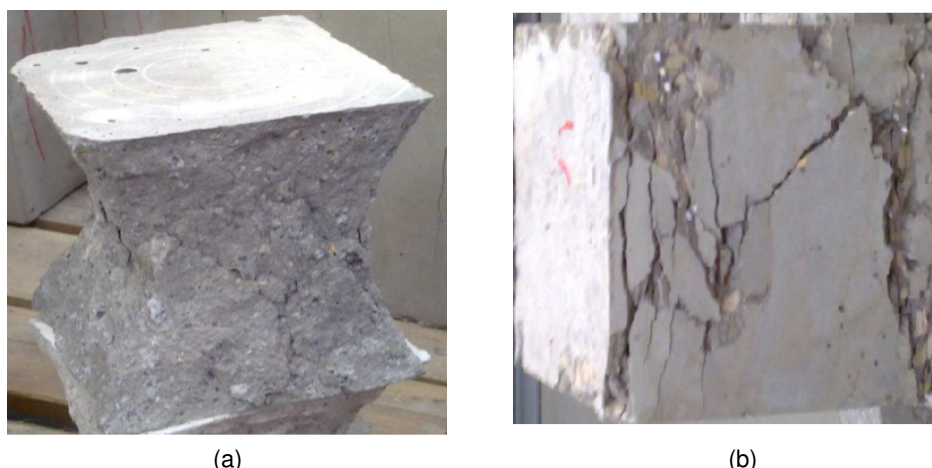


Fig 4.16 – Aspecto dos cubos no final do ensaio de compressão: (a) – BAC de referência; (b) BACRF

4.3.2. ENSAIO DE FLEXÃO

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos no ensaio de flexão sob 3 pontos. Os principais objectivos são, por um lado, analisar as principais diferenças introduzidas pela adição de fibras no BAC, a nível da forma do gráfico força-flecha e, por outro, conhecer os valores obtidos para a tensão no limite de proporcionalidade e tensões residuais, de forma a compreender o aumento na ductilidade pós-fendilhação e na energia de rotura.

Nas Figuras 4.17 a 4.25 apresentam-se os gráficos força-flecha, sendo agrupados os resultados dos dois provetes para cada dosagem de fibras e acompanhados de uma fotografia de um dos provetes na fase final do ensaio, obtidos para o BAC de referência e para os BACRF estudados no âmbito do presente trabalho. Os gráficos aqui apresentados foram traçados com recurso aos valores fornecidos pelo equipamento de ensaio depois de se aplicar um filtro de ruído.

O betão simples apresenta um comportamento frágil, ou seja, quando é ultrapassada a resistência à tracção do betão abre-se a primeira fenda e ocorre de imediato a rotura, tal como se pode observar no gráfico da Figura 4.17. De notar que neste gráfico, e contrariamente aos restantes, apresenta-se o deslocamento interno do sistema e não o obtido pelo LVDT externo. Tipicamente nos provetes entalhados de betão simples desenvolve-se uma única fractura localizada numa banda estreita logo acima do entalhe (ver Figura 4.17). A superfície de rotura apresentou-se plana e pouco rugosa observando-se um elevado número de agregados fracturados, o que indica que existe uma boa ligação pasta-agregado. O valor obtido para $f_{ct,L}$ foi de 4.49 MPa, sendo o valor previsto para f_{ctm} para um betão da classe C50/60 de 4.1MPa, segundo o Eurocódigo 2- (2004), estando portanto os valores dentro do previsto.

Nos gráficos correspondentes aos BACRF é claro o aumento de ductilidade proporcionados pela adição de fibras. No entanto, em alguns deles, observa-se ainda uma quebra no gráfico após se atingir a força máxima, nomeadamente para as dosagens mais baixas de fibras e para as fibras plásticas, nas quais os mecanismos de reforço proporcionados pelas dosagens menores de fibras metálicas e pela

adição de fibras plásticas não foram suficientes para sustentar a energia libertada no momento de fendilhação da matriz. Nos provetes de BACRF desenvolveu-se em geral uma única macrofenda numa banda estreita acima do entalhe, surgindo por vezes algumas ramificações superficiais, tanto mais significativas quanto maior a percentagem de fibras, ramificações essas também mais significativas nas fibras metálicas do que nas fibras plásticas.

Como já foi anteriormente referido, o número de fibras que atravessam a fenda está directamente relacionado com a força máxima que é suportada no ensaio e com as tensões limite de proporcionalidade e residuais. O efeito ponte que estas provocam, permite que a abertura da fenda seja mais atrasada quanto maior for o número de fibras, havendo uma relação directa entre o número de fibras e os valores das tensões residuais. Aumentando-se portanto a ductilidade, com o aumento do número de fibras.

Existem 4 modos de rotura possíveis para as fibras embebidas no BAC.

- Arrancamento da fibra do betão na qual se verifica um alisamento completo do gancho das fibras verticais ($MR_f 1$);
- Para fibras inclinadas verifica-se uma rotura similar a $MR_f 1$, no entanto, existe fragmentação do betão ($MR_f 2$);
- Rotura da fibra ($MR_f 3$), este modo de rotura é mais frequente para fibras com uma inclinação de 30° ;
- Fragmentação do betão, neste modo de rotura, a fibra é quase totalmente arrancada da matriz. No entanto, antes de esta ser arrancada verifica-se um destacamento do betão. Este tipo de rotura é mais frequente quando as fibras têm uma inclinação de 60° ($MR_f 4$).

Para as fibras onduladas e com gancho na ponta, o facto de se conferir algum atrito, promove uma ancoragem ao betão auto-compactável bastante forte.

No que se refere ao modo de rotura das fibras Dramix, a maioria das fibras cederam por arrancamento e as suas extremidades dobradas apresentavam-se rectificadas em considerável percentagem de fibras.

Este ensaio, já descrito anteriormente, foi efectuado para todas as composições utilizadas neste trabalho. São seguidamente apresentados os resultados para cada uma das composições ensaiadas e avaliados os valores obtidos para os parâmetros necessários para a interpretação destes ensaios, sendo esses parâmetros a tensão limite de proporcionalidade e as tensões residuais.

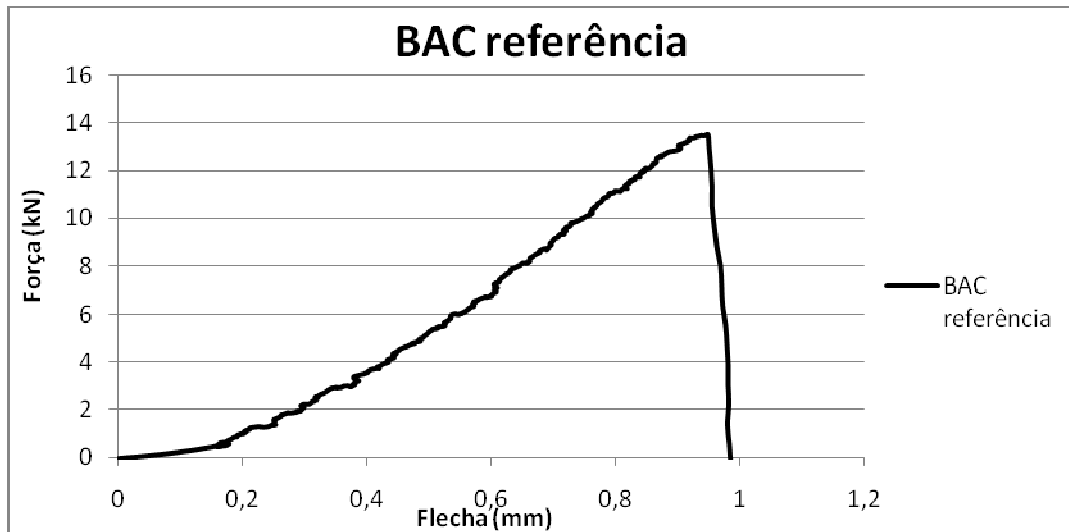


Fig. 4.17 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para o BAC de referência

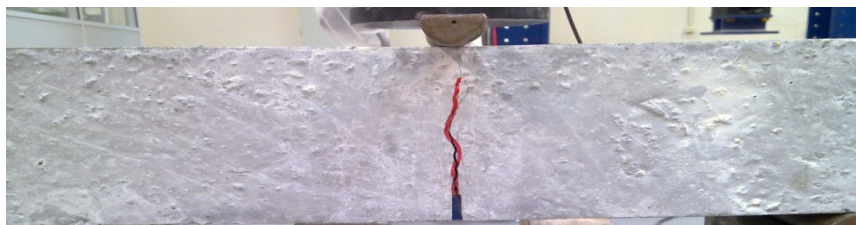
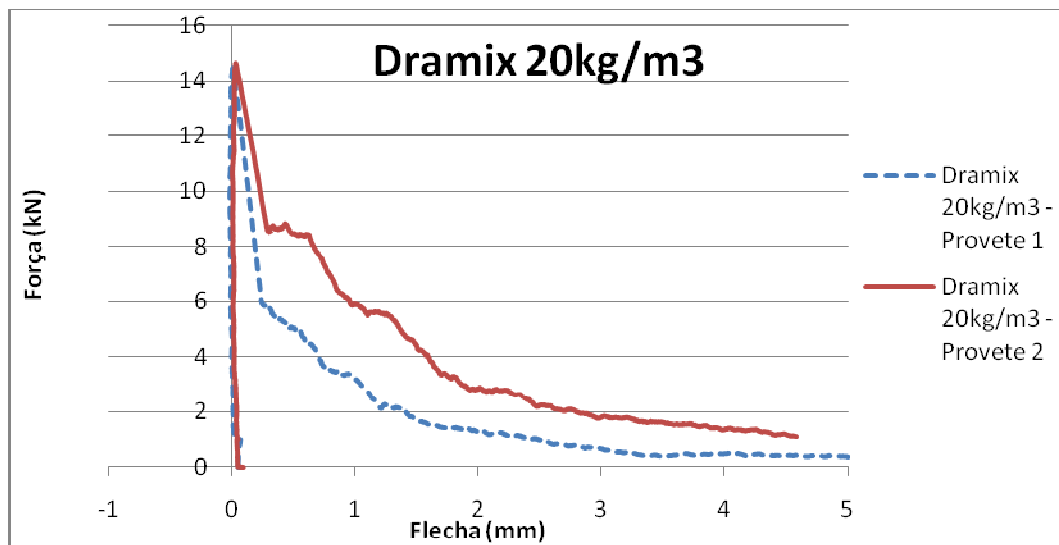


Fig. 4.18 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 20 kg/m³ de fibras Dramix

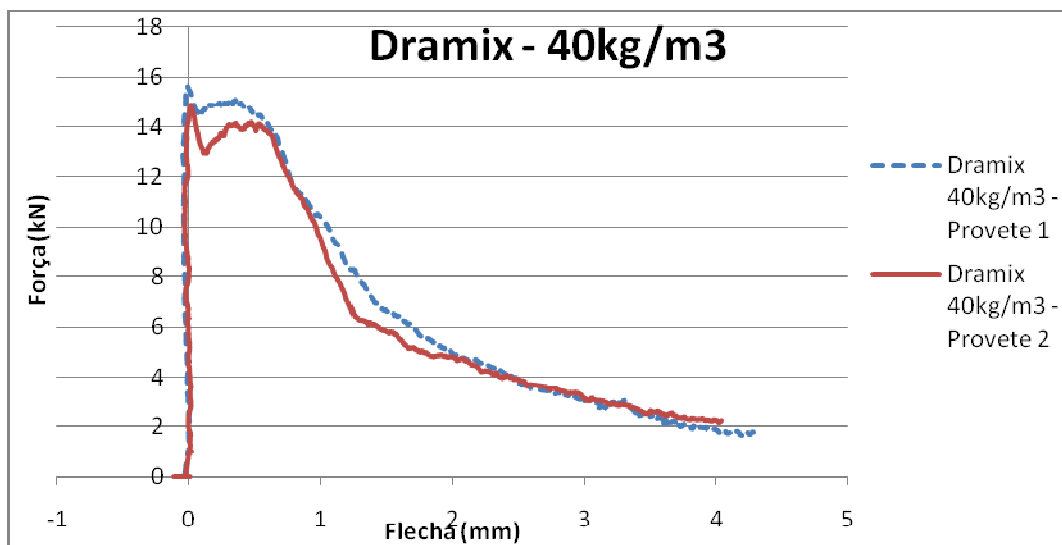


Fig. 4.19 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 40 kg/m³ de fibras Dramix

