

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS NO DESEMPENHO DO BETÃO

NUNO FILIPE MESQUITA FERREIRA

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

Orientador: Professora Ana Maria Quintela da Silva Proença Correia de
Queirós

SETEMBRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

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 minha família

Logic will get you from A to B. Imagination will take you everywhere.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado nesta tese tem a sua génese nas aulas da disciplina de Processos de Construção da Especialização em Materiais e Processos de Construção do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, como resposta a novos métodos de construção onde a selecção do tipo de material é crucial para garantir o desempenho esperado e o compromisso económico que é sempre imposto à Engenharia Civil. Pretende-se, acima de tudo, impulsionar o estudo dos betões reforçados com fibras. Uma pequena parte do trabalho iniciou-se em Agosto de 2007 no Departamento de Estruturas da NTNU – Norwegian University of Science and Technology – com posterior desenvolvimento na Secção de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da FEUP a partir de Janeiro de 2008.

Primeiramente agradeço à Engenheira Ana Maria Proença por me ter dado a oportunidade em trabalhar nesta descoberta, por todas as valiosas conversas, e pela forma singela que encara o mundo dos trabalhos em betão. Seguramente vou guardar comigo todos os seus ensinamentos. Estendo os meus agradecimentos a Amund Brulland, Terje Kanstad e Sindre Sandbakk da Norwegian University of Science and Technology pela disponibilidade que mostraram durante a mobilidade Erasmus.

Um agradecimento institucional ao LEMC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção –, ao Fernando, ao Manuel e à Patrícia por todo o empenho. A todos os meus colegas de curso, em especial aos colegas de opção, e à Sra. D. Maria Teresa pela incansável disponibilidade que tem por todos nós.

Last but not least à minha família pelo carinho e apoio.

RESUMO

O principal intento deste trabalho de investigação é o de aumentar o conhecimento actual dos aspectos relacionados com o uso e aplicação do BRF (Betão Reforçado com Fibras), sobretudo do BRFA (Betão Reforçado com Fibras de Aço) em obras de construção civil.

O objectivo específico consiste em avaliar a influência que as fibras de aço com a mesma designação comercial e, portanto, aprioristicamente iguais segundo os fabricantes, têm no desempenho do betão. Uma metodologia que permita aceder a esse comportamento será desenvolvida, tanto a nível de ensaio de arrancamento de uma única fibra, como a nível de ensaios onde se possam retirar informações sobre o efeito das fibras no betão endurecido – ensaios de absorção de energia em placa quadrada – e ensaios que possam de alguma forma retratar os mecanismos de transporte de agentes agressivos no betão.

Desta forma, a primeira parte do trabalho faz um ponto de situação sobre os conhecimentos actuais em termos de BRF, através da apresentação de *case studies* e da estrutura interna do betão com fibras. A influência das características das fibras no desempenho no betão é conseguida através de ensaios *pullout*, ensaios de absorção de energia em placa quadrada e ensaios de durabilidade, compreendendo assim a segunda parte do trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: betão reforçado com fibras de aço, ensaios de arrancamento, betão projectado, absorção de energia, durabilidade, fibras.

ABSTRACT

The driving force of this work is to provide further knowledge in some of the issues concerning the use of FRC (Fibre Reinforced Concrete), especially SFRC (Steel Fibre Reinforced Concrete) in civil engineering applications.

The specific objective consist in evaluate the influence that steel fibres, with the same commercial designation and, that are aprioristically the same concerning the manufacturers; have in terms of concrete performance. A tactic to assess how this affects the mechanical behaviour of SFRC is developed using pullout tests, energy absorption plate tests and permeability related tests to rate at which water or other aggressive substance can penetrate concrete.

Therefore the first part of the work consists of a literature review of some case studies within the scope of construction related applications and the internal structure of FRC which is fibre-matrix dependent, and the second part assess the influence that steel fibres properties have in concrete performance trough experimental work making use of single-fibre pullout tests, energy absorption plate tests and durability related tests.

KEYWORDS: steel fibre reinforced concrete, fibre pullout tests, sprayed concrete, energy absorption, durability, steel fibres.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. TEMÁTICA	1
1.2. ÂMBITO, OBJECTIVOS E LIMITAÇÕES DA INVESTIGAÇÃO	3
1.3. ESTRATÉGIA E CARACTERÍSTICAS ORIGINAIS	4
1.4. ORGANIZAÇÃO	4
2. APLICAÇÃO DAS FIBRAS EM ENGENHARIA CIVIL	7
2.1. APLICAÇÃO DAS FIBRAS EM BETÃO	8
2.2. CASOS DE ESTUDO DE APLICAÇÕES DAS FIBRAS DE AÇO EM BETÃO	12
2.2.1. REGIÕES SUJEITAS A CARGAS CONCENTRADAS	12
2.2.1.1 Pré-Esforço por Pré-Tensão em Vigas I	13
2.2.1.2 Pré-Esforço por Pós-Tensão em Vigas Caixaõ	17
2.2.2. REVESTIMENTO DE TÚNEIS E GALERIAS	19
2.2.2.1. Revestimento para túneis em betão projectado com fibras de aço.....	21
2.2.2.1.1 Evidência do lining de betão projectado com fibras vs. outros materiais	27
2.2.2.2. Segmentos de betão prefabricado reforçado com fibras de aço para escavação com máquinas integrais	30
3. ESTRUTURA DO BETÃO COM FIBRAS	35
3.1. INTRODUÇÃO.....	35
3.2. ESTRUTURA DA MATRIZ CIMENTÍCIA E INTERFACE FIBRA-MATRIZ.....	35
3.2.1. ESTRUTURA DA MATRIZ CIMENTÍCIA	35
3.2.2. INTERFACE FIBRA-MATRIZ.....	36
3.2.3. MECANISMOS DE REFORÇO DA INTERFACE ATRAVÉS DE ADIÇÕES	38
3.3. NATUREZA, SECÇÃO, FORMA E SUPERFÍCIE DA FIBRA.....	43
3.3.1. MECANISMOS DE REFORÇO DA LIGAÇÃO FIBRA-MATRIZ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DA SECÇÃO, FORMA E SUPERFÍCIE DA FIBRA	46

3.3.1.1. Fibras sintéticas	46
3.3.1.2. Fibras metálicas	46
4. PRINCIPIOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE BRFA	51
4.1. INTRODUÇÃO.....	51
4.2. ENSAIO DE FLEXÃO – MÉTODO σ - ϵ	52
4.2.1. LIMITE DE PROPORCIONALIDADE	54
4.2.2. TENSÃO RESIDUAL À TRACÇÃO POR FLEXÃO	54
4.2.3. PRINCÍPIOS DE DIMENSIONAMENTO	55
4.3. MODELO ANALÍTICO SIMPLIFICADO	56
5. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	59
5.1. INTRODUÇÃO.....	59
5.2. COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO – <i>SINGLE FIBRE PULLOUT TESTS</i>	60
5.2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	63
5.2.1.1. Composição da amassadura.....	63
5.2.1.2. Caracterização das fibras	64
5.2.2. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO	65
5.2.3. RESULTADOS	66
5.2.4. DISCUSSÃO	67
5.3. ENSAIOS EM BETÃO COM FIBRAS	70
5.3.1. CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL DAS FIBRAS UTILIZADAS.....	71
5.3.2. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO	74
5.3.3. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA.....	77
5.3.3.1. Configuração do Ensaio.....	77
5.3.3.2. Resultados	78
5.3.3.2.1 Absorção de energia em placas – Betão Projectado	78
5.3.3.2.2 Absorção de energia em placas – Betão Cofrado	81
5.3.4. CONTEÚDO EM FIBRAS DO BETÃO PROJECTADO	84
5.3.5. ENSAIOS DE DURABILIDADE	85
5.3.5.1. Betão projectado	85
5.3.5.2. Betão cofrado	86

5.3.5.2.1 Absorção de água por capilaridade	86
5.3.5.2.2 Absorção de água	88
5.3.5.2.3 Penetração de água sob pressão	89
5.3.5.2.4 Permeabilidade ao oxigénio	90
5.3.5.2.5 Carbonatação	90
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	91
6.1. ANÁLISE DAS FIBRAS.....	91
6.1.1. COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO	91
6.1.2. CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL	91
6.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO BETÃO PROJECTADO.....	92
6.2.1. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA	92
6.2.2. COMPORTAMENTO DAS FIBRAS DURANTE A PROJECCÃO	92
6.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO BETÃO COFRADO.....	92
6.3.1. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA	92
6.4. ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	93
6.4.1. BETÃO PROJECTADO	93
6.4.2. BETÃO COFRADO	93
6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Ponte da Paz, Seoul. Ponte pedonal em betão de ultra elevado desempenho Ductal®.....	8
Fig. 2.2 <i>Taxiway</i> em betão reforçado com fibras de aço no aeroporto internacional John F. Kennedy.....	9
Fig. 2.3 Colapso de pilar de viaduto no terramoto em Northridge, Califórnia.....	12
Fig. 2.4 Viga em I pré-esforçada - pré-tensão	13
Fig. 2.5 Distribuição das tensões de tracção na região de extremidade	14
Fig. 2.6 Fendilhação de extremidade em viga I pré-esforçada	15
Fig. 2.7 Armadura de extremidade de uma viga I pré-esforçada	15
Fig. 2.8 Exemplo do pré-esforço por pós-tensão na construção por segmentos	18
Fig. 2.9 Exemplo do correcto funcionamento e avaria da zona de ancoragem.....	19
Fig. 2.10 Arena Olímpica Gjøvik - Noruega	20
Fig. 2.11 Métodos de construção de túneis mais apropriados em função de cada tipo de solo	20
Fig. 2.12 Métodos de escavação de túneis em função da resistência à compressão do terreno.....	21
Fig. 2.13 Ábaco para a determinação da categoria do suporte definitivo com classes de absorção de energia ...	23
Fig. 2.14 (a) Q/vão vs. deformação radial e convergências para túneis e galerias (b) registos de várias obras subterrâneas na República da China.....	25
Fig. 2.15 (a) configuração do ensaio de absorção de energia segundo a EN 14488-5; (b) esquema de rotura em ensaio de absorção de energia em placa redonda ASTM C-1550.....	25
Fig. 2.16 Curva carga-deformação para ensaio de absorção de energia em placa quadrada.....	26
Fig. 2.17 Comparação de revestimento a betão projectado e malha electrosoldada (a) vs. lining de betão projectado com fibras (b).....	27
Fig. 2.18 Carga máxima e absorção de energia – Paineis EFNARC	28
Fig. 2.19 Curvas carga vs deslocamento – ensaios á flexão sobre prismas.....	28
Fig. 2.20 Comportamento em fluência de macro fibras sintéticas e de aço, resultados e configuração.....	29
Fig. 2.21 Curva de reacção do solo e curva característica do suporte sem fluência significativa e com fluência ..	30
Fig. 2.22 Actuação dos macacos.....	31
Fig. 2.23 Vários tipos de juntas entre segmentos ou anéis	32
Fig. 2.24 Terminologia do revestimento	32
Fig. 2.25 Padrões de delaminação (spalling) em segmentos	33
Fig. 2.26 a) Segmento solicitado por 5 macacos; b) curvas carga vs. deslocamento obtidas de segmentos com betão simples e betão armado mais inclusão de fibras	34
Fig. 2.27 Distribuição da fissuração em túneis escavados com recurso a TBM (com escudo).....	34
Fig. 3.1 Zona de transição interfacial (ZTI).....	36
Fig. 3.2 A zona de transição no betão reforçado com fibras de aço	37

Fig. 3.3 Perfil de microdureza na zona de transição interfacial de pastas de cimento com diferentes razões a/c .	38
Fig. 3.4 Perfil de microdureza no estado fresco para a zona de transição interfacial de pastas de cimento com fibras sujeitas a diferente processamento	38
Fig. 3.5 Representação esquemática de um ensaio pull-out.....	39
Fig. 3.6 Representação esquemática do agrupamento das partículas na interface no caso da fibra embebida em matriz cimentícia convencional e na matriz DSP	41
Fig. 3.7 Representação gráfica da carga vs. deslocamento traduzindo o efeito do tipo de matriz no comportamento ao arrancamento das fibras de aço em matrizes cimentícias.....	42
Fig. 3.8 Observações a MEV da superfície da fibra sob várias condições	43
Fig. 3.9 Processos de absorção de energia em betão reforçado com fibras.....	44
Fig. 3.10 Curva tensão-extensão em BRF e em compósito cimentício reforçado com fibras de elevado desempenho	45
Fig. 3.11 Geometria da fibra sintética frisada.....	46
Fig. 3.12 Perfis típicos de fibras de aço usadas em betão	46
Fig. 3.13 Comportamento ao arrancamento de fibras de aço embebidas em betão.....	48
Fig. 3.14 Ensaio de arrancamento e ensaio à flexão. comparação entre fibras lisas, com gancho e torcidas	49
Fig. 4.1 Ensaio de flexão – flexão em 3 pontos com controlo deslocamento (abertura de fenda)	52
Fig. 4.2 Ensaio de flexão – flexão em 3 pontos com controlo de deslocamento (deformação do eixo neutro).....	52
Fig. 4.3 Curva carga vs. CMOD	53
Fig. 4.4 (a) Relação tensão-extensão; (b) factor de escala.....	55
Fig. 4.5 Relação entre α e η_0 numa secção de betão com fibras	57
Fig. 5.1 Parâmetros que determinam o desempenho do Betão	60
Fig. 5.2 Arrancamento de uma fibra lisa	61
Fig. 5.3 Arrancamento de uma fibra com gancho	61
Fig. 5.4 Exemplos de configurações para ensaio de arrancamento	62
Fig. 5.5 Aspecto do betão C35/45	63
Fig. 5.6 Configuração: a) construção do provete; b) ensaio exibindo fixadores, dispositivo de amarração da fibra e dois LVDT.....	65
Fig. 5.7 Evolução da tensão na fibra com a resistência do betão	68
Fig. 5.8 Representação da tensão média vs. deslocamento para a fibra Barchip	68
Fig. 5.9 Representação da tensão média vs. deslocamento para a fibra Dramix.....	69
Figura 5.10 Efeito do gancho; (a) arrancamento com 1/6 do comprimento da fibra embebido na matriz; (b) arrancamento da fibra sem gancho.....	70
Fig. 5.11 Fibras de aço estirado a frio utilizadas no trabalho experimental.....	72

Fig. 5.12 Fibras de aço estirado a frio utilizadas no trabalho experimental. (a) tipo de agrupamento; (b) detalhe da zona do gancho	73
Fig. 5.13 Ensaio de espalhamento	75
Fig. 5.14 Ensaio L-BOX; (a) caixa-L utilizada; (b) resistência ao bloqueio	76
Fig. 5.15 Esquema das medições que são realizadas	76
Fig. 5.16 Equipamento utilizado na realização nos ensaios sobre placas quadradas	77
Fig. 5.17 Provetes 54BP – 30 kg/m ³ de fibras tipo E.....	79
Fig. 5.18 Provetes 55BP – 30 kg/m ³ de fibras tipo D	79
Fig. 5.19 Provetes 113BC – 30 kg/m ³ de fibras tipo E	82
Fig. 5.20 Provetes 111BC – 30 kg/m ³ de fibras tipo D	82
Fig. 5.21 Rotura por corte e punção da placa 112BP1 e 112BP2	82
Fig. 5.22 Rectas de regressão para a curva de absorção capilar – primeiras 4.5h.....	87
Fig. 5.23 Rectas de regressão para a curva de absorção capilar – intervalo 4.5h-96h.....	88
Fig. 5.24 Provetes após determinação da frente de carbonatação	90

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 Razões para aplicação de BRFA nos diversos tipos de estruturas	9
Quadro 2.2 Modos de rotura de membros estruturais e melhoria no rendimento pela adição de fibras	11
Quadro 2.3 Composições optimizadas e propriedades recomendadas	17
Quadro 2.4 A construção de túneis na Noruega.....	22
Quadro 2.5 Características especiais do betão projectado com fibras.....	24
Quadro 2.6 Classes de energia de absorção para ensaios em placas quadradas.....	26
Quadro 2.7 Exemplos de casos de uso de segmentos prefabricados.....	33
Quadro 3.1 Influência das adições no comportamento ao ensaio <i>pullout</i>	40
Quadro 3.2 Consequências da optimização da secção.....	47
Quadro 5.1 Programa experimental para ensaio <i>pullout</i> sobre fibra isolada	63
Quadro 5.2 Composição dos betões utilizados no estudo.....	64
Quadro 5.3 Características das fibras.....	65
Quadro 5.4 Sumário dos resultados dos ensaios $\text{pullout } I_b = I_f/2$	66
Quadro 5.5 Efeito do gancho.....	70
Quadro 5.6 Programa experimental para os ensaios em betão com fibras – capacidade de absorção de energia.....	71
Quadro 5.7 Programa experimental para os ensaios em betão cofrado com fibras – mecanismos que contribuem para o transporte de agentes agressivos.....	71
Quadro 5.8 Características das fibras E, M e D.....	72
Quadro 5.9 Valores declarados e valores médios de uma amostra de 30 fibras	73
Quadro 5.10 Desvios entre valor médio e valor declarado e conformidade com as tolerâncias da EN 14489	74
Quadro 5.11 Características das amassaduras.....	74
Quadro 5.12 Dados do betão fresco	75
Quadro 5.13 Dados do betão endurecido.....	77
Quadro 5.14 Absorção de energia em placas de betão projectado com fibras de aço.....	78
Quadro 5.15 Aspecto das placas de betão projectado com fibras de aço.....	80
Quadro 5.16 Absorção de energia em placas de betão moldado com fibras de aço	81
Quadro 5.17 Aspecto das placas de betão cofrado com fibras de aço.....	83
Quadro 5.18 Resistência à compressão em carotes.....	84
Quadro 5.19 Determinação do conteúdo em fibras em carotes retiradas de placas de betão projectado.....	84
Quadro 5.20 Determinação da absorção de água e volume de vazios seguindo ASTM C 642.....	86
Quadro 5.21 Valores médios do K_{cap} para os diferentes provetes	87

Quadro 5.22 Determinação dos valores da absorção de água.....	88
Quadro 5.23 Determinação dos valores da absorção de água, segundo E 394-1994.....	89
Quadro 5.24 Determinação dos valores da penetração de água sob pressão.....	89

1

INTRODUÇÃO

1.1 TEMÁTICA

Há milhares de anos que o Homem utiliza materiais compósitos. Os tijolos de barro e o betão são ambos materiais compósitos. O barro é facilmente partido por flexão na sequência de tensões de tracção instaladas, no entanto é um bom material para, por exemplo, paredes, onde as forças resultantes do sistema estrutural são de compressão. A palha, por outro lado, apresenta resistências elevadas quando se tenta traccionar, mas quase nenhuma quando se tenta flectir. Combinando as valências de ambos os materiais, isto é, incorporando palha num bloco de barro e deixando secar até enrijecer, o barro resultante resistirá tanto à compressão como à tracção, constituindo-se como um óptimo material.

No betão, um dos materiais mais versáteis no domínio da construção civil, o agregado é aglutinado através de ligante hidráulico como, por exemplo, o cimento. O mesmo princípio se aplica aqui para tornar o betão resistente à tracção, através da incorporação de diversos materiais metálicos, como por exemplo varões de aço, fios, malhas, cabos ou mesmo fibras sejam elas metálicas ou de outra natureza.

Se desde a civilização egípcia se faz uso das fibras para reforçar materiais frágeis e.g. palha e crinas de cavalo incorporados em barro, faz todo o sentido explorar o domínio dos compósitos reforçados com fibras, mas sobretudo dos compósitos cimentícios reforçados com fibras. (Li, 2002).

O desenvolvimento recente do betão reforçado com fibras (BRF) inicia-se em:

- 1960 – fibras de aço;
- 1970 – fibras poliméricas;
- 1980 – fibras de vidro
- 1990 – fibras de carbono

O uso do betão com fibras pode ser efectuado utilizando:

- fibras aleatoriamente dispersas na matriz cimentícia;
- malha contínua usada em elementos finos.

Tendo em conta que mundialmente o uso das fibras está estimado em 300 000 toneladas por ano, com tendência a aumentar, o BRF representa apenas uma pequena fracção do total de betão usado pelo sector da construção (Li, 2002).

O betão reforçado com fibras de aço (BFRA) pode substituir completamente o betão armado nas estruturas em que o nível de *reliability* exigido seja relativamente baixo, como lajes apoiadas em solo, fundações e paredes. Já em estruturas em que se exige capacidade de carga significativa, o BRFA pode ser usado em combinação com o reforço convencional, isto é, diminuindo a necessidade em utilizar armaduras convencionais ou de pré-esforço (Kanstad, 2004).

As obras de construção civil tornam-se cada vez mais dispendiosas, sendo que uma parcela advém da dificuldade em encontrar operários que se sujeitem ao trabalho árduo da dobragem e colocação das armaduras, e outra resultante do custo crescente dos materiais. Assim parte do empreiteiro a iniciativa de encontrar soluções que diminuam os custos sem perda de qualidade. O custo do reforço, seja em armadura convencional ou outra, é grande parte do custo total dos trabalhos em betão, pelo que a optimização deste parâmetro passa, por exemplo, pela substituição parcial dos varões de aço por fibras de aço. A influência positiva encontra-se tanto no esforço físico dos operários que é diminuído, no decréscimo nas horas-operário que os trabalhos de dobragem e colocação de armadura exigem bem como na capacidade de industrialização na construção que o reforço com fibras oferece. Daqui resultará certamente uma solução mais eficiente economicamente.

Atente-se ainda na combinação entre BRFA e Betão Auto Compactável (BAC) que pode oferecer enormes possibilidades na mecanização e na automatização dos processos de construção, que para além de reduzir o número de operários aumenta também a qualidade. (Linnestad, 2004; Kanstad, 2004; Lofgren, 2005).

Sob um ponto de vista estrutural, o desempenho à fractura com BRFA sai melhorado como resultado de uma distribuição da fendilhação mais favorável, tanto em abertura de fendas como em espaçamento entre elas, bem como um aumento na resistência à flexão. Em termos de estado limite último obtém-se maior carga máxima e, para roturas por esforço transversal e ao punçoamento, existe um melhoramento na ductilidade (Löfgren, 2005).

As fibras de aço têm provado que podem melhorar o comportamento de vigas e lajes tanto em estado de serviço bem como em aplicações estruturais (estado limite último), no entanto, a utilização do BFRA para fins estruturais encontra-se limitada na Europa, muito devido à falta de regulamentos nacionais ou europeus para este material (Vandewalle, 2004). A natureza deste material limita a sua aplicação, em grande parte devido ao seu comportamento pós-fendilhação da relação carga – deslocamento que é influenciado pela presença das fibras, já que a maioria das ferramentas e métodos de cálculo utilizadas nos processos de dimensionamento mais comuns apenas tomam em consideração o comportamento pré-fendilhação (tipicamente módulo de Young e resistência à compressão) (Kanstad, 2004; Vandewalle, 2004). Mesmo os métodos de teste i.e ensaios correntemente aplicados a estruturas de betão reforçadas convencionalmente, não revelam a informação que permita caracterizar este material. Assim requerem-se parâmetros efectivamente característicos deste material que não índices de tenacidade adimensionais ou parâmetros de resistência à flexão que acabam por ser dependentes do tamanho do provete (efeito de escala). Apenas a mecânica da fractura não-linear pode ser a abordagem que enquadra tanto o ensaio físico como a análise estrutural. Para o BRF, os parâmetros de fractura podem ser descritos pela relação tensão - abertura de fendas ($\sigma-w$). Contudo é

fundamental que exista uma forma fidedigna de avaliar esta relação mediante ensaios apropriados que permitam assim a inclusão destas propriedades no dimensionamento do BRF (Löfgren, 2005; Vandewalle, 2004).

1.2 ÂMBITO, OBJECTIVOS E LIMITAÇÕES DA INVESTIGAÇÃO

O principal intento deste trabalho de investigação é o de aumentar o conhecimento actual dos aspectos relacionados com o uso e aplicação do BRF, sobretudo do BRFA em obras de construção civil de índole industrial e especial. O aparecimento no mercado de fibras de aço com a mesma designação comercial oriundas de diferentes fabricantes e, segundo os mesmos, com características semelhantes suscita que seja efectuada uma pesquisa sobre a equivalência no seu desempenho. Uma metodologia que permita aceder a esse comportamento será desenvolvida, tanto a nível de ensaio de arrancamento de uma única fibra, como a nível de ensaios onde se possam retirar informações sobre o efeito das fibras no betão endurecido.

O objectivo deste trabalho consiste em avaliar a influência que as fibras de aço de diferentes fabricantes, com a mesma designação comercial, têm no desempenho do betão com fibras.

Está fora do âmbito deste estudo a comparação entre betão com fibras e betão sem fibras.

O trabalho está limitado, sobretudo ao betão reforçado com fibras de aço, que exiba comportamento de amolecimento à tracção – *strain softening* –, em aplicações industriais e de obras especiais. O programa experimental sujeitou as peças a carregamentos monotónicos com deformação imposta controlada no caso do ensaio de absorção de energia e as fibras ao ensaio de arrancamento; apenas o comportamento a curto prazo foi estudado (aspectos de fluência e retracção não foram considerados). Alguns ensaios de durabilidade foram efectuados.

Embora se apresente um estudo do comportamento ao arrancamento dos diferentes tipos de fibras, efectuado em mobilidade do autor, em parceria com Sandbakk (2007), ao abrigo do programa Erasmus na Norwegian University of Science and Technology (NTNU) e SINTEF Building and Infrastructure, esse não é devidamente estendido na Faculdade de Engenharia, por dificuldades técnicas a nível de equipamento de ensaio de materiais.

Ainda que se reconheça a combinação proveitosa resultante do ensaio de materiais com a mecânica da fractura não linear (MFNL), apenas a parte da experimentação, possível de realizar em tempo útil e nas condições laboratoriais presentes, se encontra efectuada. Ensaios envolvendo a fractura como o ensaio de separação de cunha (WST - *wedge-splitting test*), e sobretudo, o ensaio de viga entalhada (*notch beam test*) onde é requerido equipamento de teste servo controlado de grande rigidez com software e electrónica digital (*closed-loop*) não foram efectuados.

Alerta-se para o facto de ser o ensaio de materiais que possibilita a retirada de valores base a incluir nos modelos numéricos e analíticos correspondentes ao comportamento estrutural.

Os principais destinatários deste trabalho são os projectistas e consultores, fornecedores de materiais de construção, laboratórios de ensaios de materiais, e empreiteiros que pretendam conhecer as especificidades do betão com fibras.

1.3 ESTRATÉGIA E CARACTERÍSTICAS ORIGINAIS

A estratégia de investigação do BRF, sobretudo do BRFA, na vertente da influência das características das fibras no desempenho do betão, pode ser dividida em duas partes:

A primeira parte é uma recolha bibliográfica com casos de aplicação em obra do betão com fibras, bem como os aspectos da estrutura interna do betão com fibras (interface fibra – matriz, secção forma e superfície da fibra). Pretende-se a apreensão dos vários aspectos que possam influenciar ou governar o comportamento ao arrancamento, mas que em ultima análise ajudam a prever o comportamento à flexão deste material.

A segunda parte - trabalho experimental - consiste em ensaios de arrancamento de fibras isoladas com diferentes tipos de fibras, ensaios de caracterização dimensional de fibras de aço e em ensaios com betão projectado e betão cofrado com as fibras caracterizadas e em que a variável é a origem (fabricante) das fibras de aço. Estes últimos ensaios incluem ensaios de absorção de energia, penetração de água sobre pressão, absorção de água por capilaridade, porosidade livre às 48h, penetração de oxigénio e carbonatação acelerada.

1.4 ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em 2 partes (os números dentro de parêntesis representam o numero do capítulo):

INTRODUÇÃO (1)

PARTE 1

Aplicações do BRF (2)

Aplicações das fibras em betão

Case studies:

- Regiões de introdução de cargas concentradas (pré-esforço por pré e pós-tensão)
- Obras subterrâneas (betão projectado, aduelas para túneis)

Estrutura do Betão com fibras (3)

Matriz cimentícia e interface fibra-matriz

Arrancamento ou pull-out

Secção, forma e superfície da fibra

Princípios de Dimensionamento de Estruturas de BRFA (4)

PARTE 2:

Desempenho do BRF. Ensaios Experimentais (5)

Trabalho experimental:

Comportamento das fibras ao arrancamento e influência do gancho

- 2 tipos de fibras (aço e sintética)

Ensaio em betão com fibras

Caracterização dimensional das fibras utilizadas

Ensaio em betão projectado

- espalhamento
- teor do ar em betão fresco
- resistência à compressão
- resistência à compressão em carotes retiradas das caixas
- absorção de água
- volume de vazios
- absorção de energia em placas
- quantidade de fibras

Ensaio em betão cofrado

- espalhamento
- resistência à compressão
- absorção de água por capilaridade
- absorção de água
- penetração de água sobre pressão
- penetração de oxigénio
- absorção de energia em placas
- carbonatação

Conclusões (6)

A Parte 1 pretende como que estabelecer um ponto de situação sobre os conhecimentos actuais em termos de betão reforçado com fibras nas vertentes de obra – *case studies* – e na vertente da tecnologia do betão – estrutura interna do betão com fibras. Assim o Capítulo 2 tem como principal âmbito mostrar que o BRF é largamente utilizado em obras de engenharia civil que exijam grandes volumes de aplicação de betão em que se requerem características especiais. Os casos de aplicação referenciados - obras subterrâneas e regiões de introdução de cargas concentradas - são exemplo disso mesmo.

No Capítulo 3, o efeito da matriz cimentícia, a importância da caracterização da interface fibra-matriz e o estudo da forma, secção e superfície da fibra são descritos. Recomendações qualitativas quanto ao tipo de fibra e tipo de matriz são referidas tendo em conta o comportamento ao arrancamento.

Tendo como principal objectivo a caracterização do BRFA em flexão e a posterior consideração do efeito que as fibras introduzem na capacidade resistente, é descrito no Capítulo 4, o ensaio de flexão como ferramenta que possibilita a retirada de valores característicos a incluir no método de dimensionamento proposto pela Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (RILEM).

É ainda incluído um modelo teórico que através do conhecimento do estado de tensão nas fibras possibilita a determinação da capacidade resistente residual em flexão do BRFA.

A Parte 2 consiste no programa experimental levado a cabo (capítulo 5) que permite aceder aos comportamentos característicos do BRFA. Assim sendo, a influência das características das fibras no desempenho no betão é conseguida através de ensaios de arrancamento (*pullout*), ensaios de caracterização dimensional, ensaios de absorção de energia em placa quadrada e ensaios de durabilidade.

O capítulo 6 compreende a conclusão e é efectuada uma lista de recomendações para investigação futura, de modo a otimizar a aplicação do BRFA em aplicações de engenharia civil.

2

APLICAÇÃO DAS FIBRAS EM ENGENHARIA CIVIL

As estruturas de engenharia civil são orgânicas, no sentido em que se desenvolvem ao longo do tempo. Sem dúvida que num futuro próximo, a ponte Akashi-Kaikyo no Japão, deixará de ser a detentora do maior vão em pontes suspensas, bem como o maior arranha-céus (Maio de 2008), Burj Dubai, nos Emiratos Árabes Unidos, com 636 m, será ultrapassado no futuro. Ainda que por detrás deste desenvolvimento esteja a evolução dos materiais de construção, a evolução da engenharia civil, comparativamente a outras indústrias, não se encontra num nível tão elevado. A falta de cooperação entre a indústria da construção e a indústria dos materiais constitui parte da razão. (Li, 2002; EMAAR, 2008)

Esta fragmentação entre estas indústrias não conduz a um crescimento saudável e sustentado para a manutenção das infra-estruturas das nossas sociedades, mas mais ainda, implica um impacto negativo na produtividade da construção, na durabilidade e na segurança pública. Estes aspectos não devem ser subestimados. (Li, 2002)

Segundo Li (2002), os materiais de construção possuem um conjunto único de características como por exemplo:

- Custo reduzido (betão=\$0,1/Kg; lentes de contacto=\$100 000/Kg)
- Aplicação em grandes quantidades
- Requisito à durabilidade (período de vida útil: ponte=75 anos; automóvel=10-20 anos);
- Segurança pública (o público é sensível a falhas nas infra-estruturas e.g. sismos, incêndios)
- Trabalho de construção (o operário da construção civil não tem a mesma formação que um operário do sector automóvel)

Só os materiais que cumpram as características atrás citadas podem ser adoptados com sucesso no mundo real. Para os compósitos cimentícios reforçados com fibras as primeiras duas restrições, custo e quantidade, implicam que as fibras não sejam extremamente dispendiosas, devendo ser usadas em quantidades relativamente pequenas. Assim sendo este material têm ainda a possibilidade de se tornar numa nova tecnologia para as infra-estruturas pois introduzem ductilidade (estruturas mais seguras), produtividade por redução de mão-de-obra (substituição do varão de aço por BRFA), sustentabilidade e durabilidade (cinzas, sílica de fumo) (Li, 2002).

Em suma os materiais podem e devem desempenhar um papel no desenvolvimento e renovação das infra-estruturas. O impacto na sociedade, economia, segurança pública, e no meio ambiente deve ser reconhecido (Li, 2000, p. 663).

2.1 APLICAÇÕES DAS FIBRAS EM BETÃO

As aplicações do BRFA, segundo o Comité 544 do ACI, dependem “da capacidade do projectista e do construtor em tirar partido das resistências à tracção (estáticas ou dinâmicas), das características de absorção de energia, da tenacidade, e da resistência à fadiga deste material compósito. A distribuição uniforme das fibras no betão proporciona propriedades resistentes isotrópicas que não são comuns ao betão armado” (ACI 544.1R, 1996, p. 17).

De facto as fibras descontínuas e distribuídas aleatoriamente na matriz cimentícia, embora não tão eficientes em resistir os esforços de tracção, tendem a controlar melhor a fendilhação pois encontram-se mais próximas umas das outras. Há que saber distinguir que as armaduras convencionais são colocadas na estrutura em localizações apropriadas de modo a resistir aos esforços de tracção e corte, portanto o reforço através da adição de fibras ao betão não é um substituto à armadura convencional, por outro lado, pode complementá-la.

Existem aplicações em que as fibras são mais eficientes:

- Materiais/estruturas muito esbeltas (varão de aço não pode ser utilizado);
- Cargas locais e deformações locais muito elevadas (revestimentos em túneis, estruturas resistentes a explosões, e estacas)
- Controlo da fendilhação induzida por humidade ou diferenças de temperatura (lajes ou pavimentos)

Assim as fibras melhoram a ductilidade do material mais propriamente a sua capacidade de absorver energia. As propriedades de resistir ao impacto, fadiga e abrasão são também melhoradas. (Bentur e Mindess, 1990).



Fig. 2.1 - Ponte da Paz, Seoul. Ponte pedonal em betão de ultra elevado desempenho Ductal® (180-230 MPa). Vão: 120 m, largura do arco: 4,30m e espessura: 1,30 m. (Lafarge, 2008) Fonte: Flickr.

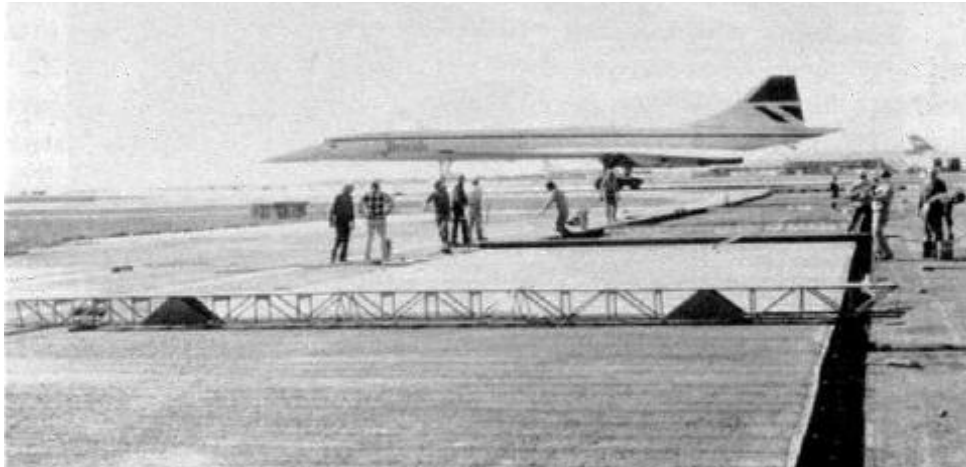


Fig. 2.2 - Taxiway em betão reforçado com fibras de aço no aeroporto internacional John F. Kennedy, Nova Iorque. (Bentur e Mindess, 1990)

É em aplicações não estruturais que o uso das fibras se revela mais corrente. Deste modo as fibras são usadas para controlar fendas por retracção (plástica ou secagem), um papel classicamente atribuído aos varões de aço ou malha electrosoldada. Estas aplicações, também referidas por vários autores como industriais (estruturas com grandes superfícies expostas e com movimento restringido) e.g. pisos e lajes, depósitos de grandes dimensões em betão, e pavimentos em betão, apresentam elevado potencial de fendilhação. Como tal e para estas aplicações, as fibras apresentam um conjunto de vantagens sobre a armadura convencional (Li, 2000):

- Distribuição uniforme no que respeita à localização e orientação;
- Resistência à corrosão, especialmente nas fibras sintéticas, de carbono, ou metal amorfo;
- Redução da mão-de-obra evitando a necessidade da dobragem dos varões de aço e do posicionamento relativamente à cofragem, conduzindo à redução do tempo de construção.

