

UTILIZAÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS COM FUNÇÕES ESTRUTURAIS EM ESTRUTURAS DE BETÃO

RUI PEDRO AGUIAR FURTADO PINTO LIMA

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

Orientador: Professor Doutor Afonso António de Serra Neves

Co-Orientadora: Professora Ana Maria Quintela da Silva Proença
Corrêa de Queirós

SETEMBRO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

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 - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

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

The only place where success comes before work is in the dictionary.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho, gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à minha família, pelo apoio prestado ao longo de toda a minha vida, o que foi fundamental na caminhada do meu percurso académico.

Gostaria de agradecer igualmente aos profissionais do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) da FEUP – Patrícia, Gil, Manuel, Fernando, Paulo, Paula, Júlia, Cecília, Irene e Dora - pelo apoio prestado para eu poder realizar devidamente os ensaios necessários para esta dissertação.

Um muito obrigado também para o Professor Doutor Afonso António de Serra Neves e para a Professora Doutora Ana Maria Quintela da Silva Proença Corrêa de Queirós pela constante disponibilidade para me ajudar neste trabalho, tirando-me todas as dúvidas que me foram surgindo e dando conselhos valiosos, não só para esta dissertação, mas também para a vida futura.

Um agradecimento sentido também para a BEKAERT e, em especial ao Eng^o Erik Ulrix da BIU Internacional, pelas fibras disponibilizadas para a realização deste trabalho. Ainda ao Sr. Pedro Valter da SECIL, S.A. pelo fornecimento do cimento, ao Sr. Arménio Soares da SECIL-Britas, S.A. pela disponibilização das britas, à SORGILA-Sociedade de Argilas, S.A. pelas areias e à SIKA Portugal, S.A pelo adjuvante.

Por último, mas não menos sentido, um agradecimento aos meus colegas de curso, com foco nos da Opção de Materiais e Processos de Construção, pela partilha de ideias e amizade demonstrados.

RESUMO

No presente trabalho é abordada a utilização de fibras metálicas com funções estruturais, em estruturas de betão.

Após uma introdução onde se faz o enquadramento do tema na problemática das construções com estruturas de betão, são descritas e caracterizadas com detalhe as fibras de aço que podem ser usadas no Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA).

São descritas as propriedades do betão fresco e do betão endurecido quando dotado de fibras metálicas. São descritos os ensaios a realizar para a caracterização do BRFA. São também descritas algumas aplicações práticas que colocam em evidência as vantagens no uso das fibras metálicas em vez de usar as tradicionais armaduras ordinárias.

São descritos ensaios experimentais de flexão sobre vigas realizadas em BRFA e comentadas as principais conclusões. São ainda comparados os resultados obtidos com os previsíveis de acordo com as recomendações do RILEM TC-162-TDF (2003).

Finalmente são identificadas as principais conclusões e propostos alguns desenvolvimentos futuros.

PALAVRAS-CHAVE: resistência à flexão, ensaios, método de dimensionamento, vigas, fibras de aço.

ABSTRACT

The present work refers to the use of the steel fibers with structural functions, in concrete structures.

After an introduction that makes the framing of the issue in the problematic of construction in concrete structures, steel fibers that might be used in Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) are described and characterized with detail.

The properties of fresh and hardened concrete with steel fibers are described. The tests to characterize the SFRC are described. There are also described some practical applications that put in evidence the advantages in using steel fibers instead of using the traditional ordinary reinforcement.

Experimental tests of flexion in SFRC beams are described, and the main conclusions are commented. Plus, the tests results are compared with the predictable results, according to the recommendations of RILEM TC-162-TDF (2003).

Finally, main conclusions are identified and future investigations are proposed.

KEYWORDS: flexural strength, tests, design method, beams, steel fibres.

INDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. TEMÁTICA	1
1.2. OBJETIVO E ESTRATÉGIA	2
1.3. ORGANIZAÇÃO	3
2. BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. FIBRAS	7
2.2.1. MODO DE FABRICO	7
2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DA FIBRA	7
2.2.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	10
2.3. PROPRIEDADES DO BETÃO FRESCO COM FIBRAS	12
2.4. PROPRIEDADES DO BETÃO COM FIBRAS ENDURECIDO	12
2.4.1. SOB A AÇÃO DE UMA CARGA ESTÁTICA	12
2.4.2. DUCTILIDADE	13
2.4.3. COMPRESSÃO	13
2.4.4. FLEXÃO	13
2.4.5. TRAÇÃO UNIAXIAL	13
2.4.6. CORTE	13
2.4.7. FADIGA	14
2.4.8. FLUÊNCIA E RETRAÇÃO	14
2.4.9. MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON	14
2.4.10. ABSORÇÃO DE ENERGIA	14
2.4.11. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA	15
2.4.12. RESISTÊNCIA À ABRASÃO	16
2.4.13. DURABILIDADE	16
2.4.14. FISSURAÇÃO RESULTANTE DA RETRAÇÃO	17
2.4.15. IMPACTO	17

2.4.16. CONDUTIBILIDADE ELÉTRICA E RESISTIVIDADE	18
2.5. INTERFACE FIBRA-MATRIZ.....	18
2.6. FRATURA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	19
2.7. COMPORTAMENTO DOS BRFA.....	20
2.8. RELAÇÃO ENTRE ALGUNS PARÂMETROS DOS BRFA.....	20
2.9. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BRFA	23
2.10. VANTAGENS DAS FIBRAS EM RELAÇÃO À MALHASOL NOS TÚNEIS.....	24
2.11. COMPARAÇÃO ENTRE FIBRAS DE AÇO E SINTÉTICAS	24
2.12. APLICAÇÕES DO BRFA	26
2.12.1. FIBRAS DE AÇO EM LAJES DE FUNDAÇÃO	28
2.12.1.1. Considerações gerais das fibras de aço em lajes de fundação.....	28
2.12.1.2. Utilização das fibras de aço Dramix READY em lajes de fundação.....	29
2.12.1.3. Redução de custos significativa.....	30
2.12.1.4. Fibras de Aço – Solução amiga do ambiente	32
2.12.1.5. Considerações finais da aplicação das fibras de aço em lajes de fundação.....	32
2.12.2. CASO DE ESTUDO – “THAMES WATER LEE TUNNEL”	33
3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	37
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. PEÇAS MOLDADAS	39
3.2.1. VIGAS PARA ENSAIO DE FLEXÃO	39
3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO BRFA.....	39
3.2.2.1. Resistência à Compressão	39
3.2.2.2. Módulo de Elasticidade	41
3.2.2.3. Limite de Proporcionalidade e Resistências Residuais à Tração por Flexão.....	41
3.2.3. ENSAIOS COMPLEMENTARES	45
3.2.3.1. Resistência à Tração Direta	45
3.2.3.2. Resistência à Tração por Flexão.....	46
3.2.3.3. Ensaio dos varões de aço	46
3.3. ENSAIOS DE FLEXÃO EM VIGAS.....	47
3.3.1. PROVETES/MODELOS E ESQUEMA DE ENSAIO.....	47
3.3.2. ENSAIOS COM VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE DIÂMETRO 8 MM	51
3.3.2.1. Vigas 1, 2 e 3 (3Φ8; Dosagem de fibras = 0 kg/m ³).....	51
3.3.2.2. Vigas 4, 5 e 6 (3Φ8; Dosagem de fibras = 39,3 kg/m ³)	56

3.3.2.3. Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ8 e com diferentes dosagens de fibras.....	60
3.3.3. ENSAIOS COM VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE DIÂMETRO 6 MM	62
3.3.3.1. Vigas 10, 11 e 12 (3Φ6; Dosagem de fibras = 19,6 kg/m ³)	63
3.3.3.2. Vigas 7, 8 e 9 (3Φ6; Dosagem de fibras = 39,3 kg/m ³)	67
3.3.3.3. Vigas 13, 14 e 15 (3Φ6; Dosagem de fibras = 58,9 kg/m ³)	70
3.3.3.4. Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ6 e com diferentes dosagens de fibras.....	73
3.3.4. ENSAIOS COM VIGAS SEM ARMADURA ORDINÁRIA.....	76
3.3.4.1. Vigas 16, 17 e 18 (Sem armadura ordinária; Dosagem de fibras = 58,9 kg/m ³)	76
3.4. INFORMAÇÃO ADICIONAL RELATIVA AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	78
3.5. CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	79
4. RILEM TC 162-TDF	81
4.1. INTRODUÇÃO.....	81
4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	81
4.3. RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO	82
4.4. DIMENSIONAMENTO EM ESTADO LIMITE ÚLTIMO	83
4.4.1. GENERALIDADES.....	83
4.4.2. VALORES DOS MOMENTOS	85
4.4.3. RESISTÊNCIA AO CORTE.....	87
4.4.3.1. Resistência ao corte para elementos sem reforço ao corte (V_{cd})	87
4.4.3.2. Contributo das fibras para a Resistência ao Corte (V_{fd}).....	88
4.4.3.3. Contributo dos estribos ou barras inclinadas para a Resistência ao Corte (V_{wd}).....	89
4.5. DIMENSIONAMENTO PARA ESTADOS LIMITE DE UTILIZAÇÃO	89
4.5.1. COEFICIENTE β	89
4.5.2. EXTENSÃO MÉDIA DO AÇO DE REFORÇO, ϵ_{sm}	90
4.5.3. EXPRESSÃO DE s_{rm}	90
4.6. RESULTADOS DOS CÁLCULOS DO MOMENTO DE CEDÊNCIA DAS ARMADURAS E MOMENTO RESIDUAL E DA RESISTÊNCIA AO CORTE DAS VIGAS, SEGUNDO O RILEM TC-162-TDF (2003).....	91
4.6.1. CÁLCULO DO MOMENTO DE CEDÊNCIA DAS ARMADURAS, MOMENTO RESIDUAL E RESISTÊNCIA AO CORTE PARA AS VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE 8 MM DE DIÂMETRO	91
4.6.1.1. Vigas 1, 2 e 3 (3Φ8; Dosagem de fibras = 0 kg/m ³).....	91
4.6.1.2. Vigas 4, 5 e 6 (3Φ8; Dosagem de fibras = 39,3 kg/m ³)	92