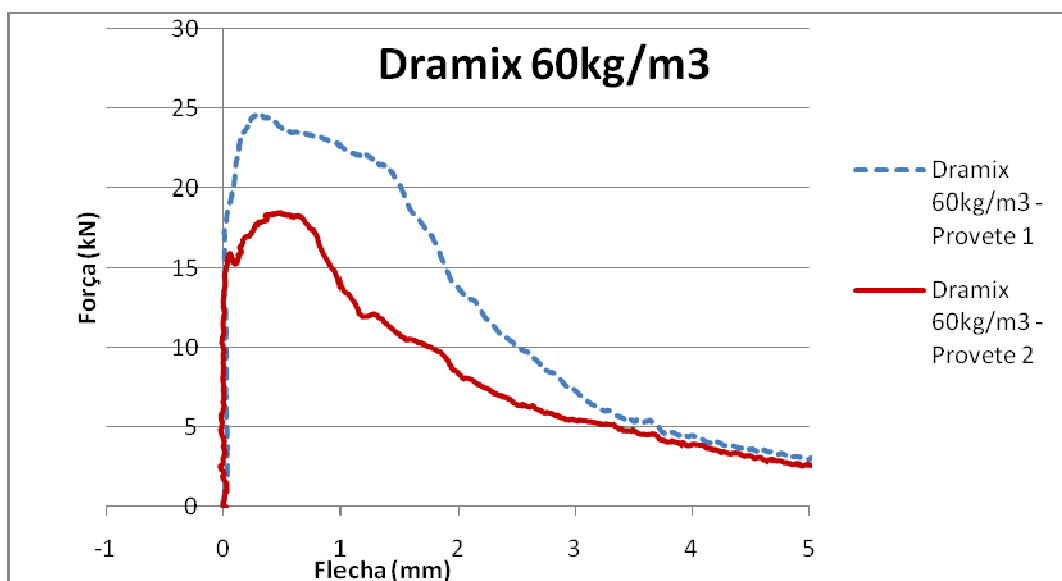


Fig. 4.20 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 60 kg/m³ de fibras Dramix

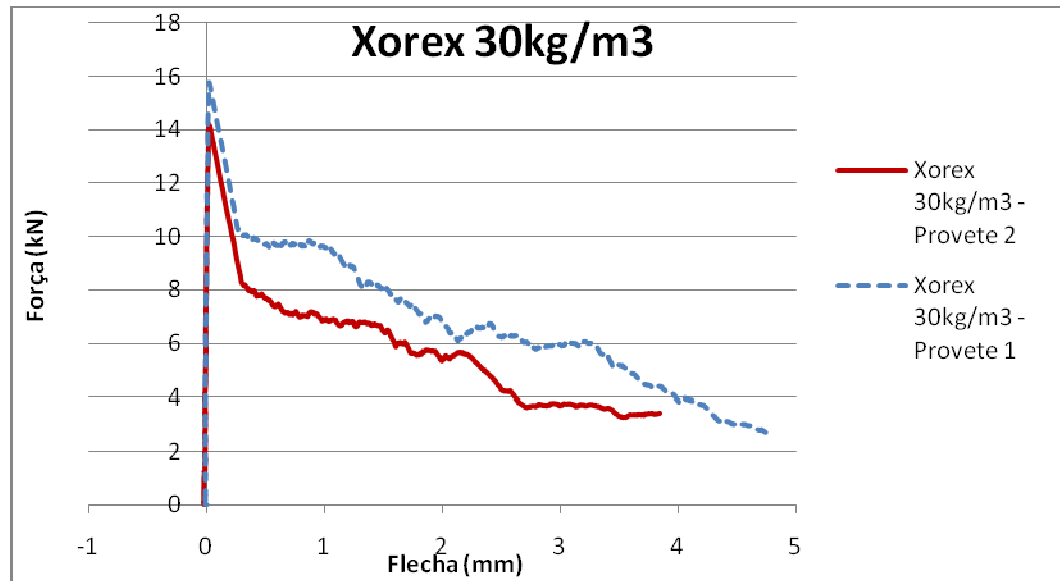


Fig. 4.21 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 30 kg/m³ de fibras Xorex

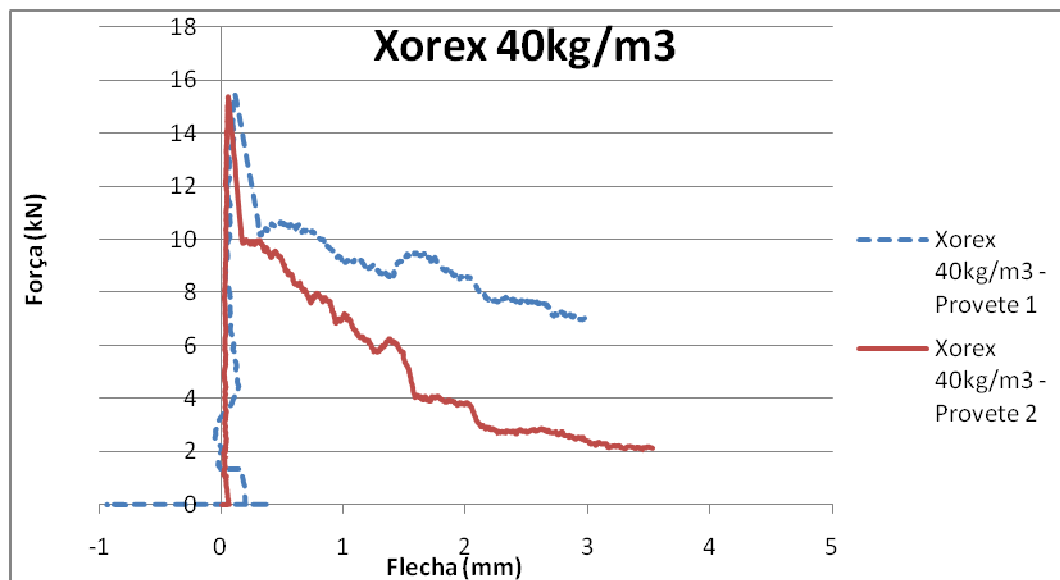


Fig. 4.22 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 40 kg/m³ de fibras Xorex

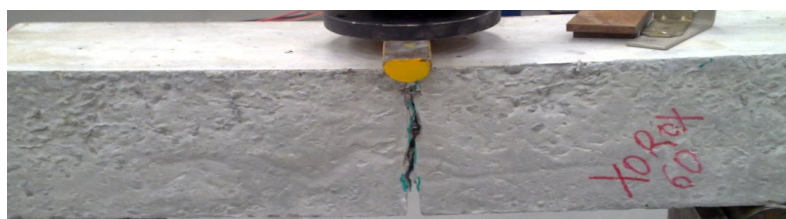
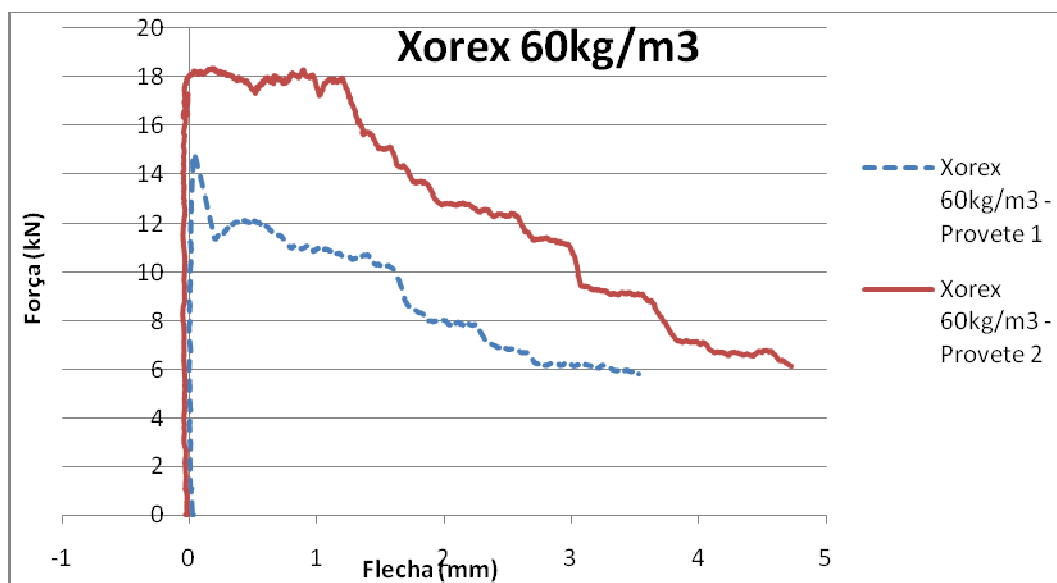


Fig. 4.23 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 40 kg/m³ de fibras Xorex

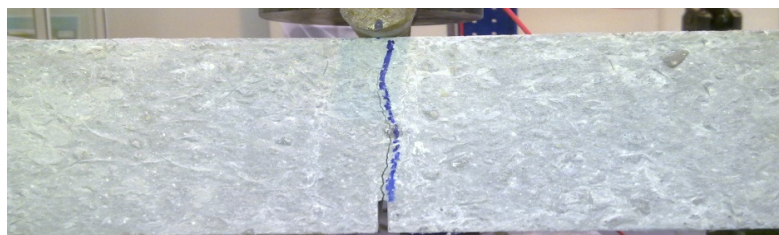
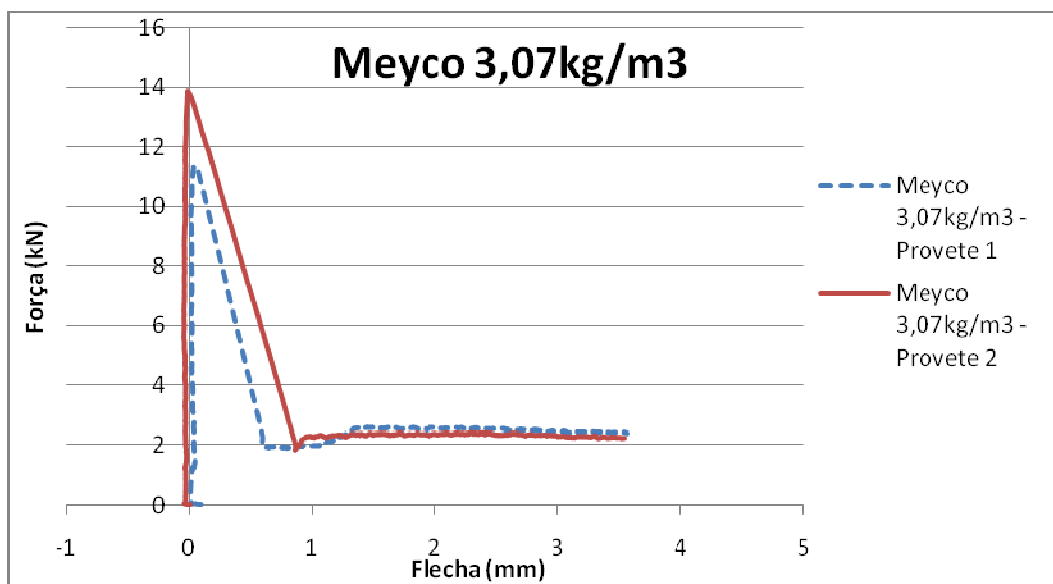


Fig. 4.24 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 3,07 kg/m³ de fibras Meyco

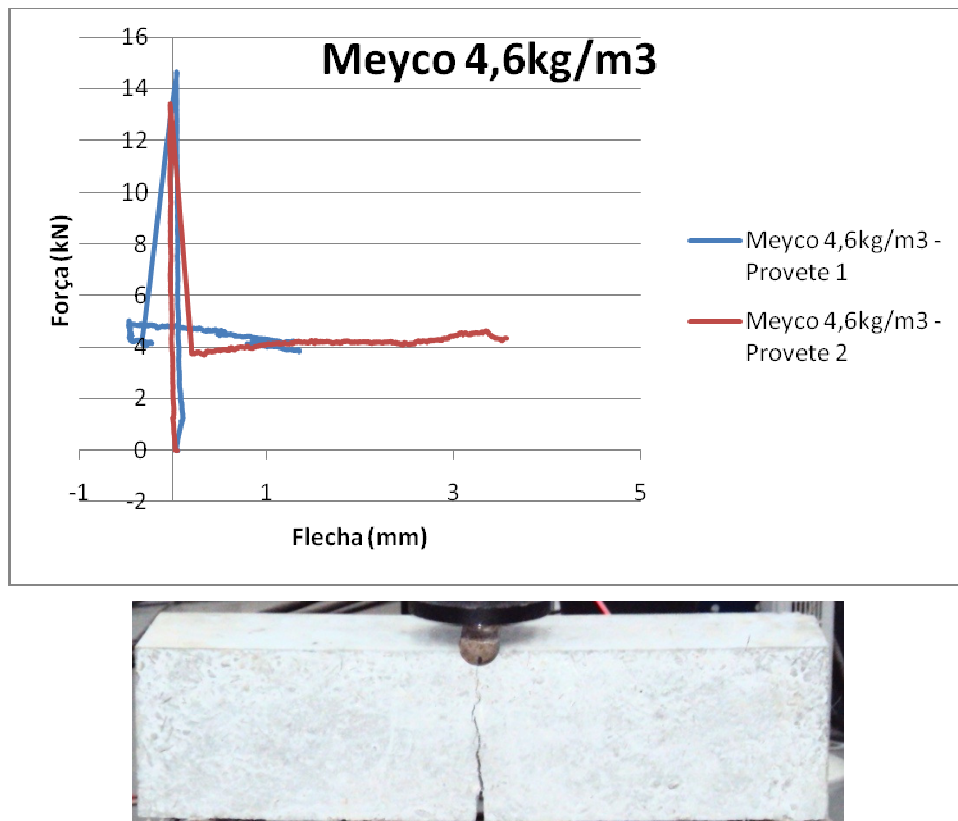


Fig. 4.25 – Diagrama força-flecha e fotografia da rotura para a composição com 4,6 kg/m³ de fibras Meyco

Nos Quadros 4.6 e 4.7 estão representados os resultados obtidos nestes ensaios, para a composição de referência, para as 3 composições utilizando fibras Dramix, para as 3 composições utilizando fibras Xorex e para as 2 composições utilizando fibras Meyco, para cada um dos provetes respectivamente. No Quadro 4.8 estão apresentados os resultados para os valores médios dos dois provetes, no que diz respeito à máxima força obtida no ensaio F_L e às tensões no limite de proporcionalidade ($f_{ct,L}^f$) e tensões residuais ($f_{R,j}$), medidas para os deslocamentos $\delta_j = 0,47; 1,32; 2,17; 3,02$ mm.