A reparação de estruturas de betão parece ser também um domínio interessante para a aplicação da tecnologia do betão reforçado com fibras. Naturalmente que todas as estruturas estando sujeitas a deterioração pelo uso requerem intervenções que estendam o seu período de vida útil; no entanto com a exigência de níveis de performance elevados nos países mais industrializados, é esperado que a necessidade de reparações duráveis cresça no futuro. Reconhece-se que as falhas resultantes do processo de reparação estejam relacionadas com as incompatibilidades mecânicas entre o material de reparação e o betão do substrato. A estabilidade dimensional do material de reparação e a resistência à delaminação são muitas das vezes referidas como os factores dominantes. As fibras podem ser, e têm sido utilizadas para tirar partido nesta área. Como tal o restauro de pavimentos, pistas de aeroportos e aeródromos, tabuleiros de pontes e lajes apoiadas em solo inclui-se neste domínio de aplicação.

O valor monetário criado pela durabilidade das estruturas é difícil de quantificar, mas a necessidade de estruturas duráveis representa claramente a grande razão do uso das fibras (Li, 2000, p. 664).

Quadro 2.1 Razões para aplicação de BRFA nos diversos tipos de estruturas

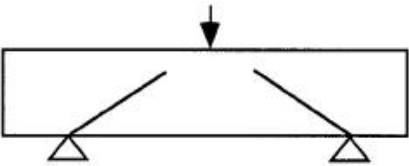
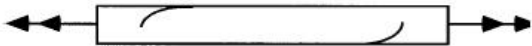
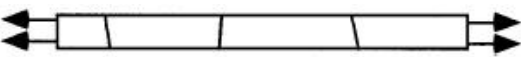
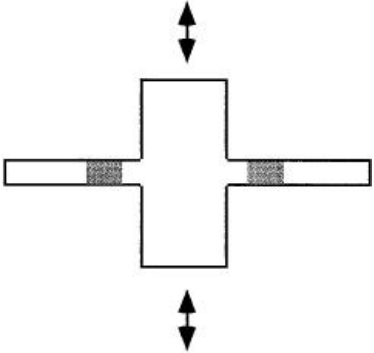
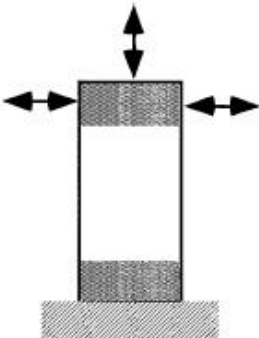
Tipo de estrutura	Razões para aplicação de BRFA
Estruturas hidráulicas (barragens, descarregadores, etc.)	Resistência à cavitação
Pavimentos (aeroportos, auto-estradas, reforço de pavimento)	Redução da espessura do pavimento
Pisos industriais	Resistência ao impacto e resistência ao choque térmico
Betão 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 a 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

Presentemente a utilização do BRFA em estruturas resistentes é muito limitada. Aproveitar a capacidade das fibras em suportar cargas em zonas fendilhadas do betão, no projecto estrutural é uma prática recente. A investigação tem estabelecido que através da inclusão de fibras se obtém melhorias significativas em:

- ductilidade;
- resistência à fissuração;
- resistência ao corte;
- resistência ao impacto e
- resistência última.

Assim adivinha-se que a resposta estrutural ao esforço de flexão, ao esforço transversal, torção, e esforços combinados seja superior a de estruturas convencionalmente armadas. O quadro 2.2 esquematiza como o efeito de ponte de transferência de tensões (*fibre bridging*) ao longo das fendas em betão ou em zonas danificadas actua como um factor que acrescenta rendimento estrutural. No caso do esforço axial, existe a ideia geral que o rendimento estrutural de um elemento comprimido não pode ser aumentado através da inclusão de fibras e que um elemento convenientemente armado, cintado e que possibilite confinamento do betão não deva exibir falhas ou dano. No entanto tomando em consideração o efeito dos sismos nas estruturas (ver Figura 2.3) pode ocorrer uma descamação frágil do betão de recobrimento que em combinação com a fracturação do aço de confinamento provoca a desintegração completa do pilar quando o aço longitudinal encurva. Pode-se esperar que a acção das fibras atribua tenacidade, evite a descamação do betão de recobrimento, obtendo-se daí um melhor rendimento à ductilidade do pilar (Li, 2002).

Quadro 2.2 – Modos de rotura de membros estruturais e melhoria no rendimento pela adição de fibras (Li, 2002)

Membro estrutural / Esforço	Exemplos	Modificação no rendimento pela adição de fibras
Membros sujeitos a esforços de flexão 	Revestimento em túneis Vigas Lajes	Resistência à flexão Ductilidade pré-pico e pós-pico
Membros sujeitos a esforços transversos 	Tabuleiros de pontes e viadutos Cachorros Conectores em construção segmental	Capacidade ao corte Segurança pós-fissuração
Membros sujeitos a esforços de momento torsor 	Tabuleiros de pontes e viadutos Postes	Capacidade à torção Segurança pós-fissuração
Membros sujeitos a esforços de tensão 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 descamação e melhora o confinamento

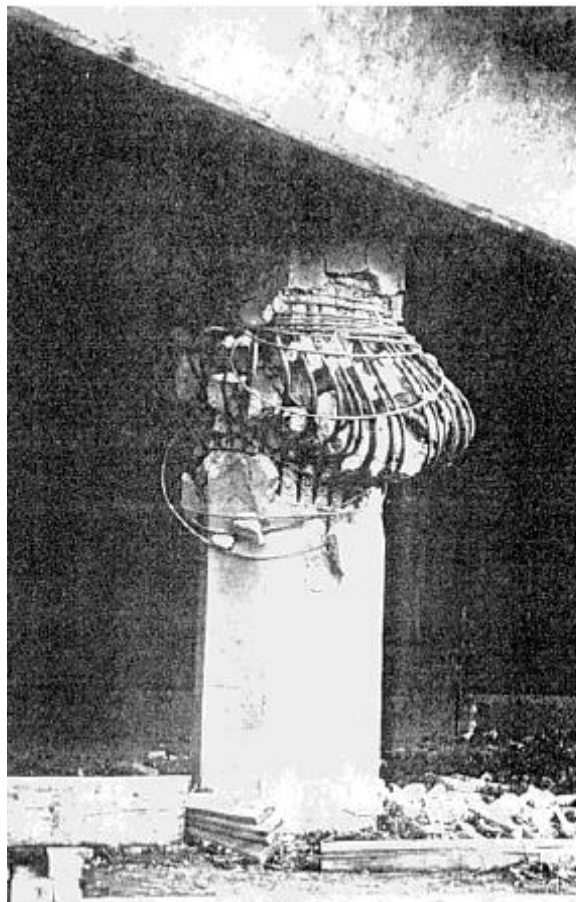


Fig. 2.3 - Colapso de pilar de viaduto no terremoto em Northridge, Califórnia (Li, 2002). Fonte: John Wiley & Sons, Inc.

2.2 CASOS DE ESTUDO DE APLICAÇÕES DAS FIBRAS EM BETÃO

Existem aplicações do BRFA que de certo modo são específicas a determinados métodos construtivos, isto é, a maior parte das vezes é durante o processo construtivo que são desenvolvidas as maiores cargas e tensões em determinados membros da estrutura ou mesmo em determinadas regiões desses mesmos membros. Assim:

- regiões sujeitas a cargas concentradas (zonas de ancoragem de elementos pré-esforçados por pré-tensão ou pós-tensão);
- revestimento para túneis e galerias em betão projectado e segmentos prefabricados para escavação automatizada em túneis;

São tudo exemplos de estruturas ou membros de uma estrutura que necessitam de contar com as características especiais que apenas um material como o BRFA oferece.

2.2.1. REGIÕES SUJEITAS A CARGAS CONCENTRADAS

O pré-esforço foi concebido originalmente, no início do século XX, por Engéne Freyssinet, com o objectivo de eliminar a fissuração do betão graças à ausência de tensões de tracção. Esta técnica tem sido largamente usada para a construção de pontes e viadutos maximizando a capacidade do betão resistir a esforços de compressão, eliminando ou controlando a fendilhação e deformação. O

desenvolvimento desta técnica e da engenharia dos materiais tem possibilitado a construção de grandes vãos em betão pré-esforçado, representando, nos Estados Unidos, cerca de 60% de todas as pontes e viadutos durante o período 1990-99. (Yazdani e Spainhour, 2002; Dhonde, Mo e Hsu, 2005).

Esta técnica implica transferência de tensões dos fios de pré-esforço para o betão por aderência dos dois materiais após a cura do betão, ou no caso da pós-tensão, transferência da força de pré-esforço na extremidade do elemento às placas de ancoragem e cabeça de ancoragem. Ainda que se tenha o intento de eliminar ou controlar fendilhação, nem sempre tal é conseguido, especialmente nas regiões onde são introduzidas essas cargas concentradas.

As zonas das extremidades requerem portanto elevadas quantidades de armadura, por vezes muito densa, que nem sempre suportam os esforços desenvolvidos durante o processo construtivo. A substituição parcial da armadura por fibras de aço nestas zonas pode constituir uma solução interessante sob o ponto de vista da eliminação de avarias como:

- fissuração nas extremidades;
- esmagamento de betão e,
- corrosão da armadura.

2.2.1.1 Pré-Esforço por Pré-Tensão em Vigas I

A standardização no projecto e construção de componentes prefabricadas para passagens superiores tem contribuído para a optimização do projecto de pontes e viadutos. Componentes de uma superestrutura como vigas I, vigas em duplo T ou vigas caixão sendo geralmente produzidas em fábrica, apresentam as inerentes vantagens associadas à pré-fabricação e ao pré-esforço:

- economia
- durabilidade,
- manutenção diminuída e,
- qualidade assegurada

As vigas prefabricadas e pré-esforçadas mais usadas neste tipo de estruturas em vãos pequenos a médios é a viga em I (PCI, 1999).



Fig. 2.4 Viga em I pré-esforçada - pré-tensão (Dhonde, Mo e Hsu, 2005)

Antes da betonagem de uma viga prefabricada pré-esforçada, os fios ou cordões de pré-esforço são traccionados até um determinado nível. Depois do endurecimento do betão ao nível requerido, cerca de 16 a 24 horas após betonagem, os fios são libertados, transmitindo-se o pré-esforço ao betão. Deste modo, a aplicação de pré-esforço envolve forças concentradas nos fios ou cordões nas regiões de extremidade da viga – principal razão para a fendilhação nas regiões de extremidade. Nestas regiões, o pré-esforço é gradualmente transferido ao betão ao longo de um determinado comprimento (comprimento de amarração). A região afectada pela força concentrada é denominada de zona de ancoragem, que evidencia distribuições de tensões críticas (Dhonde, Mo e Hsu, 2005):

- tensões de tracção superficiais (*spalling*)
- tensões de tracção transversais (*bursting*)

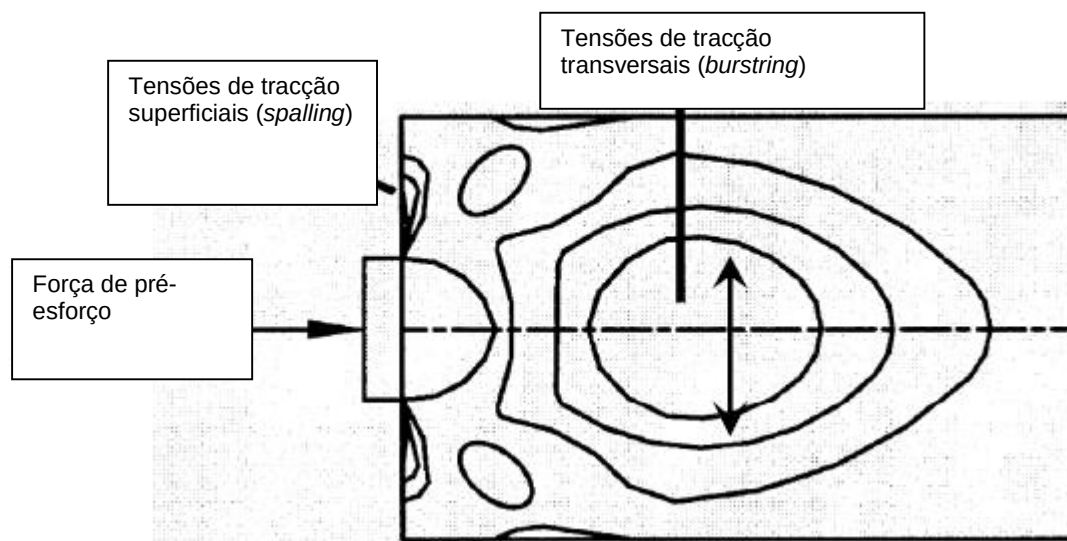


Fig. 2.5 Distribuição das tensões de tracção na região de extremidade (Dhonde, Mo e Hsu, 2005)

Tendo em conta que o betão não apresenta resistências consideráveis à tracção, a fissuração ocorrerá junto das zonas onde as tensões de tracção superficiais e transversais são elevadas. A disposição de grandes áreas de armadura transversal nestas zonas pode retardar ou evitar a propagação e abertura das fendas, contudo, se a armadura disposta nesta região é inadequada ou mal localizada o objectivo de evitar o colapso da zona de ancoragem será comprometido.

A fendilhação poderá ainda ocorrer devido a (Dhonde, Mo e Hsu, 2005):

- combinação das tensões residuais devido à cura ou hidratação do betão,
- efeitos de fluência,
- retracção,
- efeito da temperatura e,
- outras causas secundárias



Fig. 2.6 Fendilhação de extremidade em viga I pré-esforçada (Dhonde, Mo e Hsu, 2005)

Além da aparência incómoda, a fissuração pode provocar a corrosão da armadura com a inerente redução do período de vida útil destas passagens superiores. Assim sendo é imperativo um dimensionamento correcto da armadura necessária às regiões de extremidade na zona de ancoragem, pois mesmo com 4,2% de aço por volume de betão, há ainda fissuração e o problema persiste.

Sabendo que em geral as vigas pré-esforçadas para pontes e viadutos são optimizadas na sua secção transversal de forma a limitar as cargas permanentes da estrutura, uma alma estreita torna ainda mais difícil a colocação da grande quantidade de armadura necessária para efeitos de esforço transversal, de confinamento e para a zona de ancoragem. Desta forma as regiões de extremidade destes elementos tornam-se muito congestionadas, o que origina problemas na compactação do betão. Para além do factor da diminuição do período de vida útil da estrutura, pela degradação do betão da extremidade, a necessidade de operários para desempenhar o trabalho de armação intensiva nestas áreas torna útil recorrer a métodos não convencionais de reforço.



Fig. 2.7 Armadura de extremidade de uma viga I pré-esforçada (Dhonde, Mo e Hsu, 2005)

Recorrendo à adição de fibras de alta resistência ao betão muitas propriedades mecânicas são melhoradas, contudo e ainda que a trabalhabilidade possa diminuir – facto a evitar pois nestas regiões continuará a existir elevadas taxas de armadura – o uso do betão autocompactável (BAC) com fibras de aço nestas áreas parece lógico pois é expectável o controlo da fendilhação e o rendimento dos trabalhos.

Dhonde, Mo e Hsu (2005) em cooperação com o Texas Department of Transportation (TxDOT) efectuaram:

- estudos de composições de BRFA e BAC com fibras de aço no que diz respeito à trabalhabilidade (factor preponderante na escolha das composições finais), conteúdo em fibras, tipo de fibra e resistências mecânicas com o intuito de controlar fissuração e eliminar parcial ou totalmente a necessidade em armadura de esforço transversal na zona de ancoragem;
- procedimentos para a betonagem de vigas I à escala real e modo de instrumentação para recolher dados de temperaturas, esforços e extensões
- ensaios de carga para determinar a influência das fibras no comportamento estrutural (resistência última ao esforço transversal, ductilidade e mecanismo de rotura)

Assim concluiu-se, resumidamente que (Dhonde, Mo e Hsu, 2005):

- 1) O BRFA e o BAC com fibras possuem a trabalhabilidade e estabilidade necessárias para colocação nas regiões de extremidade das vigas I.
- 2) Os ensaios em betão endurecido provam que as resistências mecânicas no BAC são mais elevadas que as do BRFA, em média as resistências à tracção foram aumentadas 50% no BAC com fibras e 25% no BRFA
- 3) Conteúdo óptimo para BAC de 1% por volume (fibras curtas) e 0,5% por volume (fibras longas) e conteúdo óptimo para BRFA de 1,5% por volume (fibras curtas).
- 4) As fibras de aço foram capazes de reduzir as extensões e tensões de tracção induzidas pela fase inicial do processo de cura do betão e libertação dos varões.
- 5) Ensaios de carga demonstraram eficiência das fibras em aumentar as resistências ao corte, ao desenvolvimento de fendas, aumentaram a ductilidade mostrando que podem substituir parcialmente ou totalmente as armaduras transversais na extremidade
- 6) Possivelmente, 0,75% por volume de fibras longas, podem eliminar completamente a necessidade de armadura transversal bem como o aparecimento de fendas.

O conjunto de recomendações a nível de projecto para as regiões de extremidade tendo em vista a composição e colocação de BRFA ou BAC em vigas I encontram-se dispostas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 Composições optimizadas e propriedades recomendadas, adaptado de Dhonde, Mo e Hsu (2005)

Componentes	BRFA	BAC com fibras de aço
Cimento -Tipo III (ASTM C150)	308 Kg/m ³	348 Kg/m ³
Cinzas volantes -Tipo II (ASTM C618)	147 Kg/m ³	148 Kg/m ³
Agregado grosso (AASHTO T 27) - dm _{max} = 19,05 mm	1127 Kg/m ³	914 Kg/m ³
Agregado fino (ASHTO M 43) - MF = 2,55	686 Kg/m ³	937 Kg/m ³
Cinzas Volantes/Cimento	0,48	0,43
Agregado grosso/agregado fino	1,64	0,97
Razão A/C	0,43	0,43
Razão A/L	0,3	0,3
Superplastificante - Tipo F (ASTM C494)	5,70 Kg/m ³ (1300 mL/100Kg)	6,23 Kg/m ³ (1300 mL/100Kg)
Fibras de aço (fibras curtas) -Dramix ZP305 (30/0,55)	117,5 Kg/m ³ (1,5% vol.) Vf=82,5	78,3 kg/m ³ (1,0%vol.) Vf=55
Retardador de presa - Tipo B (ASTM C494)	0,593 Kg/m ³ (211,2 mL/100Kg)	0,726 Kg/m ³ (286 mL/100Kg)
Slump (ASTM C143/C143-2003)	17 a 20 cm	-
Espalhamento	-	> 63 cm
Índice VSI	-	"zero"
T-50	-	3 a 7 s.
Anel-J	-	< 75 mm

Vf = Factor da fibra = (Vol. fibras) x (coeficiente de forma)

2.2.1.2 PRÉ-ESFORÇO POR PÓS-TENSÃO EM VIGAS CAIXÃO

O uso do pós-tensionamento em vigas caixão de pontes ou viadutos provoca o desenvolvimento de tensões de tracção tangenciais (*bursting*) a uma determinada distância do dispositivo de ancoragem denominada de zona de amarração. Sendo necessária a disposição de grandes quantidades de armadura de reforço na zona das ancoragens de modo a resistir às elevadas tensões tangenciais, adivinha-se o congestionamento desta região em termos da quantidade de armadura aí localizada o que implica dificuldade na colocação e compactação do betão. Assim a redução da quantidade de armadura de reforço na zona das ancoragens admite-se como exequível com a substituição desta pela adição de fibras de aço à zona de amarração.

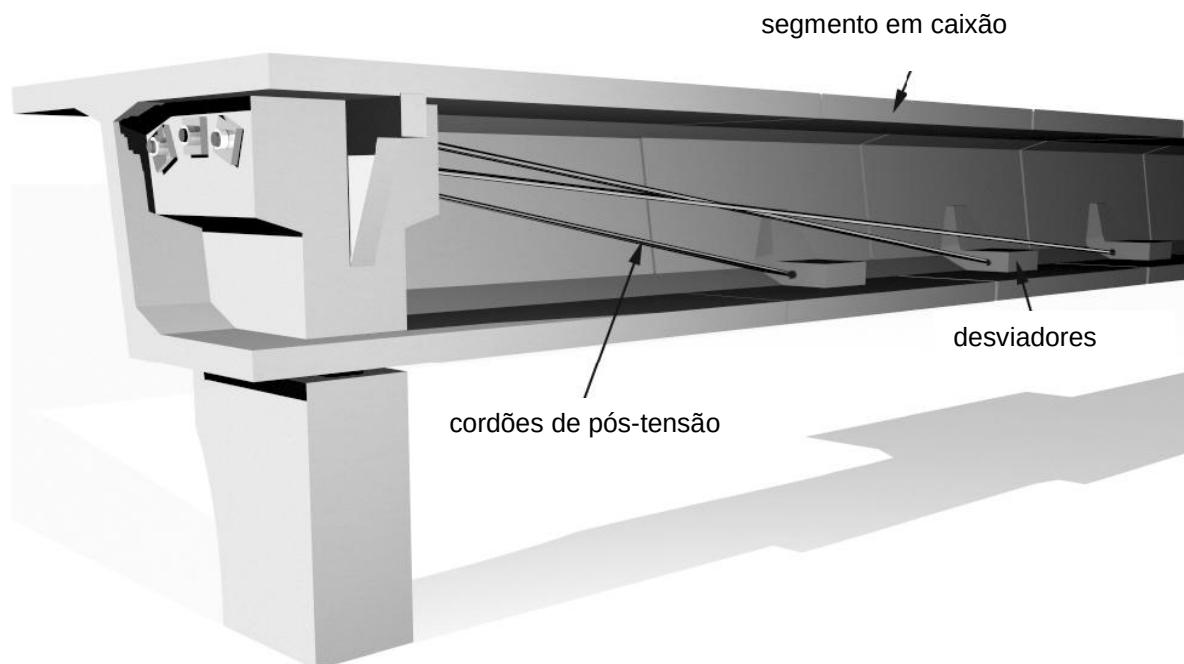


Fig. 2.8 Exemplo do pré-esforço por pós-tensão na construção por segmentos (Johnson, 2006)

O uso do pré-esforço por pós-tensão em infra-estruturas como pontes e viadutos é cada vez mais comum. Este processo construtivo envolve o tensionamento na extremidade de cabos ou cordões de aço de elevada resistência ao longo de bainhas e em ancoragens, estas últimas dispostas antes da betonagem. Assim que o betão adquire a resistência necessária, o aço é tensionado, criando tracção no aço e compressão na secção de betão. Contudo este tipo de operações origina falhas na zona de ancoragem, pois nem sempre o equilíbrio é desenvolvido para resistir à força de tracção dos cabos. Existem assim 3 modos de rotura (Johnson, 2006):

- rotura local – tensão de rotura à compressão do betão insuficiente ou insuficiente confinamento – desenvolvimento de um cone durante a aplicação da força de pós-tensão.
- rotura na zona de amarração por tensões de tracção tangenciais (*bursting*) – insuficiência das armaduras de esforço transversal aí dispostas – desenvolvimento de grandes fendas paralelas à bainha desde o dispositivo de ancoragem, ocorrendo usualmente durante o carregamento.
- rotura na interface da zona local com a zona de amarração – semelhante ao primeiro modo no entanto ocorre a maior distancia do dispositivo de ancoragem. É precedido de fissuração em redor da placa de ancoragem no betão de recobrimento.

Todos os 3 modos originam roturas frágeis, “explosivas”, e obviamente, não desejáveis.

As excessivas tensões de tracção transversais que causam excessiva fissuração e o tipo de avaria disposta na figura 2.9 são aspectos comprometedores do correcto funcionamento e da durabilidade das estruturas. A adopção de BRFA nesta zona de introdução de cargas concentradas e, particularmente, na zona de amarração, para além da redução da armadura de reforço, contribui para um melhor comportamento da região, através da capacidade de absorção de energia e da redução do tamanho e propagação das fendas inerentes ao comportamento mecânico do BRFA.

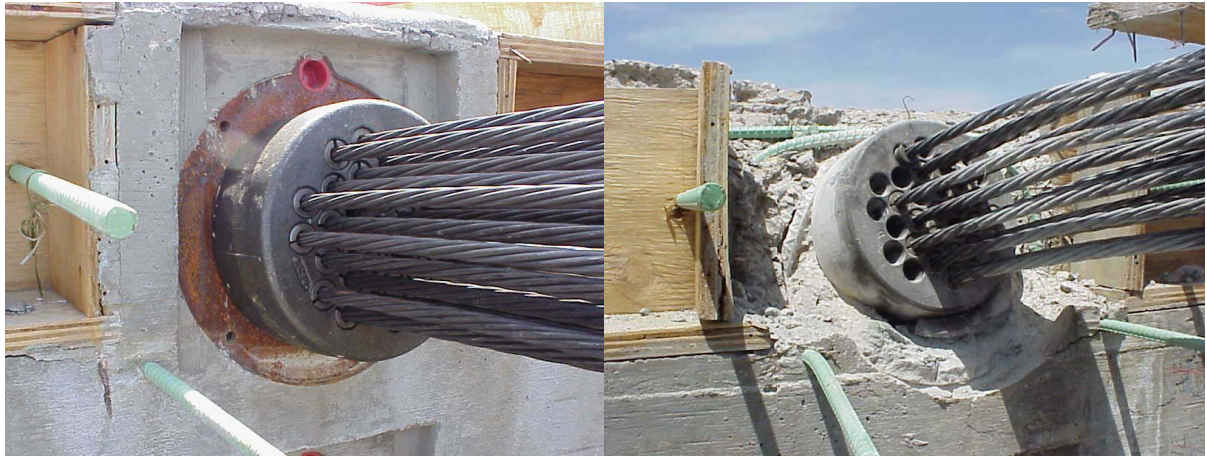


Fig. 2.9 Exemplo do correcto funcionamento e avaria da zona de ancoragem (Johnson, 2006)

Assim sendo tendo em conta os estudos de Johnson (2006) através da análise pelo método dos elementos finitos, conclui-se e recomenda-se o uso de BRFA na zona de amarração de elementos pós-tensionados, desde que:

- a redução máxima em armadura de reforço na zona da ancoragem, com adição de 0,50% de fibras de aço por volume de betão, é de 65% na zona de amarração
- quantidades acima dos 0,50% por volume de betão em fibras de aço (Dramix ZP305) são de evitar, pois podem aumentar as tensões instaladas em torno da zona de amarração.

2.2.2. OBRAS SUBTERRÂNEAS - REVESTIMENTO PARA TÚNEIS E GALERIAS

Tunnelling is a joy. Tunnelling is an art. Tunnelling in weak rock masses is an adventure. Tunnels are liked by people all over the world (Singh e Goel, 2006, p. 1).

Os túneis rodoviários, ferroviários e para a produção de energia hidroelétrica ainda constituem a parte dominante dos trabalhos subterrâneos. Contudo, áreas subterrâneas para uso do público (ver figura 2.10), estruturas de armazenamento de matérias-primas e produtos como gás, petróleo e derivados, estações de tratamento de água e águas residuais, estão a tornar-se cada vez mais importantes. Estrategicamente esta tendência será agravada no futuro através da tomada de preocupação em aspectos como segurança e protecção; além disso as estruturas subterrâneas são propriedade permanente das pessoas, protegidas de parte das calamidades naturais, ao contrário das estruturas superficiais, sujeitas a desastres e temporariamente propriedade das pessoas (Grønv, 2006; Singh e Goel, 2006).



Fig. 2.10 Arena Olímpica, Gjøvik - Noruega. Galeria com 62 m de vão, 24 m de altura e capacidade para 5800 pessoas (NFF, 2006). Fonte: VS-Group/Bjørn Fuhre

Tendo em conta que 70% da população mundial irá viver em áreas urbanas, existirá uma procura multidimensional de espaço, sobretudo das áreas subterrâneas. As infra-estruturas de transporte, que se traduzem basicamente em túneis rodoviários, ferroviários e para metropolitano, etc. oferecem vantagens significativas como a redução da poluição sonora e do impacto resultante da modificação das paisagens. Contudo estão sujeitas ao risco de fogo e explosão, bem como no caso dos túneis rodoviários, à descarga dos gases para a atmosfera (Waal, 1999).

O método de construção de túneis está sobretudo dependente do tipo de solo, isto é, quando considerados dois tipos extremos de solos podemos como que admitir que existem métodos de construção mais apropriados (Figura 2.11 e Figura 2.12), no entanto estes métodos são muitas vezes combinados ficando mesmo difícil a classificação em métodos descontínuos ou métodos contínuos de escavação (TBM) (Kolymbas, 2005).

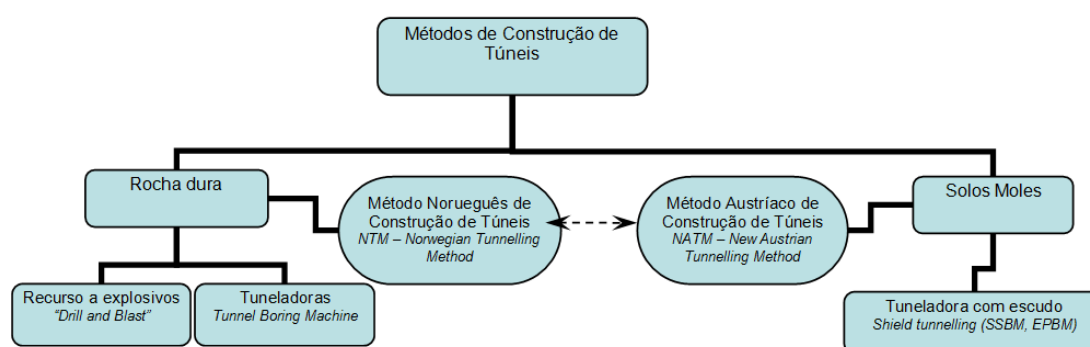


Fig. 2.11 Métodos de construção de túneis mais apropriados em função de cada tipo de solo

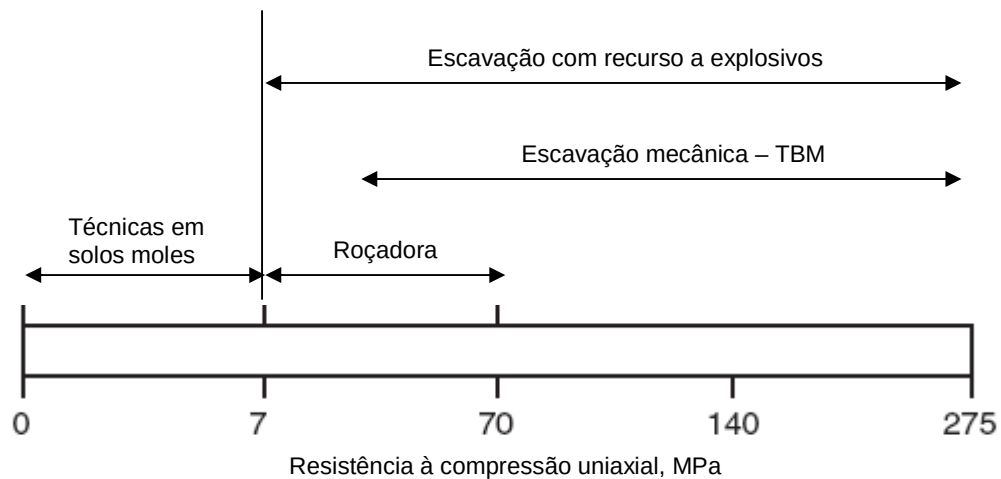


Fig. 2.12 Métodos de escavação de túneis em função da resistência à compressão do terreno (adaptado de Singh e Goel, 2006)

O revestimento de um túnel nunca é solicitado pelos esforços que inicialmente estavam instalados no maciço. Felizmente, as tensões iniciais (ou primárias) são reduzidas pela deformação do terreno que ocorre durante a escavação mas também após a instalação do revestimento (*lining*) (considera-se aqui o termo “revestimento” como camada de betão projectado, que é colocado rapidamente após a escavação). Aqui ocorre o efeito de arco (*arching*), isto é, a redução das tensões iniciais motivadas pela deformação do terreno. Consequentemente a deformação do terreno esta relacionada com a deformação do próprio revestimento; assim a solicitação no revestimento depende da sua própria deformação, portanto não é o valor da pressão que actua no revestimento que importa mas sim a relação entre pressão e deformação (Kolymbas, 2005).

Aparte das controvérsias sobre a terminologia apropriada, ver Romero (2002), sugere-se que a revolução proporcionada pelo advento da projecção de betão com fibras de aço por via húmida tenha tornado os métodos baseados na filosofia NATM - dimensionamento e construção - nos mais utilizados na construção de túneis. No entanto existem outros métodos, no domínio da escavação mecânica, que naturalmente fazem uso da tecnologia do betão com fibras:

- TBM – *tunnel boring machine* – betão projectado com fibras de aço (BPFA)
- SSBM + ECL – *slurry shield machine* equipada com método de colocação de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) por extrusão (ECL - *extruded concrete lining method*).

É opinião do autor que o suporte mais viável, económica e tecnicamente, para túneis é conseguido através da aplicação de betão nas formas da projecção, da colocação de segmentos pré-fabricados ou mesmo através de extrusão, todo ele reforçado por fibras de aço.

2.2.2.1 REVESTIMENTO PARA TÚNEIS EM BETÃO PROJECTADO COM FIBRAS DE AÇO

A evolução do método Norueguês de construção de túneis (NTM – Norwegian Tunnelling Method) constitui nos últimos 30 anos um caso de sucesso pois pode ser adoptado nas mais variadas condições rochosas. Os mais de 1260 registos provam a eficácia da abordagem através do NTM (Singh e Goel, 2006). Ainda que se alerte para o facto que condições do terreno sejam favoráveis à prática da

construção de túneis na Noruega, o NMT tem-se mostrado também eficiente em terrenos menos favoráveis (NFF, 2004).

Quadro 2.4 A construção de túneis na Noruega (NFF, 2004)

Tipo de túnel	Número	Extensão (km)
Ferroviário	700	316
Rodoviário	881	843
Produção de energia hidroeléctrica	> 300	3500
Minas industriais	20	-
Outros fins	200	250
Total	> 2100	≈ 5000

Torna-se importante referir que o sucesso do método está dependente do tipo de suporte aplicado: **betão projectado com fibras de aço, por via húmida**, através de robot e pregagens.

Dentro do contexto da construção de túneis ferroviários e rodoviários, o NTM é um conjunto de práticas que resultam em túneis permanentemente revestidos, drenados, secos e a um custo de aproximadamente 4000-8000 Eur/m. O tipo de construção resulta em túneis com uma secção transversal entre os 45 e 110 m² para 2 vias em estradas e 3 vias em vias rápidas (Barton e Chrysanthakis, 1996).

Tendo em conta que a selecção do suporte está dependente da classificação do maciço rochoso tendo, sobretudo por base o Sistema Q, desenvolvido por Barton, Lien e Lunde (1974) e actualizado por Barton e Grimstad em 1993, com última actualização por Barton (2002), utilizando os valores do índice Q e da dimensão equivalente no ábaco da Figura 2.13, é possível determinar a categoria do suporte definitivo requerido. Importa portanto definir alguns parâmetros que permitem calcular o valor do índice Q (Eq.1) para classificação geomecânica:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Os três quocientes apresentados na expressão podem ser entendidos da seguinte forma (Miranda, 2003):

- RQD/J_n - Representa a compartimentação do maciço rochoso e é uma medida grosseira do tamanho dos blocos.
- J_r/J_a - Representa a resistência ao corte das descontinuidades (e do maciço rochoso)
- J_w/SRF - Representa um factor empírico denominado por “tensão activa”.