4.6.1.3.Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ8 e com diferentes dosagens de fibras.....	92
4.6.2. CÁLCULO DO MOMENTO DE CEDÊNCIA DAS ARMADURAS, MOMENTO RESIDUAL E RESISTÊNCIA AO CORTE PARA AS VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE 6 MM DE DIÂMETRO	92
4.6.2.1.Vigas 10, 11 e 12 (3Φ6; Dosagem de fibras = 19,6 kg/m ³)	92
4.6.2.2.Vigas 7, 8 e 9 (3Φ6; Dosagem de fibras = 39,3 kg/m ³)	93
4.6.2.3.Vigas 13, 14 e 15 (3Φ6; Dosagem de fibras = 58,9 kg/m ³)	93
4.6.2.4.Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ6 e com diferentes dosagens de fibras.....	93
4.6.3. CÁLCULO DO MOMENTO DE FENDILHAÇÃO E MOMENTO RESIDUAL PARA AS VIGAS SEM ARMADURA ORDINÁRIA	94
4.6.3.1.Vigas 16, 17 e 18 (Sem armadura ordinária; Dosagem de fibras = 58,9 kg/m ³)	94
4.7. CONCLUSÃO SOBRE OS CÁLCULOS EFETUADOS SEGUNDO O RILEM TC-162-TDF	94

5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DO RILEM TC-162-TDF

5.1. INTRODUÇÃO	97
5.2. MOMENTO DE FENDILHAÇÃO	97
5.3. MOMENTO DE CEDÊNCIA DAS ARMADURAS.....	98
5.4. MOMENTO RESIDUAL	99
5.5. CONCLUSÃO SOBRE A COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS PREVISÍVEIS PELO RILEM TC-162-TDF (2003).....	100

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. INTRODUÇÃO	101
6.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	101
6.3. RESULTADOS PREVISÍVEIS DE ACORDO COM O RILEM TC-162-TDF (2003)	102
6.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DO RILEM TC-162-TDF (2003).....	102
6.5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Formas de fibras encontradas frequentemente no mercado	8
Fig. 2 - Fibras de aço em banda (tipo Dramix).....	9
Fig. 3 - Comportamento ao arrancamento de uma fibra de aço com gancho e sem gancho, respectivamente, para várias classes de resistência.....	10
Fig. 4 - Efeito da resistência à tração das fibras e do tipo de ancoragem na largura de fendas.....	11
Fig. 5 - Efeito da resistência do betão e da resistência das fibras na largura de fendas	12
Fig. 6 – Utilização das fibras de aço numa rotunda	14
Fig. 7 – Curva típica de carga-deflexão de Betão Projetado reforçado com fibras de aço usada para determinar as classes de absorção de energia	15
Fig. 8 – Recomendação da escolha das fibras de aço. A: fio estirado; B: folha cortada; C: outro tipo de fibra / 1: Baixo teor de carbono; 2: Alto teor de carbono; 3: Inoxidável	17
Fig. 9 – Número de golpes nos provetes de betão com vista a analisar a influência das fibras de aço relativamente ao impacto	18
Fig. 10 – Ponte das fibras de aço sobre a fenda	19
Fig. 11 – Gráfico representativo das relações da abertura de fendas do BRFA com comportamento de extensão suave	20
Fig. 12 – Efeito da dosagem das fibras de aço na largura de fendas do BRFA.....	21
Fig. 13 – Efeito da relação l/d das fibras de aço na largura de fendas do BRFA.....	21
Fig. 14 – Efeito do comprimento das fibras de aço na largura de fendas do BRFA.....	22
Fig. 15 – Efeito da ancoragem das fibras de aço na largura de fendas do BRFA.....	22
Fig. 16 – Efeito da qualidade do betão na largura de fendas do BRFA	23
Fig. 17 – Efeito da resistência das fibras de aço na largura de fendas do BRFA	23
Fig. 18 – Comportamento em fluência de fibras macro-sintéticas e de aço, resultados e configuração de ensaio	24
Fig. 19 – Comparação entre fibras metálicas (SF) e macro fibras sintéticas (MS), relativamente ao desenvolvimento da abertura de fenda com acréscimo de temperatura de 10°C após 15 dias	25
Fig. 20 – Carga máxima e absorção de energia – Painéis EFNARC, em que cada barra equivale à média de um mínimo de 3 placas.....	26
Fig. 21 – Exemplo da aplicação de fibras de aço em lajes de fundação	29
Fig. 22 – Aplicação de isolante térmico em lajes de fundação com fibras de aço	29
Fig. 23 – Solução tradicional de reforço de lajes de fundação	31
Fig. 24 – Solução de reforço com fibras de aço Dramix em lajes de fundação.....	31
Fig. 25 – Pormenores a considerar no Thames Water Lee Tunnel	33
Fig. 26 – Construção do Thames Water Lee Tunnel	34
Fig. 27 – Construção do Thames Water Lee Tunnel	35

Fig. 28 – Diagramas Carga-Deflexão dos prismas ensaiados da Composição 2 (<i>fibras</i> = 39,3 kg/m ³).....	43
Fig. 29 – Diagramas Carga-Deflexão dos prismas ensaiados da Composição 3 (<i>fibras</i> = 19,6 kg/m ³).....	43
Fig. 30 – Diagramas Carga-Deflexão dos prismas ensaiados da Composição 4 (<i>fibras</i> = 58,9 kg/m ³).....	44
Fig. 31 – Gráficos dos valores médios, por composição, das Resistências Residuais à Tração por Flexão.....	44
Fig. 32 – Representação esquemática da validade dos ensaios para a obtenção da Resistência à Tração Direta.....	45
Fig. 33 – Descrição geral das vigas ensaiadas [dimensões em mm].....	47
Fig. 34 – Exemplo de viga a ser produzida.....	48
Fig. 35 – Esquema de ensaio [dimensões em mm].....	50
Fig. 36 – Exemplo de viga pronta a ensaiar.....	50
Fig. 37 – Parâmetros a avaliar durante o ensaio de flexão das vigas.....	51
Fig. 38 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	52
Fig. 39 – Forma de rotura da viga 1.....	53
Fig. 40 – Forma de rotura da viga 2.....	53
Fig. 41 – Forma de rotura da viga 3.....	54
Fig. 42 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	57
Fig. 43 – Forma de rotura da viga 4.....	58
Fig. 44 – Forma de rotura da viga 5.....	58
Fig. 45 – Forma de rotura da viga 6.....	59
Fig. 46 – Comparação dos diagramas Momento-y1 das vigas 2 e 4.....	62
Fig. 47 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com 19,6 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	64
Fig. 48 – Forma de rotura da viga 10.....	65
Fig. 49 – Forma de rotura da viga 11.....	65
Fig. 50 – Forma de rotura da viga 12.....	66
Fig. 51 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	67
Fig. 52 – Forma de rotura da viga 7.....	68
Fig. 53 – Forma de rotura da viga 8.....	68
Fig. 54 – Forma de rotura da viga 9.....	69
Fig. 55 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	70

Fig. 56 – Forma de rotura da viga 13.....	71
Fig. 57 – Forma de rotura da viga 14.....	71
Fig. 58 – Forma de rotura da viga 15.....	72
Fig. 59 – Comparação dos diagramas Momento-y1 das vigas 10,7 e 13.....	75
Fig. 60 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e sem varões de aço.....	76
Fig. 61 – Forma de rotura da viga 16.....	77
Fig. 62 – Forma de rotura da viga 17.....	77
Fig. 63 – Forma de rotura da viga 18.....	78
Fig. 64 – Diagrama Carga-Deflexão a meio vão, usado para obter a resistência à tração residual por flexão	82
Fig. 65 – Diagrama tensão-extensão para a contribuição das fibras.....	83
Fig. 66 – Fator de escala k_h	84
Fig. 67 – Distribuição das tensões e extensões.....	85
Fig. 68 – Relação tensões-extensões para o BRFA com armadura ordinária	86
Fig. 69 – Distribuição tensões-extensões para as vigas sem armadura ordinária	87

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Características de fibras e matrizes cimentícias	6
Quadro 2 – Classificação do método de fabrico das fibras de aço.....	7
Quadro 3 – Influência do comprimento e diâmetro das fibras no desempenho do betão	8
Quadro 4 – Relação indicativa entre a geometria e o desempenho das fibras (fibras em forma de gancho, comprimento admitido = comprimento da fibra + 2 mm).....	9
Quadro 5 – Importância da prevenção da rotura das fibras	10
Quadro 6 – Relação entre a resistência à tração dos fios de aço com a mudança de rotura dúctil para rotura frágil.....	11
Quadro 7 – Aplicações de BRFA	27
Quadro 8 – Cargas admissíveis permitidas com o reforço das fibras de aço Dramix em lajes de fundação em estruturas de madeira	30
Quadro 9 – Cargas admissíveis permitidas com o reforço das fibras de aço Dramix em lajes de fundação em estruturas com parede de alvenaria.....	30
Quadro 10 – Representação do custo (%) da solução de reforço tradicional em lajes de fundação.....	31
Quadro 11 – Representação do custo (%) da solução de reforço com fibras de aço Dramix em lajes de fundação	32
Quadro 12 – Composição do betão base	38
Quadro 13 – Referência das diferentes composições de BRFA	38
Quadro 14 – Definição das diferentes séries de vigas	39
Quadro 15 – Resistência à compressão do betão das diferentes composições, segundo a NP EN 12390-3	40
Quadro 16 – Resultados da resistência à compressão dos cubos das várias composições, segundo a NP EN 12390-3	40
Quadro 17 – Módulo de Elasticidade, segundo a DIN 1048-5.....	41
Quadro 18 – Características dos prismas ensaiados de acordo com a EN 14651	41
Quadro 19 – Resultados obtidos no ensaio de acordo com a EN 14651	42
Quadro 20 – Valores médios, por composição, das Resistências Residuais à Tração por Flexão	44
Quadro 21 – Resistência à Tração Direta, segundo a RILEM CPC7	45
Quadro 22 – Resistência à Tração por Flexão, segundo a NP EN 12390-5	46
Quadro 23 – Tensão de cedência e tensão de rotura dos varões de aço com diâmetro 6 mm, segundo a ISO 6892-1	46
Quadro 24 – Tensão de cedência e tensão de rotura dos varões de aço com diâmetro 8 mm, , segundo a ISO 6892-1	47
Quadro 25 – Totalidade das vigas ensaiadas e sua caracterização	49