Quadro 4.6 – Valores obtidos nos ensaios de flexão para o provete 1

Provete 1												
Composição	Dosagem (kg/m³)	F_L (kN)	$f_{ct,L}^f$ (MPa)	$F_{R,1}$ (kN)	$f_{R,1}$ (MPa)	$F_{R,2}$ (kN)	$f_{R,2}$ (MPa)	$F_{R,3}$ (kN)	$f_{R,3}$ (MPa)	$F_{R,4}$ (kN)	$f_{R,4}$ (MPa)	
Referência	0	14,02	4,49	Não definido								
Dramix	20	14,45	4,62	5,05	1,62	2,15	0,69	1,22	0,39	0,62	0,20	
	40	15,67	5,01	14,73	4,71	7,72	2,47	4,69	1,50	3,05	0,98	
	60	24,64	7,88	23,89	7,64	21,46	6,87	12,57	4,02	7,11	2,28	
Xorex	30	15,77	5,05	9,73	3,12	8,13	2,60	6,21	1,99	5,90	1,89	
	40	15,49	4,96	10,56	3,38	8,77	2,81	7,80	2,49	Não definido		
	60	14,85	4,75	12,05	3,86	10,59	3,39	7,89	2,52	6,14	6,14	
Meyco	3,07	11,34	4,29	4,43	1,68	2,48	0,94	2,57	0,97	2,43	6,14	
	4,6	14,67	4,69	4,65	1,49	3,91	1,25	Não definido				

Quadro 4.7 – Valores obtidos nos ensaios de momento flector para o provete 2

Provete 2											
Composição	Dosagem (kg/m ³)	F _L (kN)	f _{ct,L} ^f (MPa)	F _{R,1} (kN)	f _{R,1} (MPa)	F _{R,2} (kN)	f _{R,2} (MPa)	F _{R,3} (kN)	f _{R,3} (MPa)	F _{R,4} (kN)	f _{R,4} (MPa)
Referência	0	Não definido									
Dramix	20	14,63	4,68	8,55	2,74	5,32	1,70	2,77	0,89	1,85	0,59
	40	14,88	4,76	14,11	4,52	6,22	1,99	4,46	1,43	3,03	0,97
	60	18,53	5,93	18,46	5,91	11,88	3,80	7,68	2,46	5,41	1,73
Xorex	30	14,21	4,55	7,84	2,51	6,79	2,17	5,66	1,81	3,72	1,19
	40	15,40	4,93	9,37	3,00	5,99	1,92	2,93	0,94	2,30	0,74
	60	18,32	5,86	17,60	5,63	16,15	5,17	12,78	4,09	10,67	3,41
Meyco	3,07	13,89	4,45	7,53	2,41	2,35	0,75	2,37	0,76	2,28	0,73
	4,6	13,41	4,29	3,89	1,25	4,20	1,34	4,21	1,35	4,47	1,43

Quadro 4.8 – Valores obtidos nos ensaios de momento flector (valores médios)

valores médios							
Composição	Dosagem (kg/m ³)	F _L (kN)	f _{ct,L} ^f (MPa)	f _{R,1} (MPa)	f _{R,2} (MPa)	f _{R,3} (MPa)	f _{R,4} (MPa)
Referência	0	14,02	4,49	Não definido			
Dramix	20	14,54	4,65	2,18	1,19	0,64	0,40
	40	15,27	4,89	4,61	2,23	1,46	0,97
	60	21,58	6,91	6,78	5,33	3,24	2,00
Xorex	30	14,99	4,80	2,81	2,39	1,90	1,54
	40	15,44	4,94	3,19	2,36	1,72	0,74
	60	16,58	5,31	4,74	4,28	3,31	4,78
Meyco	3,07	12,61	4,37	2,04	0,84	0,86	3,44
	4,6	14,04	4,49	1,37	1,30	1,35	1,43

Pela análise destes gráficos é facilmente identificável a ductilidade conferida pela adição de fibras, eliminando de um modo mais ou menos eficaz o comportamento frágil do BAC quando submetido ao esforço de tracção, ainda assim, é possível verificar que com excepção das dosagens de 60kg/m³ de betão para as fibras da Dramix e Xorex, todas as restantes composições após atingirem o valor da força máxima, em que se dá a abertura da fenda, apresentam uma quebra mais ou menos brusca no ramo descendente, o que faz com que um comportamento dúctil não seja inteiramente verificado. Este comportamento permite concluir que a dosagem de fibras não é suficiente para a função a que estas se prestam aquando da introdução no betão auto-compactável, sendo por isso necessário aumentar a respectiva dosagem.

Para o caso das fibras plásticas é notório que a adição de fibras não introduz um bom rendimento após fendilhação, pois após a abertura da primeira fenda a força decai de um modo abrupto aumentando o deslocamento para uma força quase constante.

Para todas as outras composições é verificada uma relação directa entre o aumento da ductilidade e a quantidade de fibras na mistura.

No Quadro 4.9 estão apresentados os valores médios para a força máxima obtida no ensaio e os valores percentuais da variação das mesmas relativamente à amostra de referência, sendo os valores positivos para um aumento da força relativamente à amostra de referência e os valores negativos para uma diminuição da mesma.

Quadro 4.9 – Valores obtidos nos ensaios de momento flector (valores médios)

Composição	Dosagem (kg/m ³)	F _L (kN)	Variação da força máxima (%)
Referência	0	14,02	0,0
Dramix	20	14,54	3,7
	40	15,27	9,0
	60	21,58	54,0
Xorex	30	14,99	7,0
	40	15,44	10,2
	60	16,58	18,3
Meyco	3,07	12,61	-10,0
	4,6	14,04	0,2

Conclui-se então, que para quase todas as composições houve um aumento da força máxima obtida no ensaio, relativamente à amostra de referência, sendo esse aumento de aproximadamente 50% para a composição com mais quantidade de fibras Dramix, que traduz portanto um ganho na resistência à tracção quando as fibras são adicionadas.

Apenas na composição com menor quantidade de fibras plásticas houve uma diminuição da força máxima obtida no ensaio.

Para as primeiras tensões residuais, as composições com maior dosagem de fibras da Dramix apresentam valores mais elevados do que as fibras Xorex, para o mesmo volume de fibras, isto significa que estas são mais eficazes, quando se pretende um bom rendimento após a abertura de fendas.

Este factor poderá ser explicado visto que devido à sua secção e ao seu comprimento serem menores do que os das fibras onduladas Xorex, é possível para o mesmo volume de fibras, inserir um maior número das mesmas na matriz cimentícia, sendo portanto superior a absorção de energia conferida pelas composições utilizando estas fibras, uma vez que “cosem” melhor a fenda devido à melhor distribuição por toda a secção do provete.

4.4. NÚMERO DE FIBRAS QUE ATRAVESSAM A FENDA

No Quadro 4.10 indica-se a quantidade de fibras que foi possível contabilizar no total das duas faces após o ensaio de flexão sob 3 pontos.

O processo consistiu em contar separadamente o número de fibras que se encontravam em cada uma das metades do prisma, após o ensaio estar concluído, e somá-las para se entender o contributo do total das mesmas para os parâmetros ensaiados.

Na Figura 4.26 está representado o aspecto do prisma após a conclusão do ensaio dos três pontos.



Fig. 4.26 – Aspecto dos prismas no final do ensaio para composição utilizando fibras da Dramix

Quadro 4.10 – Contagem das fibras

Composição	Nº de fibras		Nº médio
	provete 1	provete 2	
Dramix 20kg/m ³	52	81	67
Dramix 40kg/m ³	151	122	137
Dramix 60kg/m ³	272	214	243
Xorex 30kg/m ³	68	60	74
Xorex 40kg/m ³	90	60	65
Xorex 60kg/m ³	90	108	99

É portanto realçada a correspondência entre o número de fibras que atravessam as fendas e o ganho no comportamento à flexão.

De realçar que as conclusões aqui retiradas referem-se apenas à idade ensaiada (7 dias). No entanto segundo o estudo realizado Barros et al. – (2006) com BACRF a partir dos 7 dias de idade do betão o valor para o parâmetro $f_{ct,L}$ não aumenta significativamente. Mais relevante ainda é o pequeno número de ensaios efectuados e o limitado número de propriedades das fibras e da composição de betão estudadas. Seria necessário estudar os efeitos da relação L_f/d_f das fibras, do esqueleto sólido formado pelos agregados e das propriedades da pasta para ser possível retirar conclusões mais sustentadas.

5

Aplicação do BACRF em zonas de ancoragem de elementos pré-esforçados.

5.1. PRÉ-ESFORÇO. ZONAS DE ANCORAGEM DOS CABOS

A deficiente resistência do betão à tracção faz com que, desde o início do uso deste material, se pensasse em colocar sob compressão as zonas traccionadas.

A ideia de aplicação de pré-esforço surge devido ao americano P.H. Jackson, com o intuito de formar arcos de betão em estruturas servindo como lajes de piso.

Interessa referir que a aplicação do pré-esforço pode ser efectuada por dois processos distintos.

O processo da pré-tensão, no qual os varões ou cabos são tensionados antes da colocação do betão, sendo a transferência do esforço por aderência depois do mesmo adquirir a resistência necessária, como pode ser verificado pelo esquema presente na Figura 5.1.

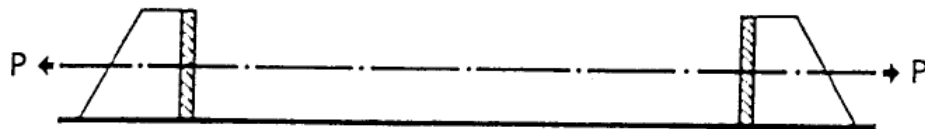


Fig. 5.1 – Aplicação da técnica de pré-esforço por pré-tensão

O processo da pós-tensão consiste em apenas traccionar as armaduras depois do betão adquirir a resistência necessária. O pré-esforço é aplicado por cabos munidos de ancoragens nas suas extremidades e colocado em bainhas de modo a ficarem livres durante a betonagem.

Na Figura 5.2 é possível visualizar o exemplo da aplicação desta técnica.

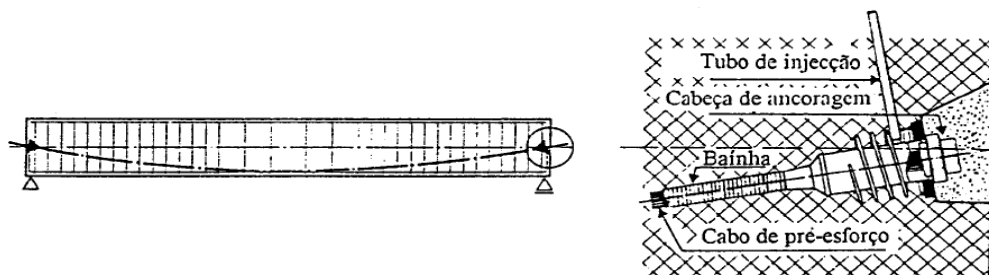


Fig. 5.2 – Aplicação da técnica de pré-esforço por pós-tensão e pormenor da zona de ancoragem

As zonas de ancoragem correspondem a uma zona localizada de uma determinada estrutura na qual se procede à aplicação do esforço de tracção nos cabos de aço.

Esse processo consiste em puxar os cabos, através de um macaco hidráulico, até estes atingirem uma tensão determinada, de seguida os cabos são presos por meio de cunhas, ficando a secção de betão preferencialmente sujeita a um esforço de compressão na sua totalidade, para uma carga inicial correspondente, em geral, apenas ao peso próprio da estrutura.

Na Figura 5.3 está representado um exemplo de uma ancoragem activa para uma viga pré-esforçada.

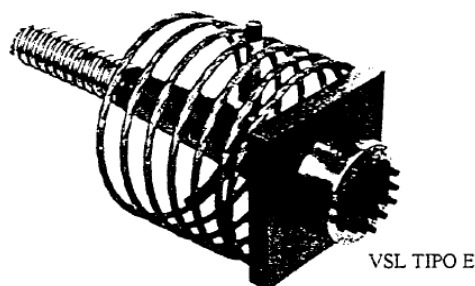


Fig. 5.3 – Ancoragem VSL tipo E

Os cabos podem ser traccionados por uma extremidade ou pelas duas extremidades da peça, sendo no primeiro caso uma extremidade activa e a outra passiva e no segundo caso as duas activas.

O pré-esforço é uma técnica na qual desde o momento de aplicação se impõem grandes carregamentos localizados à estrutura que o suporta, por outro lado, esse carregamento é geralmente superior na primeira fase, visto que, devido às perdas diferidas no tempo provocadas pela relaxação no aço, fluência do betão, bem como uma perda por escorregamento das cunhas de ancoragem, há uma diminuição da tensão de compressão imposta pelo dispositivo, desse modo, o betão das zonas atrás descritas deverá desde cedo apresentar uma elevada resistência. Não obstante, durante toda a vida útil da obra está presente uma carga localizada bastante elevada.