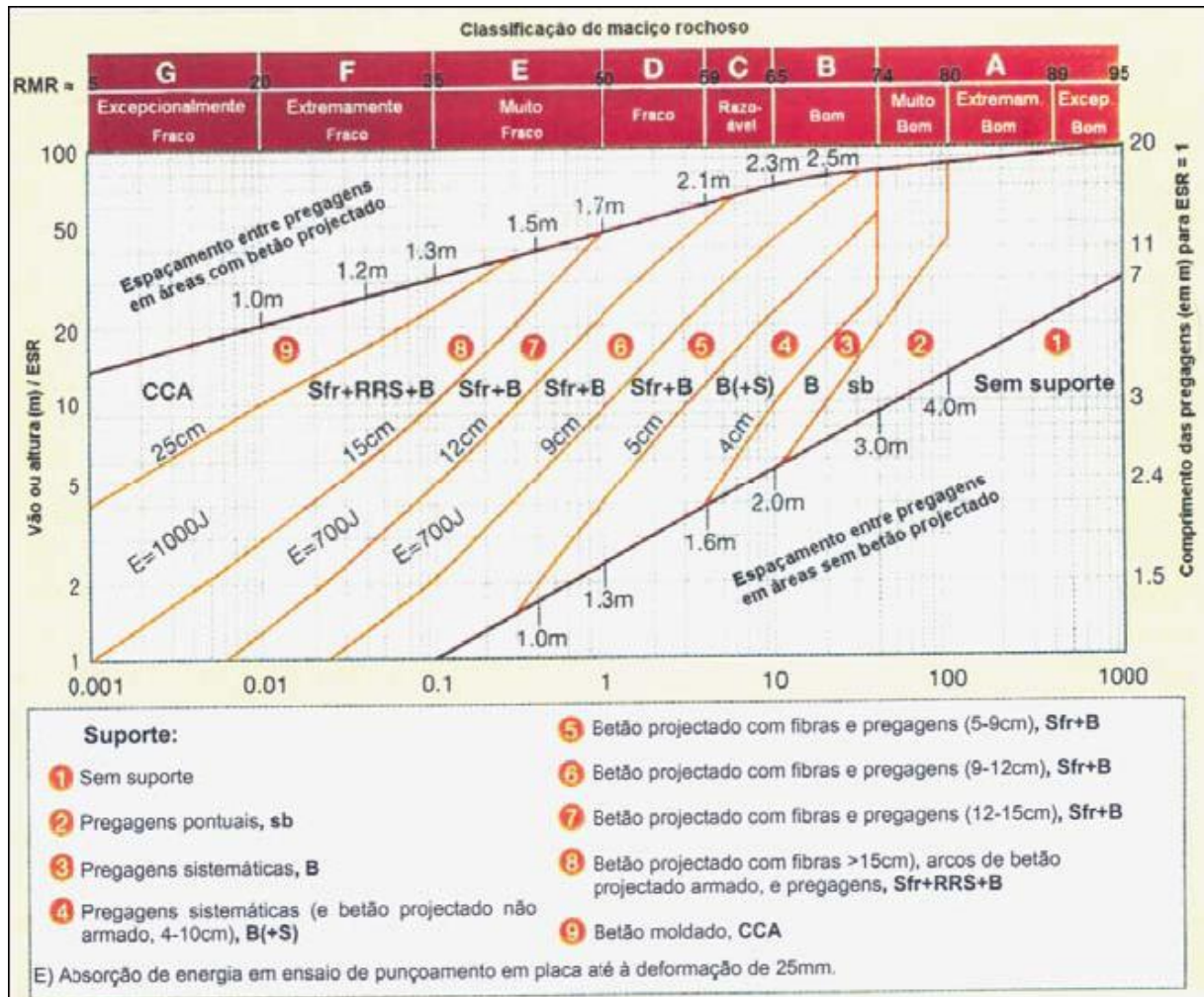


Fig. 2.13 Ábaco para a determinação da categoria do suporte definitivo com classes de absorção de energia (Miranda, 2003)

Tendo em vista que os sistemas de classificação geomecânica fornecem uma abordagem em que o tipo de suporte é função destes, existe a possibilidade da combinação com análise numérica – modelação da deformação da rocha, com ou sem suporte – tornando possível avaliar a deformação e os esforços a que o *lining* estará sujeito. Assim no caso de deformações elevadas é necessário um revestimento com capacidade para resistir aos esforços mas suficientemente dúctil. O betão projectado com fibras (BPF) é exemplo de um material capaz de comportar tais níveis de deformação (Quadro 2.5).

Quadro 2.5 Características especiais do betão projectado com fibras (adaptado de Aagaard e Blindheim, 1996)

Estabilização e comportamento estrutural:	Aspectos de durabilidade	Acções térmicas e do fogo
Estabiliza o contorno da rocha e contribui para a estabilidade global mantendo esse mesmo contorno Melhor rendimento no que diz respeito à ductilidade e durabilidade que a malhasol Capacidade de se deformar; manter o nível de deformação continuando a suportar carga Em maciços fracos, sugerem-se conteúdos elevados em fibras o que resultará em elevada capacidade de absorver energia e resistências residuais após grandes deformações.	Distribuição homogénea das fibras descontínuas (assegurada através de uma correcta composição) resultará numa protecção à corrosão, já no caso da malhasol, uma deficiente espessura de recobrimento pode comprometer a durabilidade. As fibras na parte carbonatada do betão irão apresentar corrosão com o tempo, no entanto as fibras embebidas em betão são estão salvaguardadas Baixa permeabilidade devido à razão água-ligante reduzida Em ambientes extremamente agressivos emprego de fibras de aço galvanizado ou aço inoxidável.	Acção do fogo provoca expansão das fibras provocando fissuração, no entanto atendendo às dimensões reduzidas da fibra, o efeito da expansão não é significativo. Outras fibras (poliméricas) com a função de criar espaços para a circulação dos gases desenvolvidos durante a acção do fogo evitam destacamentos do betão. Diminuição do potencial para fissuração resultante dos agregados com coeficiente de expansibilidade térmica elevada, e.g. rochas ricas em quartzo.

O ábaco da Figura 2.13 relaciona o índice geomecânico Q , as dimensões da escavação, recomenda comprimentos de pregagens, o seu espaçamento e a espessura de betão projectado (com ou sem fibras de aço). Ábacos deste tipo pode ainda indicar a constituição das costelas bem como o seu espaçamento. Um dos aspectos fulcrais tem que ver que não é a espessura do *lining* de betão projectado com fibras que é suficiente para garantir os requisitos em ductilidade, ou a capacidade para continuar a sustentar carga para deformações cada vez maiores. É a capacidade em absorver energia que deve ser avaliada. Assim num maciço excepcionalmente fraco, onde grandes deformações são de esperar, os requisitos de ductilidade e absorção de energia do betão projectado devem ser tidos em consideração, no ábaco de Barton melhorado (Figura 2.13).

Em maciços rochosos fracos é de esperar a existência de deformações logo após a escavação da abertura subterrânea. Deformações entre os 2-10cm ou maiores podem ocorrer em aberturas com vão de 10 m, portanto um suporte primário e flexível combinado com pregagens é necessário para controlar deformações da massa rochosa para evitar o colapso (Grimstad et al., 2002). Assim é importante aplicar betão projectado com fibras de elevada qualidade, que possa comportar grandes

níveis de deformação e possua ainda resistência residual. Existe uma conexão entre deformação e variação do índice Q , bem como entre deformação e o vão ou altura da abertura subterrânea (Figura 2.14). Assim deformações elevadas sugerem valores baixos para o índice Q . Devido a esta evidência, o suporte temporário, e até em alguma extensão o suporte definitivo deve ser dimensionado de forma a tolerar os níveis de deformação esperados.

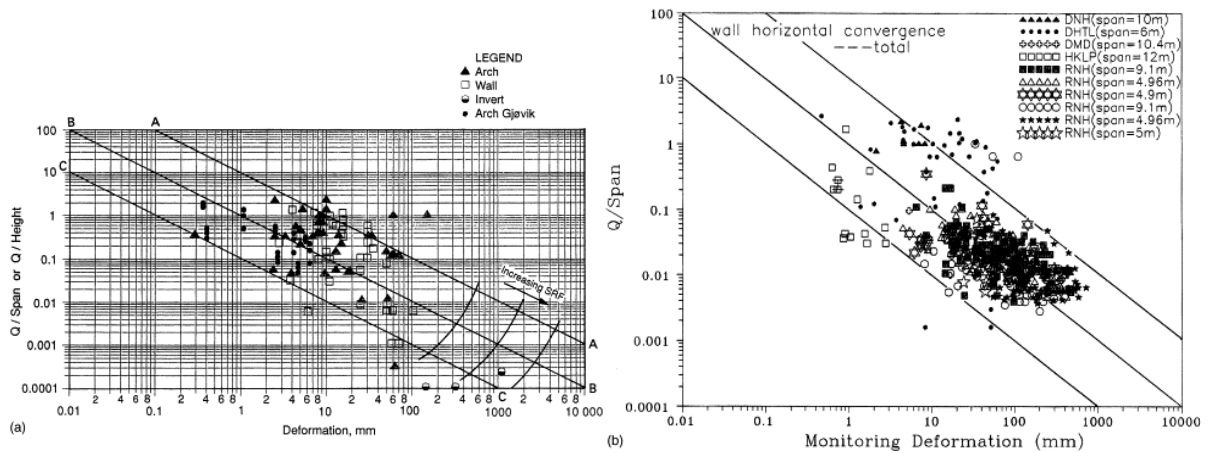


Fig. 2.14 (a) $Q/\text{vão}$ ou Q/altura vs. deformação radial e convergências para túneis e galerias; (b) registos de convergências de varias obras subterrâneas na República da China (Barton, 2002)

Uma forma de avaliar o modo como o *lining* de betão projectado sustem a deformação é o ensaio de absorção de energia, que pode ser efectuado segundo dois ensaios (Figura 2.15). Tem existido a noção errada que todas as fibras exibem desempenho semelhantes no regime pós-fendilhação em que o parâmetro determinante é a dosagem em fibras (NCA, 1999). Portanto partir da premissa da dosagem, ou volume de fibras, é falacioso. As aplicações estruturais do BPF são agora baseadas na performance do produto final, sobretudo em estado fendilhado, fazendo uso de ensaios sobre provetes em prisma ou em placa – Figura 2.15 – ; os ensaios realizado em placa quadrada, no caso de revestimento em túneis, são mais representativos que os ensaios de ductilidade efectuados em vigas ou mesmo em placa redonda, pois traduzem mais fielmente a realidade.

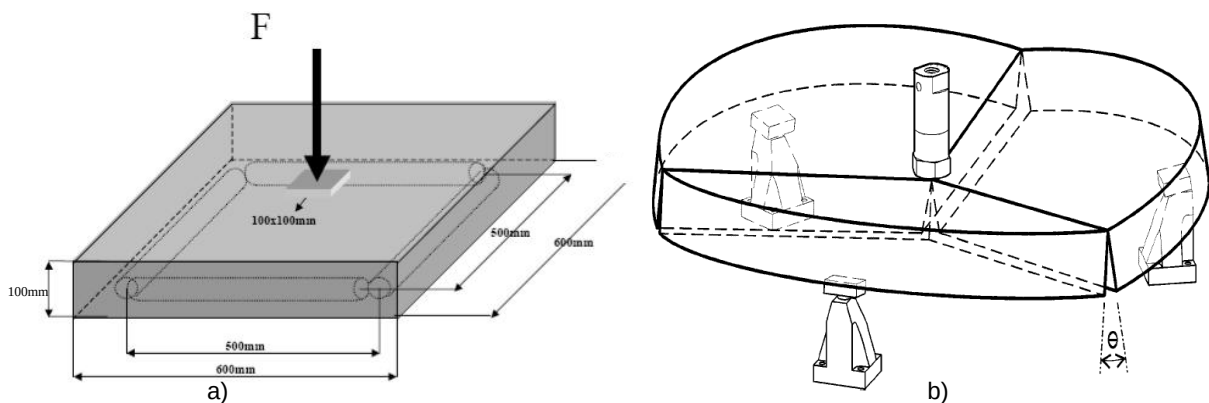


Fig. 2.15 (a) configuração do ensaio de absorção de energia segundo a NP EN 14488-5:2008 (IPQ, 2008a); (b) esquema de rotura em ensaio de absorção de energia em placa redonda ASTM C-1550 (ASTM, 2003)

Ambas as configurações para ensaio de absorção de energia geram uma curva carga vs. deslocamento, cuja área sob a curva é a capacidade de absorção de energia do material. Quantifica-se assim a performance do BPF.

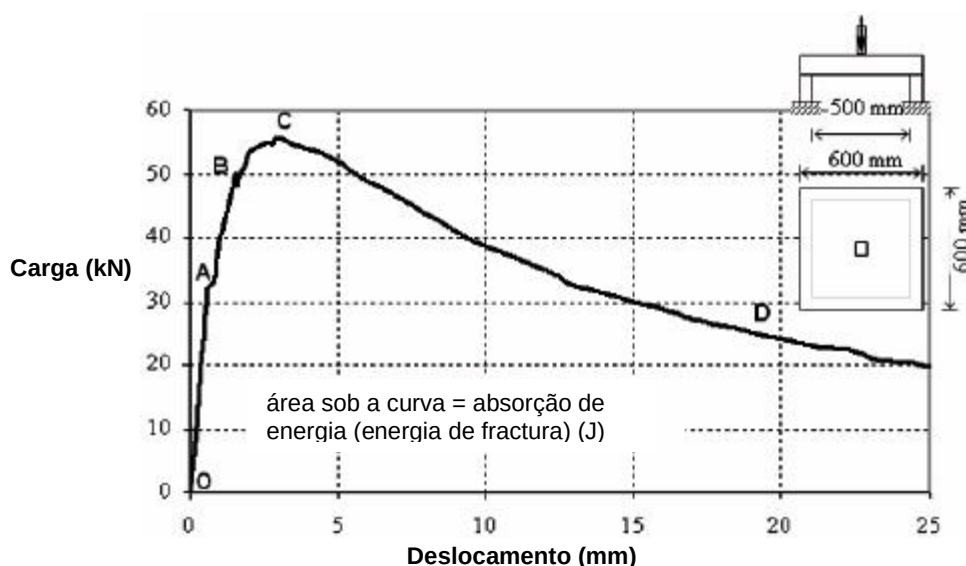


Fig. 2.16 Curva carga-deformação para ensaio de absorção de energia em placa quadrada (Koksal, Ilki, Bayramov e Tasdemir, 2006)

A figura 2.16 ilustra uma curva típica do ensaio de absorção de energia segundo a NP EN 14488-5:2008 (IPQa, 2008), onde é possível retirar pontos característicos da curva (Koksal et al., 2006):

- AO – região elástica linear
- AB – fendilhação da matriz
- BC – comportamento de endurecimento (*strain hardening*)
- CD – fase de desligamento (*debonding*), seguida de arrancamento das fibras (*pull-out*)

Em linha com as recomendações da EFNARC (1996), a EN 14487-1:2005 (CEN, 2005) define classes de absorção de energia – Quadro 2.6 – segundo o valor da energia absorvida até uma deformação de 25 mm.

Quadro 2.6 Classes de energia de absorção para ensaios em placa quadrada

Classes de energia de absorção		Energia absorvida até uma deformação de 25 mm	Condição do maciço
EFNARC (1996)	EN 14487-1:2005 (CEN, 2005)		
a	E500	500 Joules	Bom
b	E700	700 Joules	Médio
c	E1000	1000 Joules	Difícil

Recorde-se que estas classes de absorção de energia estão indicadas no ábaco de Barton (Fig. 2.13) devendo ser cumpridas para maciços fracos ou excepcionalmente fracos. No entanto este procedimento de determinação da capacidade de absorção de energia em placas de betão projectado com fibras deve também ser estendido a controlo de qualidade, consistindo numa ferramenta útil pois

avalia correctamente a natureza do material colocado (em termos de ductilidade, resistências residuais etc). Refira-se que o controlo após projecção deve incluir a avaliação de parâmetros como:

- Resistência à compressão
- Adesão BPF-substrato
- Espessura

Mas sobretudo do conteúdo em fibras, que apesar de indicativa, não é determinante na efectiva capacidade de absorção de energia do material.

2.2.2.2.1 EVIDÊNCIA DO LINING DE BETÃO PROJECTADO COM FIBRAS VS. OUTROS MATERIAIS

Viu-se que para efeitos de revestimento em túneis ou galerias importa a capacidade em resistir a cargas pontuais, estabilizar o contorno da rocha e sobretudo ter a capacidade de se deformar, sustendo carga. Especialmente em obras subterrâneas tem sido comum a aplicação de BPFA – Betão projectado com fibras de aço - ao invés de malha electrosoldada (malhasol) colocada à mão que constitui um processo difícil, lento, perigoso e dispendioso, onde nem sempre a adesão entre substrato e o revestimento é alcançada (zonas sombra por detrás da malha, etc.) – Figura 2.17.

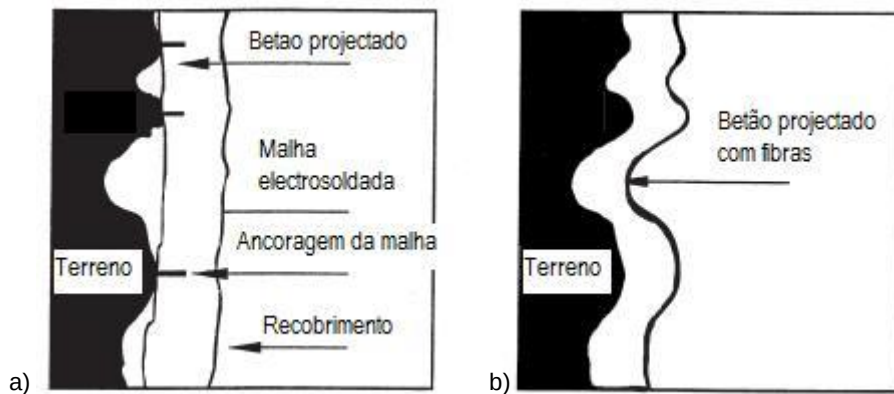


Fig. 2.17 Comparação de revestimento a betão projectado e malha electrosoldada (a) vs. lining de betão projectado com fibras (b); retirado de Vandewalle (1998)

Por outro lado, as fibras eliminam a necessidade de armadura convencional em betão proporcionando desta forma uma facilidade na colocação do betão. Torna-se então útil comparar o comportamento do BPFA e o betão armado convencional (malhasol), mais ainda quando é requerido um efeito estabilizador rápido – especialmente na frente – já que muitas vezes esse revestimento irá estar sujeito a explosões (*drill and blast*) e ao processo de furação para colocação de pregagens (Ding e Kusterle, 1999).

Assim e tendo em conta que novos materiais têm surgido no domínio do BPF, como as fibras sintéticas, importa também incluir o comportamento deste material – betão projectado/reforçado com fibras de polipropileno/sintéticas (BPFS) – em termos de absorção de energia e ductilidade (Figura 2.18 e Figura 2.19).

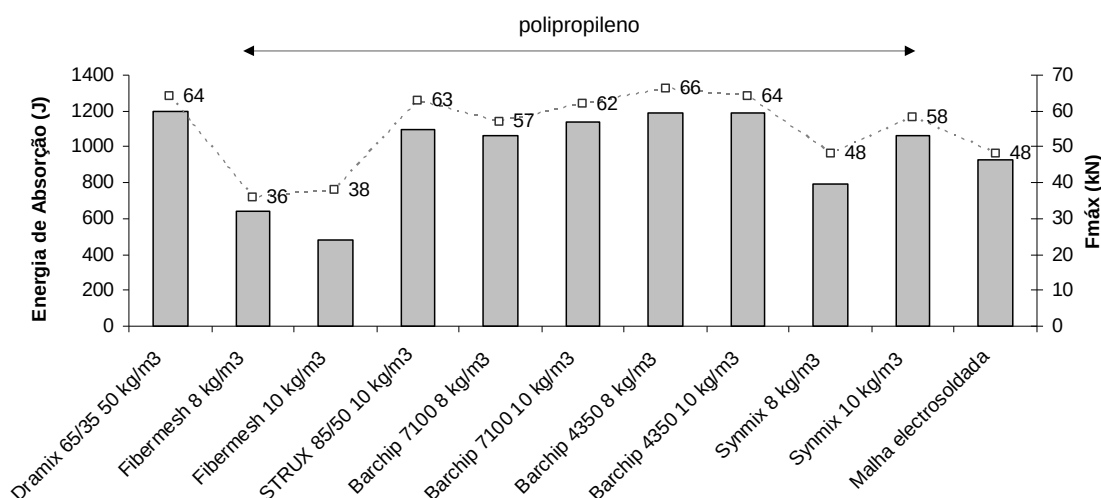


Fig. 2.18 Carga máxima e absorção de energia – Painéis EFNARC. Cada barra corresponde ao valor médio de um mínimo de 3 placas; retirado de Malmgren (2005)

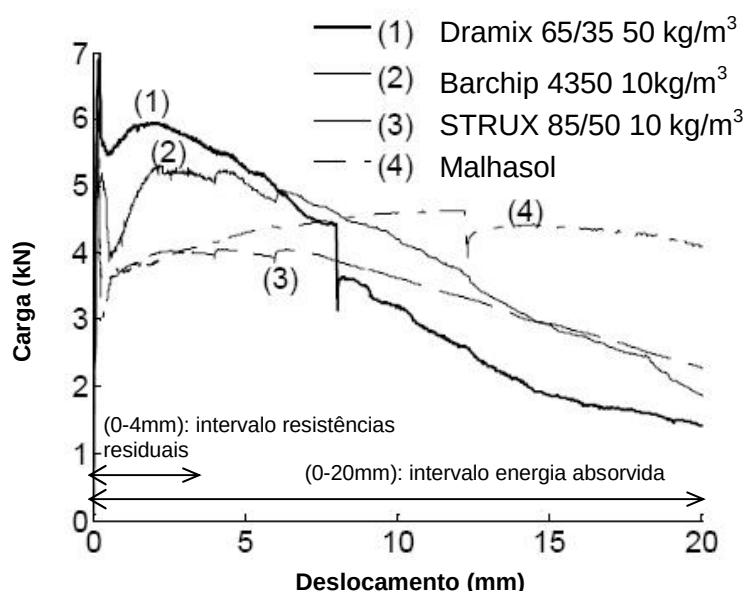


Fig. 2.19 Curvas carga vs. deslocamento – ensaios à flexão sobre prismas. Cada barra corresponde ao valor médio de um mínimo de 3 primas; retirado de Malmgren (2005)

As curvas carga vs. deformação, segundo a configuração disposta pela EFNARC (1996) para o ensaio sobre prismas de betão projectado, revelam maior carga máxima para as fibras de aço, no entanto esta capacidade decresce mais rapidamente para deslocamentos maiores, comparativamente aos prismas armados convencionalmente (malhasol) ou reforçados com fibras de polipropileno. No entanto se admitidos dois critérios de deformação (Papworth, 2002):

- Baixa deformação – em aplicações estruturais (a abertura de fenda é muito considerável – aproximadamente 4 mm) onde fissuração é aspecto a ter em conta pois daí depende a maior ou menor facilidade da entrada de água, da corrosão das fibras, ou apenas por considerações estéticas; as fibras metálicas oferecem melhores desempenhos.

- Alta deformação – em aplicações estruturais onde altas deformações sejam permitidas; as fibras de polipropileno oferecem melhores desempenhos, sem desenvolvimento de corrosão e a menor custo.

No entanto é bom não esquecer que num túnel a sobre-escavação, a irregularidade da superfície e a deformação do terreno tornam impossível prever a localização dos esforços de tracção; ainda a dificuldade em posicionar a malha e de a manter no local durante o impacto do betão projectado faz com que dificilmente a malhasol esteja no sítio onde é necessária a sua contribuição.

Comparativamente as fibras distribuem-se em toda a massa de betão logo em qualquer ponto a sua presença garantirá a resistência a esforços de tracção.

A realidade da obra é bem diferente do ensaio em laboratório em que a malhasol é colocada no sítio certo.

Deve-se alertar que mesmo considerando estes dois critérios de deformação, o lining tem de oferecer capacidade de suporte contínua à pressão do terreno. Assim o fenómeno da fluência torna-se importante.

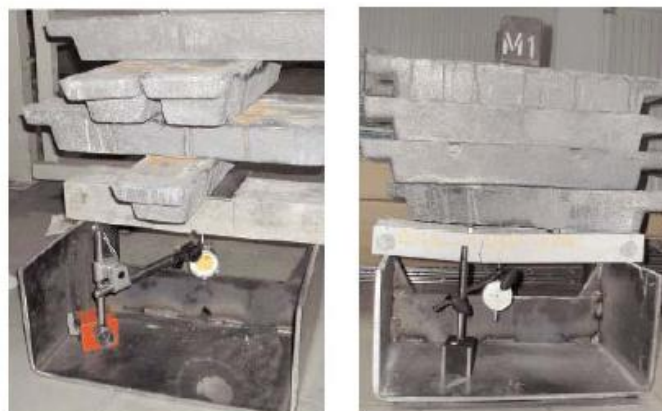
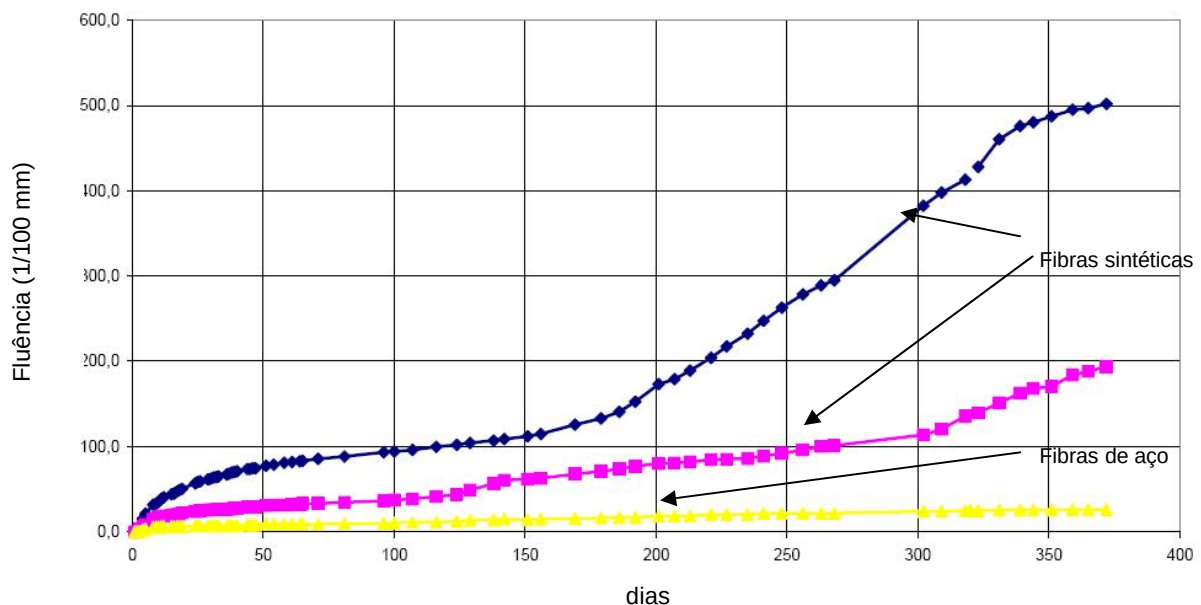


Fig. 2.20 Comportamento em fluência de fibras macro sintéticas e de aço, resultados e configuração; retirado de Lambrechts (2005)

Sendo característica do *lining* de betão projectado com macro fibras sintéticas ou de polipropileno de baixo módulo de elasticidade proporcionar capacidade de suporte considerável a deformações elevadas, esta pode ser agravada ao longo do tempo, isto é, o comportamento em fluência é factor de agravamento do aparecimento de patologias como fendas e deformações anormais. Assim contextualizando este comportamento com a curva de reacção de um solo (CRS) e com a curva característica do suporte (CCS) a betão projectado, pode-se referir, simplifadamente, que para coeficientes de fluência elevados, existirá uma diminuição do módulo de elasticidade do betão projectado, o que por consequência resultará numa diminuição da rigidez do *lining*, podendo resultar em colapso – Figura 2.21.

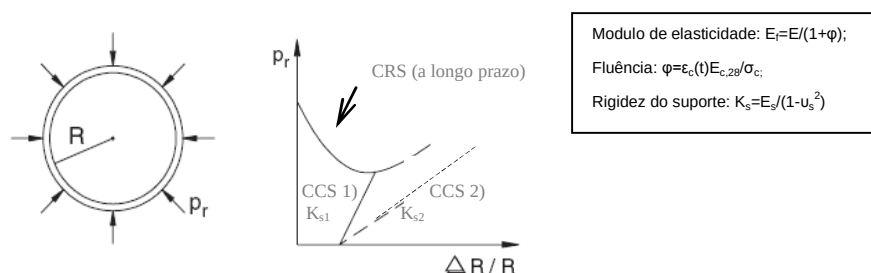


Fig. 2.21 Curva de reacção do solo e curva característica do suporte sem fluência significativa (1) e com fluência (2)

Sem entrar em controvérsias remete-se para Vandewalle (2007) e Lambrechts (2005) as considerações relativas à fluência dos *linings* de betão projectado com fibras sintéticas ou de polipropileno, pois segundo os mesmos autores:

- As fibras de aço desempenham um papel importante na durabilidade das construções, nas situações em que estas actuam como solução única ou solução híbrida (fibras de aço e armadura convencional);
- A corrosão das fibras não é uma questão relevante, pois quando estão em jogo aspectos estéticos ou quando se permitem grandes deformações, as fibras de aço galvanizadas oferecem a protecção à corrosão requerida nessas aplicações.
- Em termos de comportamento ao fogo, as macro fibras sintéticas são consumidas sob a acção de pequenos incêndios (140 °C);
- Contrariamente às fibras de aço, as macro fibras sintéticas não garantem a estabilidade estrutural em maciços rochosos e terrenos altamente convergentes.

2.2.2.2 SEGMENTOS DE BETÃO PRÉFABRICADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO PARA ESCAVAÇÃO COM MÁQUINAS INTEGRAIS

"It is cheaper to do things right the first time."
Phil Crosby

A escavação de túneis com máquinas integrais é um método especial, faz uso de equipamento sofisticado tendo como principal intento que no decorrer dos trabalhos estes não disturbem as actividades à superfície. Não sendo objectivo do presente trabalho o estudo das combinações de acções em escavação mecanizada - shield tunnelling – que o lining deve suportar, remete-se para JSCE (2007) e Toan (2006) a caracterização e procedimento de cálculo destas, referindo-se

simplificadamente que o revestimento deve ser capaz de resistir às solicitações seguintes (ITA-AITES, 1999):

- geoestáticas (estado inicial de tensão, estado de redução das pressões, escavação suportada pelo escudo, escavação suportada pelos segmentos injectados com grout, deformação a longo termo)
- colocação (macacos hidráulicos) – Figura 2.22
- balastro e solicitações de serviço motivadas pela circulação de cargas
- injecções secundárias
- peso próprio, armazenamento e levantamento



Fig. 2.22 Actuação dos macacos, retirado de Toan (2006)

No que diz respeito ao revestimento colocado este é quase sempre constituído por segmentos prefabricados de betão, onde um determinado número de segmentos e a “chave” (keystone) fecham o anel, existindo entre cada dois anéis e cada dois segmentos as seguintes juntas:

- Junta lateral – entre cada anel
- Junta longitudinal – entre cada segmento

Tendo em conta o processo de produção, transporte, colocação e solicitações em estado de serviço dos segmentos dos anéis é natural que ocorra fendilhação e/ou outra fissuração. As razões são várias sendo a sua probabilidade de ocorrência a seguinte (Chen e Mo, 2008):

- Transporte e depósito – 5,30%
- Colocação do segmento – 38,20%
- Incompatibilidades entre tuneladora e segmentos – 21,60%
- Forças dos macacos hidráulicos não uniformes – 18,50%
- Pressão de injecção errada – 6,50%
- Qualidade do segmento – 9,90%

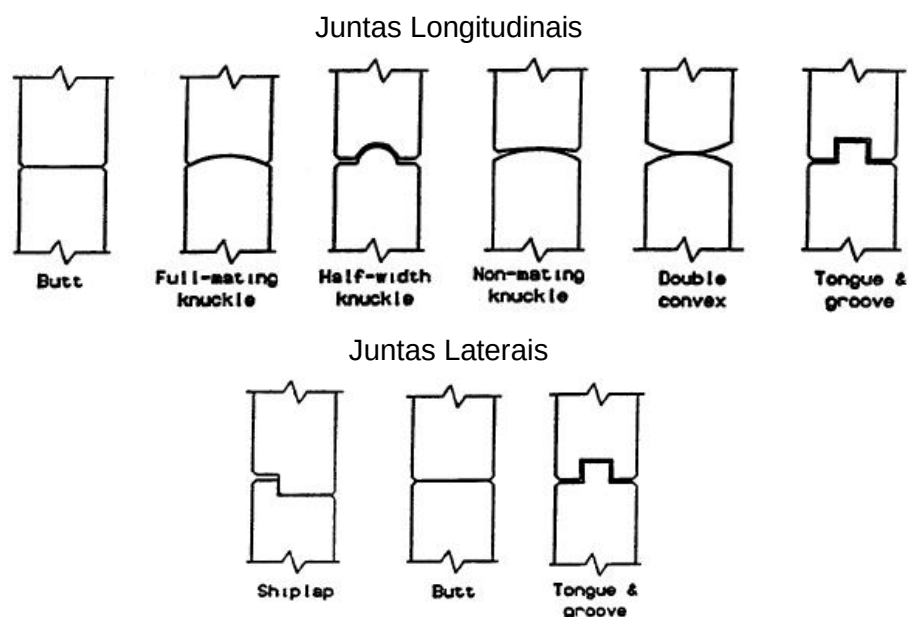


Fig. 2.23 Vários tipos de juntas entre segmentos ou anéis, retirado de USACE (1999)

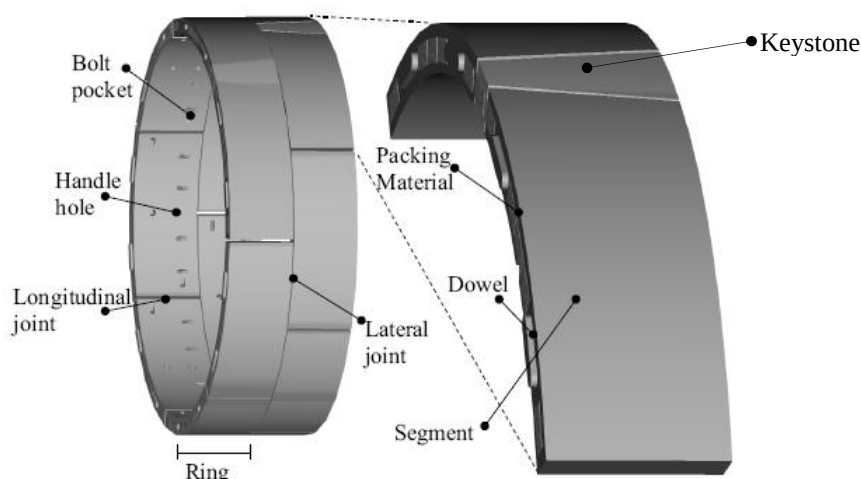


Fig. 2.24 Terminologia do revestimento, retirado de Blom (2002)

Se a fissuração reduz a durabilidade do segmento de betão, influenciando a durabilidade do túnel, é necessário um estudo da forma, distribuição e origem das fendas que contribua para reforçar a parte mais vulnerável do segmento, aumentando a fiabilidade da peça e em ultima análise da estrutura (Figura 2.25 e Figura 2.26). Este trabalho é necessário pois uma redução do dano nas peças pode reduzir os custos de construção consideravelmente, aumentando também a rapidez de construção, já que muitas vezes durante o processo construtivo é necessário reparar a avaria ou trocar o segmento imediatamente após dano (Waal, 1999). Como já foi atrás referido, a maioria das avarias verificam-se em fase de construção do túnel, assim, simplificada, dependendo da especificidade do método de construção é natural que as avarias nas peças dependam da:

- aplicação das forças concentradas através de macacos hidráulicos e da rotação entre dois segmentos consecutivos – algumas destas avarias não são visíveis nem reparáveis.

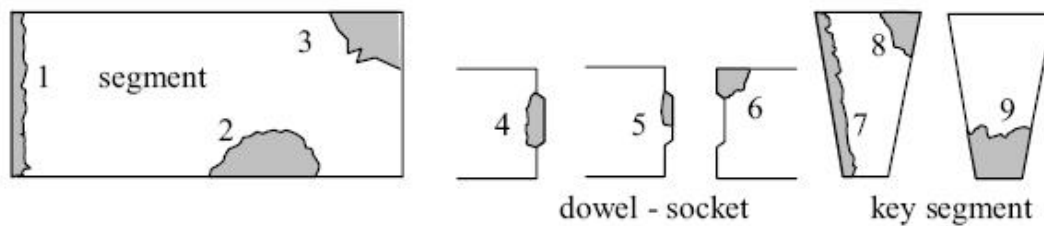


Fig. 2.25 Padrões de delaminação (*spalling*) em segmentos. Danificações 4 e 5 são invisíveis e irreparáveis; as restantes apenas reparáveis pelo interior; retirado de Blom (2002)

As fibras de aço potenciam o comportamento dúctil pós-fendilhação e uma distribuição da fendilhação no betão. Como o conceito de espessura de recobrimento não se estende ao BRFA, os elementos ficam mais salvaguardados de danos vários como delaminação, perdas nos cantos; além disso a resistência ao impacto é maior que em elementos com armadura convencional. Deve-se considerar, contudo, que apesar de económica e tecnicamente atractiva, a solução com recurso a segmentos prefabricados reforçados só com fibras de aço deve ser utilizada com a devida cautela. As diversas solicitações a que os segmentos irão estar sujeitos podem exigir combinação com armadura convencional (Kasper, Edvardsen, Wittneben e Neumann, 2007) Contudo têm sido descritas na literatura algumas aplicações em que se recorreu exclusivamente ao reforço mediante fibras de aço – Quadro 2.7.