Quadro 26 – Características da secção transversal das vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro	51
Quadro 27 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da rotura, para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro	52
Quadro 28 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro, e respetivo valor obtido através dos ensaios dos prismas	54
Quadro 29 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras e respetiva Força de Cedência das armaduras, para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro	55
Quadro 30 – Comparação entre a Força de Cedência das armaduras calculada a partir do ensaio e o respetivo valor obtido diretamente do ensaio, para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	55
Quadro 31 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras , para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	55
Quadro 32 – Características da seção transversal, para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	56
Quadro 33 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	57
Quadro 34 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão, para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro, e respetivo valor obtido através dos ensaios dos prismas	59
Quadro 35 – Cálculo do Momento de Rotura, para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	59
Quadro 36 – Cálculo da média das tensões máximas de tração no betão no instante de fendilhação, para as vigas com varões de aço de 8 mm de diâmetro.....	60
Quadro 37 – Cálculo da média do Momento de Cedência das armaduras, a partir dos ensaios, para as vigas com varões de aço de 8 mm de diâmetro	61
Quadro 38 – Resumo dos valores dos Momentos das vigas 2 e 4	62
Quadro 39 – Referências (das vigas e composições) e dimensões reais das vigas, para as vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro	63
Quadro 40 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com 19,6 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	64
Quadro 41 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com 19,6 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro, e respetivo valor obtido através dos ensaios dos prismas	66
Quadro 42 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras para as vigas com 19,6 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro	66
Quadro 43 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	67

Quadro 44 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro, e respetivo valor obtido através dos ensaios dos prismas	69
Quadro 45 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras para as vigas com 39,3 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro	69
Quadro 46 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1 ^a fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	70
Quadro 47 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro	72
Quadro 48 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras para as vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro	72
Quadro 49 – Cálculo da média das tensões máximas de tração no betão no instante de fendilhação para as vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	73
Quadro 50 – Benefício do aumento da dosagem de fibras nas tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção das vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro	73
Quadro 51 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras a partir dos ensaios e benefício do aumento da dosagem de fibras sobre o mesmo, para as vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro.....	74
Quadro 52 – Resumo dos valores dos Momentos das vigas 10, 7 e 13	75
Quadro 53 – Benefício das fibras nos valores dos Momentos de Fendilhação, de Cedência das armaduras e Residual [%]	75
Quadro 54 – Características da seção transversal das vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e sem armadura ordinária	76
Quadro 55 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1 ^a fenda e da fendilhação, para as vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e sem armadura ordinária	77
Quadro 56 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com 58,9 kg/m ³ de fibras e sem armadura ordinária	78
Quadro 57 – Valores do Coeficiente β	90
Quadro 58 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 8 mm e sem fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	91
Quadro 59 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 8 mm e com 39,3 kg/m ³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	92
Quadro 60 – Benefício da inclusão de fibras no Momento de Cedência das armaduras e Residual e na Resistência ao Corte, nas vigas com varões de diâmetro 8 mm, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	92
Quadro 61– Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e com 19,6 kg/m ³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	92

Quadro 62 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e com 39,3 kg/m ³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	93
Quadro 63 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e com 58,9 kg/m ³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	93
Quadro 64 – Valores médios dos Momentos de Cedência das armaduras e Residual e da Resistência ao Corte, das vigas com varões de diâmetro 6 mm, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	93
Quadro 65 – Benefício do aumento da dosagem de fibras no Momento de Cedência das armaduras e Residual e na Resistência ao Corte, nas vigas com varões de diâmetro 6 mm, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003).....	94
Quadro 66 – Momentos de Fendilhação e Residual, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e sem armadura ordinária, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	94
Quadro 67 – Comparação entre os valores dos Momentos de Fendilhação obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003), das vigas constituídas exclusivamente por fibras.....	97
Quadro 68 – Comparação entre os valores médios dos Momentos de Fendilhação, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003), das 3 vigas da série constituída exclusivamente por fibras	97
Quadro 69 – Comparação entre os valores dos Momentos de Cedência das armaduras para cada viga, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	98
Quadro 70 – Comparação entre os valores médios dos Momentos de Cedência das armaduras das 3 vigas de cada série, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003).....	98
Quadro 71 – Comparação entre os valores dos Momentos Residuais para cada viga, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003).....	99
Quadro 72 – Comparação entre os valores médios dos Momentos Residuais das 3 vigas de cada série, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)	100

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Romanas Maiúsculas:

A – Área bruta da seção do betão

$A_{c,ef}$ – Área efetiva de betão

A_{ct} – Área da zona de tração da seção transversal do betão

A_p – Área do reforço ativo

A_s – Área de aço

A_{sw} – Área do reforço ao corte

E_c – Módulo de Elasticidade do betão

E_{cm} – Valor médio do Módulo de Elasticidade do betão

E_s - Módulo de Elasticidade do aço

F_{cr} – Força de Fendilhação

$F_{fc,t}$ – Tensão de tração residual resultante das fibras

F_{ry} – Força de Cedência das armaduras

F_{ru} – Força Residual

L – Vão do provete

L – Comprimento da fibra de aço

M_{cr} – Momento de Fendilhação

M_{ry} – Momento de Cedência das armaduras

M_{ru} – Momento Residual

V_{cd} – Resistência ao Corte para elementos sem reforço ao corte

V_{cu} – Resistência ao Corte para elementos sem reforço ao corte

V_d – Resistência ao Corte máxima

V_{fd} – Contribuição das fibras para a resistência ao corte

V_{fu} – Contribuição das fibras para a resistência ao corte

V_{Rd} – Resistência ao Corte

$V_{Rd,c}$ – Contribuição do betão para a resistência ao corte

$V_{Rd,f}$ – Contribuição das fibras para a resistência ao corte

$V_{Rd,s}$ – Contribuição do reforço ao corte para a resistência ao corte

$V_{Rd,Fmin}$ – Valor mínimo para a resistência ao corte

V_{su} – Contribuição do reforço transversal para a resistência ao corte

V_{wd} – Contribuição dos estribos ou dos varões inclinados para o reforço ao corte

W_1 – Módulo de Flexão

W_b – Módulo de Flexão

Letras romanas minúsculas:

b – Largura da viga

b_f – Largura das flanges

c – Recobrimento do beão

d – Altura útil

$f_{ck,cub}$ – Resistência do Cubo

$f_{ck,cyl}$ – Resistência do Cilindro

f_{cm} – Resistência à compressão média do betão

f_{ctm} – Resistência à tração média do betão

f_{fcm} – Resistência à compressão média do betão

$f_{ct,d}$ – Resistência à tração de cálculo

$f_{fctm,fl}$ – Resistência à tração residual média

$f_{R,1}$ – Resistência residual à flexão para deformação de 0,46 mm

$f_{R,4}$ – Resistência residual à flexão para deformação de 3,00 mm

f_{su} – Tensão última do aço

f_{sy} – Tensão de cedência do aço

f_{ywd} – Tensão de cedência do reforço ao corte

h – Altura da viga

h_f – Altura das flanges

h_{sp} – Distância entre a seção de corte e o topo do provete

k – Fator escala

k – Coeficiente que toma em conta as tensões auto-equilibrantes não uniformes que levam à diminuição da força de fendilhação

k_1 – Coeficiente que toma em conta as propriedades de aderência dos varões de aço

k_2 – Coeficiente que toma em conta a distribuição das extensões

k_c – Coeficiente que toma em conta a distribuição de tensões na seção transversal imediatamente antes da fendilhação e a variação do braço interno

k_f – Coeficiente que toma em conta a contribuição das flanges na seção em T

k_h – Fator escala

k_v – Fator escala

l – Vão do provete

l_f – Comprimento da fibra

l_s – Comprimento do vão livre
 $l_{s,max}$ – Comprimento acima do qual ocorre o escorregamento entre o betão e o aço
 l_t – Comprimento do vão
 s – Espaçamento entre o reforço ao corte
 s_m – Distância média entre fendas
 s_{rm} – Espaçamento de fendilhação médio
 w_d – Valor de cálculo da largura de fenda
 w_u – Valor máximo da largura de fenda permitido
 x – Altura do bloco de tensões de compressão
 x_T – Centro de gravidade das fibras a partir do eixo neutro
 x_{tot} – Centro de gravidade das fibras visto desde o topo da zona de tração dado como uma percentagem da distância
 x_u – Altura do bloco de tensões de compressão em Estado Limite Último
 x_y – Distância desde o topo da viga até ao eixo neutro
 y – Distância entre o eixo neutro e o lado de tração da seção transversal
 z – Braço interno
 z_f – Braço para a zona de tração

Letras gregas:

α – Ângulo do reforço ao corte
 α – Relação modular
 α_e – Relação modular
 β – Coeficiente empírico para avaliar a extensão média ao longo de $l_{s,max}$
 β – Distância desde o topo da viga até ao centro da zona de compressão do betão
 β_1 – Coeficiente que toma em conta as propriedades de aderência dos varões de aço
 β_2 – Coeficiente que toma em conta a duração da carga
 γ_c – Fator parcial de segurança do betão
 ϵ_{c2} – Extensão no betão quando os varões de aço alcançam a cedência
 ϵ_{cm} – Extensão média no betão ao longo de $l_{s,max}$
 ϵ_{cs} – Extensão no betão devida à retração
 ϵ_{cu} – Extensão última no betão
 $\epsilon_{fc,max}$ – Extensão de compressão no betão
 $\epsilon_{fc,t}$ – Extensão de tração
 ϵ_r – Extensão na fendilhação

ε_{sm} – Extensão média do aço ao longo de $l_{s,max}$
 ε_{sy} – Extensão de cedência dos varões de aço
 ξ – Fator escala
 η – Coeficiente que define a resistência efetiva
 η_r – Coeficiente que toma em conta os efeitos de longa duração
 λ – Coeficiente que reduz a altura da zona de compressão
 ρ_1 – Relação entre aço e betão
 $\rho_{s,ef}$ – Relação efetiva entre aço e betão
 ρ_s – Relação entre aço e betão
 σ_1 – Tensão principal de tração
 σ_{cp} – Tensão média que atua na seção transversal do betão para um esforço axial
 σ_{cd} – Contribuição do esforço axial de compressão e do pré-esforço
 σ_s – Tensão do aço numa fenda
 σ_{sr} – Tensão máxima do aço numa fenda no estágio de formação da fenda
 τ_{bm} – Resistência de aderência média entre os varões de aço e o betão
 τ_{fd} – Valor de cálculo do aumento da resistência ao corte devido às fibras de aço
 φ – Diâmetro das fibras de aço
 φ_b – Diâmetro dos varões de aço
 φ_s – Diâmetro dos varões de aço

Abreviaturas:

BRF – Betão Reforçado com Fibras

BRFA – Betão Reforçado com Fibras de Aço

EHE – Código espanhol para betão estrutural

FIB – Federação Internacional para betão estrutural

RILEM – União internacional de laboratórios e peritos em materiais de construção, sistemas e estruturas

1

INTRODUÇÃO

1.1. TEMÁTICA

O betão é um material versátil na construção de estruturas, com largo emprego, pois pode moldar-se em qualquer forma ou geometria e é economicamente mais vantajosa a sua utilização em relação a outros materiais. A utilização do betão tem, por isso, tido grandes progressos nos últimos anos.