Este facto obriga a ter cuidados especiais aquando do dimensionamento desta zona uma vez que devido ao facto de se tratar de uma carga concentrada numa zona de dimensões reduzidas, a distribuição dos esforços não é semelhante a outras zonas da estrutura. O estudo destas zonas assenta numa análise, quer por meio da teoria da elasticidade, quer apoiado num modelo de escoras e tirantes, fortemente fundamentado por dados experimentais. Na Figura 5.4 pode ver-se as principais avarias nestas zonas de ancoragem.

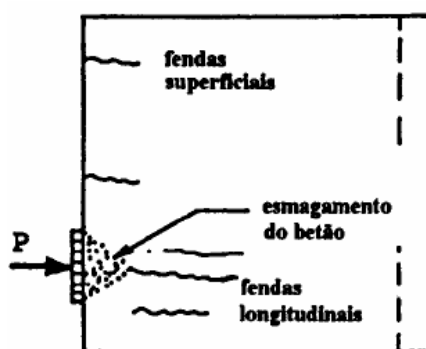


Fig. 5.4 – Potenciais avarias em zonas de ancoragem dos cabos de pré-esforço

Na figura 5.5, estão representadas as trajectórias das tensões principais para este tipo de carregamento. Sendo as tensões de tracção representadas a traço cheio e as tensões de compressão a traço interrompido.

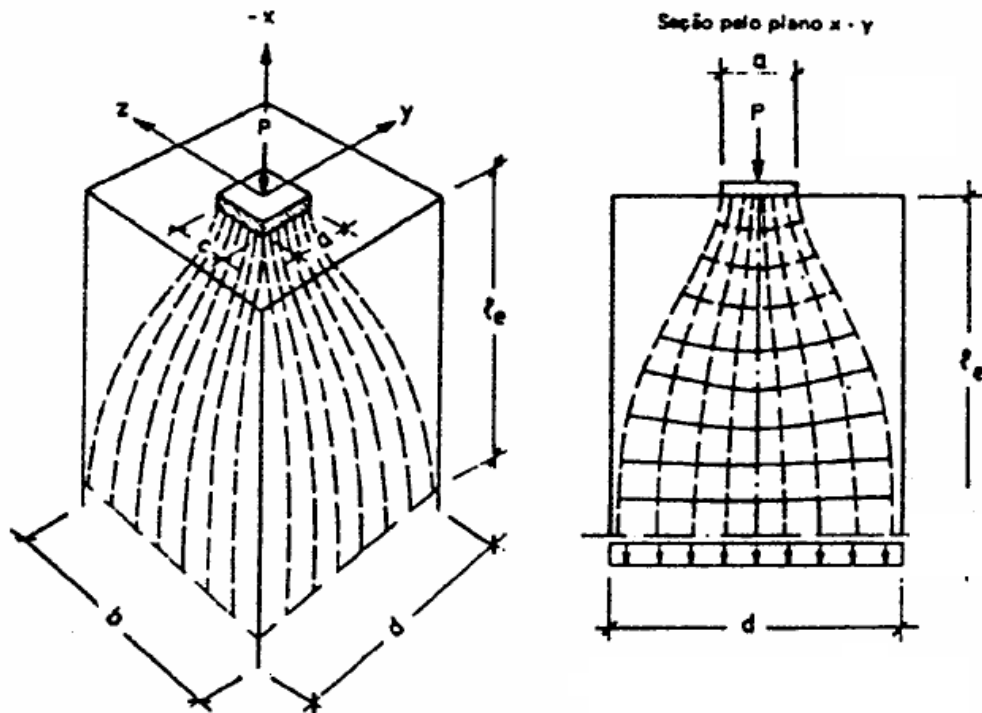


Fig. 5.5 – Trajectória das tensões para zonas com cargas concentradas aplicadas

Pode-se então distinguir 3 tipos de rotura nestas zonas com carga concentrada aplicada. A primeira forma de rotura designada por “bursting” é provocada pela existência de tensões de tracção transversais, ao longo do eixo longitudinal, que podem gerar fendilhação nesta zona e rotura da peça.

A segunda forma de rotura, também conhecida por “spalling”, é provocada pelas tensões de tracção que ocorrem junto à superfície carregada e decrescem rapidamente para o interior. O valor dessas tensões depende, fundamentalmente, da proporção entre a área da secção e a do órgão de ancoragem e da excentricidade da carga, as tensões de “spalling” podem provocar a fendilhação e rompimento superficial do betão, provocando a rotura do elemento.

Na figura 5.6 pode ser visualizada uma figura representativa destes dois modos de rotura.

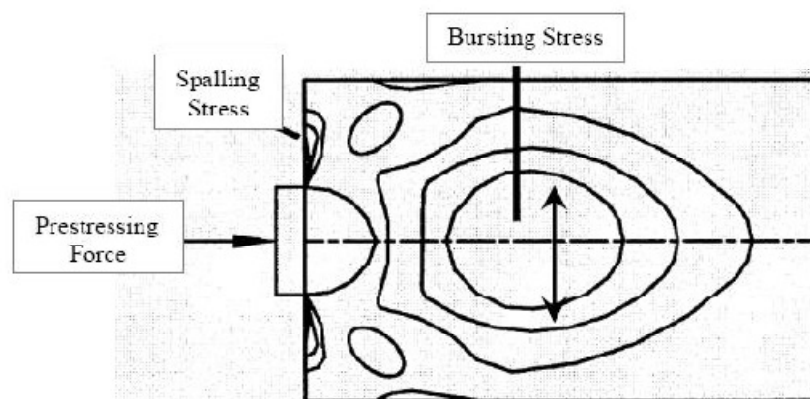


Fig. 5.6 – Identificação dos modos de rotura “bursting” e “spalling”

O terceiro modo de rotura tem a ver com a resistência do betão à compressão sendo então de evitar o esmagamento localizado induzido pela carga numa zona confinada de betão, este modo de rotura é conhecido como “crushing”.

Na sequência do que foi descrito anteriormente, estas zonas de ancoragem de cabos de pré-esforço, necessitam de uma elevada densidade de armadura, de forma a evitar a rotura do betão segundo os primeiros dois modos explicados nos parágrafos anteriores, sendo estas mesmas zonas de dimensões relativamente reduzidas, quando comparadas com a restante estrutura e havendo a necessidade de se distribuir a armadura numa região de dimensões apertadas. Desta forma, a ideia de tentar substituir uma percentagem da armadura, ou até mesmo a totalidade da mesma, por fibras é encarada como uma boa alternativa, de forma a evitar um congestionamento excessivo de armaduras.

Não obstante, devido à grande quantidade de fibras dispersas no betão, estas “fecham” de um modo mais eficaz as fendas que se podem abrir quando a resistência à tracção do betão é ultrapassada, sendo mais improvável a entrada de água ou de agentes nocivos, que podem danificar os cabos de pré-esforço. Por outro lado, o BAC ao evitar a necessidade de vibração é de grande eficácia pois devido à sua compactação apenas por acção do seu peso, permite uma melhor deposição do betão nas zonas fortemente armadas, bem como uma distribuição mais homogênea das fibras.

5.2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DAS ZONAS DE ANCORAGEM

Ao longo dos tempos o método de dimensionamento das zonas de ancoragem tem vindo a sofrer algumas alterações.

No presente trabalho a carga concentrada está localizada no núcleo central, uma vez que a mesma é exercida no centro do provete. Como tal, a expressão apresentada no MC90, para a força de tracção transversal exercida é a que consta na expressão 5.1. Na Figura 5.7 está representado o modelo teórico, bem como as dimensões utilizadas nas expressões e a localização da força de tracção.

$$F_{t1} = 0,3F \left(1 - \frac{a_0}{a_1}\right) \quad (5.1)$$

Com:

$$a_1 = 2 \cdot b \quad (5.2)$$

Onde: F_{t1} = Força de tracção exercida transversalmente [kN];
 F = Força concentrada [kN].

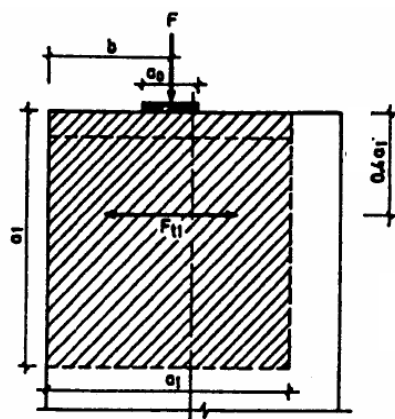


Fig. 5.7 – Identificação da força de tracção “brusting”, localização da mesma no prisma dos ensaios

O Eurocódigo 2, para a mesma força, propõe a expressão 5.3 para o caso de uma descontinuidade parcial $\left(b \leq \frac{H}{2}\right)$, os parâmetros para utilização da mesma expressão e localização da força são demonstrados na figura 5.8 (a). Para o caso de zonas com descontinuidade total, $\left(b > \frac{H}{2}\right)$ o EC2, propõe a expressão 5.4, cujos parâmetros e localização da força se encontram demonstrados na Figura 5.8 (b).

$$T = \frac{1}{4} \cdot \frac{b-a}{b} \cdot F \quad (5.3)$$

$$T = \frac{1}{4} \left(1 - 0,4 \cdot \frac{a}{h} \right) F \quad (5.4)$$

Onde: T = Força de tracção transversal [kN];
F = Força concentrada [kN].

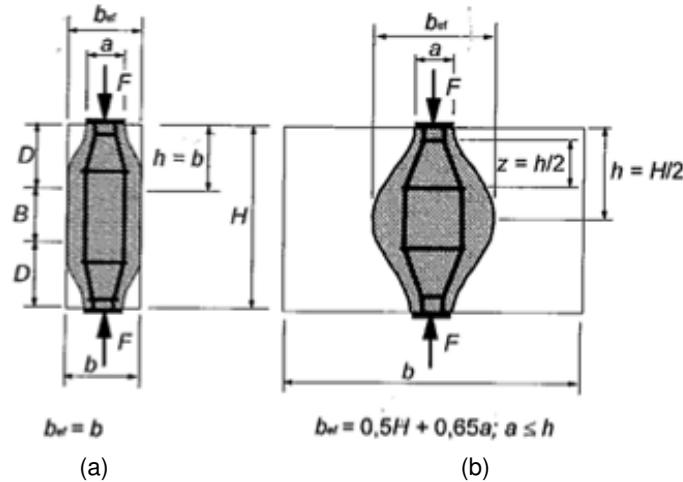


Fig. 5.8 – Parâmetros para determinar as forças de tracções transversais; (a) – Descontinuidade total; (b) – Descontinuidade parcial

Relativamente ao esmagamento localizado do betão, a forma proposta no Eurocódigo 2 para controlar este fenómeno é apresentada na expressão 5.5.

$$F_{Rdu} = A_{co} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1} / A_{c0}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} \quad (5.5)$$

Na Figura 5.9 é dada a conhecer a forma de obter os valores para calcular tanto o valor de A_{c0} (área carregada) como de A_{c1} (área de distribuição de cálculo).

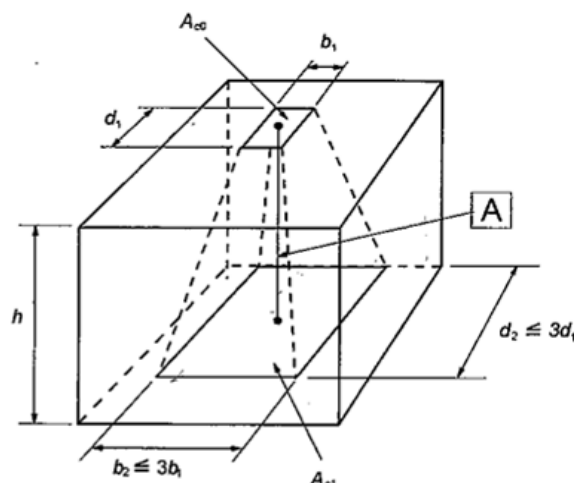


Fig. 5.9 – Distribuição de cálculo para zonas sujeitas a cargas concentradas

5.3. ENSAIO DE MODELOS DAS CABEÇAS DE ANCORAGEM DOS CABOS DE PRÉ-ESFORÇO. MODELOS PRODUZIDOS E ENSAIOS REALIZADOS

5.3.1. MODELOS PRODUZIDOS

O principal objectivo nesta fase de estudo consistiu em caracterizar o comportamento do BACRF numa utilização estrutural específica, em particular em zonas de ancoragem de cabeças de pré-esforço.

Desta forma e sabendo quais as principais condicionantes destas zonas, atrás discutidas, foi necessário escolher as composições que à partida apresentariam melhor desempenho.

Num outro trabalho a realizar no âmbito da dissertação do MIEC, com o título “Dimensionamento de zonas de ancoragem de cabos de pré-esforço”, a caracterização e dimensionamento das zonas de ancoragem foi igualmente abordada, tendo sido estudados 6 modelos com diferentes percentagens de armadura transversal, sem no entanto se proceder à introdução de fibras no BAC, para se estudar os fenómenos da aplicação de uma carga concentrada. No presente trabalho utilizaram-se os valores dos ensaios de 2 desses prismas, visto serem os que poderiam ser comparáveis directamente com os modelos nos quais se adicionaram fibras ao BAC.