Quadro 2.7 Exemplos de casos do uso de segmentos prefabricados usando fibras de aço

Extensão (Km)	Diâmetro interno (m)	Função	Tipo de estrutura	Referência
3,9	4,2	Rede de distribuição de água e aquecimento – Copenhaga	3 segmentos; 2 contra-chaves; 1 chave BRFA, Espessura: 300mm Fibras: DUOLOC 47/0,80 35 Kg/m3	Kasper et al. (2007)
2,5	7,15	Thames - Túnel ferroviário – Channel Tunnel Rail Link Project (CTRL) – Reino Unido	9 segmentos; 1 chave BRFA, Espessura: 350mm Fibras de aço (30kg/m3) e polipropileno monofilamento	Glover (2007)
7,5	9,5	Linha 4 - Metrô de São Paulo	Fibras de aço e armadura convencional	Odebrecht (2008)
1,3	2 x 6,1	Heatrow T5	BRFA, Espessura: 220 mm	Mottmac (2008)

Apenas como exemplo da possibilidade da inclusão das fibras de aço com o objectivo de melhorar as propriedades do segmento prefabricado, Plizzari e Tiberti (2006) estudaram a o revestimento (D=9m; L=4 Km; 6 segmentos + 1 chave) usado na linha 1 do metropolitano de Valência (Venezuela) e um outro reforçado com fibras de aço, chegando à conclusão que a optimização do reforço aumentaria a capacidade ultima resistente em 3 vezes.

Como consideração final refira-se que com a adição de quantidades crescentes de fibras reduz significativamente a abertura de fendas.

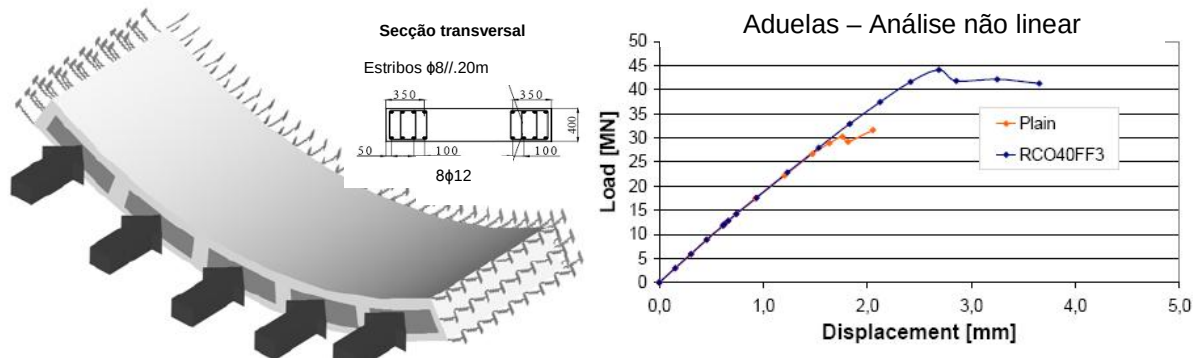


Fig. 2.26 a) Segmento solicitado por 5 macacos; b) curvas carga vs. deslocamento obtidas de segmentos com betão simples e betão armado mais inclusão de fibras, retirado de Plizzari e Tiberti (2006)



Fendilhação longitudinal



Fendilhação local



Quebra local

Fig. 2.27 Distribuição da fissuração em túneis escavados com recurso a TBM (com escudo); retirado de Chen e Mo (2008)

3

ESTRUTURA DO BETÃO COM FIBRAS

3.1. INTRODUÇÃO

As propriedades do betão reforçado com fibras são afectadas pela interacção entre a fibra e a matriz cimentícia circundante. Numa primeira aproximação é possível afirmar que das características das fibras dependerá um comportamento mais ou menos específico do compósito resultante. Aqui se incluem os mecanismos de transferência de esforços entre fibra e matriz, o efeito que a fibras introduzem nos diversos estados de sollicitação, tanto em fase não fendilhada como em fase fendilhada.

Sabe-se também que do tipo de fibra depende ainda a chamada zona de transição i.e. a interface fibra-matriz com uma microestrutura diferente da matriz cimentícia que envolve os agregados (Bentur e Mindess, 1990). O conceito de zona de transição interfacial (ZTI) é também indicado por Li e Stang (2001) como governando a interacção entre a fibra e a matriz. Assim a aferição do desempenho do betão com fibras sob várias sollicitações passa também pelo estudo da forma, secção e superfície das fibras, pela distribuição e orientação das fibras, e finalmente a estrutura da matriz cimentícia e estrutura da interface fibra-matriz, esta ultima sendo factor chave no controlo do desempenho global do material (Bentur e Mindess, 1990; Löfgren, 2005).

3.2. ESTRUTURA DA MATRIZ CIMENTÍCIA E INTERFACE FIBRA-MATRIZ

3.2.1. ESTRUTURA DA MATRIZ CIMENTÍCIA

Da estrutura da matriz em betões reforçados com fibras há que referir que no caso da pasta de cimento esta não é significativamente diferente da encontrada em outros materiais cimentícios (Bentur e Mindess, 1990, 1990; Löfgren, 2005).

No caso da interface pasta de cimento – agregado, esta é geralmente constituída por duas camadas (Bentur e Mindess, 1990):

- filme duplex com uma espessura de 1 μm sendo subdividida em outras duas zonas (cristais de CH e gel C-S-H);
- zona de interface com uma espessura estimada entre 50-100 μm diferente em estrutura e mais porosa que a pasta de cimento (contendo gel C-S-H, etringite e grandes cristais de CH com várias orientações)

3.2.2. INTERFACE FIBRA-MATRIZ

A resistência, deformação e o modo de rotura de toda a gama dos compósitos reforçados com fibras é dependente da ligação entre a fibra e a pasta de cimento sendo esta última dependente da microestrutura da interface.

Ao introduzir fibras no betão em estado fresco ocorre uma perturbação na distribuição dos agregados grossos e das areias, verificando-se uma maior concentração de pasta de cimento em redor das fibras de modo a preencher os espaços criados (efeito de parede) (Dupont, 2003). A zona de transição na vizinhança do reforço é então dependente do tipo de fibra, do modo e tempo de mistura (Bentur e Mindess, 1990).

Em redor de certas não homogeneidades como fibras ou outras inclusões surge a denominada zona de transição interfacial (ZTI), substancialmente diferente em comportamento e composição da matriz mais interior. Assim a formação da ZTI é consequência de (Bentur e Mindess, 1990; Löfgren, 2005):

- efeito de parede;
- possibilidade de ocorrerem reacções químicas junto à superfície da não homogeneidade;
- exsudação e aprisionamento de água como resultado do deficiente agrupamento dos grãos de cimento ($\sim 10 \mu\text{m}$) na zona $20\text{--}40 \mu\text{m}$ em torno da fibra.

Dupont (2003) refere que a ZTI deve ser tratada como uma superfície (espessura igual a zero), já que a espessura desta é desconhecida e difícil de calcular. Assim todas as propriedades da ZTI devem ser concentradas nas propriedades da zona de interface fibra-matriz. Contudo foi estimado que a ZTI num betão típico se situa no intervalo $20\text{--}50 \mu\text{m}$, perfazendo um total entre os $20\text{--}40 \%$ do volume total da matriz cimentícia (Löfgren, 2005).

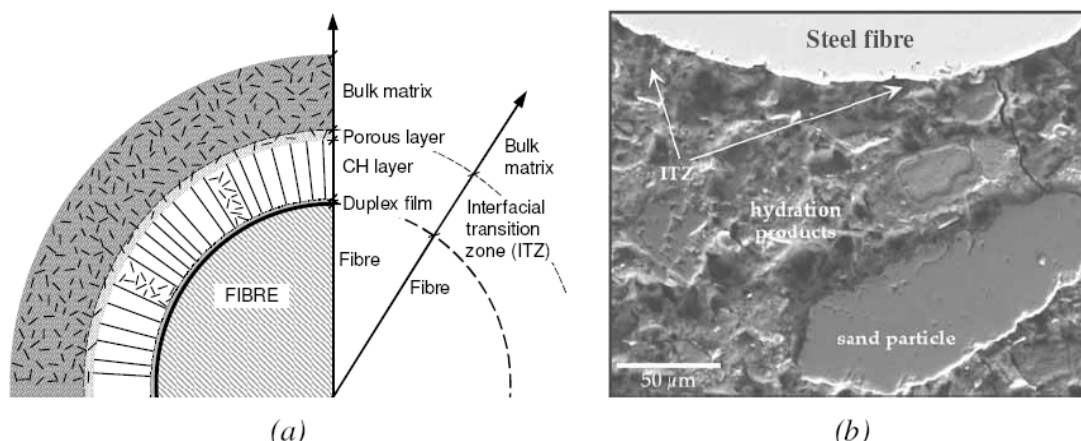


Fig. 3.1 A zona de transição interfacial (ZTI): (a) esquema da ZTI em torno da fibra, baseado em Bentur (1991); e (b) fotografia mostrando a ZTI próxima da fibra e a microestrutura do betão. Fonte: T. Easley e K.T. Faber, Northwestern University (Löfgren, 2005)

Uma forma de encontrar a verdadeira zona de interface i.e aquela que apresenta uma diminuição das resistências faz-se recorrendo a testes de microdureza na fronteira fibra-matriz.

A determinação da microdureza em pastas de cimento e compósitos cimentícios pode ser efectuada usando o equipamento de ensaio de dureza Vickers, existindo também normalização para ensaios de

microdureza como a ASTM E384 (1999). Possibilita-se assim a caracterização dos gradientes microestruturais e.g. ZTI. A descrição do princípio teórico e procedimentos a ter em conta num ensaio de microdureza pode ser encontrado em Igarashi et al. (1996).

A natureza da ZTI pode então ser caracterizada através (Igarashi et al., 1996):

- ensaios de microdureza para avaliar a espessura;
- imagens de microscópio electrónico de varrimento (SEM–*Scanning electron microscope*) para avaliação da microestrutura;

Do exposto resulta que a microestrutura da pasta de cimento na vizinhança da superfície de uma inclusão – não homogeneidade – é muito diferente da matriz cimentícia.

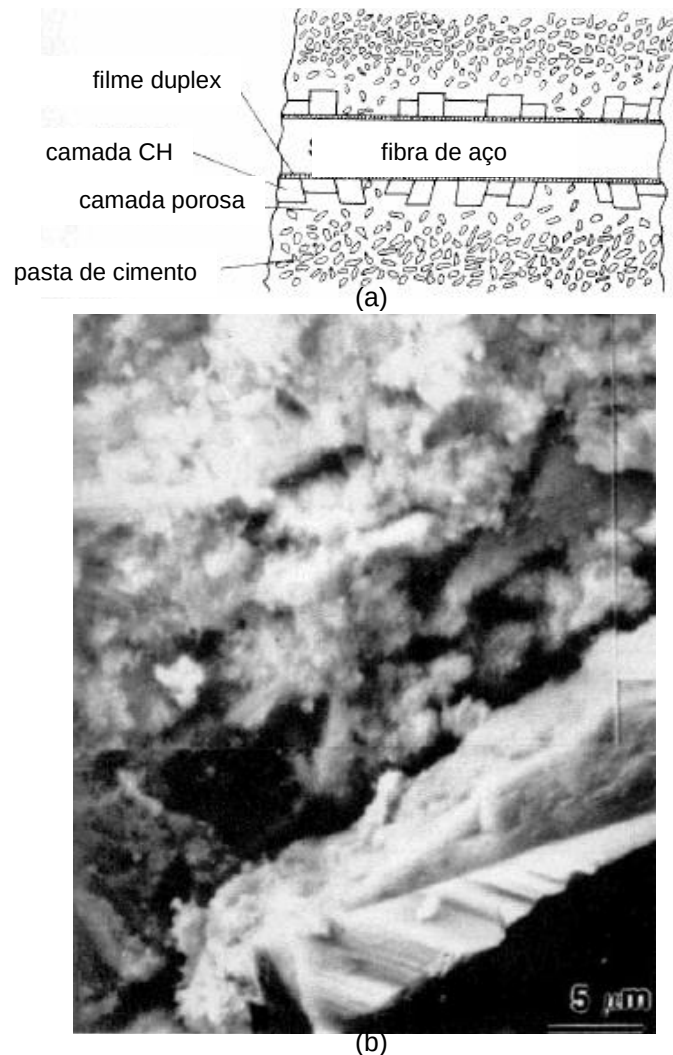


Fig. 3.2 A zona de transição no betão reforçado com fibras de aço: a) esquema; b) Microfotografia a SEM mostrando a camada CH, a camada porosa e a restante matriz cimentícia (Bentur e Mindess, 1990). Fonte: Elsevier Science

Das Figuras 3.1 e 3.2 constata-se, que ligação mais fraca pode não se situar na verdadeira interface fibra-matriz, podendo esta estar localizada na camada porosa (Bentur and Mindess, 1990). Os perfis de microdureza apresentados na Figura 3.3, mesmo para várias razões água/cimento, indicam uma zona menos resistente a uma distância entre os 20 a 40 µm da fibra. Estes gradientes microestruturais são

também função da evolução da hidratação da pasta de cimento. Na Figura 3.4, apresentam-se perfis de microdureza aos 0 minutos e aos 40 minutos (Igarashi et al., 1996).

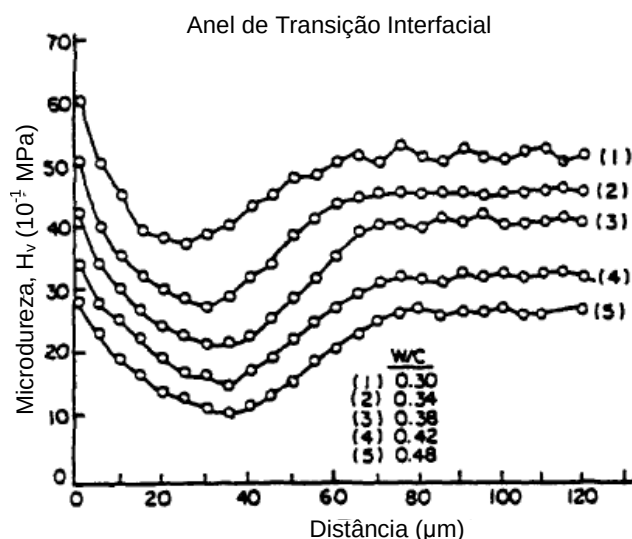


Fig. 3.3 Perfil de microdureza na zona de transição interfacial (ZTI) de pastas de cimento com diferentes razões água cimento (a/c) segundo Wei et al. (1986) (Igarashi et al., 1996)

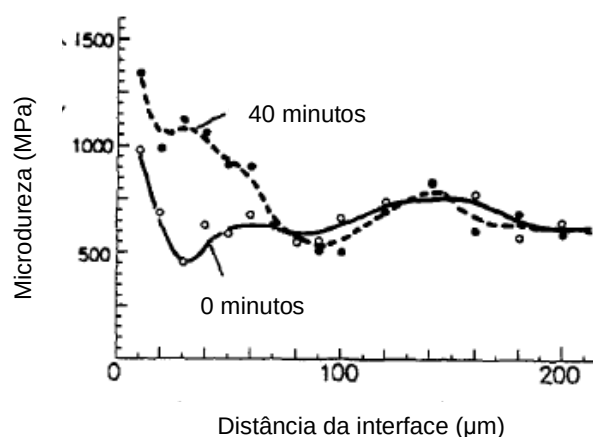


Fig 3.4 Perfil de microdureza no estado fresco para a zona de transição interfacial (ZTI) de pastas de cimento com fibras sujeitas a diferente processamento: 0 minutos; 40 minutos. (Igarashi et. al, 1996)

3.2.3. MECANISMOS DE REFORÇO DA INTERFACE ATRAVÉS DE ADIÇÕES

A interação fibra-matriz pode ser melhorada a nível micro estrutural através da adição de fumo de sílica, escórias de alto forno ou mesmo alterando o conteúdo em agregado fino contribuindo desta forma para o agrupamento entre das diversas granulometrias e inclusões i.e contribuindo para a compacidade da mistura (Chan e Chu, 2004; Igarashi et al., 1996; Guerrero e Naaman, 2000). A melhoria da ligação entre fibra e matriz circundante, atrás referido como dependendo em grande parte da ZTI, pode ser alcançado através de duas formas: actuando sobre a secção, forma e superfície da fibra ou, pelo contrário, modificando a matriz cimentícia, alcançando-se melhorias na ordem dos 100% (Igarashi et al., 1996; Naaman et al., 1991). Desta forma a adição de fumo de sílica ou microsilica ou outro micro-filler contribui para o aumento da aderência e resistência ao arrancamento da fibra (*pullout*), consistindo num mecanismo de reforço interfacial (Chan e Chu, 2002).

Assim correntemente para o estudo da interface fibra-matriz recorre-se a:

- ensaios de arrancamento (pull-out) – mede as propriedades da interface como sendo a força necessária para arrancar ou fracturar um elemento de reforço embebido na matriz (Bartos, 1981) e.g. arrancamento da fibra em controlo de deformação registando-se os valores de força vs. deslocamento (Figura 3.5.) Os ensaios pull-out podem ser efectuados segundo várias configurações;
- observação em microscópio electrónico de varrimento (SEM) da superfície das fibras arrancadas dos diversos tipos de matrizes.

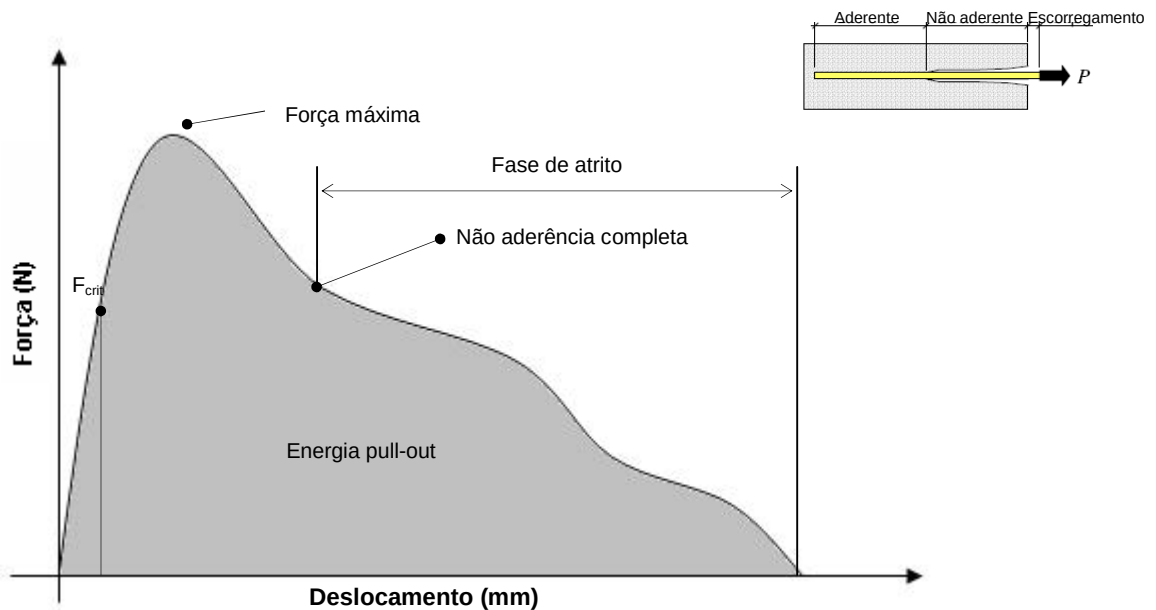


Fig. 3.5 Representação esquemática de um ensaio de pull-out

Vários autores retrataram a influência dos diversos agentes de aderência no comportamento ao arrancamento das fibras (pull-out). Guerrero e Naaman (2000) analisaram o efeito da finura da areia e de diversos agentes de adesão na resposta ao arrancamento de fibras metálicas em argamassas. Os parâmetros a investigar neste estudo incluíram dois tipos de areias (normal e micro-areia), três tipos de fibras metálicas (lisas, com gancho, e torcidas), e quatro tipos de adições (PVA, látex, metacaulino, e cinzas volantes), no Quadro 3.1 resumem-se as conclusões em termos qualitativos.

Quadro 3.1 – Influência das adições no comportamento ao ensaio *pullout*, segundo Guerrero e Naaman (2000)

Aditivo	% Adição por massa de cimento	Comportamento ao arrancamento								
		Fibras lisas (S)			Fibras gancho (H)			Fibras torcidas (T)		
		F _{máx}	T _f ¹	Energia ²	F _{máx}	T _f	Energia	F _{máx}	T _f	Energia
Cinzas Volantes, FA ³	20%	+	+		+			-		+
Metacaulino, MK ⁴	10%		+	+	+			-	+	+
PVA ⁵	2%		+					-	-	
Látex ⁶	10%		+	+		-			-	+

¹ Tensão de aderência: resiste a deslocamentos ao longo da interface paralela ao comprimento da fibra mas permite um escorregamento ao longo da interface. É caracterizada por um valor estático ou inicial que tem de ser excedido em ordem a um deslocamento na interface; e por um valor dinâmico que representa a tensão de corte necessária para manter o deslocamento a uma taxa constante (Bartos, 1981)

² Energia pull-out ou de arrancamento: trabalho do arrancamento da fibra, definido como a área sob a curva pull-out.

³ Cinzas volantes: subprodutos industriais obtidos por combustão do carvão nas centrais térmicas, podem ser divididas em duas categorias dependendo no conteúdo de cálcio. As cinzas volantes da primeira categoria (propriedades pozolânicas) contêm menos de 10% de óxido de cálcio sendo geralmente produtos da combustão de antracite e de carvões betuminosos. As cinzas da segunda categoria (propriedades pozolânicas e hidráulicas latentes), contêm entre 15 a 35% óxido de cálcio sendo geralmente um produto da combustão da lignite e de carvões sub betuminosos. A pozolanicidade (reactividade), a exigência em água para trabalhabilidade constante do betão contendo cinzas volantes como adjuvante e o desenvolvimento das resistências do betão, são aspectos controlados pela distribuição do tamanho das partículas, morfologia e características da superfície das cinzas. Dos vários aspectos pode-se referir que da densidade das partículas, as menos densas são mais reactivas; as mais limpas e esféricas actuam como enchimento dos vazios contribuindo para a redução de água de amassadura; já as cinzas com alto teor em cálcio apresentando textura rugosa e porosa, vítreas, de partículas esféricas e grande superfície específica são mais reactivas que as esferas lisas. (Ramachandran et. al, 1995; Mehta e Monteiro, 2001)

⁴ Metacaulino: obtido por tratamento térmico – desidroxilação - do caulino (minério composto por silicatos hidratados de alumínio também conhecido como argila da China), este produto é tido em conta como um substituto parcial dos materiais cimentícios. Ensaio têm demonstrado vantagem na durabilidade (cloretos e carbonatação) bem como no aumento da resistência à compressão, entre outras (Sampaio, Coutinho e M. N. Sampaio, 2001).

⁵ PVA (álcool polivinílico): polímero solúvel em água usado como substituição parcial do cimento. Pequenas quantidades do polímero são adicionadas na forma de pó ou em soluções aquosas à pasta de cimento ou ao betão durante o processo de mistura. Este sistema mostra grande redução de água crescendo esta com a razão polímero-cimento. Consequentemente é possibilitada grande adesão a substratos porosos (cerâmicas, argamassas e betões). Este sistema modificado de polímero solúvel em água - contribui para a durabilidade do betão, pois diminui a permeabilidade, e; aumenta a resistência de compressão pois a influência do PVA na hidratação melhora as ligações entre as partículas de cimento (Ramachandran et al., 1995; Singh e Rai, 2000)

Ainda no domínio do reforço da interface fibra-matriz, a técnica da densificação da interface (ver Figura 3.6), utiliza como adição a sílica de fumo. Nesta caso uma matriz cimentícia de alta resistência denominada de sistema Densificado de Pequenas Partículas (DSP – *Densified Small Particles*), faz uso de grandes quantidades de superplastificante e sílica de fumo obtendo-se uma pasta densa e compacta, com razões água ligante na ordem dos 0,2 e uma resistência à compressão na ordem dos 150 MPa (Shannag et al., 1997). Tendo em conta a Figura 3.7, é importante reconhecer não só o efeito da resistência à compressão, que está em relação directa com a força máxima no ensaio pull-out, mas também o decaimento (atrítico) que é eliminado no sistema de maior resistência. Esta melhoria na resposta ao arrancamento é atribuída à microestrutura da interface.

No entanto deve ser tido em conta que esta técnica contribui para a melhoria das ligações da interface mas é limitada apenas a fibras de aço ou de carbono (Singh et al., 2004). Desta forma adições de sílica de fumo até 15% podem melhorar a adesão entre as fibras e a pasta de cimento, mesmo que a tenacidade geral do compósito possa não mostrar um desempenho correspondente (Ramachandran et. al, 1995).

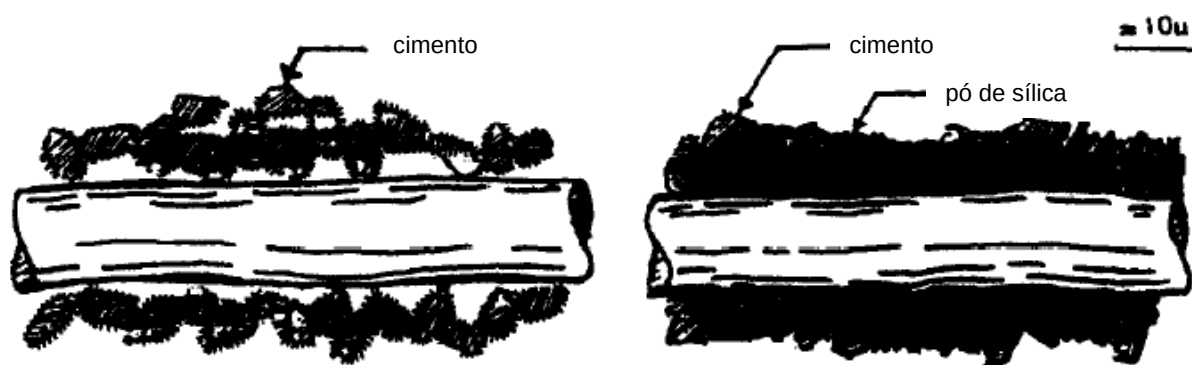


Fig. 3.6 Representação esquemática do agrupamento das partículas na interface no caso da fibra embebida em matriz cimentícia convencional (à esquerda), e na matriz DSP (à direita), (Bache referida por Shannag et al., 1997) Fonte: Elsevier Science Ltd.

⁶ Látex: Sistema de copolímeros de dois ou mais monómeros sendo o seu conteúdo total sólido, incluindo os polímeros, emulsionantes, estabilizadores etc., de 40-50% por massa. Os látexes mais utilizados incluem: borracha de estireno-butadieno (SBR), etileno-vinil-acetato (EVA), éster poliacrílico (PAE) e resina epoxídica (EP). Dos vários tipos de polímeros utilizados em betões modificados, o látex é o mais utilizado na construção. Os polímeros são geralmente adicionados à água de amassadura como qualquer outra adição numa dosagem de 5-20% por massa de cimento (Rixom e Mailvaganam, 1999). O látex pode de facto aumentar as resistências à flexão e tracção de betões ou argamassas especialmente se a incorporação de concentrações superior à crítica são empregues. Por outro lado grande aumento na concentração pode diminuir a resistência à compressão pela redução do cimento Portland disponível na matriz. Outro aspecto importante prende-se com a trabalhabilidade que é diminuída pelo aumento da viscosidade, sugerindo-se a aplicação de um superplastificante compatível (Çolak, 2004).

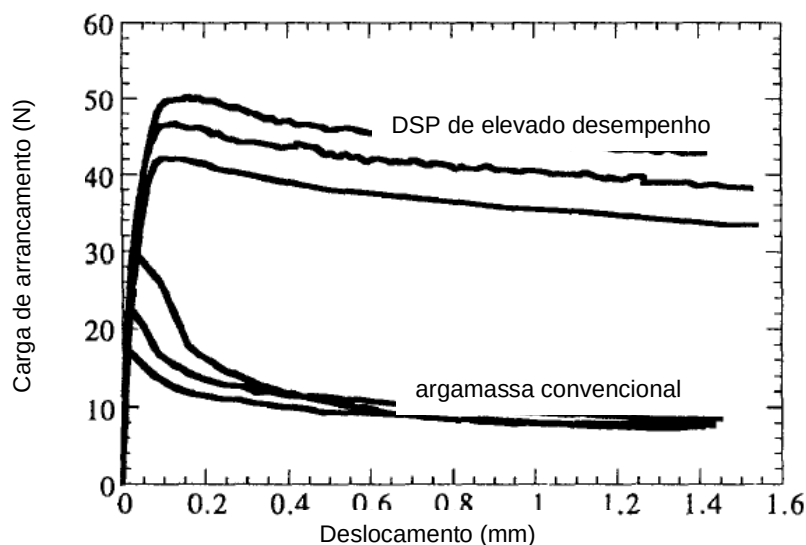


Fig. 3.7 Representação gráfica da carga de arrancamento vs. deslocamento, traduzindo o efeito do tipo de matriz no comportamento ao arrancamento das fibras de aço em matrizes cimentícias (Shannag et al., 1997)

Fonte: Elsevier Science Ltd.

Este sistema de reforço da interface, devido à densa microestrutura se comparada à da pasta de cimento normal traduz-se num:

- aumento em cerca de 3 vezes na tensão de atrito e na energia da fase não aderente (o mecanismo mais importante na absorção de energia destes materiais é o atrito interfacial durante o arrancamento das fibras)
- aumento significativo da força máxima num ensaio de *pullout* e do trabalho de arrancamento i.e energia pull-out

Outro trabalho (Chan e Chu, 2004), embora para efeitos de betão de ultra-elevado desempenho (200-800 MPa de resistência à compressão e extensão última na rotura de 1%), referem que o efeito da sílica de fumo (SF) na matriz correspondente se traduz em:

- fase de não aderência (*debonded*) das fibras mais cedo que no caso de matriz sem SF
- mecanismo de reforço interfacial é significativo para conteúdos entre os 20-30% de SF, decrescendo para valores superiores
- aumento da energia de pull-out para conteúdos de SF até 30%.

Mais significativo que o reforço nas propriedades interfaciais é sem dúvida o aumento dos valores de energia de *pullout*, obtendo-se valores 100% maiores se utilizando 30% SF comparativamente à matriz sem SF.

Uma forma de investigar o mecanismo de reforço microestrutural na interface fibra-matriz como já referido anteriormente, faz-se por meio de SEM – Figura 3.8.

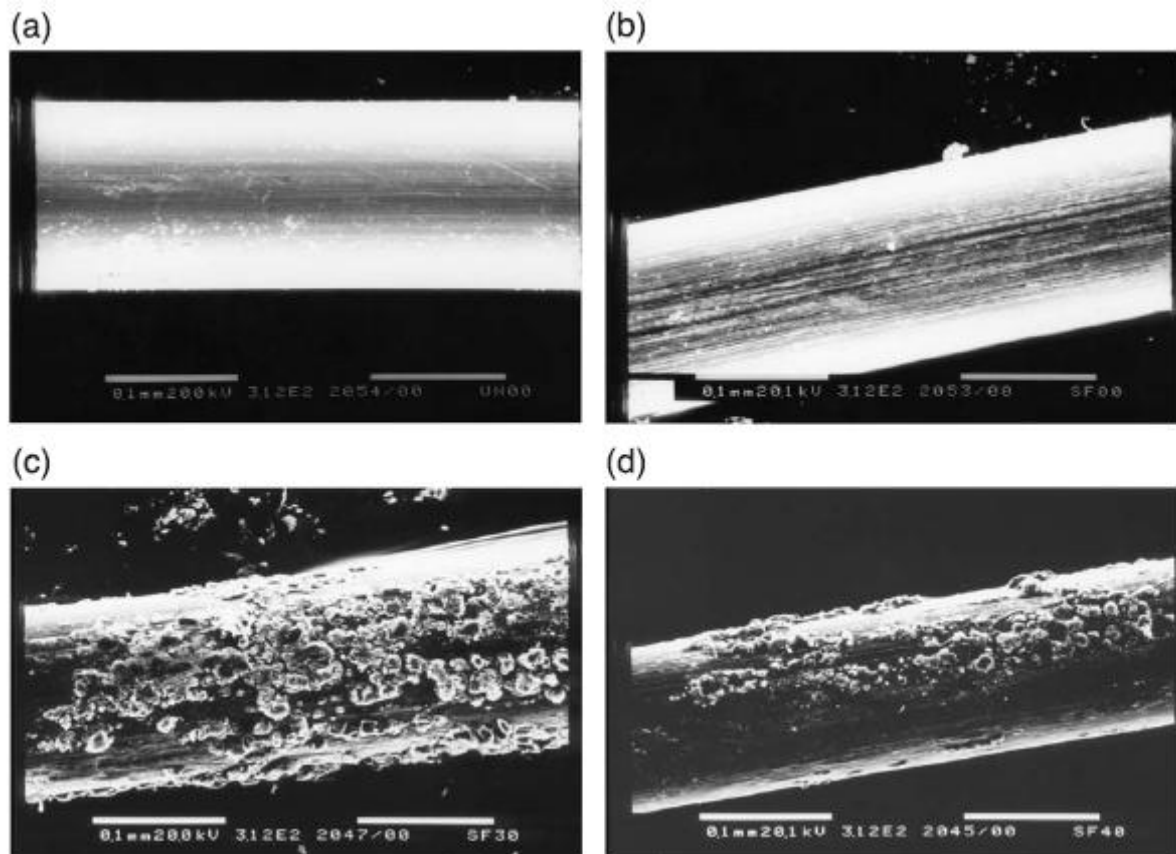


Fig. 3.8 Observações a SEM da superfície da fibra sob varias condições (x300): (a) fibra em estado natural; (b) fibra arrancada (0% SF); (c) fibra arrancada (30% SF); (d) fibra arrancada (40% SF) (Chan e Chu, 2004)

Fonte: Elsevier Science Ltd.

3.3. NATUREZA, SECÇÃO, FORMA E SUPERFÍCIE DA FIBRA

Na génese do comportamento pós-fendilhação dos compósitos reforçados com fibras estão os processos de interacção entre fibra e matriz (Figura 3.9), responsáveis pela contribuição para a considerável capacidade em absorver energia, ductilidade e resistência, que podem ser enunciados no seguinte (Zollo, 1997; Singh, 2004):

- fibra actuando como ponte de transferência de tensões (*fibre-bridging*)
- desligamento da fibra (*fibre debonding*)
- arrancamento da fibra ou deslizamento (*fibre pullout*)
- rotura da fibra

Mesmo que a quantidade de energia de absorção associada a cada mecanismo não seja significativa, o enorme número de fibras actuando sobre uma determinada zona de influência contribui para um mecanismo de reforço muito considerável (Zollo, 1997; Singh, 2004)

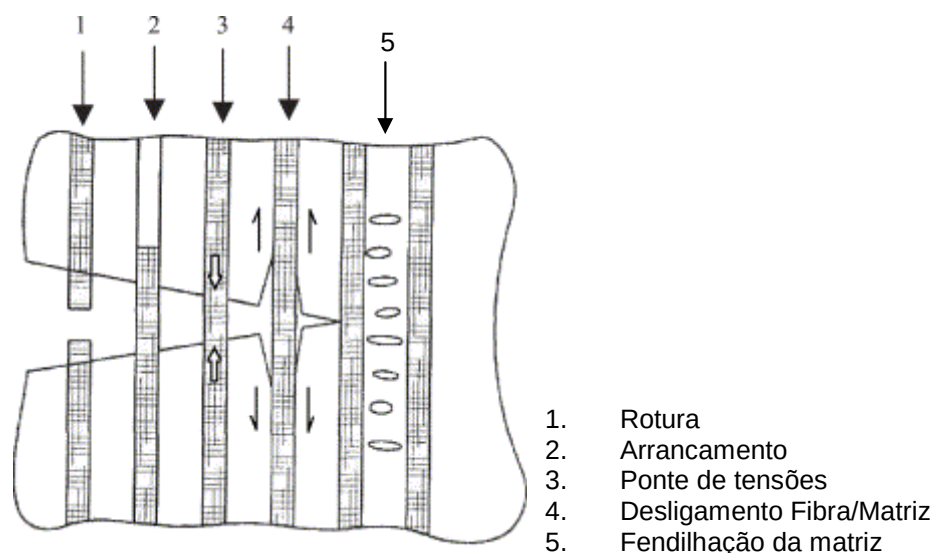


Fig. 3.9 Processos de absorção de energia em betão reforçado com fibras (Zollo, 1997; Singh, 2004)

O parâmetro chave que influencia a ductilidade em flexão do betão com fibras é a ligação entre fibra e matriz; assim qualquer melhoria do comportamento do betão neste aspecto está directamente relacionado com às propriedades da interface. Um aperfeiçoamento destas ligações pode resultar num betão de ultra elevado desempenho e de alta ductilidade (Won, Lim e Park, 2006). Outra forma que não a alteração da matriz cimentícia na vizinhança da ZTI é actuar sobre a secção, forma, superfície da fibra e resistência da fibra.