O betão é um material que pode apresentar grande resistência à compressão mas fraca resistência à tração. A baixa resistência à tração implica a utilização de armaduras de varões de aço. Em casos particulares (por exemplo, em estruturas delgadas e de geometria complexa) as armaduras ordinárias podem ser substituídas pelas fibras de aço.

Existem no mercado fibras muito diversas de materiais e formas muito diferentes (aço, polipropileno, carbono, etc..) e também com desempenhos muito diferentes.

A adição de fibras ao betão permite melhorar os aspetos em que este não tem um bom desempenho, como é o caso da resistência à tração e o comportamento relativamente à fendilhação e à ductilidade.

A utilização de fibras já é efetuada desde longa data. A palha adicionada ao barro usado para fazer tijolos e as crinas de cavalo nas argamassas feitas pelos romanos são duas provas da utilização ancestral das fibras.

A construção de adobe é igualmente outra prova da utilização ancestral das fibras, que contudo chegou aos dias de hoje.

Vários estudos apontam que as fibras adicionadas ao betão datam do fim do século XIX/início do século XX, sendo que grande evolução se deu após a I Guerra Mundial, pois era extremamente vantajoso um material que absorvesse os impactos das explosões com baixa destruição do mesmo.

A partir dos anos 60 que se tem investigado fortemente os Betões Reforçados com Fibras (BRF).

As fibras são pequenos materiais descontínuos, dispersos aleatoriamente no betão.

O betão simples (betão sem fibras) é passível de colapso através de uma só fenda. O Betão Reforçado com Fibras, dependendo do tipo de fibra, mantém a capacidade de carga pós-fissuração.

O reforço dos pilares com fibras é particularmente importante no caso da resistência às ações horizontais (por exemplo, os sismos), sendo provavelmente mais eficaz e económico do que as técnicas tradicionais.

A substituição da armadura ordinária por fibras pode ser efetuada parcial ou integralmente.

As fibras de aço são, hoje em dia, as mais utilizadas devido às grandes vantagens que apresentam.

O comportamento dos Betões Reforçados com Fibras de Aço (BRFA), dependendo do tipo de fibra, depende de:

- elementos constituintes da matriz;
- propriedades mecânicas das fibras;
- propriedades geométricas das fibras: esbelteza (razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra), dosagem de fibras por m^3 de betão e composição do betão;
- processo de fabrico destes compósitos.

A adição de fibras permite melhorar as capacidades de:

- absorção de energia;
- ductilidade;
- comportamento sob fendilhação;
- resistência às ações dinâmicas e estáticas.

Nos BRFA é imprescindível garantir a aderência das fibras ao betão.

Esta dissertação tem por objetivo a verificação experimental do comportamento em flexão do betão reforçado:

- apenas com armadura convencional;
- apenas com fibras de aço;
- com armadura convencional e fibras de aço.

Para os ensaios utilizaram-se vigas de betão, com seção retangular com a largura de 15,0 cm, a altura de 22,5 cm e o comprimento de 200 cm.

1.2. OBJETIVO E ESTRATÉGIA

Esta dissertação tem como principal objetivo comparar os resultados obtidos experimentalmente no estado limite último relativamente à capacidade de resistência à flexão com os resultados espectáveis pelas recomendações do RILEM TC 162-TDF (2003).

O estudo envolveu:

- moldagem de vigas de betão ($15,0 \times 22,5 \times 200 \text{ cm}^3$);
- moldagem de provetes de ensaio para caracterização do betão (cilindros para obtenção do módulo de elasticidade; cilindros para a obtenção da resistência à compressão; prismas para a obtenção da resistência residual à tração por flexão);
- ensaio dos provetes;
- ensaio de flexão de todas as vigas ($15,0 \times 22,5 \times 200 \text{ cm}^3$);
- cálculo da resistência à flexão segundo o RILEM TC-162-TDF (2003);
- cálculo da resistência à flexão a partir do ensaio;
- comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os espectáveis a partir do RILEM TC-162-TDF (2003).

As fibras que se utilizaram nesta dissertação foram as Dramix RC-80/60-BN da Bekaert.

1.3 ORGANIZAÇÃO

O presente trabalho está organizado em três partes principais.

A primeira parte é constituída pelo presente capítulo, no qual se faz uma breve apresentação dos Betões Reforçados com Fibras de Aço (BRFA), apresentando também o objetivo, a estratégia e a organização do trabalho.

A segunda parte é constituída pelo capítulo respeitante a aspetos teóricos sobre o Betão Reforçado com Fibras de aço (BRFA), onde se apresenta também duas aplicações práticas já efetuadas (lajes de fundação e “Thames Water Lee Tunnel”).

A terceira parte é constituída pelos seguintes capítulos:

- Ensaio experimentais (Capítulo 3)
- RILEM TC 162-TDF (Capítulo 4)
- Comparação entre os resultados experimentais e do RILEM TC 162-TDF (2003) (Capítulo 5)
- Conclusões e desenvolvimentos futuros (Capítulo 6)

A segunda parte tem como principal intento expor os conhecimentos que existem atualmente do Betão Reforçado com Fibras (BRF) e apresentar dois exemplos práticos de utilização de fibras de aço já realizados. Assim, o Capítulo 2 procura expor a informação existente acerca das fibras de aço e o Capítulo 3 apresenta um caso de estudo.

A terceira parte inicia-se com os resultados experimentais obtidos no LEMC e de seguida faz uma descrição do método de dimensionamento utilizado (RILEM TC 162-TDF (2003)), comparando então os respetivos resultados. Apresenta ainda conclusões sobre toda a dissertação efetuada e futuros trabalhos e investigações que podem ser feitos para tentar otimizar o uso do BRF.

2

BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

2.1. INTRODUÇÃO

Tal como já foi referido, hoje em dia as fibras de aço são as mais utilizadas devido às grandes vantagens que apresentam.

Contudo, hoje em dia utilizam-se ainda outros tipos de fibras, nomeadamente as fibras de abesto, carbono, madeira, vidro, sintéticas (nylon, poliéster, polietileno e polipropileno) e vegetais. Apesar de as fibras de carbono e sintéticas apresentarem também algumas vantagens importantes, a sua utilização é limitada (aplicam-se apenas em certas situações específicas) pois as fibras de carbono têm uma fraca resistência ao corte e as fibras sintéticas têm um mau comportamento à fluência.

Neste capítulo é efetuada uma abordagem teórica ao tipo de fibras em que recai a ênfase desta dissertação: as fibras de aço. É sobre este tipo de fibras que recai a atenção deste capítulo (teórico) e dos restantes capítulos (experimentais).

As fibras de aço são pequenos filamentos que se orientam aleatoriamente no betão. O desempenho das fibras é influenciado pelos seguintes fatores: forma geométrica, comprimento, diâmetro e resistência à tração [Vitt, 2011].

O Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA) é um compósito de matriz cimentícia, no qual são introduzidas fibras de aço discretas e dispersas aleatoriamente. Esta adição de fibras ao betão vai fazer com que ele seja um material pseudo-dúctil, isto é, vai continuar a apresentar resistência às cargas, mesmo após fissurado. Isto acontece pois as fibras aumentam consideravelmente a resistência residual do betão devido ao controlo das fissuras, implicando assim uma redistribuição dos esforços internos que ocorrem no betão armado, depois da rotura da matriz. Para tal, as fibras funcionam como “agrafos” entre as fissuras, transmitindo as tensões entre elas.

A substituição das armaduras convencionais ou de pré-esforço por fibras de aço pode ser total ou parcial.

É de salientar que o BRFA, sobretudo se associado com o Betão Auto Compactável (BAC), permite grandes vantagens na mecanização e industrialização de processos de construção, pois permite diminuir a quantidade de operários e melhorar a qualidade do produto final.

A eficiência de um BRFA depende fundamentalmente de:

- dosagem de fibras;
- propriedades (físicas e mecânicas) das fibras;
- características do betão;

- ligação entre a matriz cimentícia e as fibras.

É importante chamar-se a atenção que BRFA não é o mesmo que “Betão + Fibras de Aço”. É sim um material composto por um betão com composição apropriada, um tipo de fibras adequado e na dosagem necessária para cumprir os requisitos especificados.

Muitas vezes existe alguma dificuldade em conseguir-se uma boa ligação entre as fibras e a matriz, sendo que frequentemente esta aderência é afetada pelo tempo e pelo meio ambiente, que modificam a interface fibra-matriz.