Nesse trabalho esses 2 modelos foram armados com aço convencional A500 e diâmetro (ϕ) 6 mm. O tipo de reforço utilizado foram estribos horizontais exteriores apenas no primeiro nível (ver Figura 5.10 (a)), sendo que os restantes níveis apresentam para além dos estribos exteriores, mais dois estribos interiores com dois ramos (ver Figura 5.10 (b)). Relativamente ao espaçamento, todos os estribos horizontais foram espaçados de 60mm, com excepção dos dois últimos níveis nos quais o espaçamento foi de 75mm. Todos os modelos apresentam as mesmas dimensões (250x250x500mm³).

Para o carregamento dos modelos foi utilizada uma placa de aço centrada no topo do prisma com dimensões (10x10cm²).

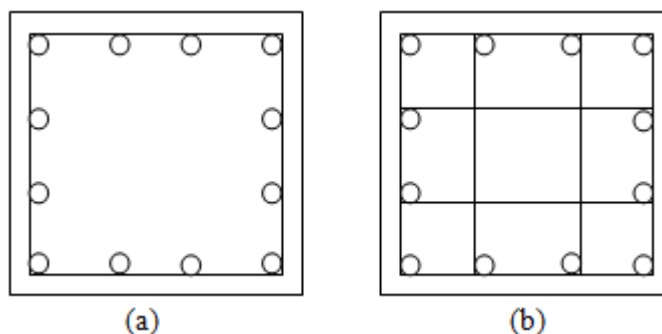


Fig. 5.10 – Solução de estribos horizontais para os modelos ensaiados (a) no presente trabalho e (b) na dissertação “Dimensionamento de zonas de ancoragem de cabos de pré-esforço”

Desta forma e afim de proceder a um estudo comparativo relativamente à adição de fibras, foram escolhidos modelos com as mesmas dimensões para a realização dos ensaios para o presente trabalho. No entanto a variante foi na solução de armaduras e a inclusão de fibras.

De facto, em quatro prismas, procedeu-se à colocação de estribos horizontais, exteriores, sendo eles compostos por 2 ramos de $\phi 6\text{mm}$ de aço A500 espaçados de 60 mm em todos os níveis com excepção dos dois últimos em que o espaçamento aumenta para 75mm. Para os restantes 2 prismas, não foi colocada nenhuma armadura, sendo apenas as fibras o único reforço deste modelo.

Na Figura 5.11 é possível identificar a solução de armadura adoptada para os 4 provetes atrás referidos (a), bem como a solução de armadura utilizada na dissertação descrita anteriormente (b).

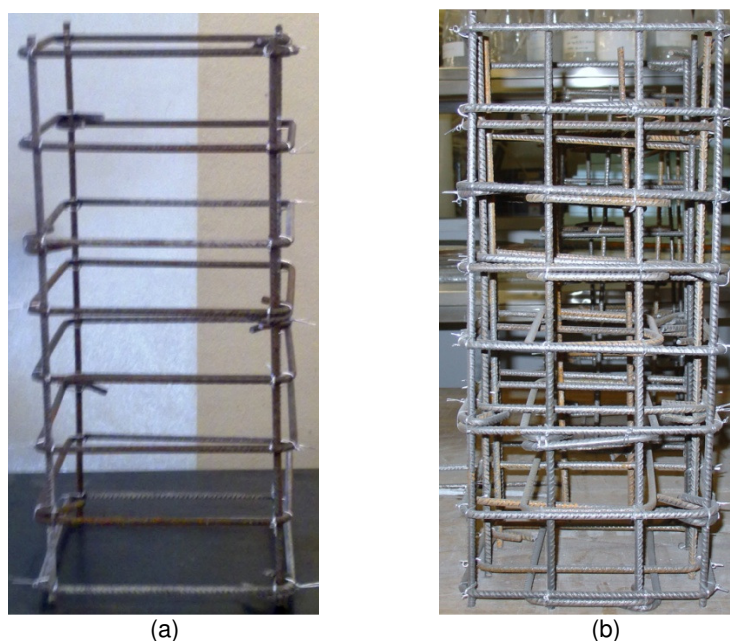


Fig. 5.11 – Solução de armaduras

Devido a um estudo criterioso dos resultados obtidos nos ensaios do estado endurecido, para todas as composições aqui testadas, verificou-se que as composições que provavelmente seriam mais susceptíveis de fornecer resultados mais satisfatórios seriam as que continham maior volume de fibras.

Por conseguinte, as escolhidas foram a composição na qual se incluíam fibras da Dramix e Xorex com quantidade de 60kg/m^3 de betão.

Foram então betonados 2 prismas com a solução de armadura descrita e composição com 60kg de fibras Dramix por m^3 de betão, 2 prismas com armadura e uma dosagem de 60kg/ m^3 de fibras Xorex e 2 prismas sem armadura e com 60kg/ m^3 de fibras Xorex.

Na Figura 5.12, é possível visualizar a cofragem dos modelos e o modo de colocação das armaduras.



Fig. 5.12 – Cofragem e colocação das armaduras

5.3.2. ENSAIOS REALIZADOS

Relativamente aos ensaios realizados, estes foram contudo semelhantes ao ensaio da resistência à compressão com os cubos de 150mm de aresta.

Utilizou-se a mesma prensa, no entanto ao contrário aos ensaios de compressão, utilizaram-se LVDT's externos colocados horizontalmente em três faces a uma distância de 10 cm da face carregada, de modo a ser possível registar os respectivos deslocamentos. Estes são de elevada importância pois permitem conhecer os deslocamentos laterais do prisma na zona traccionada.

O ensaio foi realizado com controlo de deslocamentos, aplicando-se um carregamento que se traduzisse numa velocidade de deformação constante de 0,05 mm/seg.

A Figura 5.13 ilustra o aparato experimental, sendo possível na mesma figura visualizar a forma como foram colocados os LVDT's externos de elevada precisão.



Fig. 5.13 – Esquema de ensaio

Deste modo, tendo o conhecimento das forças que foram aplicadas por leitura no aparelho, é possível conhecer a força máxima do ensaio e traçar o respectivo diagrama força vs. deslocamento para cada um dos prismas.

Não obstante pelos resultados obtidos pelo LVDT interno foi também possível traçar o diagrama força vs. deslocamento para as deformações verticais sentidas na peça.

Interessa ainda acrescentar que para o presente trabalho todos os prismas foram ensaiados 18 dias após a betonagem, tendo os mesmos sido desmoldados próximos do dia do ensaio e mantidos à temperatura ambiente no restante tempo até ao ensaio. No entanto, sendo o pré-esforço, uma técnica cuja aplicação é feita quase sempre em idades precoces do betão, a idade do betão na data do ensaio deveria ter sido reduzida, apenas se tomou os 18 dias para haver alguma coerência para a comparação com os outros ensaios, nos quais os modelos foram também ensaiados aos 18 dias.

5.4. RESULTADOS OBTIDOS

Em seguida, nas Figuras 5.14 a 5.19, são apresentados os diagramas força-deslocamento obtidos para os ensaios efectuados, quer para os resultados dos deslocamentos medidos pelos LVDT's externos, como para o transdutor interno da prensa, bem como uma foto do aspecto dos prismas no final do ensaio.

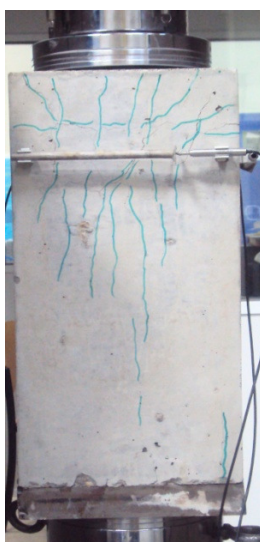
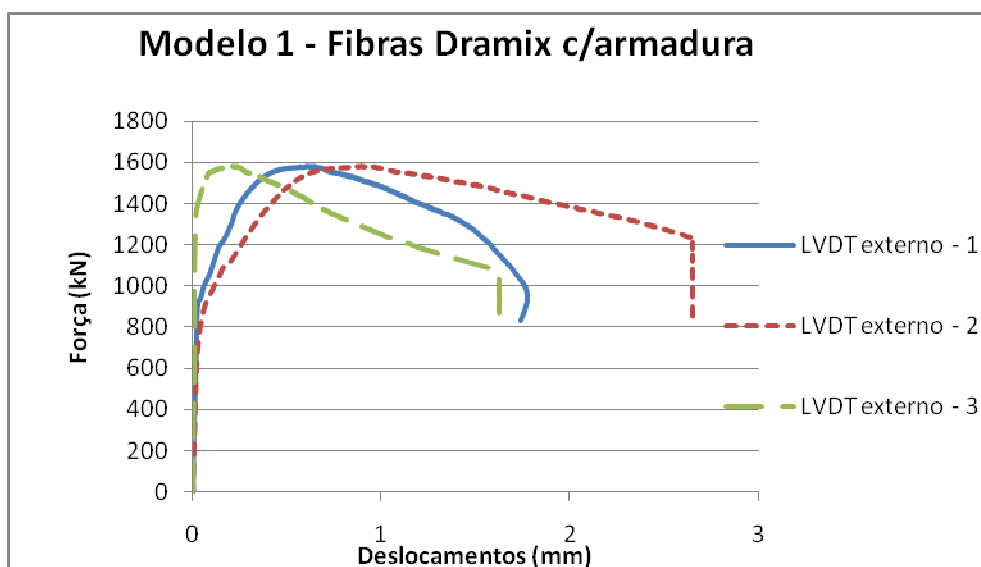
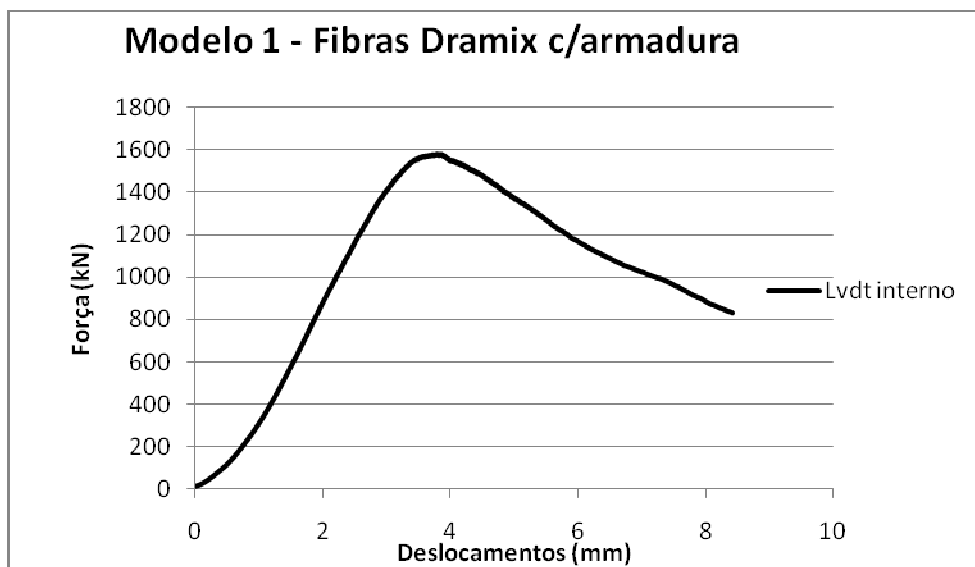


Fig. 5.14 – Diagrama força-deslocamento (transdutor interno e LVDTs externos); aspecto do prisma 1 de BACRF Dramix (com armadura) no final do ensaio

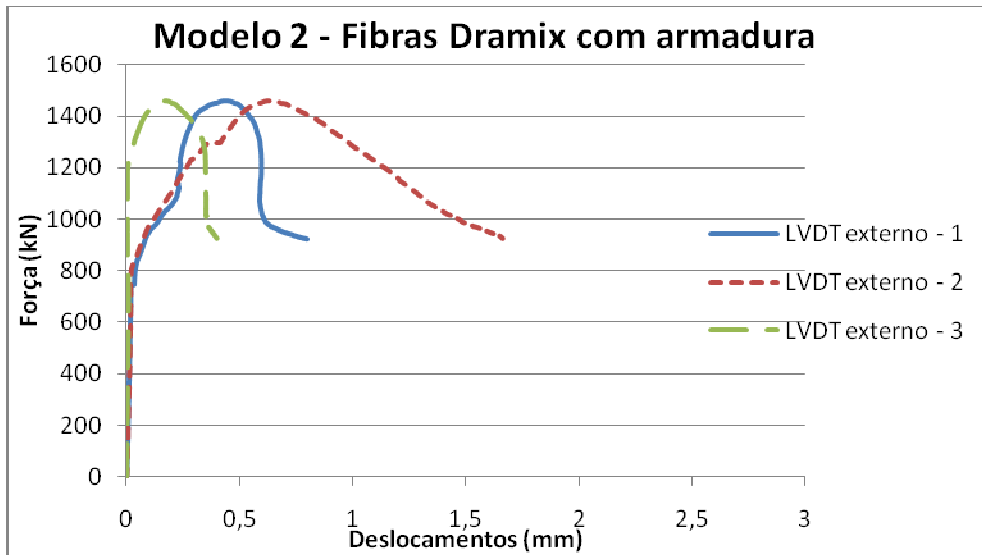
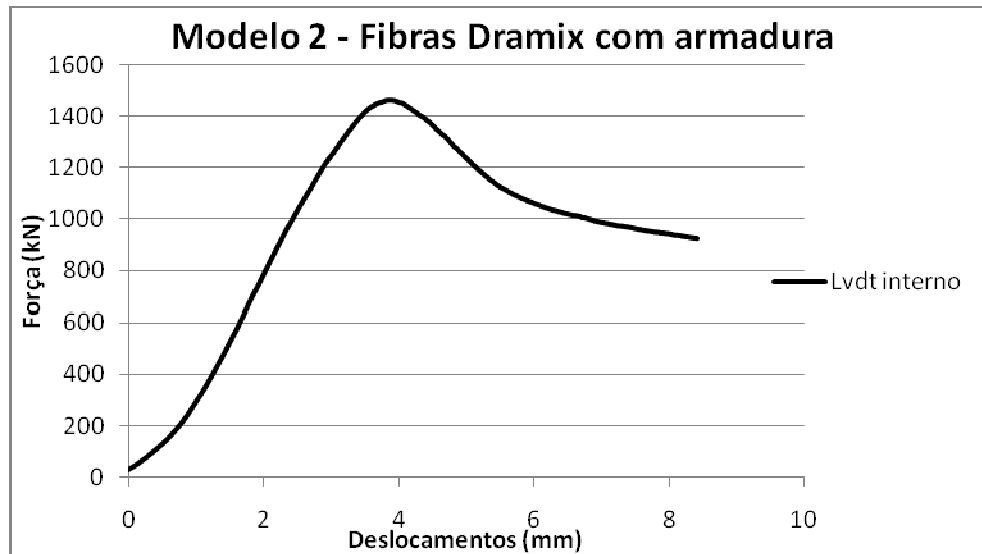