Tendo em conta a natureza das fibras disponíveis no mercado eg. aço, polímero, vidro, carbono, etc., nas mais variadas formas e secções, com tratamentos superficiais ou não, torna-se útil uma descrição das propriedades que mais podem influenciar a ligação entre fibra e matriz, e em ultima análise, o seu comportamento final avaliado em termos de resistência, absorção de energia e redução do risco de fissuração da matriz.

A análise dos diagramas de tensão-extensão (Figura 3.10) de um betão reforçado com fibras (BRF) mostra dois pontos de interesse (Naaman, 2003):

- σ_{cc} - tensão de fendilhação – praticamente influenciada pela resistência da matriz;
- σ_{pc} - tensão de pós-fendilhação – somente dependente das fibras e da tensão de adesão entre fibra e matriz.

Assim maximizar os parâmetros dependentes das fibras é factor chave para melhorar o comportamento pós-fendilhação do compósito.

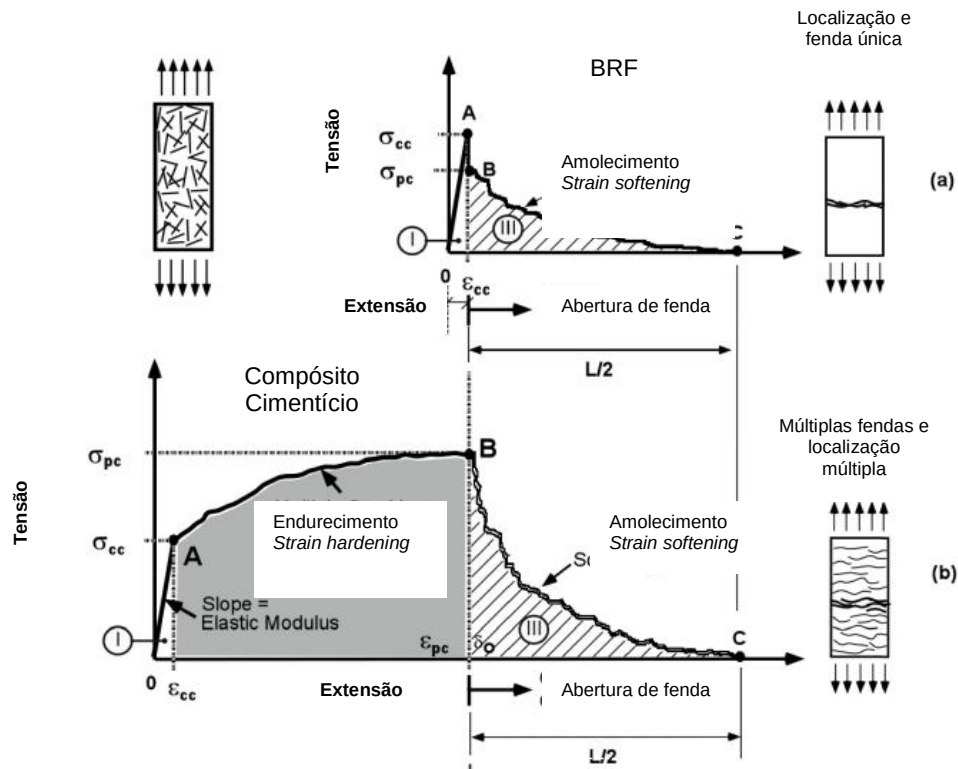


Fig. 3.10 Curva tensão-extensão em BRF e em Compósito Cimentício de elevado desempenho reforçado com Fibras. Tensão de fendilhação e tensão máxima de pós fendilhação (Naaman, 2003) Fonte: JCI.

Deve ser referido que a tensão de pós-fendilhação σ_{pc} é influenciada pelas componentes principais da tensão de adesão (física, química, atrítica, mecânica) entre a fibra e matriz, que com maior ou menor peso contribuem para a transferência de tensões em fase fendilhada. De referir que em fase fendilhada, a resistência oferecida ao deslocamento da fibra ao longo da matriz é maioritariamente resultante da componente de atrito da tensão de adesão, constituindo-se assim como o factor que governa todo o comportamento pós-fendilhação do compósito (Löfgren, 2005). As várias relações existentes para a adesão por atrito: (1) constante, (2) amolecimento, e (3) de endurecimento contribuem para os valores da tensão de pós-fendilhação evidenciados na Figura 3.10.

Supondo-se que todo o reforço introduz um aumento da resistência do material a reforçar, este aumento será mais eficiente com a imposição de certas propriedades (Naaman, 2003):

- tensão de tracção entre 2 a 4 vezes a tensão de tracção do betão;
- tensão de aderência ao betão pelo menos da mesma ordem de grandeza que a tensão de tracção deste
- modulo de elasticidade significativamente maior, pelo menos 3 ordens de grandeza
- coeficiente de Poisson e coeficiente de expansibilidade térmica da mesma ordem de grandeza

Mas estes aspectos podem ser ultrapassados através de vários procedimentos (aplicáveis tanto a fibras de aço como a fibras de natureza sintética) que têm por base o aumento da área de contacto entre fibra e matriz (Won, Lim e Park, 2006; Naaman, 2003):

- aumentar a rugosidade da fibra
- torcer a fibra ao longo do seu comprimento
- deformar a fibra para obter amarração mecânica nas extremidades (zona de ancoragem)

- deformar ao longo do comprimento (indentar, frisar, etc.)
- tratar micromecanicamente a superfície (cauterização química, tratamento por plasma)

3.3.1 MECANISMOS DE REFORÇO DA LIGAÇÃO FIBRA-MATRIZ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DA SECÇÃO, FORMA E SUPERFÍCIE DA FIBRA

Se bem que na globalidade todos os métodos descritos atrás (aumentar rugosidade, torcer fibra ao longo do comprimento, deformar para obter amarração nas extremidades, indentar, frisar, tratar micromecanicamente a superfície) possam ser aplicados às diferentes fibras, metálicas ou sintéticas alguns deles são mais apropriados a cada uma destas naturezas.

3.3.1.1 FIBRAS SINTÉTICAS

Nas fibras sintéticas, segundo os estudos de Won, Lim e Park (2006), o método mais apropriado tem que ver com a deformação da fibra ao longo do seu comprimento. De facto a fibra frisada (*crimped*) obteve a melhor resposta a nível de aderência na interface e na carga de arrancamento (não apresentando rotura), se comparadas com as fibras torcidas, com extremidades alargadas, sinusoidais, com gancho, *double duoform* ou lisas. A optimização da geometria (Figura 3.11) indica uma amplitude de $\lambda=6\text{mm}$ e uma altura $a_0=1,8\text{mm}$.

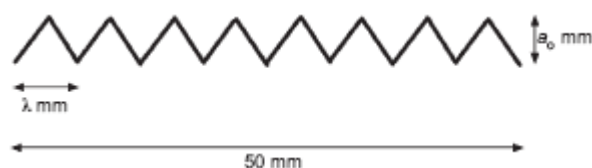


Fig. 3.11 Geometria da fibra sintética frisada (Won et al., 2006)

3.3.1.2 FIBRAS METÁLICAS

No caso das fibras metálicas, e tendo em vista que importa é aumentar a tensão de pós-fendilhação do compósito, deve ser tido em conta uma nova abordagem que considere a secção real da fibra.

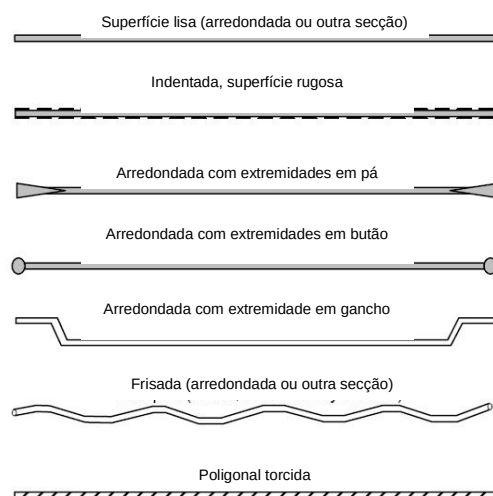


Fig. 3.12 Perfis típicos de fibras de aço usadas em betão (Naaman, 2003). Fonte: JCI.

A tensão de pós-fendilhação σ_{pc} , segundo a abordagem clássica (2), entra em consideração com o termo L/d (esbeltez), o que pode conduzir a falsas indicações caso a fibra não seja circular, atribuindo-se assim um diâmetro equivalente, d_e .

$$\sigma_{pc} = \Lambda \tau V_f \frac{L}{d} \quad (2)$$

Λ – produto de vários coeficientes (comprimento de arrancamento esperado, factor de orientação, factor de redução de grupo associado ao numero de fibras em arrancamento por unidade de área, coeficiente de alongamento (*snubbing*))

τ – tensão de aderência entre fibra e matriz

V_f – volume em fibras

L/d – esbelteza ou factor de forma (razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra)

A nova abordagem (3), segundo Naaman (2003), entra em consideração com características geométricas como o perímetro ψ e a área A da secção transversal da fibra, sendo portanto uma equação mais geral que (2). Desta forma é retratada a influência da razão ψ/A , isto é, a forma da secção transversal.

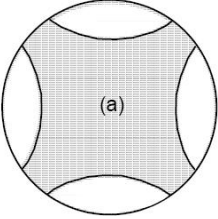
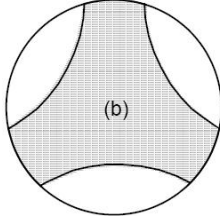
$$\sigma_{pc} = \frac{\Lambda}{4} \tau V_f \frac{\psi L}{A} \quad (3)$$

Uma forma de caracterizar a influência da razão ψ/A é através de uma variável (4) definida como Razão de Eficiência Intrínseca da Fibra (*FIER – Fibre intrinsic efficiency ratio*):

$$FIER = \frac{\psi L}{A} \quad (4)$$

$$\sigma_{pc} = \frac{\Lambda}{4} \tau V_f FIER \quad (5)$$

Quadro 3.2 Consequências da optimização da secção segundo Naaman (2003). Fonte: JCI

Fibra 1	Fibra 2
 FIER = 1,6 Para o mesmo perímetro, a área da Fibra 1 é apenas 62% da área de uma fibra circular circunscrita. O que implica que (mantendo todos os outros parâmetros constantes), a força de arrancamento e resistência do compósito pode ser alcançada com apenas 62% de Fibras 1 comparativamente às fibras circulares.	 FIER = 2 Para o mesmo perímetro, a área da fibra 2 é apenas 50% da área de uma fibra circular circunscrita. O que implica que (mantendo todos os outros parâmetros constantes), a força de arrancamento e resistência do compósito pode ser alcançada com apenas 50% de Fibras 2 comparativamente às fibras circulares.

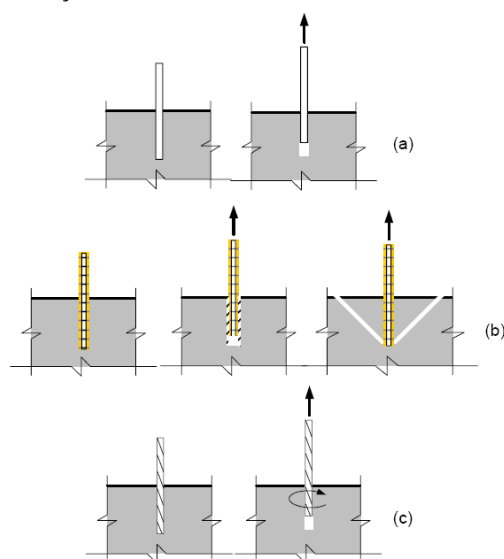
Caso as equações (2), (3) ou (5) sejam consideradas é claro que existe um número de variáveis que são passíveis de controlo, de forma a obter uma melhor resposta pós-fendilhação. No entanto existem limites práticos ou outros aspectos que impossibilitam uma maximização da tensão de pós-fendilhação do compósito.

Assim impõem-se os seguintes limites práticos (Naaman, 2003):

- $V_f < 2\%$ (para efeitos correntes de betão reforçado com fibras) - utilizar volumes em fibras acima de 2% por volume de betão pode ser impraticável (formação de ouriços, segregação, dificuldade em misturar, etc.); aumentar muito o volume de fibras necessitará obrigatoriamente de uma matriz cimentícia fina, tendo por consequência a redução do módulo de elasticidade do material, já que o agregado grosso não está presente.
- $L/d < 100$ – aumentar a esbelteza das fibras utilizadas em valores superiores a 100 pode conduzir a segregação, formação de ouriços e dificuldade em misturar.
- Λ – apenas marginalmente controlado já que apenas pode ser influenciada a orientação das fibras (1D, 2D ou 3D), sobre os outros coeficientes pouco pode ser feito
- τ – aumentar as forças de ligação entre fibra e matriz conduz a aumentos directos na tensão de pós-fendilhação, absorção de energia e ductilidade. Para ser eficiente, o valor de τ deve ser mantido sobre deslizamentos consideráveis, gerando um comportamento dúctil no arrancamento.

A tensão de aderência τ pode ser melhorada através dos métodos descritos atrás (sílica fumo, diminuir a razão água/ligante, aumentar a quantidade de finos, ou fazendo uso de adições do tipo látex ou epoxy) ou actuando sobre a forma, secção e superfície da fibra. Fazendo uso deste último método é possível melhorar a tensão de aderência. Existindo para isso duas formas:

- melhorar adesão e componente de atrito da tensão de aderência – através do aumento do FIER, pois a forma poligonal da secção transversal da fibra contribui para uma maior superfície de contacto e para um aumento da coesão.
- melhorar comportamento mecânico da tensão de aderência – através da deformação, indentação, uso de gancho ou mesmo torcer. Torcer ao longo do eixo longitudinal da fibra é mais eficiente, pois em fase de arrancamento, a fibra torcida tende a rectificar, originando como que um momento torsor que contribui para o aumento do atrito e da força de arrancamento da fibra.



- a) fibra lisa sujeita a esforço de arrancamento. A componente de adesão e de atrito é mínima.
- b) fibra tipo “parafuso” ou fibra com amarração na extremidade – pode originar superfície de fractura ao longo do comprimento da fibra ou em cone.
- c) fibra torcida – é observado um mecanismo que tende a contrariar a torção previamente induzida à fibra

Fig. 3.13 Comportamento ao arrancamento de fibras de aço embebidas em betão (Naaman, 2003). Fonte: JCI.

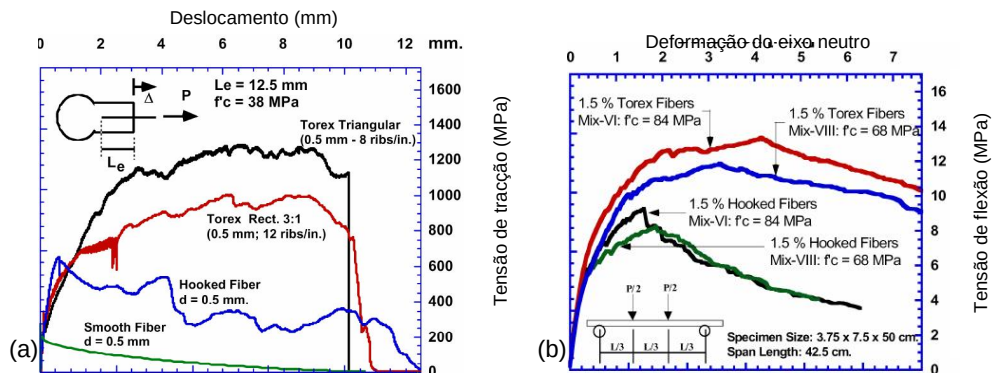


Fig. 3.14 Ensaio de arrancamento (a); e ensaio à flexão (b). Comparação entre fibras lisas (*smooth*), com gancho (*hooked*) e torcidas (Torex) (Naaman, 2003). Fonte: JCI.

Assim a avaliação do índice FIER avizinha-se como aquela que mais fielmente pode influenciar a capacidade de resistência em regimes de pós-fendilhação do compósito. E onde deformar ao longo do comprimento da fibra, através da torção, prova ser um mecanismo indirecto de reforço da interface pois contribui para um aumento da tensão de aderência entre fibra e matriz.

Uma fibra deste tipo apresenta um melhor desempenho (2 a 3 vezes mais carga máxima de arrancamento), podendo ser utilizada para obter um melhor rendimento estrutural do BRFA, ou mesmo, para diminuir o volume requerido de fibras.

4

**PRINCIPIOS DE
DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE BRFA****4.1. INTRODUÇÃO**

Tomando em consideração a natureza do betão reforçado com fibras de aço (BRFA), sobretudo a capacidade pós-fendilhação que este exhibe, resultante da adição das fibras de aço, é natural que só recentemente existam algumas ferramentas de dimensionamento de estruturas de BRFA. No entanto o dimensionamento das estruturas em betão, é quase sempre efectuado através do conhecimento do comportamento pré-fendilhação. Uma abordagem simples e compatível com a normalização já existente no dimensionamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado deve também ser estendida ao betão reforçado com fibras de aço (BRFA).

Nos últimos 30 anos as fibras de aço têm mostrado que a sua inclusão no betão pode melhorar significativamente o desempenho em estado limite de serviço (ELS) em elementos como vigas e lajes através da (Vandewalle, 2004):

- limitação da abertura de fenda
- distribuição favorável da fendilhação

No entanto este material deve também ser considerado para aplicações estruturais em que importa conhecer o seu comportamento em estado limite último (ELU). Atente-se que os procedimentos descritos segundo a RILEM TC162-TDF são apenas tidos em conta para aplicações estruturais.

A descrição do comportamento do BRFA em tensão pode ser descrita através de duas formas:

- relação tensão – extensão, (σ - ϵ)
- relação tensão – abertura de fenda, (σ - w)

O método de dimensionamento σ - ϵ baseia-se no Eurocódigo 2, sendo os parâmetros característicos determinados através do ensaio de flexão do prisma indentado sob controlo de deformação (resposta em flexão). Pelo contrário, o método σ - w deriva do princípio da fenda fictícia (*fictitious crack model*) de Hillerborg sendo a relação $\sigma_w(w)$ efectuada através do ensaio de tracção directa sobre provetes indentados (resposta uni-axial). Não se pretendendo alongar o âmbito deste trabalho este método não será aqui descrito, de qualquer modo, o método de dimensionamento σ - w encontra-se devidamente descrito em RILEM TC162-TDF (2002).

Assim tendo em conta que se pretende um método “simples e compatível com a normalização já existente” será feita uma breve descrição do método de dimensionamento σ - ϵ , segundo a RILEM TC 162-TDF (2003) apenas este método será apresentado no decorrer deste trabalho.

4.2 ENSAIO DE FLEXÃO – MÉTODO σ - ϵ

A capacidade pós-fendilhação do BRFA é das vantagens de que se deve tirar partido sempre que exista necessidade de uma estrutura com desempenho à fractura melhorado ou de elevada capacidade de absorção de energia.

Tendo em conta que o Eurocódigo 2 apenas considera o comportamento pré-fendilhação à tracção e que o comportamento pós-fendilhação é influenciado pela presença das fibras de aço, a relação σ - ϵ tem de ser estudada experimentalmente mediante ensaio de flexão em prismas com entalhe a meio vão (Fig. 4.1 a 4.3), fazendo uso da seguinte normalização:

- NP EN 14845-1 Métodos de ensaio de fibras no betão – Parte 1: Betões de referência (IPQ, 2008b)
- NP EN 14845-2 Métodos de ensaio de fibras no betão – Parte 2: Influência sobre a resistência (IPQ, 2008c)
- EN 14651 Método de ensaio para betão reforçado com fibras metálicas – Tensão de rotura à tracção por flexão (Limite de proporcionalidade (LP), residual) (CEN, 2007)
- NP EN 14889-1 Fibras para betão – Parte 1: Fibras de aço, definições, especificações e conformidade (IPQ, 2008d)

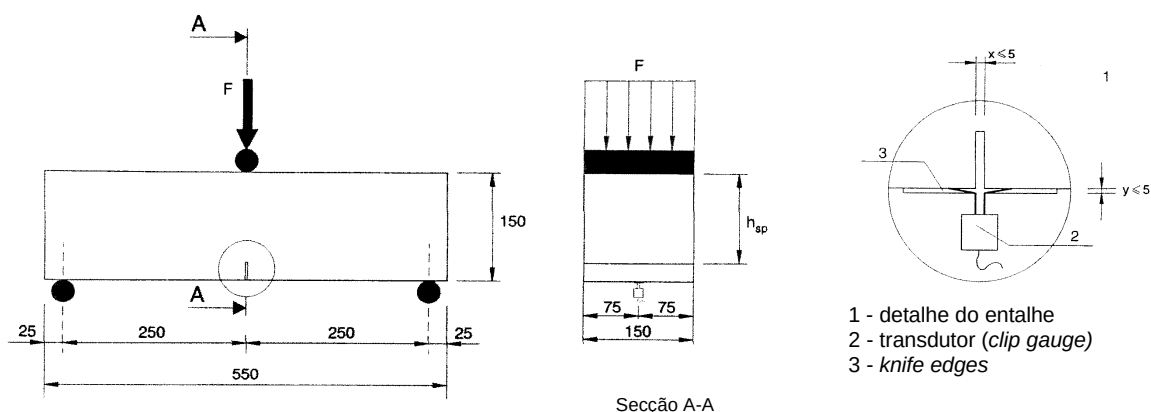


Fig. 4.1 Ensaio de flexão – flexão em 3 pontos com controlo deslocamento (abertura de fenda) (CEN, 2007)

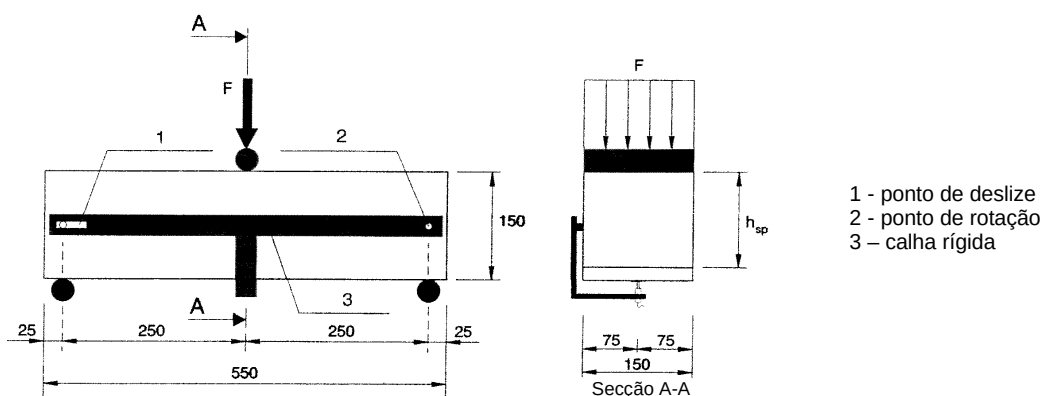


Fig. 4.2 Ensaio de flexão – flexão em 3 pontos com controlo de deslocamento (deformação do eixo neutro) (CEN, 2007)

Dependendo da configuração adoptada, no decorrer do ensaio os valores de carga e deformação a meio vão (δ) ou abertura de fenda (CMOD – *Crack mouth opening displacement*) são registados.

Do ensaio resultarão os diagramas F- δ ou F-CMOD, de onde se podem retirar os seguintes parâmetros:

- Limite de proporcionalidade, $f_{ct,L}$

$$f_{ct,L} = \frac{3F_L L}{2bh_{sp}^2} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

F_L = carga correspondente ao limite de proporcionalidade, LP

L = comprimento do provete (mm)

b = largura do provete (mm)

h_{sp} = distância do topo da secção transversal ao entalhe (mm) (geralmente 25 mm)

- Tensão residual à tracção por flexão ou Resistência à flexão residual, $f_{R,j}$

$$f_{R,j} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

F_j = carga correspondente ao CMOD_j ou δ_j ($j=1,2,3,4$)

L = comprimento do provete (mm)

b = largura do provete (mm)

h_{sp} = distância do topo da secção transversal ao entalhe (mm) (geralmente 25 mm)

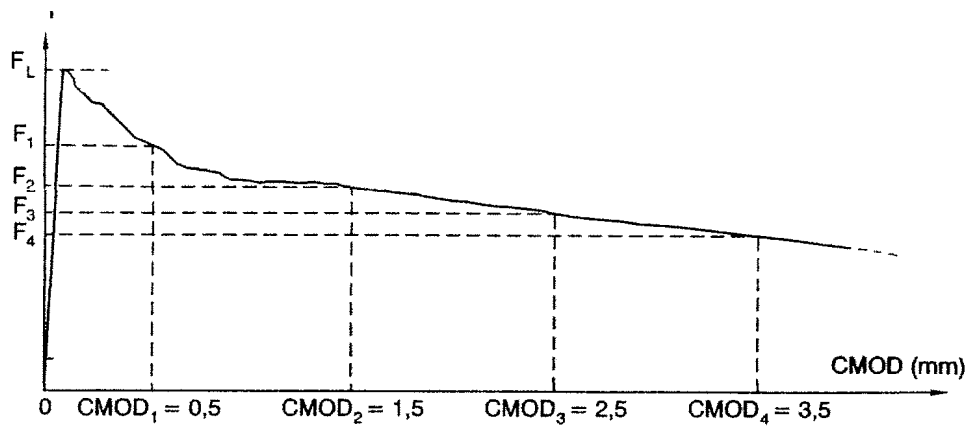


Fig. 4.3 Curva carga vs. CMOD (CEN, 2007)

Nos casos em que o equipamento de ensaio não permita controlo em abertura de fenda - CMOD, os parâmetros devem ser convenientemente transformados através da seguinte expressão:

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04 \quad (8)$$

4.2.1 LIMITE DE PROPORCIONALIDADE

O ensaio à flexão permite obter os valores característicos do limite de proporcionalidade assim:

$$f_{fctk,L} = f_{fctm,L} - k_x s_p \quad (\text{MPa}) \quad (9)$$

com:

$f_{fctk,L}$: valor característico do Limite de Proporcionalidade (MPa);

$f_{fctm,L}$: valor médio do Limite de Proporcionalidade (MPa);

s_p : desvio padrão (MPa);

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (f_{fctm,L} - f_{fct,L})^2}{(n-1)}}$$

n : número de provetes

k_x : factor dependente do número de provetes

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
$k_{x \text{ known}}$	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,77	1,74	1,68	1,67	1,64
$k_{x \text{ unknown}}$	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64
$k_{x \text{ unknown}}$ significa que o coeficiente de variação da população é desconhecido, sendo assim verificado o desvio padrão da amostra.											

Assim segundo as considerações do RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2003) a tensão de rotura à flexão por flexão do betão reforçado com fibras de aço pode considerada da seguinte forma:

$$f_{fctk} = \max\{0,7 f_{fctm,L}; f_{fctm,L} - k_x s_p\} \quad (\text{MPa}) \quad (10)$$

4.2.2 TENSÃO RESIDUAL À TRACÇÃO POR FLEXÃO

A tensão residual à tracção por flexão $f_{R,j}$ é um parâmetro que caracteriza o comportamento pós-fendilhação do BRFA. A relação entre o valor da tensão residual “característico” e valor da tensão residual “médio” faz-se também através de (9).

Segundo RILEM TC162-TDF (2003), o BRFA é classificado utilizando dois parâmetros que são determinados através do conhecimento da tensão residual em dois pontos, $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$, assim:

- 1) $FL_{0,5}$ é o valor de $f_{R,1}$ reduzido ao múltiplo mais próximo de 0,5 MPa e está compreendido entre 1 e 6 MPa;
- 2) $FL_{3,5}$ é o valor de $f_{R,4}$ reduzido ao múltiplo mais próximo de 0,5 e está compreendido entre 0 e 4 MPa

Os dois parâmetros dão a informação dos valores característicos mínimos das tensões residuais à tracção por flexão para as aberturas de fenda (CMOD) de 0,5 e 3,5 mm respectivamente. Sendo a classe de tensão residual representada por FL ($FL_{0,5}$ / $FL_{3,5}$), um BRFA com uma tensão de rotura à compressão de 30 MPa, $f_{R,1}=2,2$ MPa, $f_{R,4}=1,5$ MPa terá $FL_{0,5}=2,0$ MPa e $FL_{3,5}=1,5$ MPa e pode ser classificado como C30/37 FL 2,0/1,5.

Ainda segundo a NP-EN 14845-2 Métodos de ensaio de fibras no betão – Influência na resistência (IPQ, 2008c) para os valores CMOD de 0,5 e 3,5 deve ser indicado o teor de fibras, em kg/m^3 , correspondentes aos níveis de desempenho de 1,5 e 1,0 MPa respectivamente.

4.2.3 PRINCIPIOS DE DIMENSIONAMENTO

Sendo que a capacidade pós-fendilhação é um aspecto característico do BRFA é necessário estender os procedimentos adoptados no Eurocódigo 2 ao dimensionamento de estruturas de betão armado reforçado com fibras de aço. Assim torna-se importante conhecer a relação tensão-extensão para o betão onde é explorada a capacidade pós-fendilhação deste material.

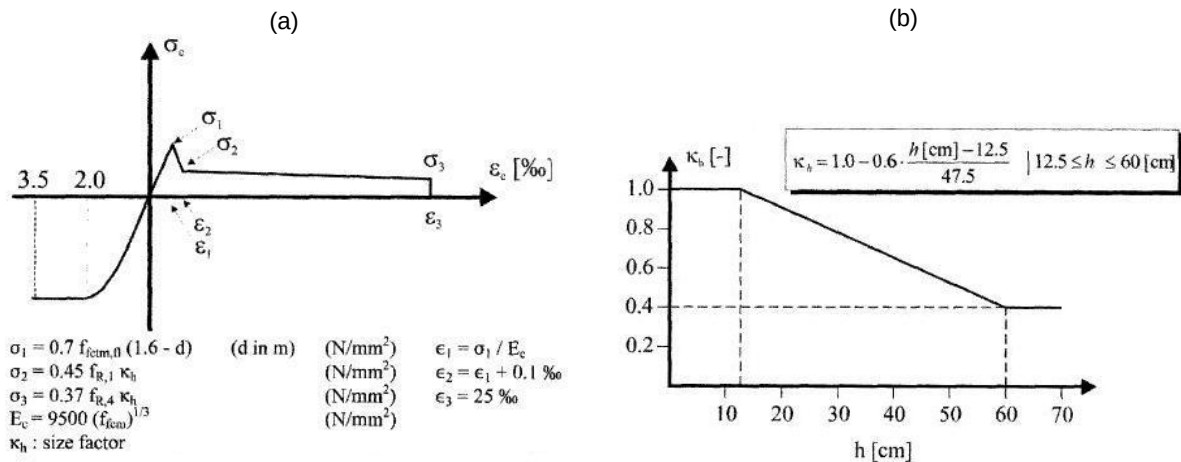


Fig. 4.4 (a) Relação tensão-extensão; (b) factor de escala (RILEM, 2003)

Sendo a relação tensão-extensão em compressão idêntica à do betão comprimido, atente-se na importância dos valores de tensão residual $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$ para a relação tensão-extensão pós-fendilhação, nomeadamente nas tensões σ_2 e σ_3 , respectivamente. Assim a relação σ - ϵ , na parte respeitante ao ramo pós-fendilhação é construída através do ensaio à flexão em vigas.

Não sendo alvo do presente trabalho de investigação, o estudo detalhado dos métodos de dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras, refere-se que os métodos de ensaio e de dimensionamento para betão reforçado com fibras dispostos no RILEM TC 162-TDF (2003) fornecem as indicações quanto ao:

- Dimensionamento para estados limites últimos:
 - flexão simples e esforço axial;
 - esforço transversal
- Dimensionamento para estados limites de utilização:
 - controlo da fendilhação
 - área de armadura mínima
 - cálculo da largura de fendas

No entanto estas indicações destinam-se apenas a betão armado com fibras (varões ou malha electrosoldada) ou betão pré-esforçado com fibras, onde as contribuições da adição das fibras são devidamente tidas em conta.

4.3 MODELO ANALITICO SIMPLIFICADO

Como o que se pretende é o dimensionamento à flexão, existe um modelo teórico baseado na avaliação do estado de tensão nas fibras que cruzam a fenda, que determina a tensão de tracção residual à flexão (Thorenfeldt, 2004). Este modelo analítico proposto por Thorenfeldt (2004) pode ser expresso da seguinte forma:

$$f_{t,res} = \eta_0 v_f \eta_1 \sigma_{fmax} = \eta_0 v_f \sigma_{fmean} \quad (11)$$

v_f : volume de fibras

σ_{fmax} : tensão máxima na fibra com um comprimento de ancoragem totalmente desenvolvido $L_b=L/2$

σ_{fmean} : tensão média nas fibras que cruzam a fenda (uniformemente distribuídas em orientação e comprimento de ancoragem)

η_1 : razão entre $\sigma_{fmean} / \sigma_{fmax}$

$\eta_1=0,5$ fibras lisas

em fibras com gancho é necessário estudo suplementar via ensaios de arrancamento

η_0 : factor de capacidade que exprime a efectividade das fibras segundo uma orientação preferencial:

$\eta=1/3$ fibras orientadas isotropicamente i.e. aleatoriamente distribuídas 3D

$\eta=1/2$ fibras orientadas sob planos i.e. aleatoriamente distribuídas 2D em planos paralelos à direcção de tracção

$\eta=1$ fibras orientadas unidireccionalmente na direcção de tracção.

A tensão máxima na fibra σ_{fmax} depende da aderência ou da ancoragem e da razão l/d , das características da superfície da fibra e da tensão de rotura à tracção do betão. A capacidade de ancoragem das fibras com gancho é também dependente da tensão de cedência da fibra.

A tensão média das fibras σ_{fmean} numa fenda atingirá um valor máximo para um determinado da abertura de fenda (abertura de fenda crítica). Atingido o valor de abertura de fenda crítica, um aumento seguinte resultará no processo de arrancamento da fibra à matriz bem como numa gradual diminuição do esforço de tracção na fibra. A determinação da capacidade de ancoragem das fibras com gancho deve ser tida em conta, deste modo sugere-se a aplicação do ensaio de arrancamento com diferentes comprimentos de amarração, para inferir sobre o valor da tensão média das fibras σ_{fmean} .

No entanto outras considerações devem ser tidas em conta, como os efeitos introduzidos pela variabilidade da orientação das fibras. Assim o factor de capacidade para uma secção reforçada com fibras pode ser também estimado através:

- da contagem do numero de fibras,
- do calculo da razão entre as secções transversais (betão e fibras) e
- do factor de orientação, α

$$\alpha = \frac{\rho_f}{v_f} = \frac{nA_f}{A_c v_f} = \frac{n\pi d_f^2}{4A_c v_f}$$

n : numero de fibras na secção transversal

A_c : área da secção transversal

v_f : conteúdo em fibras (em volume)

Tendo em conta os pressupostos descritos em Thorenfeldt (2004), a relação entre factor de orientação e factor de capacidade encontrada é:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \frac{2}{3}\alpha & \text{se } 0 < \alpha < 0,5 \\ \eta_0 &= \frac{4}{3}\alpha - \frac{1}{3} & \text{se } 0,5 < \alpha < 1,0 \end{aligned} \quad (12)$$

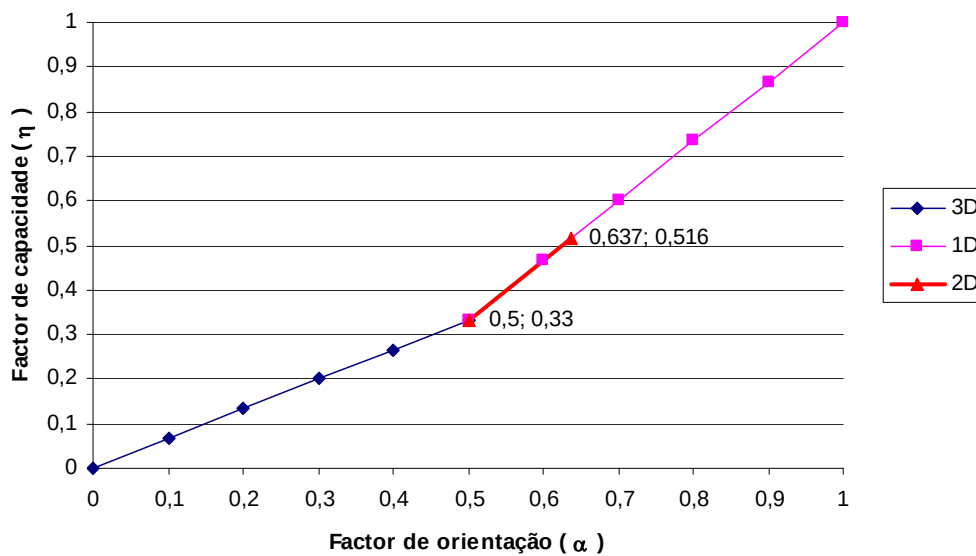


Fig. 4.5 Relação entre α e η_0 numa secção de betão com fibras

A determinação destes parâmetros é importante pois dependendo do modo de colocação do betão (betão autocompactável, betão vibrado, não vibrado), do tipo de elemento a betonar (parede, laje, viga) e sobretudo o modo como o betão flui, obtêm-se factores de orientação α diferentes.