O Quadro 1 apresenta algumas propriedades de fibras e matrizes:

Quadro 1 – Características de fibras e matrizes cimentícias. Fonte: Hannant, 1994

Matriz ou Fibra	Densidade	Espessura [µm]	Comp. [mm]	Módulo de Elastic. [GPa]	Resist. à Tração [MPa]	Extensão na rotura (%)	Volume no composto (%)
Argamassa	1.8-2	300-5000	-	10-30	1-10	0.01-0.05	85-97
Betão	1.8-2.4	10000-20000	-	20-40	1-4	0.01-0.02	97-99.5
Poliamidas	1.45	10-15	5- contínua	70-130	2900	2-4	1-5
Asbestos	2.55	0.02-30	5-40	164	200-1800	2-3	5-15
Carbono	1.16-1.95	7-18	3- contínua	30-390	600-2700	5-204	3-5
Celulose	1.5	20-120	0.3-5.0	10-50	300-1000	20	5-15
Vidro	2.7	12.5	10-50	70	600-2500	3.6	3-7
PAN	1.16	13-104	6	17-20	900-1000	8-11	2-10
Polpa	0.91-0.97	1-20	1	-	-	-	3-7
HDPE	0.96	900	3-5	5	200	-	2-4
Alto módulo	0.96	20-50	contínua	10-30	>400	>4	5-10
Monofilamento	0.91	20-100	5-20	4	-	-	0.1-0.2
Chopped film	0.91	20-100	5-20	5	300-500	10	0.01-1.0
Rede contínua PVC	0.91-0.93	20-100	contínua	5-15	300-500	10	5-10
Aço	7.86	100-600	10-60	200	700-20000	03-Mai	0.5-2

Da análise do Quadro 1, pode retirar-se a seguinte conclusão [Teixeira, Martins, 2003]:

em geral, as extensões na rotura das fibras são bastantes maiores do que a da matriz. Uma vez que a fendilhação da matriz ocorre muito tempo antes de se esgotar a resistência da fibra, fica óbvio a vantagem da utilização das fibras no comportamento com a matriz fraturada;

No entanto, deve ter-se algum cuidado na análise do Quadro 1, porque é necessário ter em atenção os seguintes aspetos:

- comportamento das fibras ao corte (as fibras de carbono, por exemplo, são desvantajosas neste aspeto);
- comportamento das fibras à fluência (as fibras sintéticas, por exemplo, são desvantajosas neste aspeto);

- para as fibras serem eficazes, o módulo de elasticidade das mesmas tem que ser maior do que o módulo de elasticidade do betão.

Deve referir-se ainda que quanto maior for a tensão de rotura do betão, mais alta tem que ser a resistência à tração da fibra.

Deve notar-se também o elevado módulo de elasticidade das fibras de aço, sendo isto uma das suas vantagens.

No entanto, a utilização de fibras nos betões ainda precisa de ser muito bem estudada, pois está longe de ficar completamente caracterizada. Deve salientar-se que pode ter vantagem empregar mais do que um tipo de fibras em certas situações, derivado das propriedades concretas que cada um dos tipos de fibras.

2.2. FIBRAS

As fibras de aço podem variar nas seguintes 3 vertentes:

- modo de fabrico;
- fatores que influenciam o desempenho da fibra;
- resistência à tração.

2.2.1. MODO DE FABRICO

O Quadro 2 apresenta a classificação do método de fabrico das fibras de aço, de acordo com a NP EN 14889-1:

Quadro 2 – Classificação do método de fabrico das fibras de aço

Grupo	Método de Fabrico
I	Fio de aço estirado a frio
II	Chapa cortada
III	Fusão
IV	Fio de aço estirado a frio por aplainamento
V	Fresagem a partir de blocos

A maioria das fibras usadas pertence ao Grupo I, devido ao desempenho que proporcionam ao betão. As pertencentes aos Grupos II e IV também se utilizam consideravelmente. Já as fibras dos Grupos III e V não têm tanta importância, sendo por isso menos utilizadas. [Vitt, 2011]

As fibras que foram utilizadas nos ensaios experimentais pertencem ao Grupo I.

2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DA FIBRA

Apesar de a dosagem das fibras ser, como é evidente, fundamental no desempenho que elas podem proporcionar ao betão, comparar as fibras apenas relativamente à dosagem não conduzirá a conclusões corretas, pois o desempenho das fibras é influenciado por diversos fatores: forma, comprimento, diâmetro e tensão de rotura. [Vitt, 2011]

Em relação à forma, as fibras podem-se distinguir quanto à seção, ao corpo e às extremidades.

A seção pode ser circular, semicircular, retangular ou totalmente irregular. O corpo pode ser liso ou rugoso. As extremidades podem ser lisas ou com ancoragens de vários tipos.

A Figura 1 ilustra diversas formas de fibras encontradas frequentemente no mercado



Fig. 1 – Formas de fibras encontradas frequentemente no mercado

Para o mesmo tipo de ancoragem, o comprimento e o diâmetro determinam o desempenho da fibra.

A esbelteza (comprimento/diâmetro) das fibras de aço dá uma boa ideia do desempenho, conforme se pode ver pela análise dos Quadros 3 e 4.

Valores típicos dos comprimentos das fibras de aço situam-se entre 30 mm a 60 mm, enquanto que os diâmetros das mesmas apresentam valores razoáveis no intervalo de 0,4 mm a 1,3 mm. Estes parâmetros são os que têm a maior influência no desempenho das fibras [Vitt, 2011].

Quadro 3 – Influência do comprimento e diâmetro das fibras no desempenho do betão

Parâmetro	Relação Parâmetro/Desempenho do Betão	Justificação
Comprimento	Maior comprimento => Melhor desempenho	Melhor ancoragem
Diâmetro	Diminuição do diâmetro => Melhor desempenho	Maior nº de fibras por kg

Por isso, a razão l/d (sendo “ l ” o comprimento e “ d ” o diâmetro das fibras) permite estimar o desempenho das fibras de aço. O Quadro 4 revela isso mesmo: [Vitt, 2011]

Quadro 4 – Relação indicativa entre a geometria e o desempenho das fibras (fibras em forma de gancho, comprimento admitido = comprimento da fibra + 2 mm). Fonte: Vitt, 2011

Tipo de Fibra	Comprimento l [mm]	Diâmetro d [mm]	Razão l/d [-]	Fibras [~pcs./kg]	Fio [m/kg]	Desempenho
50/1,3	50	1,30	38	1800	90	Mais baixo
RL-45/50-BN	50	1,05	45	2800	140	
ZC 610	60	1,05	60	2300	140	
RC-65/60-BN	60	0,90	65	3200	190	
RC-80/60-BN	60	0,75	80	4600	275	

Apesar da forma da curva de carga-deflexão do BRFA ser condicionada pelo tipo de ancoragem, uma relação l/d elevada é sempre preferível. [Vitt, 2011]

Estas fibras podem ainda apresentar-se isoladamente ou em bandas. Neste último caso, elas soltam-se com facilidade aquando da mistura no betão. A Figura 2 ilustra fibras de aço em banda:

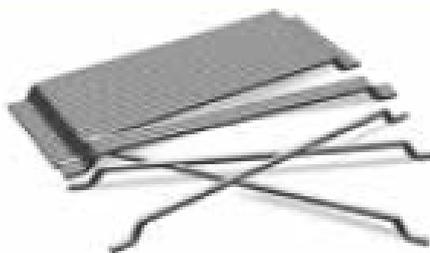


Fig. 2 - Fibras de aço em banda (tipo Dramix). Fonte: Vitt, 2011

As fibras apresentadas na Figura 2 são as Fibras Dramix.

As fibras usadas nos ensaios experimentais foram as Dramix-80/60-BN, que apresentam:

- Extremidades dobradas
- Agregadas por uma cola que desaparece ao longo da mistura na betoneira, ocasionando assim a dispersão da fibra no compósito, aquando da sua produção.

O comportamento das fibras vai depender claramente das suas características mecânicas e geométricas e do desenho do gancho.

Na Figura 3 pode-se visualizar a eficácia da inclusão do gancho que estas fibras apresentam:

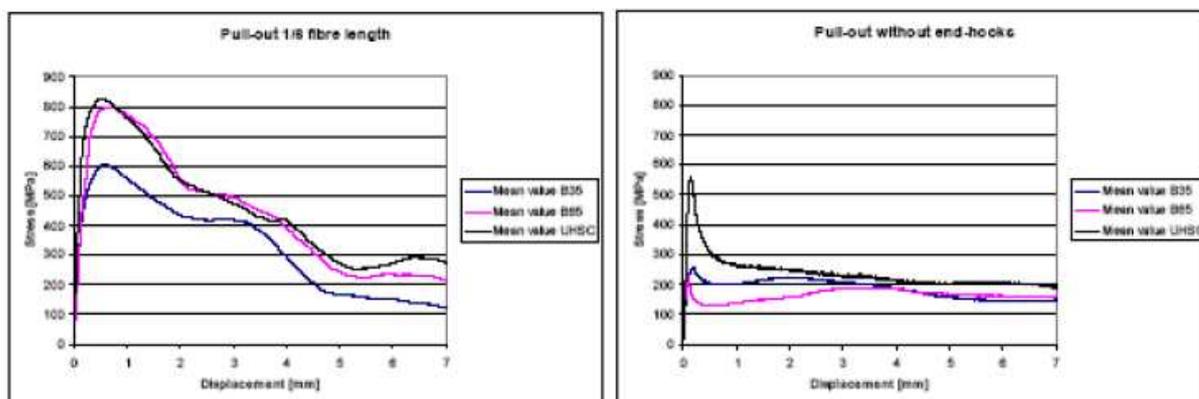


Fig. 3 - Comportamento ao arrancamento de uma fibra de aço com gancho (à esquerda) e sem gancho (à direita), respetivamente, para várias classes de resistência. Fonte: Ferreira, 2008

Com base nos ensaios de arrancamento efetuados por Ferreira em 2008, o comportamento de pós-fissuração depende também da classe da resistência do betão, já que esta implica um acréscimo do estado de tensão nas fibras. Isto é, a capacidade de amarração da fibra depende da aderência entre o betão e a fibra [Ferreira, 2008].

As metodologias de cálculo das peças de BRFA ainda não atendem ao desempenho típico de cada tipo de fibra de aço, apesar de se ter a noção que assumem influência no comportamento do betão.

2.2.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O próprio mecanismo dos BRFA induz a importância de escolher, face à resistência do betão, corretamente a resistência à tração das fibras de aço: necessidade de arrancamento lento das fibras da matriz cimentícia. O sistema de ancoragem (gancho nas pontas das fibras) deve apresentar deformação para evitar que a fibra parta, mantendo a fibra intacta e sem arrancar o betão.

O Quadro 5 indica a importância da prevenção da rotura das fibras [Vitt, 2011]:

Quadro 5 – Importância da prevenção da rotura das fibras		
Cuidado	Justificação	Para evitar:
Prevenção da rotura das fibras	Extensão de rotura do fio da fibra de aço ser relativamente baixa	Redução demasiado rápida da resistência pós-fendilhação  <ul style="list-style-type: none"> • Redução demasiado rápida da resistência • Redução demasiado rápida da ductilidade.