Fig. 5.15 – Diagrama força-deslocamento (transdutor interno e LVDTs externos); aspecto do prisma 2 de BACRF Dramix (com armadura) no final do ensaio

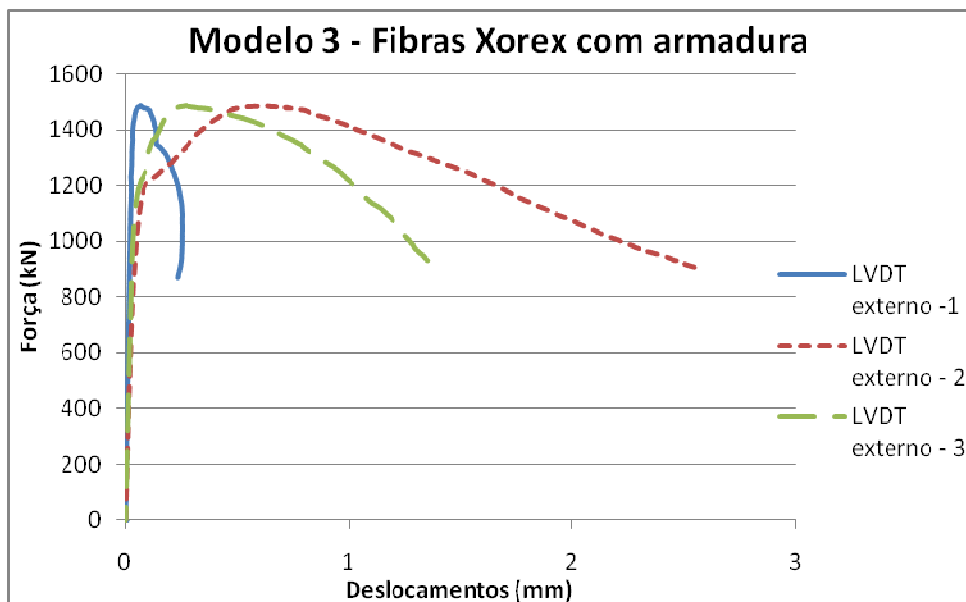
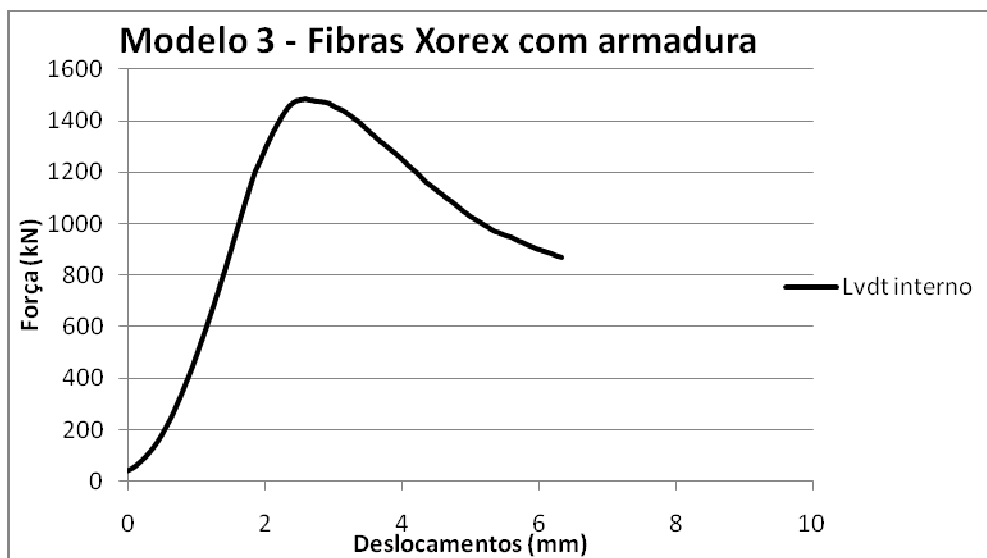


Fig. 5.16 – Diagrama força-deslocamento (transdutor interno e LVDTs externos); aspecto do prisma 3 de BACRF Xorex (com armadura) no final do ensaio

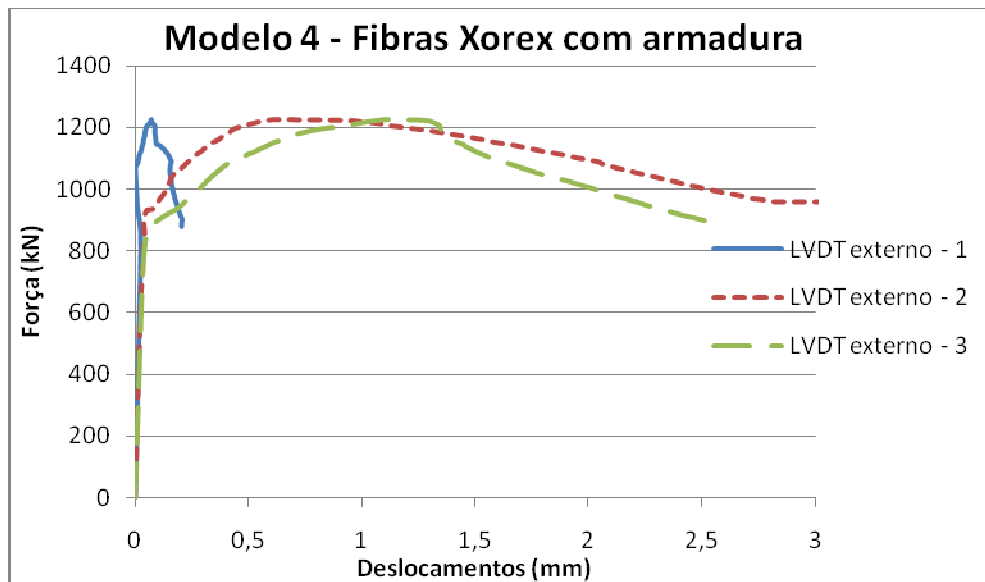
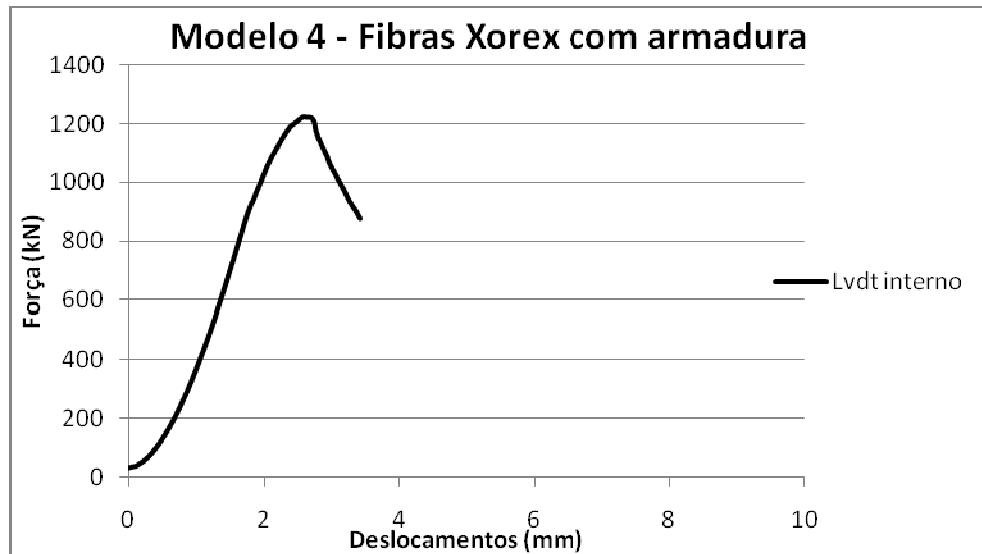


Fig. 5.17 – Diagrama força-deslocamento (transdutor interno e LVDTs externos); aspecto do prisma 4 de BACRF Xorex (com armadura) no final do ensaio

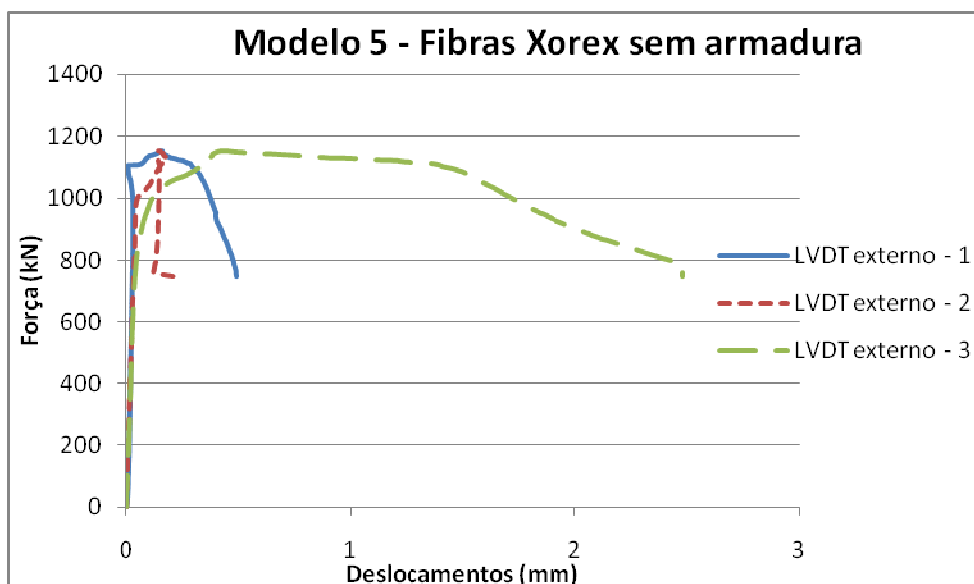
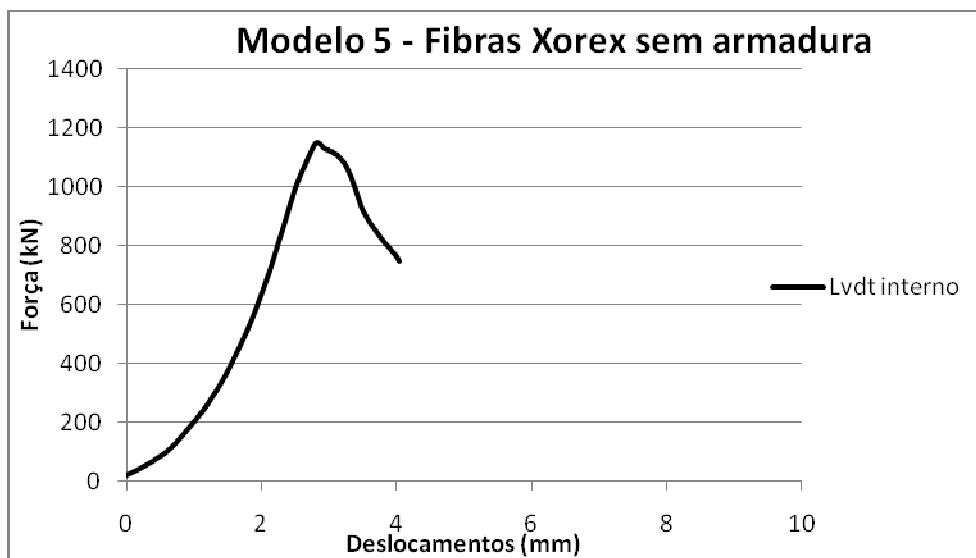


Fig. 5.18 – Diagrama força-deslocamento (transdutor interno e LVDTs externos); aspecto do prisma 5 de BACRF Xorex (sem armadura) no final do ensaio