Segundo o estudo de Grimheden (2004) é referido que a influência da direcção de enchimento do betão fresco na tensão de tracção residual é significativa em peças betonadas com betão vibrado bem como em betão autocompactável. No que diz respeito ao tipo de peça, no caso de lajes, o betão fresco podendo percorrer uma maior distância (geralmente do camião até à sua posição final) provocará uma orientação das fibras mais pronunciada segundo uma direcção, desde modo admitem-se valores de α superiores. Já no caso da betonagem de paredes é natural que o betão caia de uma determinada altura até ao nível de betão fresco já colocado, podendo mesmo causar turbulência no betão, este facto pode explicar a presença de fibras mais aleatoriamente distribuídas, fazendo baixar o factor α . Simplificadamente podemos dizer que o factor α é maior para lajes que em paredes, e que elementos em que o betão é autocompactável o factor α é também superior que em elementos em que o betão é vibrado.

No entanto, deve ser tido em conta que a orientação das fibras deve ser considerada parcialmente como o resultado das combinações das orientações segundo as 3 direcções ortogonais. Em vigas e no caso do betão autocompactável a maior parte das fibras estão mais orientadas segundo a direcção longitudinal, menos segundo a largura e ainda menos segundo a altura. Assim para vigas de betão vibrado assume-se uma orientação 100% isotrópica e para vigas em betão autocompactável assume-se uma orientação isotrópica entre 35 e 55% (Døssland, 2004).

5

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

5.1. INTRODUÇÃO

O comportamento do betão endurecido reforçado com fibras pode ser estudado a dois níveis. Num primeiro nível podemos admitir que o arrancamento da fibra à matriz de base cimentícia representa um dos processos que determina o comportamento mecânico do betão com fibras, já que a interacção entre a fibra e a matriz é responsável pela capacidade em absorver energia e na ductilidade proporcionada (Figura 3.9). O nível seguinte já entra em considerações acerca do desempenho em elementos e.g. vigas ou lajes, isto é, em que o comportamento mecânico do betão com fibras é influenciado pela quantidade, orientação e distribuição destas. (Grünewald, 2004; Löfgren, 2005).

As propriedades mecânicas do betão resultantes da adição de fibras revelam melhorias nas fases de endurecimento e na fase endurecida, e.g. a capacidade de *fechar* fendas através da criação de uma ponte de transferência de tensões (*fibre bridging*), contribuindo também para a diminuição da propagação das fendas. O BRF também surge como um material versátil sempre que o conceito de durabilidade seja invocado, pois este permite (num elemento convencionalmente armado por exemplo) obter aberturas de fendas menores, desde que as fibras estejam o mais possível distribuídas homogeneamente. Assim é de incluir um pequeno estudo sobre o papel que as fibras possam ter em aspectos chave da durabilidade das estruturas de betão. Aspectos como capilaridade, permeabilidade, porosidade, penetração de água sobre pressão, penetração de oxigénio e carbonatação serão tidos em conta.

A Figura 5.1 pretende ilustrar quais os parâmetros que intervêm no desempenho do BRFA.

Sob o ponto de vista de durabilidade os agentes agressivos e os mecanismos de transporte que afectam o BRFA são idênticos aos que interferem na vida útil do betão convencional; no entanto, tal como atrás referido, a capacidade das fibras de aço para redistribuir a fissuração e diminuir a abertura das fissuras coloca as estruturas de BRFA em vantagem relativamente às estruturas de betão armado convencional.

Sob o ponto de vista estrutural a capacidade de absorção de energia do BRFA depende da matriz do betão e da natureza, dosagem, orientação e distribuição das fibras de aço.

Assim, a durabilidade da estrutura está intimamente ligada com a absorção de energia do BRFA.

O objectivo deste trabalho consiste em averiguar a influência que as fibras de aço de diferentes fabricantes mas com características idênticas (segundo a ficha técnica do produto) têm no desempenho do betão.

Desta forma o programa experimental levado a cabo englobou dois grupos de ensaios:

1º grupo :

- ensaios de pullout utilizando 2 tipos de fibras e 5 classes de resistência de betão

2º grupo:

- ensaios de caracterização dimensional de 3 tipos de fibras de aço com a mesma referência comercial – 65/35
- ensaios de absorção de energia em betão cofrado e betão projectado em que foram usadas as fibras de aço acima mencionadas na mesma dosagem – 30 kg/m³
- ensaios de durabilidade dos betões anteriormente referidos

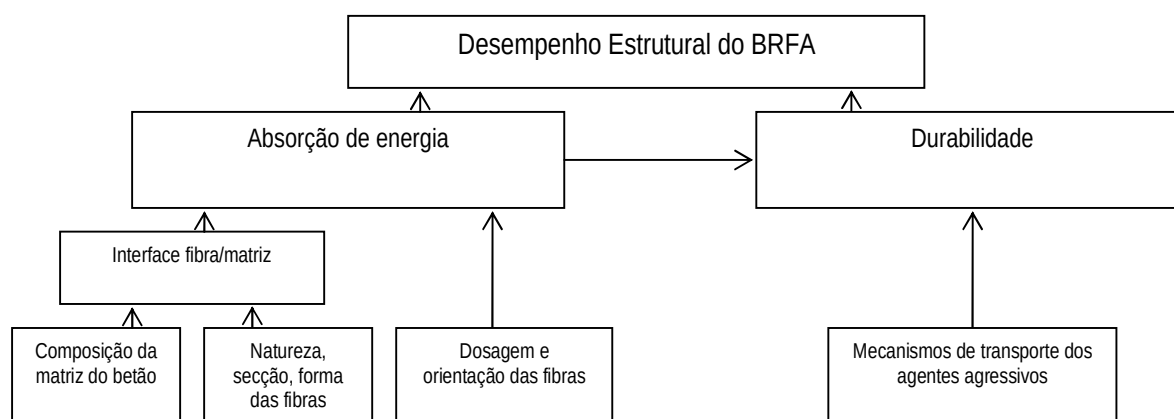


Fig. 5.1 Parâmetros que determinam o desempenho do betão

Os ensaios *pullout* visaram entender qual a contribuição prestada pelo betão e pelas fibras e em relação a estas entender qual a influência do tipo de fibra.

Os ensaios incluídos no 2º grupo foram efectuados utilizando os três tipos de fibras 65/35, sendo a única variável adoptada o fabricante.

5.2. COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO – *SINGLE FIBRE PULLOUT TESTS*

O ensaio de arrancamento (pull-out) avalia as propriedades da interface através da força necessária para arrancar ou fracturar um elemento de reforço embebido na matriz. O processo de arrancamento pode assim ser considerado como o resultado de um desligamento gradual da interface em torno da fibra seguida por um escorregamento e arrancamento desta. Tendo em conta os ensaios de microdureza evidenciados no capítulo 3, admite-se que a fase de desligamento ocorre na zona de transição interfacial (ZTI), ou seja, o arrancamento acontece não na fronteira física entre fibra e matriz mas sim a uma distancia da fibra com uma microestrutura significativamente diferente do resto da pasta de cimento (Groth, 2000)

O processo de arrancamento de uma fibra pode ser entendido como uma combinação de pelo menos 4 processos distintos (Grünwald, 2004):

- Deformação elástica: tensões de corte ao longo da fibra não excedem a tensão de aderência entre fibra e matriz – fase aderente (*bonded*). A tensão de aderência é máxima na extremidade da fibra.
- Fase não aderente (*debonding*) entre matriz e fibra: a tensão de aderência é excedida pelas tensões de corte induzidas, originando a quebra das ligações entre fibra e matriz.
- Deformação plástica do gancho (no caso de fibras metálicas com dispositivo de amarração na extremidade em forma de gancho)
- Atrito de Coulomb devido às forças normais e à curvatura do gancho (caso este exista)
- Força de atrito entre matriz e fibra no canal: quando a fase não aderente atinge a extremidade da fibra, ocorre o arrancamento da fibra.

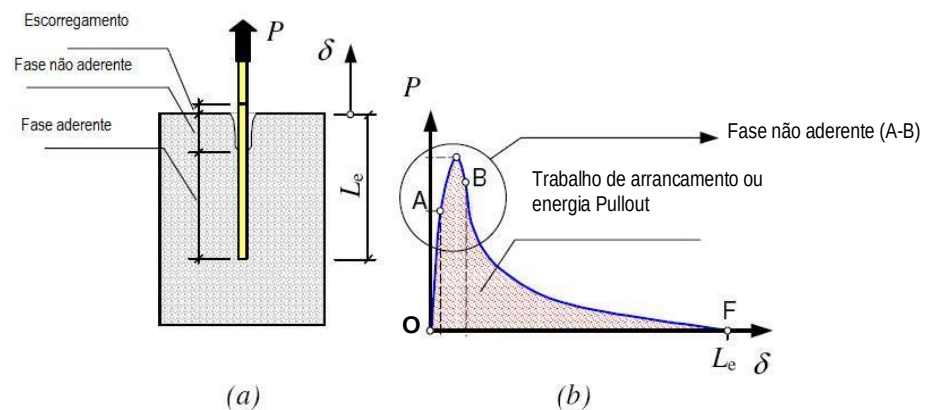


Fig. 5.2 Arrancamento de uma fibra lisa. (a) esquema; (b) Curva completa para a relação entre deslocamento e carga para uma fibra lisa (Löfgren, 2005).

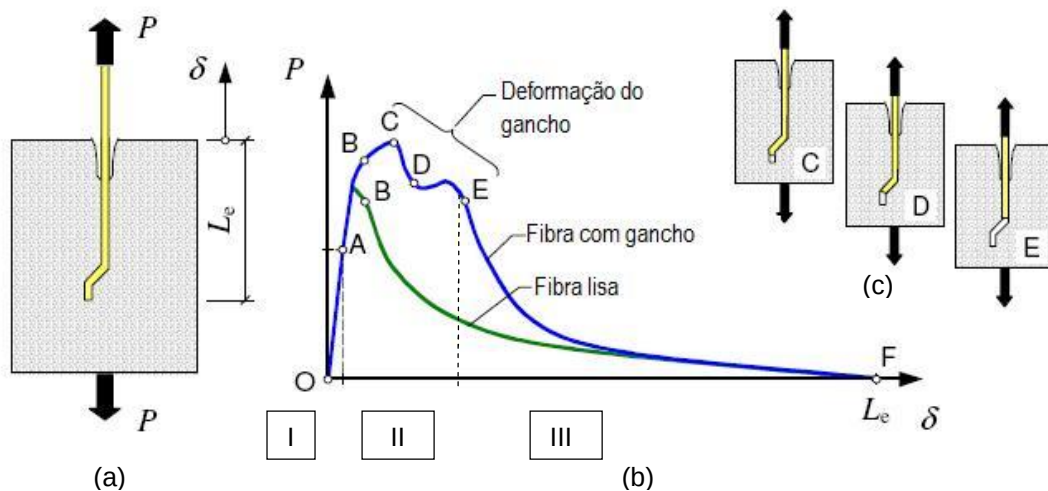


Fig. 5.3 (a) Arrancamento de uma fibra com gancho. (b) Relação entre carga e deslocamento para uma fibra lisa e fibra com gancho (Löfgren, 2005; Grünwald, 2004)

Na Figura 5.2 está representado em (a) um esquema do arrancamento de uma fibra; em (b) apresenta-se a curva completa para a relação entre deslocamento e carga para uma fibra lisa; assim à etapa OA associa-se a fase de aderência (elástica) até um valor de carga crítica em A; em AB ocorre a progressão da fase não aderente até à não aderência completa em B, e; em BF a fibra é arrancada, em

que a única resistência se deve às forças de atrito. Repare-se que a força de arrancamento decresce com o aumento do deslocamento, resultado da diminuição do comprimento de fibra embebido na matriz (L_e), por sua vez a energia dissipada aumenta – energia *pullout* – para valores crescentes do comprimento de fibra embebido na matriz (L_e). Esta é resultado das componentes de atrito e da fase não aderente.

Na figura 5.3 está representado em OA – zona elástica ou adesiva; AB – fase de desligamento iniciada até fase final em B; BF – fase de decaimento de atrito (fibra lisa); BC – aumento da carga devido à amarração mecânica do gancho; DE – deformação progressiva do gancho; EF – decaimento de atrito após deformação completa do gancho. Zona I: ligação por adesão; Zona II: ligação por dispositivo de amarração; Zona III: ligação através de atrito. (Löfgren, 2005; Grünewald, 2004)

Deve salientar-se que nos últimos anos, a aferição do comportamento ao arrancamento de uma fibra, ou conjunto de fibras, de uma matriz de base cimentícia tem sido efectuada segundo variadas configurações. Para mais informação sobre configurações e aspectos relacionados com a terminologia do ensaio e propriedades físicas dos materiais consultar Bartos (1981), já que se admite que o método de ensaio influencie os resultados.

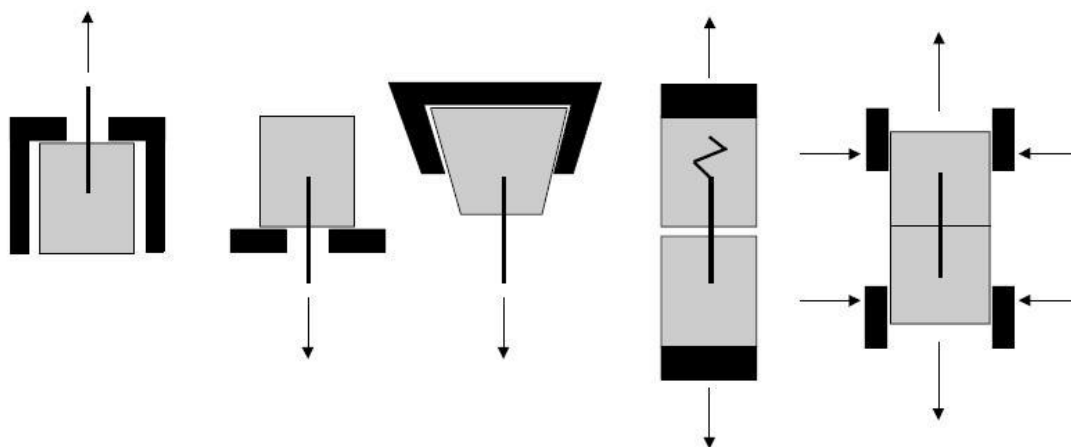


Fig. 5.4 Exemplos de configurações para ensaio de arrancamento (adaptado de Groth, 2000)

O programa experimental (parte dele efectuada em cooperação entre o autor e o aluno de doutoramento Sindre Sandbakk na Norwegian University of Science and Technology (NTNU) e SINTEF - Building and Infrastructure) permite comparar, sobretudo para o caso de fibras de aço, a capacidade de ancoragem de fibras isoladas. Além disso, a determinação da capacidade de ancoragem das fibras com gancho deve ser tida em conta para inferir sobre o valor da tensão média das fibras σ_{fmean} (a tensão média nas fibras com aderência ao longo do seu comprimento, isto é, em fase aderente, aproxima-se de 50% da tensão máxima nas fibras para aberturas de fenda maiores que a crítica) valor importante para determinar a tensão de tracção residual à flexão (Eq. 11) (Thorenfeldt, 2003). Os ensaios foram efectuados em betão convencional e betão de ultra elevado desempenho de forma a quantificar as diferenças a nível da fibra como elemento isolado. Os parâmetros estudados são:

- Classe de resistência do betão (de acordo com a NS 3473 Concrete Structures – Design Rules): B20, B35, B45, B65 e UHSC (Ultra-high strength concrete) – Resistências em cilindros de 15x 30 cm.
- Tipo de fibra de aço: Dramix RC - 65/60 - BN
- Fibras poliméricas (poliolefina): Barchip Kyodo 48

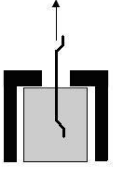
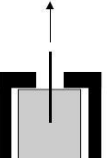
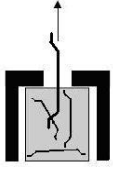
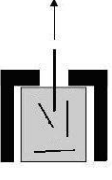
- Comprimento embebido na matriz: $1/2$ do comprimento da fibra L_f e $1/6L_f$ (apenas para as fibras metálicas)

O Quadro 4.1 fornece uma indicação do programa experimental dos 145 ensaios pullout em fibras.

Em geral o comprimento de fibra embebido no betão foi de metade do comprimento da fibra. Para o betão da classe B35, B65 e UHSC foram também utilizados provetes onde as fibras Dramix tinham um comprimento embebido de $1/6$ do comprimento da fibra, bem como outros onde gancho da fibra foi cortado. O objectivo deste último ensaio prende-se com o efeito do gancho no processo de arrancamento.

O betão da classe B20 e B45 foi moldado com um conteúdo variado em fibras, pois foram aproveitados outros ensaios que decorriam em simultâneo no laboratório.

Quadro 5.1 Programa experimental para ensaio pullout sobre fibra isolada

Betão	Conteúdo em fibras no betão		Número de provetes	Esquema de ensaio – Tipo de fibra	
				Metálicas	Polioléfina
B35	Betão sem fibras		35	 <i>c/ gancho</i>	
B65			35		
UHSC			35		
B20	1%	Dramix 65/60	5	 <i>c/ gancho</i>	
	2%	Barchip Kyodo	5		
	0,5%	Dramix 65/60	5		
B45	1%	Dramix 65/60	5		
	2%	Dramix 65/60	5		
	1%	Barchip Kyodo	5		
	2%	Barchip Kyodo	5		
	3%	Barchip Kyodo	5		

5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.2.1.1 COMPOSIÇÃO DA AMASSADURA

Neste programa experimental foram utilizados 5 classes diferentes de betão, B20, B35, B45, B65 e UHSC (Ultra-high strength concrete). As proporções detalhadas são apresentadas no Quadro 5.2.



Fig. 5.5 Aspecto do betão B35

Quadro 5.2 Composição dos betões utilizados no estudo (Sandbakk, 2007)

	Betão				
	B20 ¹	B35	B45	B65	UHSC
Resistência à compressão 28d, f_{cm} [MPa]	23,0	39,1	54,9	77,6	125,1
Água/ligante	0,70	0,47	0,40	0,37	0,20
Tipo de cimento	CEM II /A-V-42,5 R	CEM II /A-V-42,5 R	CEM II /A-V-42,5 R	CEM II /A-V-42,5 R	CEM I -52,5 N
Volume da matriz (l/m ³)	370/390 ⁴	390	390	390	450
Volume da pasta (l/m ³)	339/361 ⁴	366	361	366	421
% sílica de fumo ²⁾	6	5	6	5	20
% filer cálcario ²⁾	30	25	0	25	0
% Superplastificante Degussa Sky 550 ^{2) 3)}	0,6	1,14	1,48 ± 0,27	2,29	3,32
água/partículas _{<125µm}	0,47/0,49 ⁴	0,35	0,36	0,28	0,21
d_{max} [mm]	8	16	8	16	16
1) O betão com fibras de poliolefinas não obteve resistência para satisfazer os requisitos de B20. 2) % de adjuvante na dosagem de cimento 3) A dosagem de superplastificante variou de modo a obter o espalhamento pretendido 4) Valores para betão com fibras Barchip na classe B20.					

5.2.1.2 CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS

Tendo em conta que foram utilizadas dois tipos diferentes de fibras; um tipo de fibra de aço (Dramix 65/60) e uma fibra de poliolefina (Barchip Kyodo). As características mais relevantes são apresentadas no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 Características das fibras

	Tipo	
	RC-65/60-BN	Barchip Kyodo 48
Material	Aço estirado a frio, coladas	Poliolefinas, soltas
Resistência à tracção [MPa]	1000 ¹⁾	480-550 ¹⁾
Comprimento [mm]	60 ¹⁾	48 mm ¹⁾
Diâmetro [mm]	0,92 ¹⁾	0,90 ²⁾
Esbelteza	65 ¹⁾	53 ¹⁾
Fibras/Kg	3200 ¹⁾	>35000 ¹⁾

¹⁾ Informações retiradas da ficha de técnica; ²⁾ Informações do fabricante

5.2.2 CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO

Todos os provetes ensaiados resultaram da colocação de betão em tubos de plástico ($h=60\text{mm}$ e $d=100\text{mm}$). Tendo em conta o comprimento de fibra que se quer estudar dentro da massa de betão, fazendo uso de uma placa poliestireno, a fibra foi fixada em uma das duas extremidades livres - Figura 5.6 a). Após 24 horas os provetes foram colocados em cura húmida até perfazer 28 dias.

Para a realização do ensaio o provete é fixo à mesa e o dispositivo de amarração, à extremidade livre da fibra. Com o auxílio de dois LVDTs regista-se o deslocamento da fibra ao ser arrancada a uma velocidade constante de $1,0\text{ mm/min}$. O ensaio dá-se por terminado para valores de deslocamento na ordem dos 8mm , o que corresponde a cerca de 500 segundos. Carga e deslocamento (2 LVDTs e célula de carga) são registados digitalmente usando um sistema de aquisição de dados (4 canais e a operar a uma frequência de 2 Hz).

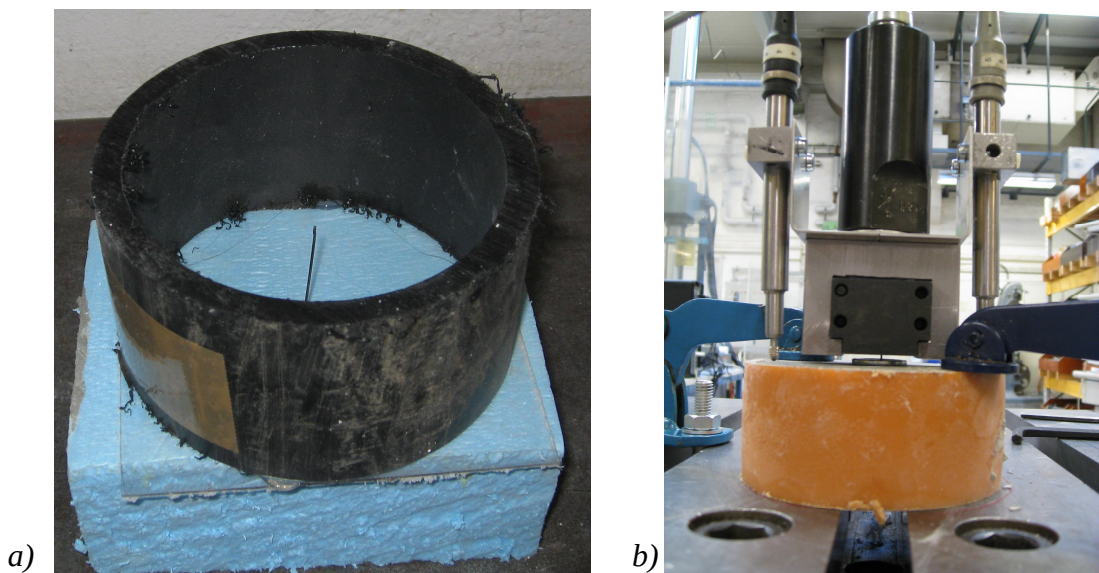


Fig. 5.6 Configuração: a) construção do provete; b) ensaio exibindo, fixadores, dispositivo de amarração da fibra e dois LVDT.

5.2.3. RESULTADOS

No Quadro 5.4 está disposto um sumário dos valores (médios) em termos de forças e tensões máximas, para as diferentes classes de resistência de betão e tipos de fibras. Nas Figura 5.7 a 5.9 estão dispostas as representações gráficas dos resultados dos ensaios de arrancamento para a fibra metálica e para as diferentes classes de betão. O comprimento embebido (L_b) é um sexto de L_f .

Tensão máxima na fibra, $\sigma_{f,max}$ e $\sigma_{f,mean}$

Para o cálculo da tensão máxima na fibra, da $\sigma_{f,max}$ e da $\sigma_{f,mean}$ o procedimento definido na versão provisória nas regras de dimensionamento (SINTEF, 2006) foi seguido.

Para cada fibra arrancada ao betão foi efectuada a curva carga vs. deslocamento (Figura 5.8 e Figura 5.9)

Definindo-se assim:

Quadro 5.4 Sumário dos resultados dos ensaios pullout, $l_b=l_f/2$ (cortesia de Sandbakk, 2007)

Tipo de Betão	Tipo de fibra	Resistência à compressão [MPa]	Tensão máxima na fibra ¹ [MPa]	Deslocamento na tensão máxima [mm]	$\sigma_{f,max}$ [MPa] ²	$\sigma_{f,mean}$ [MPa] ₂
B20	1% Dramix	24,2	519	1,19	468	305
B20	2% Barchip	21,7	392	1,74	321	161
B35	Dramix	39,1	671	1,23	603	398
B35	Barchip		481	2,26	372	186
B45	0,5% Dramix	55	646	0,92	484	314
B45	1% Dramix	55	654	0,84	568	371
B45	2% Dramix	51,7	718	0,80	674	449
B45	1% Barchip	57,9	468	2,35	350	175
B45	2% Barchip	57,3	422	1,88	349	175
B45	3% Barchip	52,7	415	1,64	360	180
B65	Dramix	77,6	683	0,81	603	444
B65	Barchip		526	2,50	383	191
UHSC	Dramix	125,1	955	0,82	844	549
UHSC	Barchip		519	1,85	396	198

1) A tensão máxima na fibra é o valor médio de todos os resultados
2) $\sigma_{f,max}$ and $\sigma_{f,mean}$ calculados de acordo com SINTEF (2006)

Tensão máxima na fibra é o valor médio dos valores de tensão mais elevados identificados em cada fibra, por outras palavras, é o valor médio do ponto mais alto das curvas. Este valor não é tido em conta no procedimento SINTEF (2006).

$\sigma_{f,max}$: é o valor mais elevado da tensão esperada no betão fendilhado. Se todas as fibras que cruzam a fenda têm metade do comprimento da fibra em cada lado da fenda, e a sua direcção é perpendicular à superfície da fenda, então a fibra apresenta este nível de estado de tensão.

$\sigma_{f,mean}$: é o valor recomendado pelo procedimento SINTEF a utilizar na Eq. 11. Este valor tem em consideração que nem todas as fibras estão em condições de desenvolver o estado de tensão máximo.

A curva carga vs. deslocamento é obtido, e a capacidade de ancoragem é tida como a carga média de arrancamento no intervalo 0,5 – 2,0 mm (no caso presente foram utilizados 5 provetes).

F_{1m} : Capacidade media de ancoragem nos provetes com comprimento embebido de $l_{b1}=l_f/2$

F_{2m} : Capacidade media de ancoragem nos provetes com comprimento $l_{b2}=l_f/6$

Valor máximo de tensão na fibra e correspondente força de adesão:

$$\sigma_{f,max} = F_{1m}/A_f \quad (13)$$

$$F_{bf} = F_{1m}/(\pi d_f l_{b1}) = 2F_{1m}/(\pi d_f l_f) \quad (14)$$

Sendo A_f a área da secção transversal da fibra, d_f o diâmetro da fibra e l_f o comprimento da fibra. Para as fibras com gancho ou outros dispositivos de ancoragem, a tensão de adesão para a parte lisa da fibra é calculada da seguinte forma:

$$f_{bf1} = (F_{1m} - F_{2m})/(\pi d_f (l_f/2 - l_{b2})) = (F_{1m} - F_{2m})/(\pi d_f l_f/3) \quad (15)$$

A capacidade de ancoragem é:

$$F_a = F_{1m} - 0,5 f_{bf1} \pi d_f l_f \quad (16)$$

A correspondente tensão media para o betão reforçado com fibras é determinada através:

Fibras lisas:

$$\sigma_{f,mean} = 0,5 \sigma_{f,max} \quad (17)$$

Fibras com gancho:

$$\sigma_{f,mean} = (0,25 f_{bf1} \pi d_f l_f + 0,7 F_a)/A_f \quad (18)$$

Todos os comprimentos embebidos estão incluídos nesta expressão, é por isso que $\sigma_{f,max}$ é multiplicado por um factor de 0,5 (correspondente a um comprimento médio embebido de $l_f/4$). O mesmo ocorre no caso de fibras com gancho. Neste ultimo caso, a capacidade de ancoragem no segundo termo é multiplicada por um factor de 0,7. Assim são tidos em conta os comprimentos de amarração mais pequenos onde o gancho não é completamente deformado.

5.2.4 DISCUSSÃO

O primeiro resultado importante deste programa experimental indica que o nível máximo de tensão que as fibras podem atingir depende da classe de resistência do betão (Figura 5.7). Não é surpreendente pois a adesão entre fibra e betão define a capacidade de ancoragem.

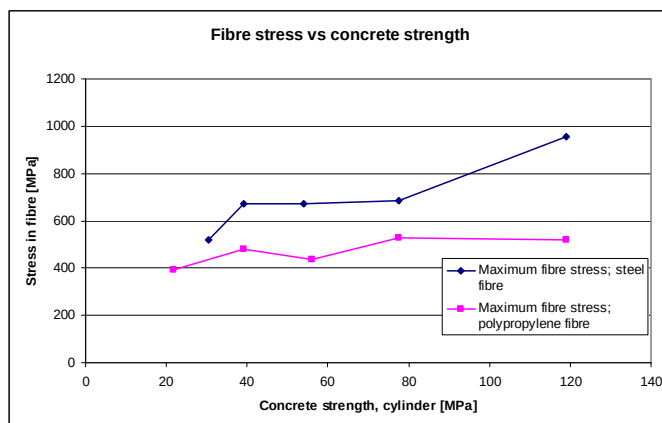


Figura 5.7 Evolução da tensão na fibra com a resistência do betão, $l_b=l_f/2$

Da Figura 5.7 resulta que a tensão máxima desenvolvida na fibra de poliolefina não aumenta com o aumento da resistência do betão para além dos 77 MPa. Esta fibra alcança o valor máximo de tensão para betões com resistência de 77 MPa.

Fibras de poliolefina

Na Figura 5.8 é apresentada a curva tensão média vs. deslocamento para todas as fibras no ensaio de arrancamento.

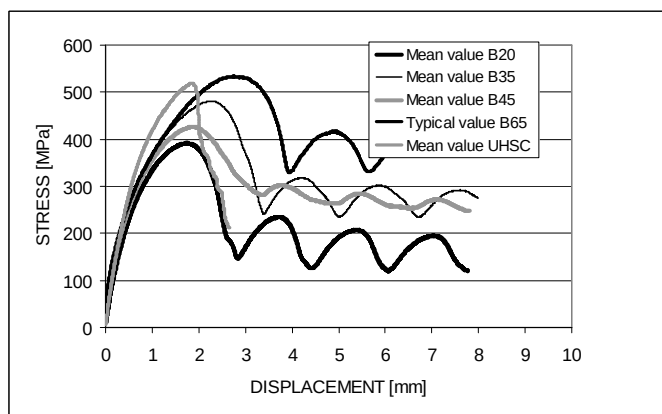


Figura 5.8 Representação da tensão média vs. deslocamento para a fibra Barchip, $l_b=l_f/2$

Atente-se que na Figura 5.8 (na classe de resistência de betão B65) é apresentada uma curva típica (curva resultante dos ensaios considerados válidos) e não uma curva média dos ensaios considerados válidos já que:

- em 3 dos 10 provetes ensaiados, a fibra partiu em vez de ser arrancada;
- existe uma diferença considerável no deslocamento na tensão máxima e no deslocamento na tensão mínima.

A forma irregular (superfície rugosa) da fibra, típica da fibra Barchip Kyodo, é provavelmente a responsável pelo aspecto da curva tensão vs. deslocamento.

É óbvio que para o betão de ultra-elevado desempenho (UHSC) a fibra de poliolefina não apresenta resistência suficiente para melhorar as propriedades mecânicas e a ductilidade do betão. Todas as fibras partiram durante o ensaio. Esta afirmação também se estende ao betão com resistência de 77 MPa (classe de resistência B65). Consequentemente não é recomendado o uso deste tipo de fibra em

betões com resistências elevadas, se a fibra é destinada a melhorar o comportamento em flexão deste material.

Outro aspecto importante tem que ver que a tensão máxima na fibra ocorre para valores de 2 mm de deslocamento. O procedimento SINTEF para calcular $\sigma_{f,max}$ e $\sigma_{f,mean}$ entra em consideração com as tensões médias obtidas no intervalo 0,5 – 2,0 mm. Isto explica a diferença entre a tensão máxima na fibra e $\sigma_{f,max}$.

$\sigma_{f,mean}$ é para as fibras de poliolefina igual a $0,5\sigma_{f,max}$. Isto deve-se ao facto de não existir gancho na fibra bem como se admitir que a tensão de adesão é constante. Estatisticamente a fibra terá $\frac{1}{4}$ do seu comprimento embebido, sendo a tensão média no betão fendilhado metade do valor obtido com $\frac{1}{2} l_f$ embebido no betão.

Fibras de aço

Comparando as Figuras 5.8 e 5.9 as fibras de aço atingem valores de tensão máximos para deslocamentos reduzidos comparativamente à fibra de poliolefina (1mm vs. 2mm). A carga máxima é também consideravelmente maior.

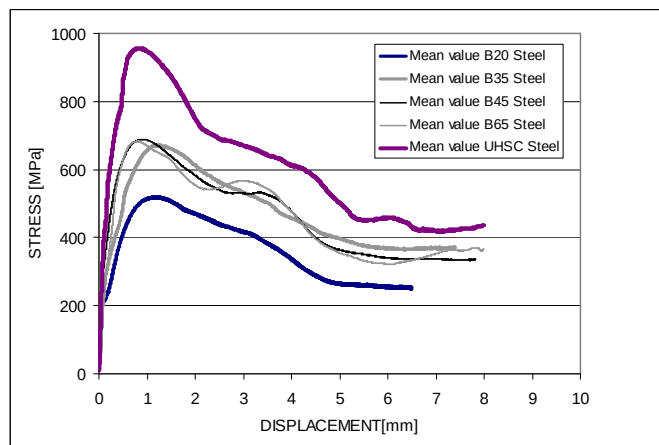


Figura 5.9 Representação da tensão média vs. deslocamento para a fibra Dramix, $l_b=l_f/2$

Tal como na fibra de poliolefina, a tensão na fibra de aço aumenta com a resistência do betão. A fibra Dramix apresenta ganchos, sendo a sua tensão de aderência maioritariamente dependente da eficiência do gancho.

Efeito do gancho

O efeito do gancho foi investigado para as classes B35, B65 e UHSC.

Para investigar a eficiência do gancho, foram utilizadas as fibras de aço com e sem gancho, tendo sido também testada a influência do comprimento de fibra embebido no betão. Assim sendo provetes com $1/6$ do comprimento da fibra embebido no betão foram ensaiados. Os resultados são apresentados na Figura 5.10.

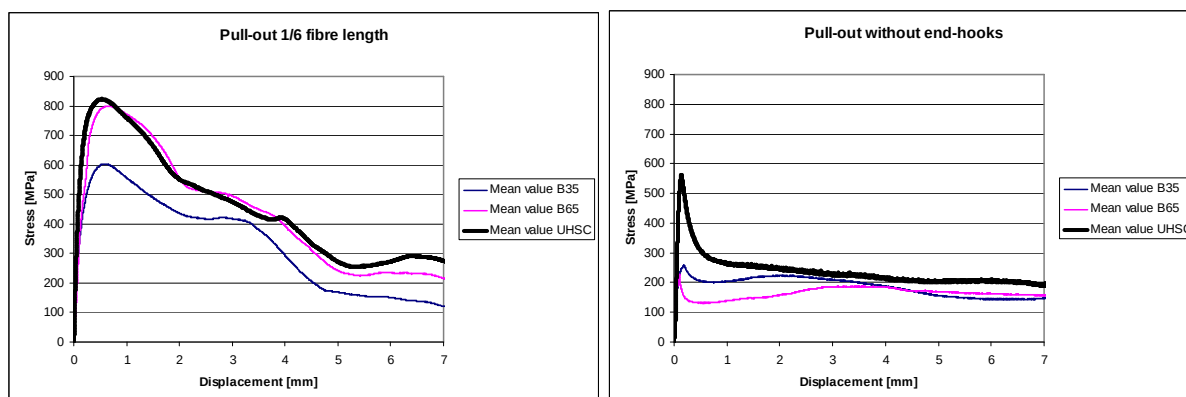


Figura 5.10 Efeito do gancho; (a) arrancamento com 1/6 do comprimento da fibra embebido na matriz; (b) arrancamento da fibra sem gancho, $l_b = l_f/6$ (Sandbakk, 2007)

Como se pode verificar da Figura 5.10 a maior contribuição para a aderência resulta da presença do gancho.