O Quadro 6 indica a relação entre a resistência à tração dos fios de aço com a mudança de rotura dúctil para rotura frágil [Vitt, 2011]:

Quadro 6 – Relação entre a resistência à tração dos fios de aço com a mudança de rotura dúctil para rotura frágil

Resistência à tração dos fios de aço	Mudança de rotura dúctil para rotura frágil
1000 MPa- 1400 MPa (normal)	Resistência do betão aproximadamente de 50 ou 60 MPa
> 2500 MPa	Resistências do betão > 60 MPa

Deve relembrar-se que o desempenho das fibras depende notavelmente do tipo de ancoragem, sendo que as pontas em forma de gancho apresentam um ótimo comportamento não só no estado inicial mas também no estado final do arrancamento das fibras [Vitt, 2011]:

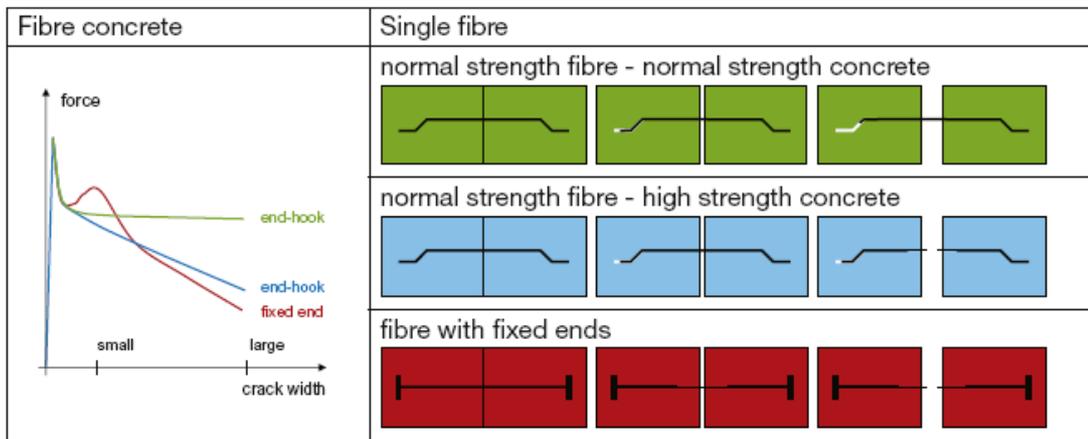


Fig. 4 – Efeito da resistência à tração das fibras e do tipo de ancoragem na largura de fendas. Fonte: Vitt, 2011

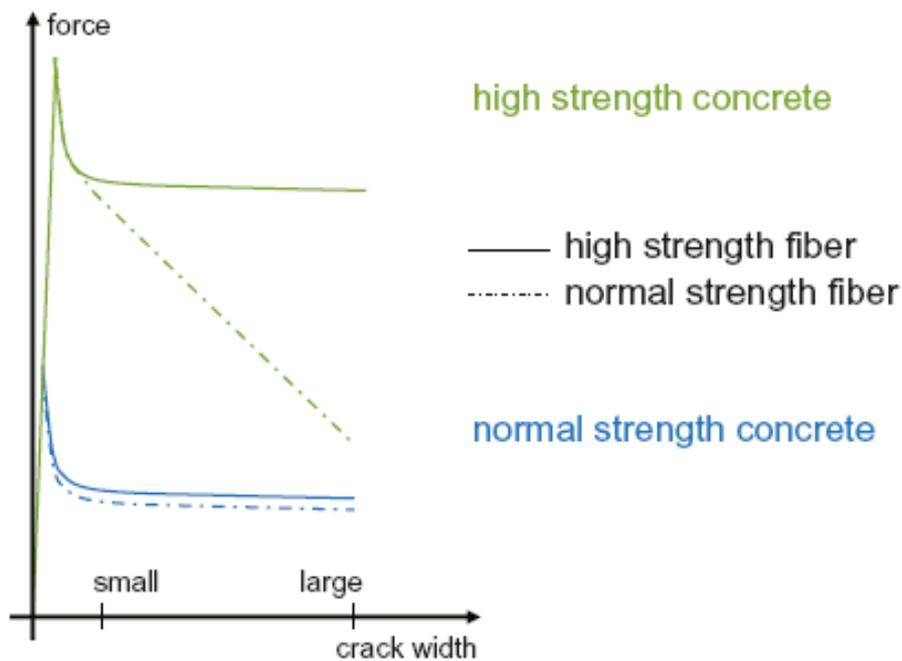


Fig. 5 – Efeito da resistência do betão e da resistência das fibras na largura de fendas. Fonte: Vitt, 2011

2.3. PROPRIEDADES DO BETÃO FRESCO COM FIBRAS

As propriedades do BRFA fresco dependem fundamentalmente de 4 fatores:

- Quantidade de fibras;
- Esbelteza de fibras;
- Geometria das fibras;
- Composição do betão.

2.4. PROPRIEDADES DO BETÃO COM FIBRAS ENDURECIDO

2.4.1. SOB A AÇÃO DE UMA CARGA ESTÁTICA

Em relação ao betão endurecido, as suas propriedades são condicionadas fundamentalmente por:

- Próprio betão;
- Orientação e dosagem de fibras;
- Tipo de fibra.

A função das fibras é conferir ductilidade ao betão, após o aparecimento da fendilhação. Este acréscimo de ductilidade é influenciado fundamentalmente pela aderência entre a fibra e a matriz, pela dosagem de fibras e pelo tipo de fibra.

2.4.2. DUCTILIDADE

Os BRFA permitem combinar a capacidade de carga com a capacidade de deformação.

2.4.3. COMPRESSÃO

Não se verifica grande influência da introdução das fibras em relação à compressão, tendo algumas experiências (Ozcan et al., 2009) apontado até para uma diminuição, não muito significativa, da resistência à compressão do betão com fibras comparativamente com o betão sem fibras.

O modo de fratura varia ligeiramente, pois quando é atingida a fendilhação do betão observa-se maior deformação sob uma carga aproximadamente constante. É de salientar que a relação entre as tensões de rotura nos provetes cilíndricos e nos cubos de betão com fibras pode afastar-se significativamente das relações observadas no betão sem fibras.

2.4.4. FLEXÃO

A introdução de fibras no betão modifica a distribuição de tensões nas zonas sujeitas a momentos fletores.

Depois da fendilhação, o comportamento do BRFA é diferente do betão sem fibras devido ao aumento da ductilidade.

2.4.5. TRAÇÃO UNIAXIAL

O aumento do valor da resistência à tração é influenciado por três aspetos:

- dosagem de fibras misturadas no betão;
- quantidade de fibras que se encontram segundo a direção de tração;
- composição do betão.

2.4.6. CORTE

Os resultados relativamente ao acréscimo da tensão de corte (apenas corte puro) são influenciados por:

- técnica do ensaio;
- posicionamento das fibras na zona de rotura por corte;
- características das fibras;
- quantidade de fibras.

Nas vigas, a substituição de estribos por fibras apresenta algumas vantagens:

- distribuição das fissuras e abertura mais pequena das mesmas, devido à dispersão aleatória das fibras no betão, encontrando-se mais próximas entre si do que os estribos;
- possibilidade de aumento da resistência à tração do betão.

2.4.7. FADIGA

A resistência à fadiga é condicionada pela dosagem de fibras (quanto maior for a dosagem de fibras, maior é a resistência à fadiga) e, claro, pelas características geométricas e mecânicas das mesmas, já que estas influenciam o seu desempenho.

Como exemplos de sucessos da utilização das fibras de aço na melhoria deste parâmetro, pode referir-se o caso dos pisos de rotundas e de autoestradas. [Vitt, 2011]



Fig. 6 – Utilização das fibras de aço numa rotunda. Fonte: Vitt, 2011

2.4.8. FLUÊNCIA E RETRAÇÃO

Estes parâmetros não são influenciados consideravelmente para pequenas dosagens (< 1% em volume) de fibras de aço.

2.4.9. MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON

A mistura no betão de pequenas dosagens de fibras (inferiores a 2% em volume) não condiciona o Módulo de Elasticidade nem o Coeficiente de Poisson do betão.

2.4.10. ABSORÇÃO DE ENERGIA

A composição do betão, o tipo de fibras e a quantidade de fibras podem influenciar significativamente o comportamento do betão quando solicitado a cargas dinâmicas ou estáticas. Assim, as fibras fazem com que:

- no caso de carga dinâmica: o impacto origina fendas locais sem afetar o restante betão;
- no caso de carga estática crescendo gradualmente: após atingida a carga máxima, é mantida a integridade do betão mesmo fendilhado e com deformações apreciáveis (se não tivesse fibras, depois de atingida a carga máxima e a primeira fissura, o betão fragmentar-se-ia).

É de salientar que nos casos em que a absorção de energia assume um papel bastante importante (por exemplo, no caso do betão projetado no revestimento de túneis), a incorporação das fibras de aço apresenta grandes vantagens, devido ao aumento de ductilidade.

Hoje em dia, utiliza-se muito frequentemente o BRFA para construir, por exemplo, revestimentos de túneis, rodoviários, ferroviários e minas com betão projetado (no qual se utilizam as classes de absorção de energia, em que se utiliza a integração das curvas de carga-deflexão dos painéis de BRFA projectado para se obter a absorção de energia requerida). [Vitt, 2011]

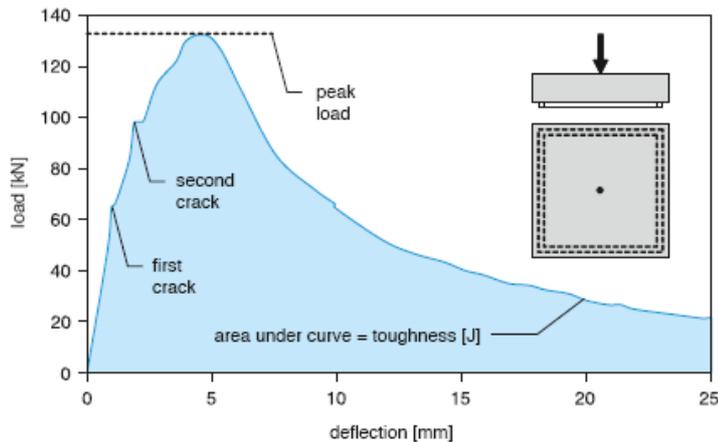


Fig. 7 – Curva típica de carga-deflexão de Betão Projetado reforçado com fibras de aço usada para determinar as classes de absorção de energia. Fonte: Vitt, 2011

2.4.11. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Apesar do betão não ser combustível, não se comporta satisfatoriamente na presença de fogo. A humidade no interior do betão tem de sair da matriz cimentícia sob a forma de vapor. O vapor não pode ser produzido mais rapidamente do que a sua saída, senão é bem provável a ocorrência de uma fragmentação explosiva. Mesmo no caso de a fragmentação ser superficial, pode expor as armaduras rapidamente e diretamente ao fogo (diminuindo assim a resistência à tração do aço com o aumento da temperatura), reduzindo-se a capacidade de carga da estrutura rapidamente, provocando eventualmente o colapso da estrutura.