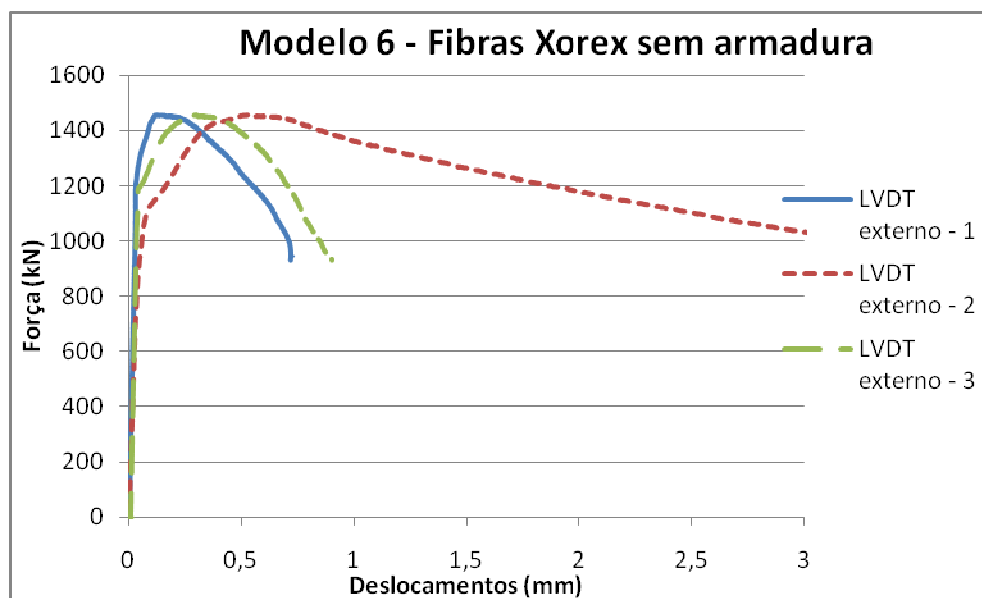
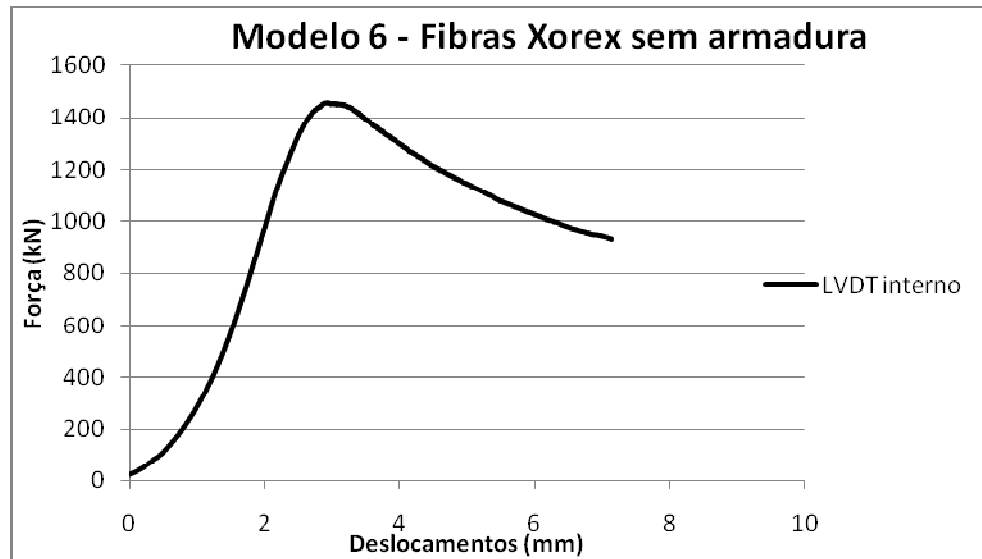


Fig. 5.19 – Diagrama força-deslocamento (transdutor interno e LVDTs externos); aspecto do prisma 6 de BACRF Xorex (sem armadura) no final do ensaio

Pela análise das fotografias, no final dos ensaios, é visível que o principal modo de rotura foi devido à formação de tracções transversais, típicas do fenómeno de “bursting”, por outro lado, mesmo quando a armadura é totalmente retirada, sendo o reforço apenas garantido pelas fibras, a rotura em nenhum dos provetes se processou de uma forma frágil, havendo sempre uma ductilidade instaurada após a abertura das fendas. O ensaio foi concluído quando a abertura das fendas provocava um deslocamento lateral superior ao campo de medida dos LVDT’s externos.

No Quadro 5.1 estão disponíveis os resultados dos ensaios efectuados no que diz respeito à força máxima mobilizada para as composições utilizadas no presente trabalho bem como a sua comparação, em termos de variação percentual, com o modelo de referência sem inclusão de fibras.

Quadro 5.1 – Variação entre os valores de forças máximas para os prismas com fibras e o prisma sem fibras

Tipo de reforço:	Provete 1	Provete 2	Valores médios	Variação
	F _{máx} (kN)	F _{máx} (kN)	F _{máx} (kN)	(%)
Prisma de BAC com 2 x armadura	1754,32	1699,36	1726,84	0
Dramix 60 kg/m ³ com armadura	1583,19	1461,49	1522,34	-11,8
Xorex 60 kg/m ³ com armadura	1486,00	1458,31	1472,15	-14,7
Xorex 60 kg/m ³ sem armadura	1224,93	1153,29	1189,11	-31,1

Como seria de esperar, visto que todos os prismas nos quais se introduziram fibras sofreram uma redução significativa da armadura horizontal, que impede a rotura do elemento, a força máxima suportada pelos mesmos em relação aos prismas sem fibras mas com maior percentagem de armadura é relativamente menor.

No entanto, é possível verificar que mesmo com a eliminação total das armaduras a variação dos valores da força máxima apresenta uma redução de apenas 30%, pelo que a adição de fibras constitui uma boa alternativa em zonas cujas condições de betonagem e colocação das armaduras seja muito difícil; podendo ser considerada apenas como um complemento às armaduras ordinárias substituí-las inteiramente tendo em conta as tensões resistentes necessárias.

5.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Figura 5.20 está representado o diagrama força-deslocamento para um dos modelos produzidos com BAC sem adição de fibras e com o dobro da armadura transversal,

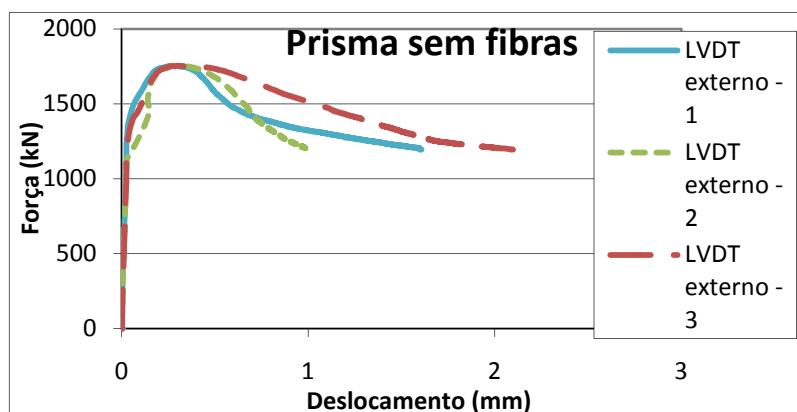


Fig. 5.20 – Diagrama força-deslocamento (LVDT externos) para o prisma sem fibras

Como se pode observar a forma do diagrama é em tudo similar à forma dos diagramas referentes ao BAC com adição de fibras, mesmo quando toda a armadura é retirada.

De forma a estudar as vantagens da adição de fibras nestes modelos, sendo o modo de rotura predominante o de “bursting”, foi calculada a força de tracção exercida na zona crítica pelo carregamento de ensaio (T_{exp}), segundo a abordagem indicada pelo MC90, e comparada com a força resistente total ($T_{R,total}$), que seria de esperar de forma analítica.

O procedimento consistiu primeiramente em calcular a força de tracção na zona crítica, obtida no ensaio através da expressão 5.1. Seguidamente, utilizando a informação da tensão máxima de tracção obtida nos ensaios de flexão sob 3 pontos efectuados no capítulo 4, foi calculada a parcela da força de tracção suportada unicamente pelo betão ($T_{R,betão}$), utilizando a expressão 5.6, e somada com a força resistente da armadura existente na zona crítica ($T_{R,estribos}$), obtida através da expressão 5.7, sendo o resultado da soma denominado força resistente total ($T_{R,total}$). Por último, foi efectuada a diferença entre a força de tracção exercida e a força resistente total. É ainda de referir que se usou o valor médio de resistência do aço, 550 MPa.

O Quadro 5.2 fornece as informações relativas a esse procedimento.

$$T_{R,betão} = f_{ct} \cdot 0,6 \cdot a_0 \cdot a_1 \quad (5.6)$$

$$T_{R,estribos} = A_s \cdot f_{sym} \quad (5.7)$$

Quadro 5.2 – Efeito da inclusão de fibras e armadura na resistência dos modelos estudados

Tipo de reforço	$F_{máx}$ (kN)	T_{exp} (kN)	f_{ctm} (Mpa)	$T_{R,betão}$ (kN)	$T_{R, estribos}$ (kN)	$T_{R,total}$ (kN)	$T_{exp} - T_{R,total}$ (kN)
Prisma de BAC com 2 x armadura	1726,84	310,83	4,68	70,20	155,51	225,71	85,12
Dramix 60 kg/m ³ com armadura	1522,34	274,02	7,88	118,20	77,75	195,95	78,07
Xorex 60 kg/m ³ com armadura	1472,15	264,99	5,86	87,90	77,75	165,65	99,33
Xorex 60 kg/m ³ sem armadura	1189,11	214,04	5,86	87,90	0,00	87,90	126,14

A análise do quadro permite concluir que há uma discrepância entre a força obtida e a força que seria de esperar teoricamente. Esse facto pode ser explicado pelo facto de a análise se basear num modelo simples ou pela dificuldade em caracterizar o valor da resistência à tracção do BACRF, sendo isso francamente evidenciado pela grande flutuação de resultados obtidos no ensaio flexão sob 3 pontos. É ainda possível verificar que para a remoção total das armaduras, as diferenças entre os valores obtidos e esperados é ainda maior, deste modo as expressões propostas deveriam sofrer algumas alterações pela adição das fibras, sendo evidenciado o carácter conservativo do MC90.

No entanto é evidente que a adição de fibras melhora o comportamento de um elemento sujeito a cargas concentradas, não só pela maior ductilidade conferida, como também pela superior resistência mobilizada às tracções transversais resultantes da aplicação dessa carga.

6

Conclusão

6.1. VANTAGENS E CONDICIONANTES DA UTILIZAÇÃO DO BACRF. DIFERENÇAS COMPORTAMENTAIS DEVIDO AO TIPO E DOSAGEM DE FIBRAS.

Neste trabalho foram discutidas as principais vantagens e desvantagens da inclusão de fibras no betão auto-compactável, quer a nível do estado fresco, medindo a alteração provocada nas propriedades mais importantes do BAC, sendo elas a capacidade de enchimento, resistência ao bloqueio e resistência à segregação, quer no estado endurecido, tendo sido estudadas as resistências à compressão e à tracção provocada pela flexão.

6.1.1. ESTADO FRESCO

Foi utilizada uma composição de BAC, que já garantia de antemão a auto-compactibilidade necessária. Foram comparadas as diferenças que a inclusão de fibras de diferentes tipos, formas e dosagens, provocam nos ensaios efectuados cuja função é de garantir que uma composição de betão apresenta as propriedades enumeradas no parágrafo anterior.

As fibras e dosagens utilizadas foram:

- Fibras Dramix (metálicas com gancho na ponta), sendo efectuadas 3 dosagens distintas (20, 40 e 60 kg/m³ de betão);
- Fibras Xorex (metálicas onduladas), sendo igualmente testadas 3 dosagens distintas (30, 40 e 60 kg/m³ de betão);
- Fibras Meyco (plásticas e lisas), inseridas em 2 dosagens (3,07 e 4,6 kg/m³).

Os ensaios efectuados foram o do espalhamento, medindo-se os parâmetros diâmetro de espalhamento e T₅₀₀, o da caixa L e do funil V, que no seu conjunto garantem que uma composição apresenta as características de auto-compactabilidade.

No entanto, devido ao equipamento, nomeadamente a caixa L e o funil V, existente no Laboratório de Estruturas da FEUP ser demasiadamente exigente, no que diz respeito às dimensões para a passagem do betão com fibras, os únicos parâmetros analisados foram os do diâmetro de espalhamento e do T₅₀₀.

Dessa forma foi possível concluir que todas as composições, com excepção das fibras Meyco com uma dosagem de 4,6 kg/m³, respeitam o intervalo de valores aconselhável. Podendo essas composições ser consideradas auto-compactáveis se não existirem exigências de resistência ao bloqueio demasiadamente restritivas.

As diferenças no comportamento dos diferentes tipos e dosagens de fibras no estado fresco são francamente visíveis, não havendo uma relação linear entre o aumento na dosagem de fibras e a variação nos resultados dos ensaios.

Para as fibras Dramix, enquanto para as dosagens mais baixas, os valores dos ensaios são relativamente próximos dos obtidos para a amostra de BAC; para a dosagem mais elevada existe uma grande discrepância entre esses valores. Para as fibras Meyco, enquanto no diâmetro de espalhamento há uma redução gradual quando a dosagem de fibras aumenta; o valor do T_{500} para a maior dosagem de fibras é bastante distinto, relativamente à amostra de referência do que a dosagem mais baixa. Finalmente as fibras Xorex, devido às suas maiores dimensões, modificam de uma forma mais acentuada o betão no estado fresco em todas as dosagens, sendo mesmo para composições com dosagens mais baixas a discrepância mais acentuada relativamente à amostra de referência. Para a dosagem de 60kg/m^3 , as fibras Dramix e Xorex têm uma influência similar no comportamento do BACRF no estado fresco.