A razão entre a tensão máxima nas fibras com comprimento embebido de $l_f/6$ e $l_f/2$ é apresentada no Quadro 5.5. É também apresentada a razão F_{1m}/F_{2m} .

Quadro 5.5 Efeito do comprimento embebido em fibras com gancho

Betão	$\frac{\text{Tensão máxima na fibra, } l_f/6}{\text{Tensão máxima na fibra, } l_f/2}$	$\frac{F_{2m}}{F_{1m}}$
B35	$600/670 \times 100\% = 90\%$	$351/403 \times 100\% = 87\%$
B65*	$800/680 \times 100\% = 118\%$	$453/404 \times 100\% = 112\%$
UHSC	$830/950 \times 100\% = 87\%$	$473/565 \times 100\% = 84\%$

* Os ensaios “ $l_f/6$ ” apresentaram valores muito elevados para a tensão máxima, a razão não foi encontrada.

Døssland (2008) refere que para efeitos de estimativa, o gancho contribui em cerca de 90% à resposta total ao arrancamento numa abertura de fenda entre os 0,5-2 mm (para fibra perpendicular à fenda). A contribuição do gancho nestes ensaios é ligeiramente inferior, no entanto, a maior parcela contínua a estar relacionada com o gancho.

Através da Eq. (11), referida no Capítulo 4, é possível obter uma ideia da capacidade resistente em flexão do BRFA. Assim através dos valores obtidos no quadro 5.4, nomeadamente os correspondentes à $\sigma_{f,mean}$, torna-se possível conhecer o valor da tensão residual à tracção em flexão.

$$f_{t,res} = \eta_0 v_f \eta_1 \sigma_{f,max} = \eta_0 v_f \sigma_{f,mean} \quad (11)$$

5.3. ENSAIOS EM BETÃO COM FIBRAS

A finalidade do conjunto de ensaios a seguir descritos é apenas a quantificação das diferenças que as fibras de aço teoricamente iguais têm no desempenho do betão.

Para o efeito foram seleccionados 3 tipos de fibras de aço – fibras E, fibras M e fibras D – todas elas com a mesma designação comercial 65/35 e com características semelhantes segundo as fichas técnicas do produto. Assim, o trabalho experimental consistiu em:

- Caracterização dimensional das fibras
- Ensaio de betão projectado com fibras
- Ensaio de betão cofrado com fibras

A composição do betão foi sempre a mesma, tendo-se adoptado um betão autocompactável de classe de resistência C45/55, com a dimensão máxima de agregado de 10 mm.

Os ensaios decorreram no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC) e no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Nos quadros 5.6 e 5.7 apresenta-se o programa experimental para os ensaios dos betões com fibras.

Quadro 5.6 Programa experimental para os ensaios em betão com fibras – capacidade de absorção de energia

Tipo		Fibra de aço E	Fibra de aço M	Fibra de aço D
L _f [mm]		35	37	35
D [mm]		0,55	0,55	0,55
Dosagem [Kg/m ³]		30 Kg/m ³	30 Kg/m ³	30 Kg/m ³
Número de ensaios				
Betão Cofrado (BC)	28d	2	2	2
Betão Projectado (BP)	28d	3	-	2

Em termos de aspectos de durabilidade, a experimentação seguida – Quadro 5.7 – permite contribuir para uma recolha de valores relacionados com o betão reforçado com fibras, pois poderá haver influências introduzidas pelas últimas na permeabilidade e porosidade.

Quadro 5.7 Programa experimental para os ensaios em betão cofrado com fibras – mecanismos que contribuem para o transporte de agentes agressivos

Tipo		Fibra de aço E		Fibra de aço M		Fibra de aço D	
L _f [mm]		35		37		35	
D [mm]		0,55		0,55		0,55	
Dosagem [Kg/m ³]		30 Kg/m ³		30 Kg/m ³		30 Kg/m ³	
		Número de provetes para ensaio					
		BC	BP	BC	BP	BC	BP
Absorção de água por capilaridade	28d	2	-	2	-	2	-
Penetração de água sobre pressão	28d	2	-	2	-	2	-
Carbonatação	1,2,3 meses	2	-	2	-	2	-
Absorção de água		2		2		2	
Permeabilidade ao oxigénio		1		1		1	
Absorção de água e volume de vazios permeáveis		3		-		3	

5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL DAS FIBRAS UTILIZADAS

As características mais relevantes das fibras constam do Quadro 5.8 e foram retiradas da ficha técnica do produto.

A primeira fase de caracterização foi uma observação visual que desmente que as fibras não são iguais.

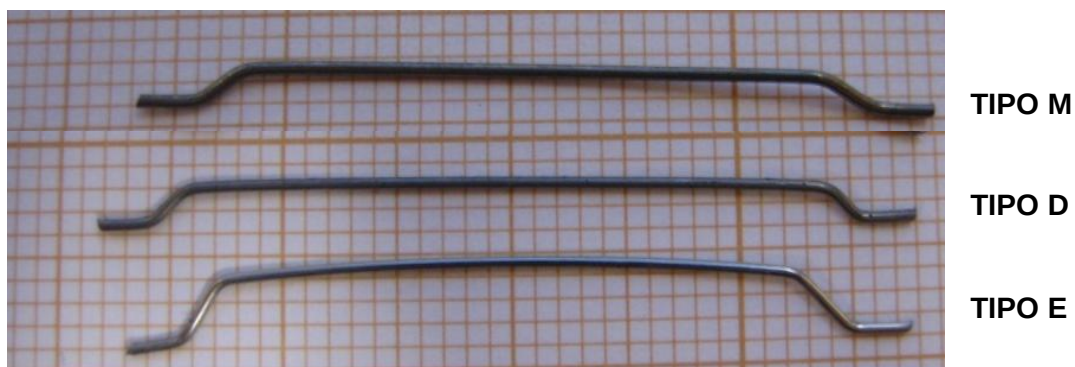


Fig. 5.11 Fibras de aço estirado a frio utilizadas no trabalho experimental

Quadro 5.8 Características das fibras E, M e D

	Tipo de Fibra		
	E	M	D
Material	Aço estirado a frio, deformadas, coladas	Aço estirado a frio, deformadas, soltas	Aço estirado a frio, deformadas, coladas
Resistência à tracção [MPa]	1300	1200	1345
Comprimento [mm]	35	37	35
Diâmetro [mm]	0,55	0,55	0,55
Esbelteza	65	67	64
Modulo de Elasticidade [GPa] ¹⁾	n.d	n.d	185
1) Retirado da ficha do fabricante, quando possível; n.d – não divulgado			

As Figuras 5.11 e 5.12 fornecem um aspecto visual das fibras de aço utilizadas, e revelam os seguintes aspectos:

- as fibras D e E apresentam-se coladas em pente; as fibras M apresentam-se soltas
- as fibras E aparecem encurvadas levando a deduzir a existência de tensões residuais que não foram eliminadas no processo de fabrico
- as fibras D são simétricas e parecem ser todas iguais
- as fibras E e M mostram assimetrias quanto à forma dos ganchos e dimensões dos mesmos.

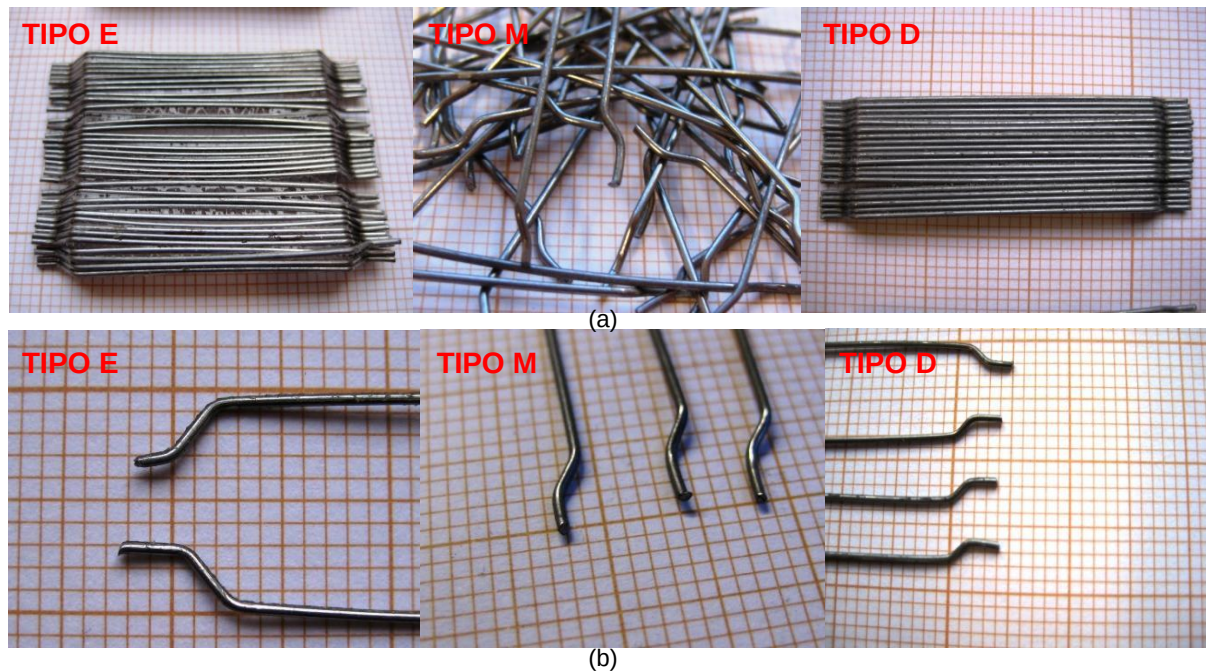


Fig. 5.12 Fibras de aço estirado a frio utilizadas no trabalho experimental. (a) Tipo de agrupamento; (b) detalhe da zona de amarração (gancho).

A segunda fase da caracterização consistiu na quantificação do comprimento, diâmetro e esbeltez dos 3 tipos com amostragem de 30 fibras.

Desta forma foi adoptado o procedimento baseado na NP EN 14489-1:2008 Fibras para betão (IPQ, 2008), e calculados os desvios relativamente ao valor declarado.

No quadro 5.9 apresentam-se os valores médios do comprimento, diâmetro e esbeltez para cada lote de 30 fibras de cada tipo e também os valores declarados pelo fabricante

Quadro 5.9 Valores declarados e valores medidos de uma amostra de 30 fibras

	Valores declarados pelo fabricante			Valores médios da amostra		
	l (mm)	d (mm)	l/d	l (mm)	d (mm)	l/d ¹⁾
Fibras E	35	0,55	65	34,93	0,53	65,67
Fibras M	37	0,55	67	36,04	0,64	56,76
Fibras D	35	0,55	64	36,07	0,55	66,93

1) média dos valores l/d individuais.

Este procedimento identifica que as fibras do tipo M não estão dentro das tolerâncias preconizadas pela NP EN 14489-1 (Quadro 5.10), no respeitante ao diâmetro e à esbeltez.

Quadro 5.10 Desvios entre valor médio e valor declarado e conformidade com as tolerâncias da NP EN 14489-1

	Desvios entre média dos valores individuais e valor declarado		
	Comprimento, l (mm)	Diâmetro, d (mm)	Esbeltez, l/d
Fibras E	- 0,2 %	- 3,64 %	+1,03 %
Fibras M	-2,59%	+16,36 %	-15,28 %
Fibras D	+3,06%	-1,82 %	+4,58 %
Tolerâncias EN 14489-1	± 5%	± 5%	±7,50 %

5.3.2 CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

Alguns dados relativos à composição do betão estão dispostos no Quadro 5.11. e 5.12 respectivamente.

As fibras descritas anteriormente e alvo de caracterização dimensional foram as utilizadas nas amassaduras conducentes aos provetes destinados a todos os ensaios de betão.

Quadro 5.11 Características das amassaduras

	Betão	
	Betão Projectado	Betão Cofrado
Classe de Resistência	C45/55	
água/cimento	0,40	
água/(cimento + cinzas)	0,28	
Tipo de cimento	CEM I 42,5 R	
$d_{\max}$ [mm]	10	
Fibras de aço [kg/m ³]	30	
Adjuvante	superplastificante	Superplastificante
	Viscocrete 3003	Viscocrete 3003
Acelerador	Alkali-free líquido	-
	Sika Acelerador 2	

Importa referir que apesar de ter sido utilizada a mesma composição de betão, a quantidade de água foi ajustada pontualmente, para obter os mesmos valores de trabalhabilidade aferidos através do ensaio de espalhamento e de L-Box. No respeitante à quantidade de fibras estas foram retiradas do respectivo lote, determinada a massa a incluir na amassadura, e adicionadas à mistura. A quantidade inserida foi sempre a conducente a uma dosagem de 30 kg/m³, tanto no caso do Betão Projectado (BP) e Betão moldado (BC).

Quadro 5.12 Dados betão fresco

Betão Projectado			Betão Cofrado		
Tipo de Fibra	E	D	E	M	D
Designação Genérica	54BP	55BP	113BC	112BC	111BC
L-Box ¹⁾					
H2/H1			1		
T-20 (s)			1,51		
T-40 (s)			3,67		
Bloqueamento/Segregação			Não/Não		
Massa volúmica do betão fresco [Kg/m ³]	2351	2329	-	-	-
Quantidade de água (l/m ³)	170	170	168	170	170
Teor em ar do betão fresco (%)	2,7	3,8	2,8	2,5	3,8

1) Ensaio L-Box, tipicamente para betão autocompactável (BAC) foi utilizado para quantificar a reologia da composição.



Fig. 5.13 Ensaio de espalhamento

Tendo em conta a natureza do betão fresco do estudo, refira-se que o ensaio de espalhamento tem por objectivo avaliar a capacidade de deformação do betão quando sujeito somente ao seu peso próprio e sem qualquer restrição (Figueiras, 2006). Este ensaio permite ainda avaliar qualitativamente, por observação visual, a presença de segregação – Figura 5.13.

Em presença da facilidade com que o betão fluiu foi também efectuado o ensaio na caixa-L (L-Box) com vista a avaliar a capacidade do betão passar entre barras que simulam as armaduras, permitindo determinar valores que quantificam o bloqueio e a fluidez do betão depois de passar pelos obstáculos. Com o ensaio da caixa-L (L-Box) é ainda possível avaliar de forma qualitativa a resistência à segregação mediante observação visual. Para este ensaio foi utilizada uma caixa em forma de L, cuja parte vertical do L comunica com a parte horizontal através de um conjunto de varões com um espaçamento reduzido. Inicialmente a parte vertical da caixa é cheia com betão e posteriormente a comporta é aberta e o betão flui da parte vertical para a parte horizontal passando através dos varões de aço - Figura 5.14. Durante o ensaio determina-se o tempo que o betão demora a percorrer uma distância longitudinal de 20 cm (T20) e de 40 cm (T40), e as alturas H1 e H2 que se alcançam em ambos os extremos da parte horizontal da caixa, com o betão já em repouso – Figura 5.15.



Fig. 5.14 Ensaio L-BOX; (a) caixa-L utilizada; (b) resistência ao bloqueio

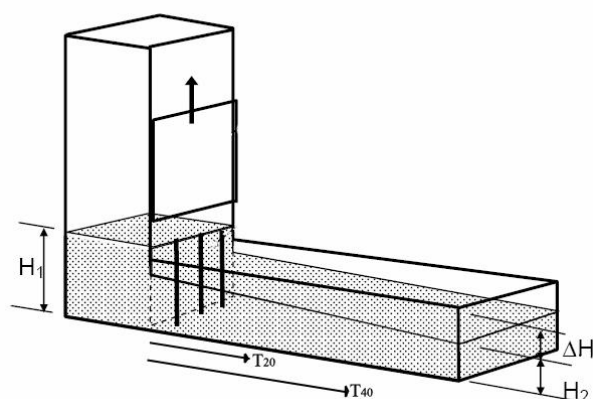


Fig. 5.15 Esquema das medições que são realizadas (Figueiras, 2006)

Dos resultados apresentados no Quadro 5.12, sobretudo no que diz respeito aos ensaios de espalhamento e ensaio em caixa-L, o betão pode mesmo ser considerado Betão Autocompactável (BAC) pois segundo Okamura et al., referenciado por Figueiras (2006), o betão auto-compactável deve satisfazer ao requisito de fluir livremente dentro da cofragem e sem uso de vibração. O betão em estudo pode ser considerado BAC conforme se constata pelo resultados do ensaio de espalhamento e da caixa em L.

Naturalmente, para caracterização em estado endurecido (Quadro 5.13), foram determinadas as resistências à compressão do betão. Para caracterização do betão projectado, as resistências foram determinadas em cubos; e em carotes retiradas das caixas de projecção. No caso do betão cofrado ou moldado *in situ*, foram determinadas as resistências dos cubos resultantes daquelas amassaduras.

Quadro 5.13 Dados betão endurecido

		Método de Colocação				
		Betão Projectado		Betão Cofrado		
Tipo de Fibra		E	D	E	M	D
Designação		54BP	55BP	113BC	112BC	111BC
Resistência em cubos (antes da projecção para o caso BP), f_c , médio [MPa]	7d	51,7	52,3	51,5	52,0	52,6
	28d	61,4	60	62,2	61,1	61,9
Resistência em carotes do betão projectado, f_c , médio [MPa]	7d	40,5	41,5	-	-	-
	28d	52,9	53,0	-	-	-

No que concerne à tensão de rotura do betão os valores são idênticos para todas as fibras.

5.3.3 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA

5.3.3.1. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO

Para a caracterização da capacidade de absorção de energia foram utilizados provetes constituídos por lajes de betão com fibras, segundo a NP EN 14488-5 (IPQ, 2008a). Neste ensaio, uma placa quadrada de 600x600x100 mm³ é simplesmente apoiada em quatro bordos rígidos com uma espessura de 20 mm e dimensões internas de 500x500 mm. A carga é aplicada no centro da placa numa superfície de contacto de 100x100 mm (Figura 5.16), com controlo de deslocamentos (1 mm/min.), até se atingir 30 mm de deslocamento central. Na zona de aplicação da carga a superfície é regularizada com uma argamassa (ponto 4.2 da NP EN 14488-5). A face moldada é apoiada nos bordos rígidos.



Fig. 5.16 Equipamento utilizado na realização nos ensaios sobre placas quadradas.

5.3.3.2 RESULTADOS

5.3.3.2.1 ABSORÇÃO DE ENERGIA EM PLACAS – BETÃO PROJECTADO

Segundo a NP EN 14488-5 foi determinada a capacidade de absorção de energia dos provetes de betão projectado (via húmida) com fibras de aço, em que a quantidade introduzida foi de 30 Kg/m^3 . Tenta-se analisar a influência da fibra - tipo E e tipo D - na ductilidade do material. Os valores obtidos encontram-se dispostos no Quadro 5.14 e representações gráficas nas Figuras 5.17 e 5.18. É também apresentado um quadro com o aspecto da placa após o ensaio – Quadro 5.15 onde se deve ter em atenção o número de fendas resultantes.

Quadro 5.14 Absorção de energia em placas de betão projectado com fibras de aço, segundo NP EN 14488-5:2008. Ensaio efectuado aos 28 dias de idade.

Designação	54BP			55BP	
	54BP15	54BP16	54BP17	55BP13	55BP14
Tipo e quantidade de fibra [Kg/m ³]	30 Kg/m ³ – Tipo E			30 Kg/m ³ – Tipo D	
Carga máxima [kN]	83,99	75,67	88,09	66,9	75,22
Carga de fendilhação [kN] <i>1st Crack</i>	50,11	33,64	46,44	36,7	41,31
Absorção de energia [J] aos 25 mm	750	550	810	1020	1050
Carga de pós-fendilhação aos 25 mm [kN]	12,47	6,25	11,76	23,18	17,16

Os valores do quadro 5.14 revelam que as fibras D têm melhor comportamento que as fibras E. O resultado relativo à absorção de energia média para as fibras D é 47,2% superior ao das fibras E, verificando-se que existe mais homogeneidade de resultados para as fibras D. Analogamente a carga média para a deformação de 25 mm para as fibras D é praticamente o dobro da carga para as fibras E; a dispersão é menor para as fibras D.

Logo no caso do betão projectado, as fibras D conferem um comportamento mais estável com resultados muito superiores aos obtidos com as fibras E.

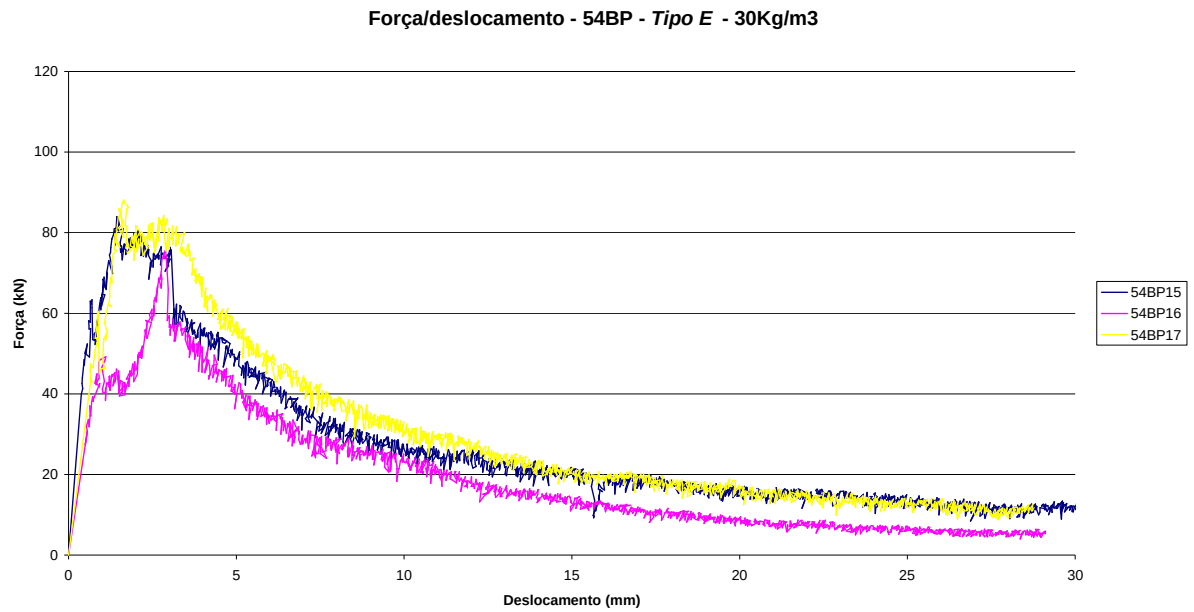


Fig. 5.17 Provetes 54BP – 30 Kg/m3 de fibras tipo E

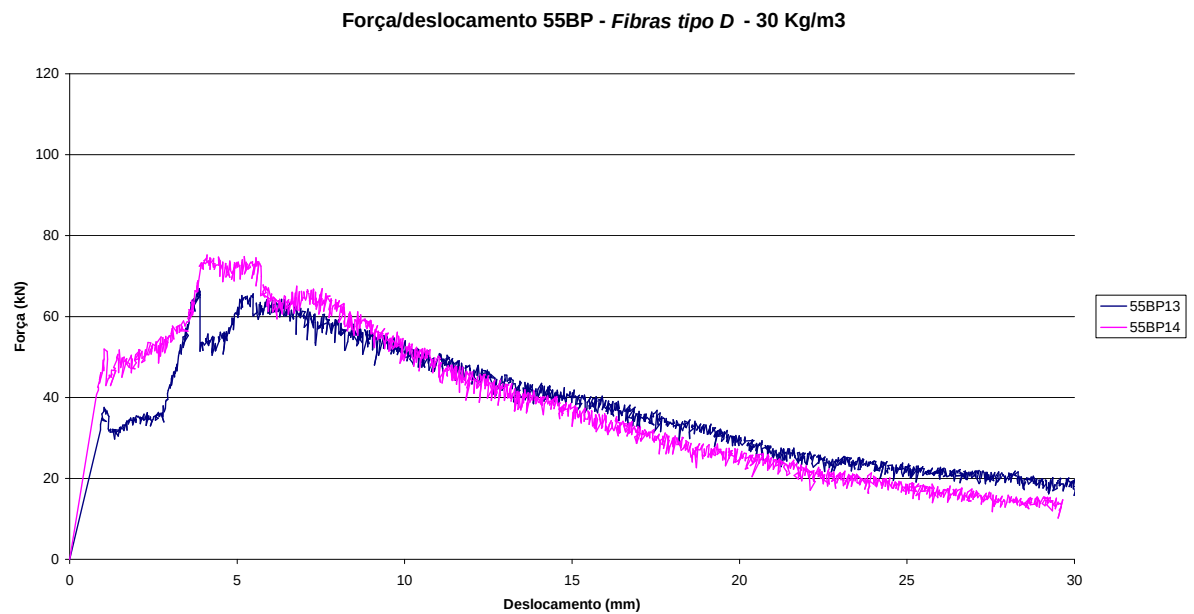


Fig. 5.18 Provetes 55BP – 30 Kg/m3 de fibras tipo D

No Quadro 5.15 apresenta-se o aspecto das placas do betão projectado com fibras após ensaio (referências 54BP15, 54BP16, 54BP17, 54BP13 e 54BP14).

Quadro 5.15 Aspecto das placas de betão projectado com fibras de aço após ensaio.

Fibras de aço tipo D 30 Kg/m ³	Fibras de aço tipo E 30 Kg/m ³
55BP13  E=1020 J 5 fendas	54BP15  E=750 J 4 fendas
55BP14  E=1050 J 5 fendas	54BP16  E=550 J 4 fendas
	54BP17  E=810 J 4 fendas

Foi visto anteriormente que um dos efeitos que as fibras introduzem numa matriz de base cimentícia é o de distribuir favoravelmente a fendilhação, no entanto não é possível afirmar com base nos ensaios

de absorção de energia levados a cabo, que a uma maior fracturação da peça corresponderá uma maior energia de absorção. É necessário ter em conta a variabilidade introduzida pelo assentamento deficiente da placa, pois poderá existir uma contribuição (não quantificável) devido ao mau assentamento da placa para efeitos de absorção de energia. Contudo a obtenção de maior fendilhação, ou por outra, de uma fracturação em mais pedaços da placa, para um mesmo betão, estará certamente depende da capacidade de ancoragem das fibras.

5.3.3.2.2 ABSORÇÃO DE ENERGIA EM PLACAS – BETÃO COFRADO

Segundo a NP EN 14488-5 foi determinada a capacidade de absorção de energia dos provetes moldados *in situ* com fibras de aço, em que a quantidade foi de 30 Kg/m³. Tenta-se analisar a influência da fibra - tipo E, tipo M e tipo D - na ductilidade do material. Os valores finais encontram-se dispostos no Quadro 5.16 e representações gráficas na Figuras 5.19 e Figura 5.20. É também apresentado um quadro com o aspecto das placas após o ensaio – Quadro 5.17 onde se deve ter em atenção o número de fendas resultantes.

No decorrer do ensaio das placas com as fibras M houve rotura por punçoamento e corte na zona da placa de distribuição de carga, como se atesta na Figura 5.21, tendo mesmo entrado cerca de 8 mm.

Quadro 5.16 Absorção de energia em placas de betão moldado com fibras de aço (28d), segundo EN 14488-5

Designação	113BC		112BC		111BC	
	113BC1	113BC2	112BC1	112BC2	111BC1	111BC2
Tipo e quantidade de fibra [Kg/m ³]	30 Kg/m ³ – <i>Tipo E</i>		30 Kg/m ³ – <i>Tipo M</i>		30 Kg/m ³ – <i>Tipo D</i>	
Carga máxima [kN]	92,95	103,07			101,84	84
Carga de fendilhação [kN] <i>1st Crack</i>	39,02	40,92			48,56	32,68
Absorção de energia [J] aos 25 mm	610	1090	a)		1100	1130
Carga de pós fendilhação [kN] <i>aos 25 mm</i>	3,32	15,24			14,5	26,09
a) valores considerados não válidos						

As fibras D mostram melhor comportamento. Os valores médios de absorção de energia e da carga relativa à deformação de 25mm para as fibras D são, respectivamente 31,2% e 118,7% superiores os correspondentes para as fibras E.

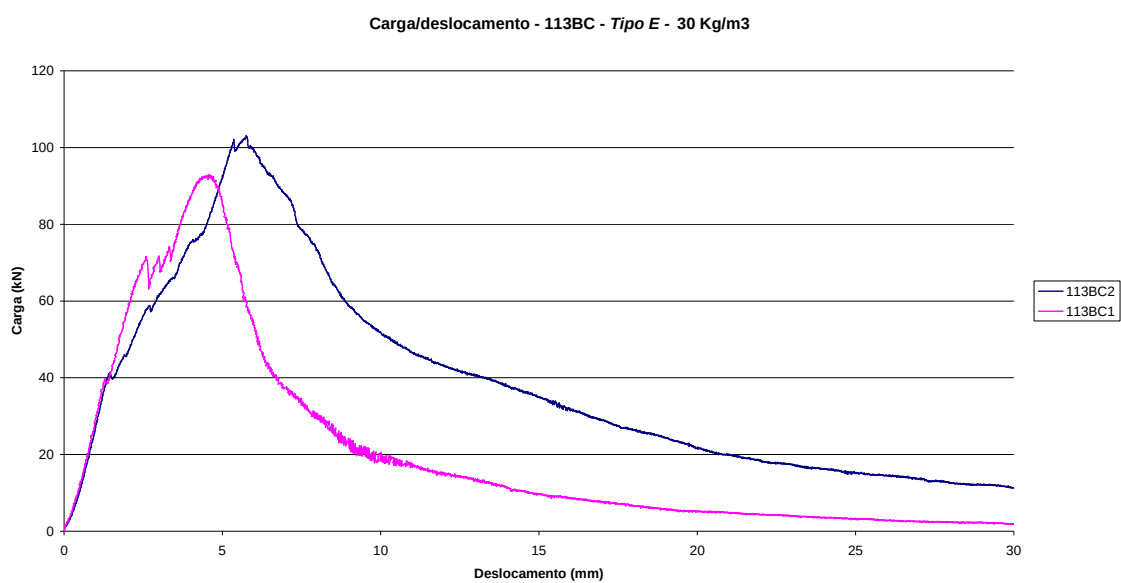


Fig. 5.19 Provetes 113BC – 30 Kg/m³ de fibras tipo E

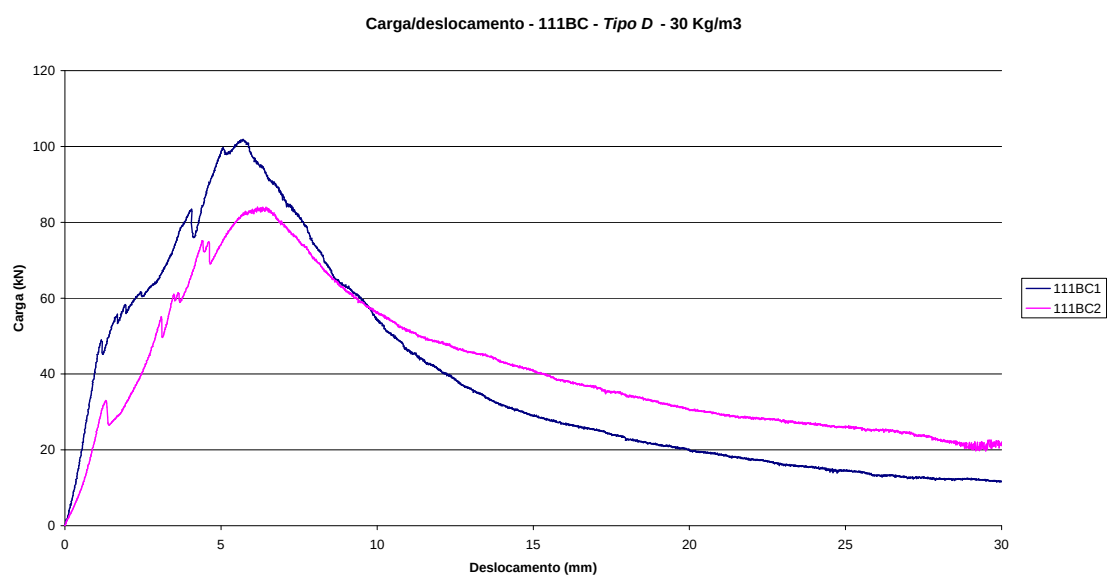


Fig. 5.20 Provetes 111BC – 30 Kg/m³ de fibras tipo D



Fig. 5.21 Rotura por corte e punção da placa 112BC2 e 112BC1, respectivamente.

Quadro 5.17 Aspecto das placas de betão cofrado com fibras de aço após ensaio.

Fibras de aço tipo D 30 Kg/m³	Fibras de aço tipo E 30 Kg/m³
111BC1  E=1010 J 5 fendas	113BC1  E=610 J 4 fendas
111BC2  E=1030 J 6 fendas	113BC2  E=1090 J 5 fendas
Nas placas com a referência 111BC é visível uma fissuração de menor abertura além das fendas principais.	

5.3.4 CONTEÚDO EM FIBRAS DO BETÃO PROJECTADO

Um aspecto determinante no desempenho do revestimento em túneis tem que ver com a efectiva dosagem em fibras metálicas presente no betão. Também aqui o método empregue influencia o desempenho, exemplo disso são as perdas durante a projecção (*rebound*) em betão e em fibras. Assim importa quantificar a presença em fibras através de ensaios destrutivos, através do caroteamento do lining em diversos pontos por exemplo. A título de exemplo diga-se que na mais recente normalização europeia em betão projectado, EN 14487:1 Betão projectado – Definições, especificações e conformidade (CEN, 2005), é verificada a conformidade em estado fresco e em estado endurecido em ensaios. Por exemplo, em estado endurecido, o valor médio do volume de fibras de pelo menos 6 amostras deve ser superior a 75% do volume de fibras determinado em testes de pré-construção.

Tendo em vista a determinação da perda de fibras por projecção foi, segundo a NP EN 14488-7 Ensaios do betão projectado – Dosagem de fibras no betão reforçado com fibras (IPQ, 2008e), determinado o conteúdo em fibras. Assim através do método A – amostra endurecida, foi para cada tipo de fibra, extraída 1 carote ($d \approx 150\text{mm}$) de cada placa de betão projectado das 3 existentes e calculado o volume geometricamente. Após esmagamento da carote, as fibras são separadas do betão (à mão e com íman) e determinada a sua massa. Deste modo é possível determinar o conteúdo real de fibras presentes na amostra – Quadro 5.19.

Quadro 5.19 Determinação do conteúdo de fibras em carotes retiradas de placas de betão projectado

Designação	Fibra E - 113BP			Fibra M - 112BP			Fibra D - 111BP		
	113BP1	113BP2	113BP3	112BP1	112BP2	112BP3	111BP1	111BP2	111BP3
Conteúdo de fibras [Kg/m³] no betão	18			20			30		
Diâmetro interno carote [mm]	143,70								
Altura [mm]	92,06	94,22	90,58	92,72	77,5	79,5	81,88	82,10	85,42
Volume [dm³]	1,49	1,52	1,47	1,5	1,26	1,29	1,33	1,33	1,34
Massa de fibras recolhidas [g]	17	18	18	15	12	16	32	31	34
Conteúdo em fibras in situ [Kg/m³]	11,41	11,84	12,24	10	9,52	12,40	24,06	23,31	25,37
Valor médio de conteúdo em fibras [Kg/m³]	11,83			10,64			24,25		
Perda por rebound %	34,3			46,8			19,2		

As fibras D apresentam o valor mais baixo da perda por *rebound*.

Os valores calculados referem-se a fibras existentes nas placas de ensaio obtidas durante a projecção em obra. A localização das placas é de certo modo favorável e o *rebound* poderá ser inferior ao resultante da projecção na abóbada ou mesmo nos hasteais.

5.3.5 ENSAIOS DE DURABILIDADE

A porosidade, no respeitante ao volume de vazios permeáveis, afecta as propriedades relacionadas com o transporte de água e agentes agressivos que por sua vez influenciam a durabilidade do betão. Está relacionada com muitos processos de deterioração do betão sempre que os mecanismos de transporte do betão são tidos em conta, já que o meio poroso do betão permite o transporte de iões cloreto, de dióxido de carbono e humidade, provocando a corrosão da armadura.

Existe um outro processo de deterioração das estruturas de betão que está relacionado com as acções gelo-degelo que também está relacionado com a porosidade permeável do betão. Os poros permeáveis são espaços onde a água pode solidificar quando a temperatura desce o suficiente, expandindo e provocando tensões internas desta forma possibilitando a fissuração.

Outros processos que comprometem a durabilidade e funcionalidade das estruturas tem que ver com o ataque do betão pelos sulfatos ou as reacções alkali-agregado estão também relacionados com os poros acessíveis à água (permeáveis).