As fibras de aço, nas dosagens geralmente utilizadas, não influenciam notavelmente a condutibilidade térmica do betão. No entanto, como elas são distribuídas por toda a seção, não estão concentradas apenas numa camada fina próxima da superfície, e, por isso, não se encontram todas na proximidade da fonte de calor, tornando insignificante o risco de perder a capacidade de carga de todas as fibras.

A duração da resistência ao fogo que pode ser alcançada com os BRFA pode ser prevista das seguintes formas:

- através da espessura que depende da temperatura e do tempo requerido da resistência ao fogo, designada “camada de rotura” (conceito introduzido por recomendações como, por exemplo, a CNR-DT 204/2006);
- através de ensaios de fogo.

Contudo, a deterioração térmica não pode ser reduzida significativamente com as fibras de aço, sendo estas apenas uma medida de aceleração da saída do vapor. Se se quiser reduzir notavelmente a deterioração térmica devido ao aumento da resistência ao fogo, uma boa hipótese será conjugar fibras de polipropileno com uma escolha adequada de agregados e composição de betão. [Vitt, 2011]

2.4.12. RESISTÊNCIA À ABRASÃO

No caso de a abrasão ser devida a detritos transportados por água que circula a baixa velocidade, a presença das fibras não influencia o comportamento do betão. No entanto, as fibras evitam a desintegração do betão se a água se mover a grande velocidade ou se estiver em causa o fenómeno da cativação.

2.4.13. DURABILIDADE

A durabilidade também é melhorada com o aumento da resistência à fendilhação, fadiga e impacto, sendo que as fibras de aço têm um papel importante nestes parâmetros. No entanto, como se trata de aço, tem de se levar em conta o aspeto da corrosão, sendo que as fibras de aço de fio estirado apresentam vários mecanismos de defesa contra a corrosão:

- não têm efeito na resistividade elétrica do betão em dosagem normal;
- o reforço é descontínuo;
- a superfície é densa e lisa;
- as dimensões são pequenas;
- o potencial eletro-químico é relativamente baixo;
- não há fragmentação do betão.

Devem-se distinguir dois casos:

- **Betão não fendilhado:** mesmo num ambiente marítimo, a corrosão não afeta tanto as fibras de aço de fio estirado como os varões de aço, sendo que apenas as fibras superficiais apresentarão corrosão. A corrosão é apenas um problema estético, uma vez que ela não penetra no interior do betão, não causando fragmentação;
- **Betão fendilhado:** neste caso, a corrosão depende da largura das fendas e do tipo de exposição. A carbonatação é menos prejudicial do que a água marítima, sendo que um ambiente húmido é muito mais gravoso do que uma atmosfera seca.

Por isso, no dimensionamento de estruturas assume-se que a durabilidade tem que respeitar uma das seguintes condições:

- a) Condições ambientais adequadas;
- b) Largura de fendas pequenas (sendo que o tipo de exposição e o tipo de fibra utilizado influenciam a máxima largura destas fendas).

Com os objetivos de respeitar a condição b) e proteger os varões de aço da corrosão (especialmente em ambientes gravosos), a introdução de fibras de aço é uma solução bem plausível. [Vitt, 2011]

Type of concrete	Type of fibre	Exposure classes																		
		No risk of corrosion or attack	Corrosion induced by carbonation					Corrosion induced by chlorides						Freeze/Thaw attack				Aggressive chemical environment		
								Other chlorides (different: from sea water)			Sea water									
			X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
C1	A3-B3-C3	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES		
	A1-B1-C1 ST	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-	YES	YES	YES	YES	YES	-		
	A1-B1-C1	YES	YES	YES	YES	-	YES	YES	-	YES	-	-	YES	YES	YES	-	-	-		
	A2-B2-C2 ST	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-	YES	YES	YES	YES	-	-		
	A2-B2-C2	YES	YES	YES	-	-	YES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
C2	A3-B3-C3	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-		
	A1-B1-C1 ST	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-		
	A1-B1-C1	YES	YES	YES	YES	-	YES	YES	-	YES	-	-	YES	-	-	-	-	-		
	A2-B2-C2 ST	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-	YES	YES	-	YES	-	-	-	-	-		
	A2-B2-C2	YES	YES	YES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
C3	A3-B3-C3	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-	YES	-	-	-	YES	-		
	A1-B1-C1 ST	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	A1-B1-C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	A2-B2-C2 ST	YES	YES	YES	YES	YES	YES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	A2-B2-C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Fig. 8 – Recomendação da escolha das fibras de aço. A: fio estirado; B: folha cortada; C: outro tipo de fibra / 1: Baixo teor de carbono; 2: Alto teor de carbono; 3: Inoxidável. Fonte: Vitt, 2011

2.4.14. FISSURAÇÃO RESULTANTE DA RETRAÇÃO

Como já foi referido, as fibras não condicionam a retração em si. No entanto, elas proporcionam uma maior dispersão da fissuração, causando mais fissuras mas reduzindo, conseqüentemente, a abertura das mesmas.

2.4.15. IMPACTO

As fibras de aço melhoram imenso a resistência a um impacto que pode ser causado, por exemplo, por balas, ondas de choque ou quedas de blocos.

Na Figura 9 estão apresentados os resultados obtidos de um ensaio, segundo ACI 544.2R-98. Pela análise da figura, constata-se que uma adoção correta do tipo de fibra é essencial para se obter um melhor desempenho no que respeita ao impacto. [Vitt, 2011]

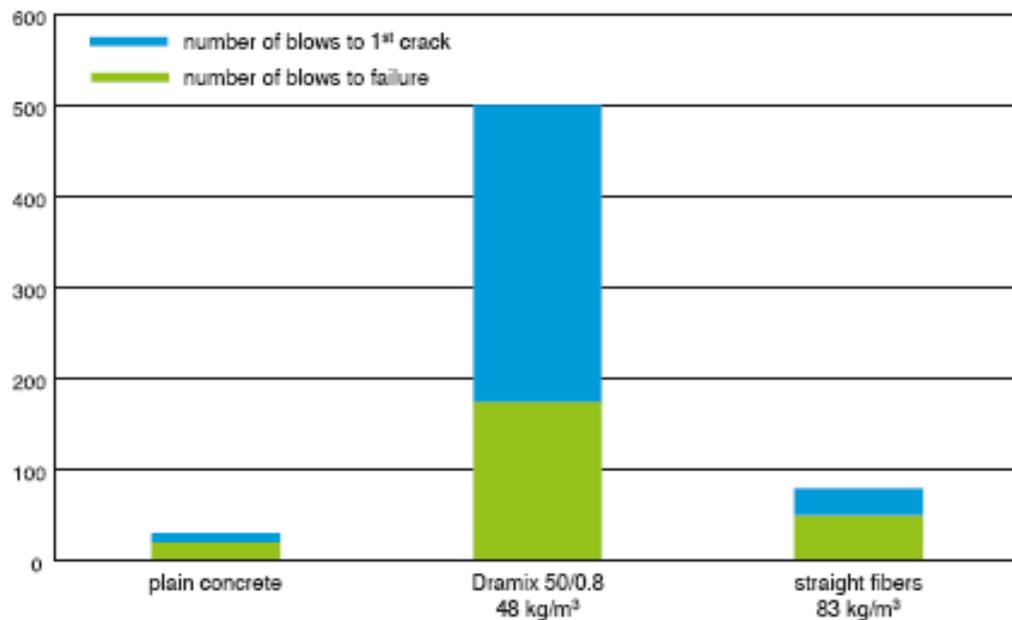


Fig. 9 – Número de impactos em provetes de betão com vista a analisar a influência das fibras de aço. Fonte: Vitt, 2011

As vantagens da adição de fibras de aço no que respeita ao impacto são [Vitt, 2011]:

- redução de fragmentação dos painéis;
- aumento da absorção de energia;
- aumento do número de impactos até à 1ª fenda;
- aumento do número de impactos até à rotura;

2.4.16. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Estes parâmetros não são influenciados pela introdução das fibras de aço, pois estas são descontínuas e a concentração crítica à qual uma rede tridimensional elétrica contínua é formada não pode ser alcançada com o BRFA. [Vitt, 2011]

2.5. INTERFACE FIBRA-MATRIZ

Uma maior área de contato entre a fibra e a matriz cimentícia pode ser conseguida através das seguintes formas [Ferreira, 2008]:

- Aumento da rugosidade da fibra;
- Torção da fibra ao longo do seu comprimento;
- Deformação da fibra de modo a alcançar amarração mecânica nas extremidades (zona de ancoragem);
- Deformação ao longo do comprimento, como por exemplo, indentação;
- Tratamento micromecânico da superfície (cauterização química, tratamento por plasma).

Um betão mais resistente melhora a adesão fibra-matriz e, por isso, aumenta a capacidade de carga das fibras (Ferreira, 2008).

É de referir também que o comprimento das fibras condiciona a interação fibra-matriz, pois, quanto mais compridas forem, maior é a área que contacta com o betão, melhorando por isso a aderência entre ambos. Um menor diâmetro implicará também uma melhor aderência, devido ao acréscimo da superfície específica.

2.6. FRATURA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

As fibras de aço permitem transferir tensões ao longo de uma seção fendilhada [Vitt, 2011].

A quantidade de fibras a fazer a ponte sobre uma fenda aumenta com [Vitt, 2011]:

- maior comprimento das fibras;
- maior número das fibras.