6.1.2. ESTADO ENDURECIDO

Relativamente à resistência à compressão, os ensaios efectuados demonstram uma diminuição na força máxima de compressão, relativamente à amostra de BAC, devido à inclusão de fibras. No entanto, o modo de rotura é diferente para esta solicitação, enquanto no betão sem fibras se dá uma rotura não dúctil quando a tensão máxima de compressão é ultrapassada, uma vez introduzidas fibras há um ganho de ductilidade, traduzido pelo maior desenvolvimento do ramo de amolecimento. Sendo as fibras responsáveis pelo efeito ponte quando se abrem as fendas relativas ao carregamento. Por outro lado foi possível observar que para a introdução de fibras Dramix, o aumento de ductilidade foi relativamente proporcional ao aumento de fibras na composição; para as fibras Xorex, o aumento de ductilidade só é significativo para a maior dosagem; e para as fibras Meyco o ganho no desenvolvimento do ramo de amolecimento é semelhante para as duas dosagens.

Relativamente ao ensaio de flexão sob 3 pontos a ductilidade conferida pelas fibras é confirmada pelos ensaios realizados. A tensão máxima de tracção do BACRF é em geral superior à do betão sem fibras, com excepção das misturas que incluem fibras plásticas. Apenas para as dosagens mais elevadas de fibras Xorex e Dramix não houve uma quebra traduzida por um decaimento da força após a abertura da fenda, o que significa que para as restantes composições a dosagem não é suficiente para conferir a ductilidade necessária. Para as fibras plásticas é ainda visível que após a abertura da fenda a força decai e mantém-se quase constante para deslocamentos cada vez maiores, o que dá a informação que estas não têm um bom funcionamento, na medida em que não são suficientes para sustentar a energia libertada aquando da abertura da fenda.

6.1.3. APLICAÇÃO EM ZONAS DE ANCORAGEM DE CABOS DE PRÉ-ESFORÇO

O ensaio dos modelos nos quais se introduziram fibras demonstrou que reduzindo para metade, ou eliminando totalmente a armadura nestas zonas, a diferença entre a carga concentrada máxima que é possível de aplicar, não ultrapassa os 30% relativamente ao modelo de BAC com uma percentagem superior de armadura. Por outro lado, o modo de rotura preferencial de “bursting” não se dá de uma forma brusca, as fibras conferem sempre um ganho de ductilidade aquando da abertura de fendas provocadas por tensões de tracção transversais, sendo a abertura das fendas mais controlada pela presença de fibras.

A tensão de tracção máxima sentida na zona crítica aumenta de uma forma significativa relativamente à que seria de esperar para betão sem qualquer tipo de reforço. No entanto, os resultados obtidos no

ensaio dos modelos foram francamente superiores ao que seria de esperar utilizando a abordagem indicada pelo MC90, o que revela o carácter conservativo desta abordagem, em particular, para o BAC reforçado com fibras.

BIBLIOGRAFIA

- Aagaard, B., Blindheim, O. (1996). *Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support. Proc 2nd Int Symposium on Sprayed Concrete*. Frequently asked questions about sprayed concrete. Answers for the practioner. Em: Barton e R. Kompen (ed), Setembro/1996, Gol, Norway pp.23-26, The Norwegian Concrete Association, Oslo.
- ACI 544 (1993). *Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete*. ACI Materials Journal, Vol, 90, No1,94-101, ACI committee 544.
- AFGC, Setra, (2002). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes. Recommendations provisoires*, Janeiro 2002, Association Française de Génie Civil, Service d'études techniques des routes et autoroutes.
- Aguiar, B., Sousa, B. (2009). *Durabilidade em ambiente marítimo de betões protegidos com pinturas acrílica*. Sítio da Internet (<http://www.engenhariacivil.com/durabilidade-em-ambiente-maritimo-de-betoes-protegidos-com-pinturas-acrilicas>), 20/Março/2010.
- Aydin, A. (2006). *Self Compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials, 20/Novembro/2007, pp.1149-1155, Elsevier Science Ltd.
- Barros, J., Figueiras, J. (1999). *Behaviour of SFRC: Testing and Modeling*. Journal of Materials in Civil Engineering, Novembro/1999, pp.331-339, American Society of Civil Engineers.
- Barros, J., Pereira, E., Santos, S., (2006) *Lightweight of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25/Maio/2006, American Society of Civil Engineers.
- Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., Swamy, R. (2007), *Stress-Strain Behaviour of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25/Junho/2007, pp.255-263, American Society of Civil Engineers.
- BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO, (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, production and use*. Maio/2005.
- Bloom, C. (2002). *Design Philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils*. Delft University, Delft: DUP Science.
- CEN (2007) European Standard EN 14651 *Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual*. European committee for standardization.
- Choulli, Y. *Et. Al* (2005), in “III Congreso de Puentes y Estructuras de Edificación de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural”, Zaragoza, Spain.
- Cunha, V., Barros, J., Sena-Cruz, M. (2008). *Pull-out Behaviour of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete*, Journal Of Materials in Civil Engineering, 26/Março/2009, pp.1-9, American Society of Civil Engineers.
- Dhonde, H., Mo, Y., Hsu, T. (2005). *Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams*. Technical Report FHWA/TX-06/o-4819-1 [Versão electrónica], Department of Civil & Environmental Engineering, University of Houston, Houston.
- Ding, Y., Zhang, Y., Thomas, A. (2007). *The investigation on strength and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete*. Construction and Building Materials, 6/Novembro/2007, pp.448-452, Elsevier Science Ltd.

Dupond, D. (2003). *Modelling and experimental validation of the constitutive law and cracking behaviour of fiber reinforced concrete*, Katholieke Universiteit Leuven, 2003.

Empelmann, M., Wichers, M. (2010) *Concentrated loading problems specific design and construction issues*. in Structural Engineering. Developments and Need for International Practice. Topic 3.6: Shear (Joint IABSE – fib conference), 3-5 Maio 2010, Croácia, pp.951-958, Dubrovnik.

Ezeldin, A., S., Balaguru, P., N., (1992). *Normal and high-strength fiber reinforced concrete under compression*. ACI Struct. J., pp.415-429.

Fantilli, A., Mihashi, H., Vallini, P. (2009). *Multiple cracking and strain hardening in fiber-reinforced concrete under uniaxial tension*, Cement and Concrete Research 19/Agosto/2009, pp.1217-1229, Elsevier Science Ltd.

Fernandes, M (2006), *Mecânica dos Solos volume II*, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

Ferrara, L., Park, Y., Shah, S. (2007). *A method for mix-design of fiber reinforced self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 28/Março/2007, pp.957-971, Elsevier Science Ltd.

Ferreira, M. (2008). *Influência das Características das Fibras no Desempenho do Betão*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Figueiras, H. (2006). *Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável. Aferição das suas características mecânicas e durabilidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Figueiras, J. Capítulo 5-Dimensionamento de zonas de elementos sujeitas a forças concentradas – zonas de amarração dos cabos. In *Apontamentos da cadeira de Estruturas Pré-esforçadas*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Grünewald, S. (2004). *Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete*. Dissertação de Doutoramento, Delft University, Delft: DUP Science.

Grünewald, F., Ferrara, L., Dehn, F. (2010). *Fib Task Group Structural Design with flowable Concrete*. Codes in Structural Engineering. Developments and Need for International Practice. Topic 3.3: Future Developments – High Performance Materials (Joint IABSE – fib conference), 3-5 Maio 2010, Croácia, pp.1333-1340, Dubrovnik.

IPQ (2003) NP EN 12390 2 *Ensaio do betão endurecido*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2004) EN 1992 1 1 Eurocódigo 2 *Projecto de estruturas de Betão*, Abril 2004, Caparica, Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2009a) NP EN12350 8 *Betão Auto-Compactável Ensaio do diâmetro de espalhamento*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2009b) NP EN 12350 9 *Betão Auto-Compactável Ensaio do Funil-V*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2009c) NP EN 12350 10 *Betão Auto-Compactável Ensaio da Caixa L*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2009d) NP EN 12350 11 *Betão Auto-Compactável Ensaio da resistência à segregação*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2009e) NP EN 12350 12 *Betão Auto-Compactável Ensaio do Anel J*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

- Iskhakov, I., Ribakov, Y., (2007) *Two-layer prestressed beams consisting of normal and steel fibered high strength concrete*. Materials & Design, 22/Outubro/2007, pp.1616-1622, Elsevier Science Ltd.
- Jo, B.-W., (2001). *The evaluation of Elastic Modulus for Steel Fiber Reinforced Concrete*, Roussian Journal of Non-destructive testing. Vol.37, 2001, pp.152-161, Original Russian Text Copyright.
- Johnston, C.D. (1996). *Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, Production Methods and Workability of Concrete*, pp.155-179, Bartos, Marrs and Cleland E&FN Spon London.
- König, G., Kützing, L. (1999). *Modelling the increase of ductility of HPC under compressive forces – a fracture mechanical approach*, Proceedings of the Third International RILEM Workshop ‘High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites’, 1999, pp.251-260.
- Kooiman, A. (1996). *Staalvezelbeton in de linings van boortunnels, een state-of-the-art*, Stevin-Report Departement of Structural and Building Engineering, Delft University of Technology.
- Kwon, S., Ferron, R., Akkaya, Y., Shah, S. (2007) *Cracking of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete due to Restrained Shrinkage*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 20/Dezembro/2007, pp.3-9.
- Lecointre, D., Calgaro, J., A., (2010). *Spreading of Concentrates loads Prestressing Forces and Forces in Bearing Zones*. Codes in Structural Engineering. Developments and Need for International Practice. Topic 3.6: Shear (Joint IABSE – fib conference), 3-5 Maio 2010, Croácia, pp.943-950, Dubrovnik.
- Li, V. (2002). *Large volume, high performance applications of fibers in civil engineering*, Journal of Applied Polymer Sciences, pp.660-668, Vol.83, John Wiley & Sons, Inc.
- Maidl, B. R. (1995). *Steel Fiber Reinforced Concrete*, Ernst Sohn, Berlin, ISBN: 3433012881.
- Minelli, F., Plizzari, G. (2010). *Including Fiber Reinforced Concrete into Design Codes: Structures Undergoing Shear Loading*. Codes in Structural Engineering. Developments and Need for International Practice. Topic 3.6: Shear (Joint IABSE – fib conference), 3-5 Maio 2010, Croácia, pp.919-926, Dubrovnik.
- Nunes, S. (2008). *Performance-based design of a self-compacting concrete (SCC): a contribution to enhance SCC mixtures robustness*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pereira, E., Barros, J., Camões A. (2007). *Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete: Experimental Research and Numerical Simulation*. Journal of Structural Engineering, Agosto/2008, pp.1310-1319, American Society of Civil Engineers.
- RILEM (2002). *TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Design of steel fibre reinforced concrete using the w- σ method: principles and applications*. Materials and Structures, vol.35, Junho/2002, pp.262-278, Rilem Publications.
- Roesler, J., Lange, D., Altoubat, S., Rieder, K., Ureich, G. (2004). *Fracture of Plain and Fiber Reinforced Concrete Slabs under Monotonic Loading*. Journal of Materials in Civil Engineering, 1/Outubro/2004, pp.452-460, American Society of Civil Engineers.
- Sanjuán, M., Moragues, A. (1996). *Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes: optimization to control plastic shrinkage*, Composites Science and Technology, 5/Dezembro/1996 pp.655-660, Elsevier Science Limited, Irlanda do Norte.

- Santos, S. (2008). *The Bending and Shear Behaviour of Laminar Structures of High Performance Fiber Reinforced Concrete*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.
- Sato, Y., Van Mier, J.G.M., Walraven, J.C. (2000). *Mechanical characteristics of multi-modal fiber-reinforced cement based composites*, BEFIB 2000, Rossi e Chanvillard, Fifth Int. RILEM Symposium, pp.791-800, Rilem Publications PRO 15.
- Soroushian, P., Lee, C.-D. (1990). *Distribution and orientation of steel fibers in steel fiber reinforced concrete*, Materials Journal, Setembro/1990, pp.433-439, American Society of Civil Engineers.
- Sousa, H., Dimande, A., Rodrigues, C., Henriques, A., Figueiras, J. (2009) "*MENSUSMONITOR – Programa informático de tratamento e interpretação de resultados experimentais*." RPEE – Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, nº6, pg 55-64.
- Torrijos, M., Barragán, B., Zerbino, R. (2009). *Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes*. Construction and Building Materials, 18/Novembro/2009, pp.1-8, Elsevier Science Ltd.
- Vandewalle, L., di Prisco, M., Plizzari, G. (2010) *Fiber Reinforced Concrete in the New FIB Model Code*. Codes in Structural Engineering. Developments and Need for International Practice. Topic 3.3: Future Developments – High Performance Materials (Joint IABSE – fib conference), 3-5 Maio 2010, Croácia, pp.1325-1332, Dubrovnik.
- Vandewalle, L., Dupont, D. (2003). *Bending Test and Interpretation, Test and Design Methods for Steel Fibre reinforced Concrete – Background and Experiences*, 2003, pp.1-14, RILEM publication PRO 31.
- Vandewalle, M. (1998). *The use of steel fibre reinforced shotcrete for the support of mine openings*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Junho, pp.113-120, The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Wang, H., Belarbi. *Flexural Behaviour of Fiber-Reinforced-Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars*.