Para efeitos de caracterização da potencial diminuição da durabilidade de uma estrutura ou elemento torna-se útil aferir certos parâmetros como absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, penetração de água sob pressão, resistência à carbonatação e permeabilidade ao oxigénio, indicadores da rede porosa do betão.

5.3.5.1 BETÃO PROJECTADO

No caso do betão projectado adoptou-se a ASTM C 642 usando a técnica da saturação em água a ferver (ASTM C 642, 2002) que permite quantificar a densidade, absorção e o volume de vazios permeáveis do betão.

Simplificadamente, os procedimentos constantes na ASTM C 642 (2002), consistiram na saturação em água a ferver usando provetes cilíndricos com as dimensões 100x50 mm. Os provetes foram secos em estufa a 105 ± 5 °C durante mais de 48h para determinar a massa do provete seco. De modo a determinar a absorção de água foram fervidos num recipiente durante 5h e seguidamente arrefecidos durante 19h até uma temperatura final de 20-25 °C.

Assim segundo a ASTM C 642 foi determinada a absorção de água e o volume de vazios permeáveis – Quadro 5.20

Quadro 5.20 Resultados absorção de água do betão projectado e volume de vazios, seguindo ASTM C 642

Designação		Fibra E - 54BP			Fibra D - 55BP		
Absorção de água (%)	-individuais	3,8	4,1	4,1	4,3	4,1	4,6
ASTM C 642	- médio		4,0			4,3	
Volume de vazios permeáveis (%)	-individuais	8,5	9,0	8,9	9,2	8,8	9,3
ASTM C 642	- médio		8,8			9,1	

Valores encontrados na literatura e determinados segundo a ASTM C642, especificam para betão projectado como valores base, o seguinte (ITA-AITES, 1993):

- absorção de água : 8% (sem acelerador); 9% (com acelerador)
- volume de vazios permeáveis: 17% (sem acelerador); 19% (com acelerador).

Repare-se que os resultados apresentados estão muito abaixo do limite especificado cumprindo a especificação da ITA-AITES (1993).

Os resultados obtidos são da mesma ordem de grandeza, pelo que se pode considerar que o comportamento face à absorção de água é idêntico.

5.3.5.2 BETÃO COFRADO

No caso do betão moldado in situ ou betão cofrado, a caracterização a nível de durabilidade envolveu os ensaios respeitantes à absorção de água por capilaridade, à penetração de água sob pressão, à determinação da absorção de água por imersão, à resistência à carbonatação e à permeabilidade ao oxigénio.

5.3.5.2.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Foram utilizados 2 provetes, para cada tipo de fibra, com dimensões 100x100x100mm³.

O procedimento de cálculo adoptados é o constante da recomendação seguinte:

- Recomendação RILEM TC 116 PCD (RILEM, 2002) – calculo do coeficiente de absorção capilar k_{cap} [Kg/(m²√s)] retirado do declive da recta de ajuste pelo método dos mínimos quadrados nas primeiras 4,5 horas – Quadro 5.20.

Na figura 5.22 está representada a absorção de água por capilaridade nas primeiras 4,5 h. Por regressão linear obteve-se o valor do coeficiente de capilaridade. A figura 5.23 exprime a evolução da absorção de água por capilaridade no intervalo 4,5-96h.

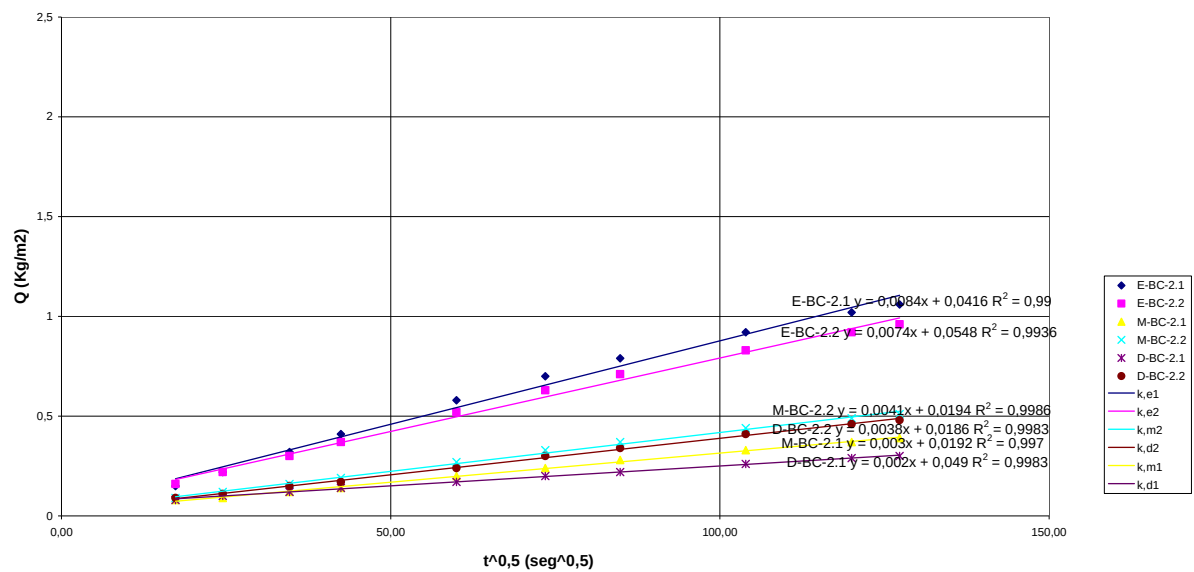


Fig. 5.22 Rectas de regressão para a curva de absorção capilar – primeiras 4,5 h

No quadro 5.21 apresentam-se os valores médios do coeficiente de capilaridade correspondentes aos provetes para cada tipo de fibra ensaiados aos 28 dias.

Quadro 5.21 Valores médios do K_{cap} para os diferentes provetes (28 dias de idade)

Valores médios – Coeficiente Capilaridade [Kg/ (m ² √s)]	RILEM
E-BC-2	0,0079
M-BC-2	0,00355
D-BC-2	0,0029

No que concerne ao coeficiente de absorção de água por capilaridade determinado de acordo com a recomendação RILEM, o betão com as fibras E mostra o pior resultado, cerca de 172,4% superior ao betão com as fibras D; o betão com as fibras M exibe valores já mais próximo do betão com as fibras D.

A partir das 4,5 h e até às 96 h o comportamento dos betões manteve-se, embora os valores tivessem diminuído.

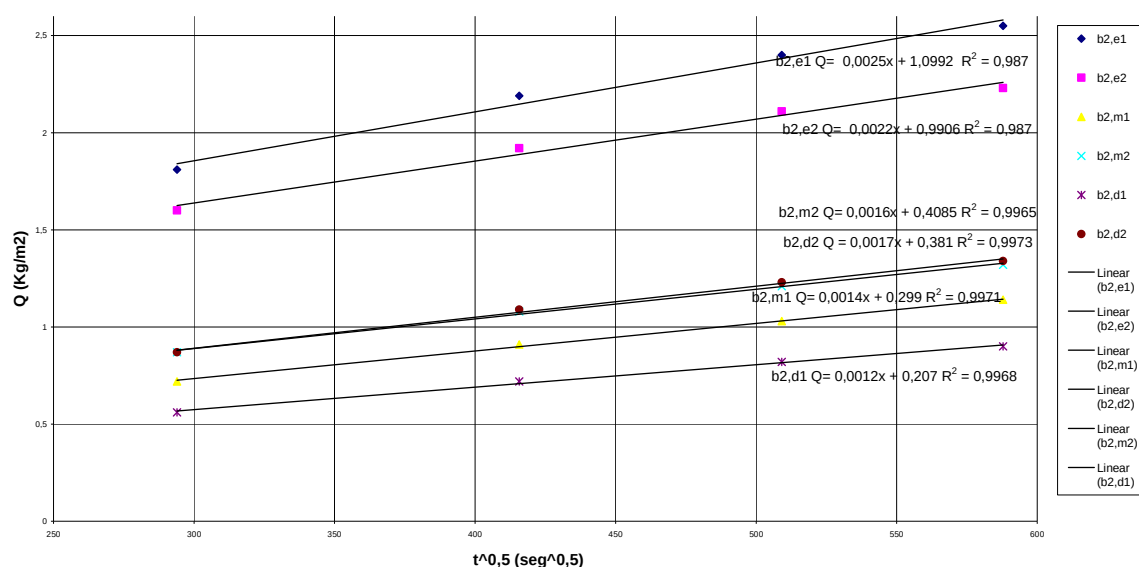


Fig.5.23 Rectas de regressão para a curva de absorção capilar – intervalo 4,5-96h

5.3.5.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A título de curiosidade adoptou-se um procedimento destinado à avaliação da porosidade livre às 48 horas para a pedra, baseado na metodologia proposta pelo Laboratoire de Péetrophysique do Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg (Hammecker, 1993). Estes dados não devem ser correlacionados com os parâmetros que interferem no transporte de agentes agressivos no betão.

Assim sendo, considera-se V , o volume do provete, a porosidade livre (N_{48}) é determinada pela seguinte expressão:

$$N_{48} = \frac{W_{48} - W_0}{V} \quad (8)$$

Assim para os provetes em análise atente-se no Quadro 5.22, os resultados para a absorção de água aos 28 dias.

Quadro 5.22 Determinação dos valores da absorção de água (28 dias de idade)

	Fibras E		Fibras M		Fibras D	
Designação	E-BC-2.1	E-BC-2.2	M-BC-2.1	M-BC-2.2	D-BC-2.1	D-BC-2.2
Área [m ²]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
h [m]	0,10169	0,0947	0,10222	0,10251	0,10211	0,10144
V [m ³]	1016,9	947	1022,2	1025,1	1021,1	1014,4
W ₀ [g]	2345,3	2185,7	2331,4	2350,2	2294,9	2229,3
W ₄₈ [g]	2427,7	2264,5	2429,2	2446,1	2384,1	2321,3
W ₄₈ -W ₀ [g]	82,4	78,8	97,8	95,9	89,2	92
N ₄₈ (%)	8,103058	8,321014	9,567599	9,355185	8,735677	9,069401
N ₄₈ médio (%)	8,21		9,46		8,90	

Neste ensaio as fibras D apresentam o melhor comportamento seguindo-se as fibras D.

Também foi determinada, com os mesmos provetes, a capacidade de absorção de água por imersão à pressão atmosférica, segundo a E 394-1993 (LNEC, 1993a) – Quadro 5.23. Ensaio efectuado aos 3 meses.

Quadro 5.23 Determinação dos valores da absorção de água, segundo E 394-1993 (3 meses de idade)

Designação	Fibras E		Fibras M		Fibras D	
	E-BC-2.1	E-BC-2.2	M-BC-2.1	M-BC-2.2	D-BC-2.1	D-BC-2.2
Peso húmido (g)	2446,7	2278,5	2439,9	2458,2	2406,2	2337,5
Peso seco (g)	2408,2	2242,6	2401,0	2418,4	2367,1	2294,8
Absorção %	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,9
Absorção média %	1,65		1,6		1,75	

A diferença entre os valores é muito pequena, podendo considerar-se que o comportamento dos três betões é idêntico.

Contudo de referir que segundo Miloud (2005), a adição de fibras ao betão contribui para uma diminuição da porosidade, comparativamente ao betão convencional. A adição de fibras com um comprimento de 30 mm não introduz diferenças significativas sempre que o volume em fibras se situa no intervalo 0,5-1%, existindo sim um pequeno aumento para volumes superiores a 1%.

A título de curiosidade, e segundo a ASTM C642, Miloud (2005) apresenta valores de porosidade na ordem dos 4% para o betão reforçado com fibras para os volumes em fibras de 0,5 e 1% e na ordem dos 5% para volume em fibras de 2%.

5.3.5.2.3 PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO

O ensaio para a determinação da profundidade de penetração da água sob pressão foi realizado com base na norma NP EN 12390-8 (IPQ, 2003) – Quadro 5.24.

Quadro 5.24 Penetração de água sobre pressão.

Profundidade de Penetração	Fibras E		Fibras M		Fibras D	
	E-BC-2.1	E-BC-2.2	M-BC-2.1	M-BC-2.2	D-BC-2.1	D-BC-2.2
D _{máx} (mm)	6	11	11	7	11	12
D ₁ (mm)	4	9	7	5	8	7
D ₂ (mm)	3	4	3	3	5	6
D _m (mm)	4,3	8	7	5	8	8,3
Média dos valores:						
-D _m (mm)	6		6		8	
-D _{máx} (mm)	9		9		12	

Os resultados dos dois provetes de betão com fibras D são praticamente iguais, o mesmo não acontece com as fibras M e E; nestas a diferença entre o valor máximo da profundidade de penetração nos dois provetes é muito grande, sendo um dos resultados quase o dobro do outro (caso das fibras E).

Só um número maior de ensaios poderá esclarecer as dúvidas.

5.3.5.2.4 PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO

A aguardar resultados.

5.3.5.2.5 CARBONATAÇÃO

Os componentes alcalinos da pasta de cimento hidratada reagem com o carbono da atmosfera que penetra no betão, formando carbonatos, provocando a libertação de água.

Ainda que a carbonatação não seja por si só prejudicial ao betão, estas reacções acompanhadas pela descida brusca do pH na água que circula na estrutura porosa do betão, podem despassivar a película que protege a armadura.

Para o betão armado a corrosão da armadura é aspecto determinante da durabilidade das estruturas. Assim torna-se útil controlar a penetração da carbonatação nas estruturas de betão armado para que não exista diminuição da vida útil desta de acordo com o nível especificado.

Assim sendo, os provetes correspondentes às composições estudadas e ao tipo de fibra foram colocados após os 28 dias de cura húmida, na câmara de carbonatação. A metodologia seguida, obedeceu na parte aplicável, ao descrito na E 391-1993 Determinação da resistência à carbonatação (LNEC, 1993b). Foram deste modo utilizadas como amostras os cubos de aresta 100 mm, resultantes das amassaduras atrás detalhadas, que após exposição em câmara de carbonatação foram abertos por compressão diametral.

A superfície aberta foi então pulverizada com solução de alcoólica de fenolftaleína a 0,1%. Este indicador de pH, cujo intervalo de mudança de cor se situa na ordem dos 8-10, apenas sinaliza pH altos. Na Figura 5.24 esta patente o estado não carbonatado das amostras de betão com fibras estudadas. Desta forma podemos concluir que a espessura de carbonatação é nula para o período de exposição em questão (cerca de três meses).



Fig. 5.24 Provetes após determinação da frente de carbonatação

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 ANÁLISE DAS FIBRAS

6.1.1 COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO

A nível de comportamento ao arrancamento (pullout) das fibras ensaiadas (fibra metálica e fibra de poliolefina) resulta que o nível máximo de tensão que as fibras podem atingir depende da classe de resistência do betão. Assim conclui-se que a adesão entre fibra e betão define a capacidade de ancoragem.

Quanto ao dispositivo de amarração em forma de gancho que a fibra metálica em estudo apresenta, conclui-se que a resposta total ao arrancamento numa abertura de fenda entre os 0,5-2 mm (para fibra perpendicular à fenda) é governada quase na totalidade pelo gancho.

A determinação do estado de tensão nas fibras que cruzam a fenda pode resultar na determinação da capacidade resistente em flexão do BRFA através do modelo analítico apresentado.

6.1.2 CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL

Os três tipos de fibras analisados e comercializados pelos respectivos fornecedores sob a mesma designação “65/35” apresentam diferenças significativas:

- Nas fibras coladas do tipo E - a deformação no agrupamento patente na Figura 4.9 leva a deduzir a existência de tensões residuais que não foram eliminadas durante o processo de fabrico; esta deformação não é visível no agrupamento tipo D.
- Diferenças de simetria e desenho do gancho nas fibras E e M;
- Diferença no comprimento e diâmetro das fibras, sobretudo E e M, isto é, para o mesmo tipo de fibra, se retirada uma amostra de 30 fibras, os valores de comprimento e diâmetro não são constantes.
- As tolerâncias preconizadas pela NP EN 14889-1 Fibras para betão – Fibras de aço (IPQ, 2008) não são cumpridas pelas fibras do tipo M e tipo E, para o caso do diâmetro e esbeltez.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO BETÃO PROJECTADO

6.2.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA

Com a mesma composição de betão o valor de absorção de energia para as fibras E é muito inferior ao obtido para as fibras D, sendo que a dispersão de resultados com as fibras E é também superior à obtida com as fibras D. Dispersão idêntica foi verificada no valor de carga da primeira fissura.

Também no respeitante à carga relativa à deformação de 25 mm há uma dispersão superior no betão projectado contendo as fibras E, sendo que o valor desta carga é cerca de metade do betão com as fibras D.

O número de fendas resultantes após ensaio é indicativo da capacidade de absorção de energia resultante da eficiência da ancoragem das fibras à matriz cimentícia. Conforme se pode comprovar, os betões com as fibras D apresentam maior número de fissuras.

Relativamente à tensão de rotura em carotes obtidas das caixas após projecção, verifica-se não haver diferença significativa entre o betão com fibras tipo E ou tipo D.

6.2.2 COMPORTAMENTO DAS FIBRAS DURANTE A PROJECCÃO

A determinação da quantidade de fibras existentes nas placas de betão projectado mostra perdas diferentes (para o mesmo robot de projecção e nas mesmas condições):

- 34,38% de perda para as fibras E (para um conteúdo inicial de 18 Kg/m³)
- 46,8% de perda para as fibras M (para um conteúdo inicial de 20 Kg/m³)
- 19,2% de perda para as fibras D (para um conteúdo inicial de 30 Kg/m³)

O que revela que as dimensões geométricas das fibras, diâmetro, comprimento etc., podem comprometer a capacidade resistente do revestimento em betão projectado, por perda de fibras por projecção.

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO BETÃO COFRADO

6.2.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA

No betão cofrado verificou-se que as fibras M, mais pesadas não permanecem à superfície o que fez diminuir a resistência ao punçoamento do betão.

O valor da absorção de energia com as fibras D é semelhante nas placas ensaiadas, enquanto que para as fibras E a diferença entre os resultados é muito grande.

Também no respeitante à carga relativa à deformação de 25 mm há uma dispersão superior no betão projectado contendo as fibras E, sendo que o valor desta carga é cerca de metade do obtido com o betão com as fibras D.

Verifica-se, neste caso, que com o betão utilizado e com o acelerador empregue na dosagem escolhida o comportamento das fibras, sob o ponto de vista de absorção de energia é idêntico no betão projectado e no betão cofrado.

6.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE

A influência dos diferentes tipos de fibras, E, M e D, em aspectos conducentes à durabilidade das estruturas foi analisada através dos ensaios atrás descritos. No entanto é de salientar que foi efectuado um reduzido número de ensaios.

Ainda que as dimensões das fibras comercializadas com a mesma designação 65/35 sejam de certa forma semelhantes, pequenas diferenças em termos de diâmetro, comprimento e gancho introduzem diferenças no comportamento do betão com fibras.

As características de compacidade do betão simples poderão ter inibido o efeito dos diferentes tipos de fibras, na maior parte dos ensaios

6.4.1 BETÃO PROJECTADO

Os ensaios efectuados consistiram na determinação da absorção de água e volume de vazios permeáveis de acordo com a ASTM C 642. Pode-se considerar que os valores obtidos nos ensaios são idênticos, independentemente do tipo de fibra e para este betão.

6.4.2 BETÃO COFRADO

Dos ensaios realizados:

- Absorção de água por capilaridade, RILEM TC 116 PCD (RILEM, 2002)
- Absorção de água (porosidade livre às 48h), Metodologia do Laboratoire de Pétrophysique do Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg)
- Absorção de água, E 394-1993 (LNEC, 1993)
- Penetração de água sob pressão, NP EN 12390-8 (IPQ, 2003)
- Resistência à carbonatação, E 391-1993 (LNEC, 1993)

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade revelam que o betão com as fibras E exibe piores características que o betão com as outras fibras. O mesmo acontecendo com o ensaio de penetração de água sob pressão em que as fibras E e M introduzem grande dispersão.

No respeitante aos outros ensaios podemos considerar que os valores são idênticos.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

É necessária a tomada de consideração em virtude das diferenças significativas registadas. Assim alertam-se os utilizadores da tecnologia do betão com fibras que é necessário uma compreensão profunda e integrada dos mecanismos envolvidos, já que mesmo com a normalização NP EN 14889-1:2007 Fibras para Betão. Parte 1: Fibras de aço, definições, especificações e conformidade (IPQ, 2008d) não estão devidamente balizadas as tolerâncias para, por exemplo, o comprimento dos ganchos e assimetrias várias. Grosseiramente a normalização controla comprimento e diâmetro de uma amostra de 30 fibras.

Ao nível da fibra recomenda-se como trabalhos futuros, a análise do efeito do gancho mais detalhadamente, pois foi referido que a deformação do gancho é dos principais mecanismos que governam o processo de *pullout* ou arrancamento de uma fibra à matriz cimentícia, e por sua vez este é também aspecto governador, do comportamento pós-fendilhação.

Sugere-se também a realização de ensaios com betões diferentes especialmente no que toca à compacidade.

Ao nível da tecnologia dos betões, sobretudo quando presentes adjuvantes na constituição dos betões com fibras, é de realçar que a entrada desta variável modifica profundamente a matriz cimentícia. O estudo de vários adjuvantes e aceleradores de presa, em diferentes dosagens e de diferentes fabricantes, poderá resultar num entendimento mais aprofundado dos mecanismos de transferência de esforços entre fibra e matriz.

O ensaio de flexão sobre prisma indentado é também fundamental, pois associa factores ligados ao processo de arrancamento com os dependentes da distribuição e orientação das fibras, que em muito condicionam a resposta em termos de resistências residuais a níveis de deformação (ou de abertura de fenda) específicos e requeridos pela normalização mais recente – NP EN 14845 Métodos de ensaio de betão reforçado com fibras (IPQ, 2008b; IPQ, 2008c).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aagaard, B. e Blindheim, O. (1996). Frequently asked questions about sprayed concrete. Answers for the practitioner. Em: N. Barton e R. Kompen (ed), *Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support: Proc 2nd Int Symposium on Sprayed Concrete, Gol, Norway 23-26, September 1996*. The Norwegian Concrete Association, Oslo.
- ACI Committe 544, “*State-of-the-art report (ACI 544.1R-96) on Fiber Reinforced Concrete*”, ACI Report, Nov. 1996, pp. 544.1R-1 – 544.1R-65, Michigan, 1996.
- ASTM. (1997). Standard test method for Microindentation hardness of materials. *American Society for Testing and Materials standard E-384*, West Conshohoken.
- ASTM. (2002). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *American Society for Testing and Materials standard C-642*, West Conshohoken.
- ASTM. (2003). Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete using a centrally loaded round panel. *American Society for Testing and Materials standard C-1550*, West Conshohoken.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics* 6/4, Springer-Verlag, Berlin, pp. 189-236.
- Barton, N. e Chryssanthakis, P. (1996). Design of tunnels for NMT using fibre reinforced shotcrete and bolting as permanent support. Em: N. Barton e R. Kompen (ed), *Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support: Proc 2nd Int Symposium on Sprayed Concrete, Gol, Norway 23-26, September 1996*. The Norwegian Concrete Association, Oslo.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39, Elsevier Science Ltd, pp. 185–216.

- Bartos, P. (1981). Review paper: bond in fibre reinforced cements and concrete. *The International Journal of Cement Composites*, Vol.3, No.3, Construction Press, 159-176.
- Bentur, A. & Mindess, S. (1990). *Fibre Reinforced Cementitious Composites* (1ª Ed). Essex: Elsevier Science Publishers Ltd.
- Blom, C. (2002). *Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils*. Delft University, Delft: DUP Science.
- CEN (2005). Definitions, specifications and conformity. *Sprayed concrete EN 14487-1:2005*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (2007). Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). *EN 14651:2005+A1*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Chan, Y., Chu, S. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, Elsevier Science Ltd, 1167-1172.
- Chen, J., Mo, H. (2008). Numerical study on crack problems in segments of shield tunnel using finite element method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, (article in press), Elsevier Science Ltd.
- Çolak, A. (2004). Properties of plain and latex modified Portland cement pastes and concretes with and without superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, 35, Elsevier Science Ltd, 1510-1521.
- Ding, Y. e Kusterle, W. (1999). Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests. *Cement and Concrete Research*, 29, Elsevier Science Ltd, 1827-1834.

Dhonde, H., Mo, Y., Hsu, T. (2005). *Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams*. Technical Report FHWA/TX-06/ 0-4819-1 [Versão electrónica], Department of Civil & Environmental Engineering, University of Houston, Houston.

Døssland, Å. (2003). Nordic miniseminar: design rules for steel fibre reinforced concrete structures, Em: T. Kanstad (ed), Beams of ordinary and self compacting concrete reinforced with steel fibres and ordinary reinforcement tested in moment and shear: *Proc Nordic miniseminar, Oslo, 6 October 2003*. The Norwegian Concrete Association, Oslo.

Døssland Å.L.: Fibre reinforcement in load carrying concrete structures, PhD-thesis, Department of structural engineering, NTNU, Trondheim, Noruega, Abril 2008.

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

EFNARC (1996). *European Specification for Sprayed Concrete* [Versão electrónica]. Surrey: European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Materials Suppliers for the Construction Industry (EFNARC).

EMAAR. (12 de Maio, 2008). Download em 5 de Junho de 2008, de <http://www.emaar.ae/MediaCenter/PressReleases/2008May12a.asp>

Figueiras, H. (2006). *Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável: aferição das suas características mecânicas e durabilidade*, Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, DEC-FEUP, Universidade do Porto, Porto.

Glover, M. (2007, Março). High speed one. *Ingenia*, pp. 16-24.

Grimheden, D. (2004). Results from tests on small beams (b/h=150/150) sawn from walls and slabs of realistic dimensions produced by ordinary or self-compacting concrete, Em: T. Kanstad (ed), *Design*

rules for steel fibre reinforced concrete structures: Proc Nordic miniseminar, Oslo, 6 October 2003.

The Norwegian Concrete Association, Oslo.

Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A., Kaynia, A. (2002) Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption, Report, NGi, *Proceedings 4th Inter. Symp. on Sprayed Concrete, Davos, Switzerland 22-26 Sept*, pp. 134-151

Grøtv, E. (2006). Storage of hydrocarbon products in unlined rock caverns. Em: NFF, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (Ed.), *Sustainable underground concepts, Publication no.15*, 3; 19-2. Oslo: NFF

Groth, P. (2000) Fibre reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders, PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology.

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

Guerrero, P. e Naaman, A. (2000). Effect of mortar fineness and adhesive agents on the pull-out response of steel fibers, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, Jan-Feb. 2000, pp. 12-20.

Hammecker, C. (1993). Importance des transferts d'eaux dans la dégradation des pierres en oeuvre. Tese de doutoramento, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg, 254 pp.

Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S. (1996). Microhardness testing of cementitious materials. *Adv. Cem. Based Mater.*, 42, Elsevier Science Ltd, 48–57.

IPQ (2003). Profundidade de penetração de água sobre pressão. NP EN 12390-8:2003 *Ensaio do betão endurecido*. Caparica: Instituto Português da Qualidade .

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

IPQ (2008a). Determinação da capacidade de absorção de energia de provetes de lajes reforçadas com fibras. *NP EN 14488-5:2008 Ensaio do betão projectado*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2008b). Betões de referência. *NP EN 14845-1 Métodos de ensaio de fibras no betão*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2008c). Influência sobre a resistência. *NP EN 14845-2 Métodos de ensaio de fibras no betão*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2008d). Fibras de aço, definições, especificações e conformidade. *NP EN 14489-1 Fibras para betão*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2008e). Dosagem de fibras no betão reforçado com fibras. *NP EN 14488-5:2008 Ensaio do betão projectado*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

ITA-AITES. (1993). Shotcrete for Rock Support: a Summary report on the State of the Art in 15 Countries. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No.4, Pergamon Press Ltd, 441-470.

ITA-AITES, (1999). Guidelines for Design of Shield Tunnel Lining – ITA-Working Group Research, Association Internationale des tunnels et de l'espace souterrain, Lausanne.

Johnson, S. (2006). *Analytical modelling of fiber reinforced post-tensioned concrete anchorage zones* [Versão electrónica]. The Florida State University, FAMU-FSU College of Engineering, Tallahassee, Florida.

JSCE (2007). Standard Specifications for Tunnelling-2006: Shield Tunnels. Tunnel Engineering Committee. Tóquio: Japanese Society of Civil Engineers

- Kanstad, T. (2004). Nordic miniseminar: design rules for steel fibre reinforced concrete structures, Em: T. Kanstad (ed), *Design rules for steel fibre reinforced concrete structures: Proc Nordic miniseminar, Oslo, 6 October 2003*. The Norwegian Concrete Association, Oslo.
- Kasper, T. et al. (2007). Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen, *Tunnelling and Underground Space Technology*, (article in press), Elsevier Science Ltd.
- Koksal, F., Ilki, A., Bayramov, F. e Tasdemir, M. (2006). Mechanical behaviour and optimum design of SFRC plates [Versão electrónica]. Em: M.S. Konsta-Gdoutos (ed.), *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, 199-205. Springer
- Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling*. Berlim: Springer-Verlag Berlin Heildelberg.
- LAFARGE. (desconhecido). Download em 17 de Maio de 2008, de http://www.lafargenorthamerica.com/wps/portal!/ut/p/kcxm1/04_Sj9SPykssy0xPLMnMz0vM0Y_QjzKLN4p3CwbJgFjGpvqRyCIG8Y5wAV-P_NxU_SB9b_0A_YLc0IhyR0dFAKjZGbQ!/delta/base64xml/L3dJdyEvd0ZNQUFzQUMvNElVRS82XzJfRlM!?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/LNA/Library/Project/Product/Ductal/The_Footbridge_Of_Peace/The_footbridge_Of_Peace
- Lambrechts, A. (2005, Abril). The technical performance of steel and polymer based fibre content. *Concrete for a new world*, The Institute of Concrete Technology, Londres.
- Li, V. (2002). Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering [Versão electrónica]. *Journal of Applied Polymer Sciences*, Vol. 83, John Wiley & Sons, Inc., 660-686.
- Li, V. e Stang H. Bridging – Physical and Mechanical Aspects, DCAMM –Højgaard foundation Summer School Mechanics of Fiber Reinforced Cement Based Composites, DTU, August, 2001.

- Linnestad, M. (2004). Steel fibres in Concrete Structures – A research Project Chaired by Veidekke ASA, Em: T. Kanstad (ed), *Design rules for steel fibre reinforced concrete structures: Proc Nordic miniseminar, Oslo, 6 October 2003*. The Norwegian Concrete Association, Oslo.
- LNEC (1993a). Determinação da absorção de água por capilaridade. *Especificação LNEC E 393-1993*. Lisboa: MOPTC-LNEC.
- LNEC (1993b). Determinação da Resistência à Carbonatação. *Especificação LNEC E 391-1993*. Lisboa: MOPTC-LNEC.
- Löfgren, I.: *Fibre Reinforced Concrete for Industrial Construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Doctoral Thesis. Publication 2378, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005, 146p.
- Malmgren, L. (2005). *Interaction between shotcrete and rock: experimental and numerical study*. Department of Civil and Environmental Engineering – Division of Mining and Geotechnical Engineering – Rock Mechanics and Rock Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.
- Mehta, P. e Monteiro, P. (2001). *Concrete: microstructure, properties and materials*. (3rd Ed). Nova Iorque: McGraw-Hill.
- Miloud, B. (2005). Permeability and porosity characteristics of steel fibre reinforced concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Vol. 6, No.4, 317-330.
- Miranda, T. (2003). *Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos*. Universidade do Minho, Guimarães.
- MOTTMAC. (2008). Download em 5 de Junho de 2008, de <http://www.terminal5.mottmac.com/>
- Naaman, A., Alwan, J., Hansen, W. (1991). Pull-out work of steel fibers from cementitious composites: analytical investigation, *Cement and concrete composites*, 13, Elsevier Science Ltd, 247-255.

- Naaman, A. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, 241-252, Japan Concrete Institute.
- NCA (1999). *Publication no.7– Sprayed Concrete for Rock Support – Technical specification, guidelines and test methods*. Oslo: Norsk Betongforening
- NFF (2004). Norwegian Tunnelling. Em: NFF, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (Ed.), *Norwegian tunnelling*, Publication no.14, 29-34. Oslo: NFF
- Odebrecht (2008, Janeiro). Metrô de São Paulo. *Odebrecht Informa*, nº 134. Salvador da Baía: Odebrecht S.A
- Papworth, F. (2002). Design guidelines for the use of fibre reinforced shotcrete in ground support. *American Shotcrete Association, ASA Magazine*, Spring 2002, pp. 16-21
- PCI (1999), “*PCI Design Handbook*,” Precast/Prestressed Concrete Institute, 5th Edition, Chicago, Illinois.
- Plizzari, G., Tiberti, G. (2006) Steel fibres as reinforcement for precast tunnel segments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, Elsevier Science Ltd., 438-439.
- Ramachandran, V. (1995). Handbook of chemical admixtures. Em: V. S. Ramachandran (Ed.), *Institute for Research in Construction – NRCC*. New Jersey: Noyes Publications.
- RILEM (2002). TC 116 PCD: Recommendation of TC 116-PCD: Tests for gas permeability of concrete - Preconditioning of concrete test specimens for the measurement of gas permeability and capillary absorption of water - Measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM - CEMBUREAU method - Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete, RILEM.

- 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, Jun 2002, RILEM., 262-278.
- RILEM (2003). TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ design method – Final recommendation. *Materials and Structures*, vol. 36, Out 2003, RILEM., 560-567.
- Rixom, R. e Mailvaganam, N. (1999). Chemical admixtures for concrete (3rd ed), E&FN Spon, London: Taylor & Francis Group.
- Romero, V. (2002, 3/09). NATM in soft ground: a contraction of terms? *World tunnelling*, 338
- Sampaio, J., Coutinho, J. e Sampaio, M. (2001). Melhoria de desempenho de betões pelo metacaulino. Apresentado no 43º Congresso Brasileiro do Concreto, São Paulo.
- Sandbakk, S. (2007) Pull-out testing of different fibre types. *Concrete Mini-seminar*, Trondheim.
- Singh, N. e Rai, S. (2000). Effect of polyvinlyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, 31, Elsevier Science Ltd, 239-243.
- Singh, S., Shukla, A., e Brown, R. (2004). Pullout behaviour of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*, 34, Elsevier Science Ltd, 1919-1925.
- Singh, B. e Goel, R. (2006). Tunnelling in weak rocks. Em: J. Hudson (Ed.) *Elsevier Geo-Engineering Book Series V.5*, Oxford: Elsevier Ltd.
- SINTEF (2006). Thorenfeldt E.V., Fjeld, S. et. al.: Steel Fibre Reinforcement in Concrete, Guidelines for design, execution and control, Sintef, Noruega, 2006.
- Shannag, M., Brinker, R., Hansen, W. (1997). Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites, *Cem. Concr. Res.* 27, Elsevier Science Ltd, 925– 936.

- Thorenfeldt, E. (2004). Theoretical tensile strength after cracking, fibre orientation and average stress in fibres, Em: T. Kanstad (ed), *Design rules for steel fibre reinforced concrete structures: Proc Nordic miniseminar, Oslo, 6 October 2003*. The Norwegian Concrete Association, Oslo.
- Tran, V., Bernard, E. e Beasley, A. (2005). Constitutive modeling of fiber reinforced shotcrete panels. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131, no.5, ASCE – American Society of Civil Engineers, 512-521.
- Toan, N. (2006). *TBM and Lining*. Politécnico di Torino, COREP and D2 Consult Dr. Wagner Dr. Shulter GmbH & Co. KG, Turim.
- USACE (1997). Engineering and Design – Tunnels and Shafts in Rock. Manual No. 1110-2-2901 Washington D.C: Department of the Army – U.S. Army Corps of Engineers; pp. 5.1-5.19.
- Vandewalle, M. (1998). The use of steel fibre reinforced shotcrete for the support of mine openings. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Ma/June, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 113-120.
- Vandewalle, L. (2004). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete proposed by RILEM TC162-TDF, In: T. Kanstad (ed), *Design rules for steel fibre reinforced concrete structures: Proc Nordic miniseminar, Oslo, 6 October 2003*. The Norwegian Concrete Association, Oslo.
- Vandewalle, M. (2007, Março). Sprayed concrete for underground applications. Apresentado em *Revestimento de Betão em Túneis*, LNEC-CPT, Lisboa.
- Won, L., Lim, D., Park, C. (2006). Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58, Thomas Telford Ltd, 401-410.
- Waal, R. (1999). *Steel fibre reinforced tunnel segments, for the application in shield driven tunnel linings*. Delft University, Delft: DUP Science.

Yazdani, N. e Spainhour, L. (2002) Application of fiber reinforced concrete in the end zones of precast prestressed bridge girders [Versão electrónica]. In: *Final Report BC386*, FDOT, Dezembro 2002, FAMU-FSU College of Engineering, Civil and Environmental Engineering Department. Tallahassee, Florida.

Zollo, R. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and concrete composites*, 19, Elsevier Science Ltd. 107-122.