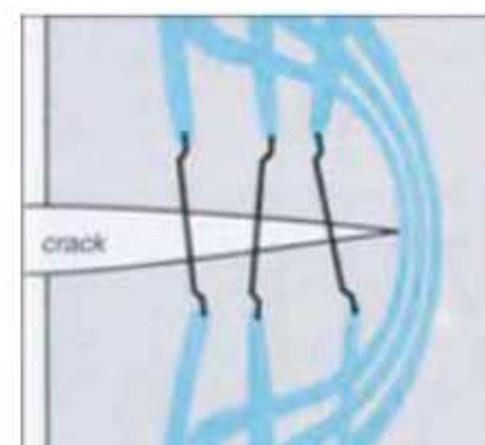


Fig. 10 – Ponte das fibras de aço sobre a fenda. Fonte: Vitt, 2011

2.7. COMPORTAMENTO DOS BRFA

Os BRFA, em geral, apresentam um comportamento aproximadamente similar ao representado na Figura 11:

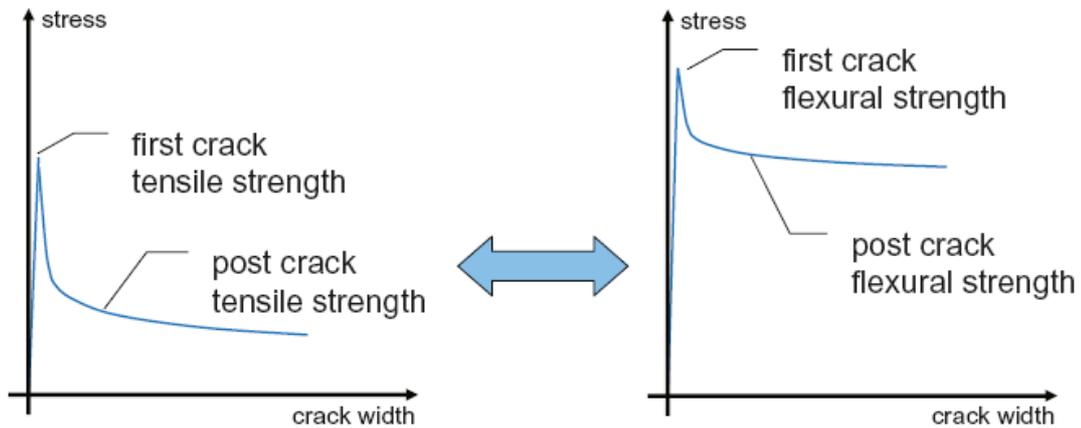


Fig. 11 – Gráfico representativo das relações da abertura de fendas do BRFA com comportamento de extensão suave. Fonte: Vitt, 2011

Os fatores de conversão (dependentes do comportamento tensão-extensão assumido do BRF e da maneira como o ensaio é realizado) permitem transformar a resistência à tração pós-fendilhação em resistência à flexão pós-fendilhação, e vice-versa.

Os seguintes fatores influenciam o nível e a forma da curva de resistência pós-fendilhação [Vitt, 2011]:

- classe da fibra;
- número de fibras numa fenda;
- tipo de ancoragem;
- comprimento da fibra;
- orientação da fibra;
- matriz e resistência do betão;
- resistência à tração da fibra vs resistência à tração do betão.

2.8. RELAÇÃO ENTRE ALGUNS PARÂMETROS DOS BRFA

As Figuras 12, 13, 14, 15, 16 e 17 evidenciam de forma clara a relação entre alguns parâmetros dos BRFA.

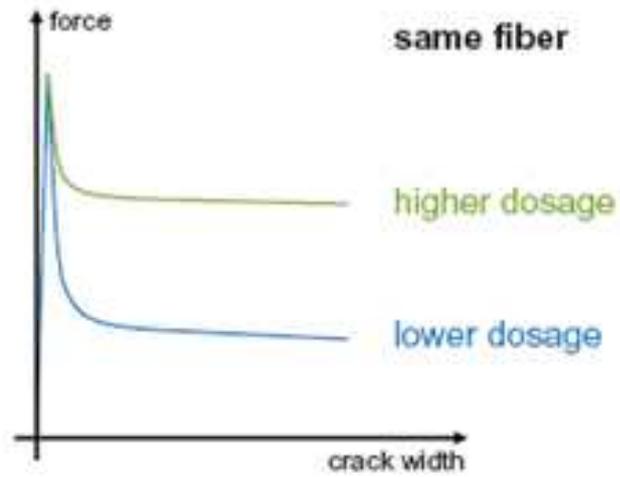


Fig. 12 – Efeito da dosagem das fibras de aço na largura de fendas do BRFA. Fonte: Vitt, 2011

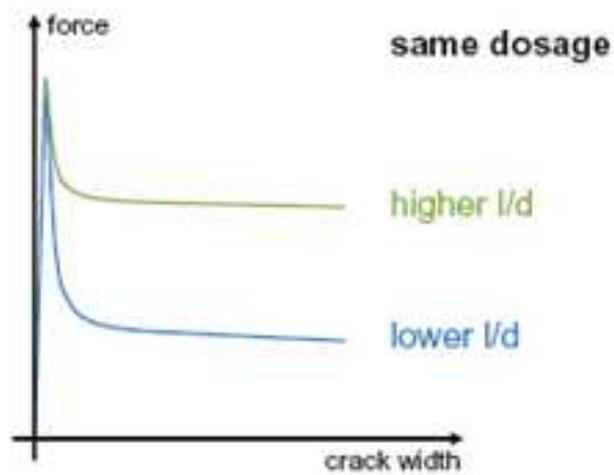


Fig. 13 – Efeito da relação l/d das fibras de aço na largura de fendas do BRFA. Fonte: Vitt, 2011

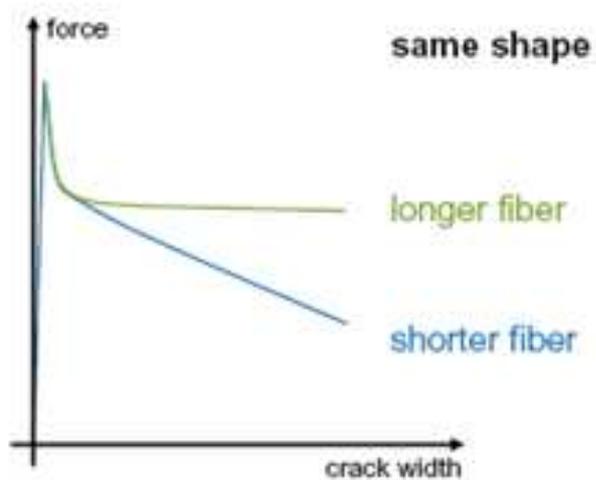


Fig. 14 – Efeito do comprimento das fibras de aço na largura de fendas do BRFA. Fonte: Vitt, 2011

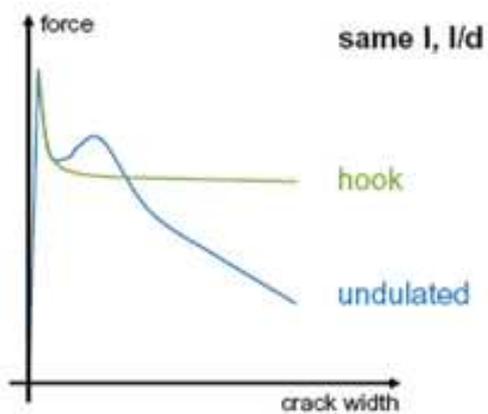


Fig. 15 – Efeito da ancoragem das fibras de aço na largura de fendas do BRFA. Fonte: Vitt, 2011

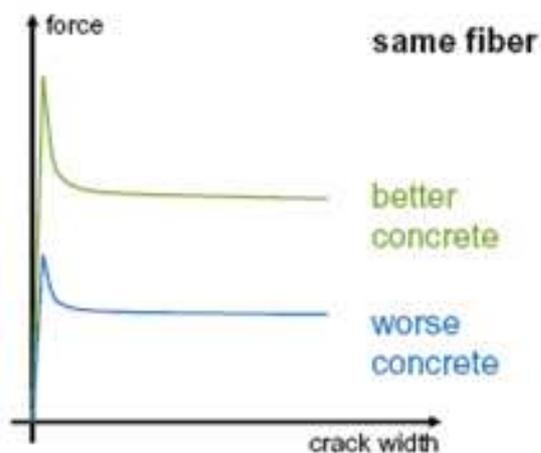


Fig. 16 – Efeito da qualidade do betão na largura de fendas do BRFA. Fonte: Vitt, 2011

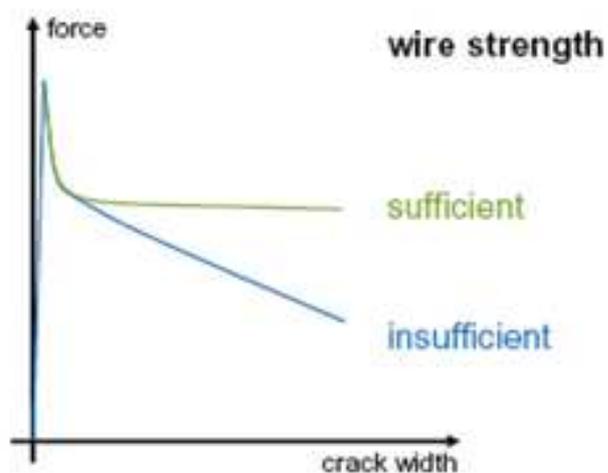


Fig. 17 – Efeito da resistência das fibras de aço na largura de fendas do BRFA. Fonte: Vitt, 2011

2.9. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BRFA

O comportamento de um BRFA deve ser analisado através de ensaios de flexão de prismas de acordo com a norma EN 14651.

2.10. VANTAGENS DAS FIBRAS EM RELAÇÃO À MALHASOL NOS TÚNEIS

As fibras apresentam as seguintes vantagens, em túneis, em relação à malhasol [Ferreira, 2008]:

- Distribuição por todo o betão, o que faz com que ele resista tensões de tração em qualquer zona (note-se que num túnel não é possível localizar as zonas onde se verificam os esforços de tração devido à sobre-escavação, superfície irregular e terreno deformado);
- Não apresentam dificuldade de posicionamento nem da sua permanência na zona pretendida após a projeção do betão (ao contrário da malhasol).

2.11. COMPARAÇÃO ENTRE FIBRAS DE AÇO E SINTÉTICAS

As fibras de aço, comparativamente com as fibras sintéticas, alcançam:

- Maiores deformações para os mesmos esforços de tração;
- Carga máxima maior;
- Menores deformações por fluência;
- Menor abertura de fendas com o aumento da temperatura.

O aspeto referido em c) pode ser observado na Figura 18:

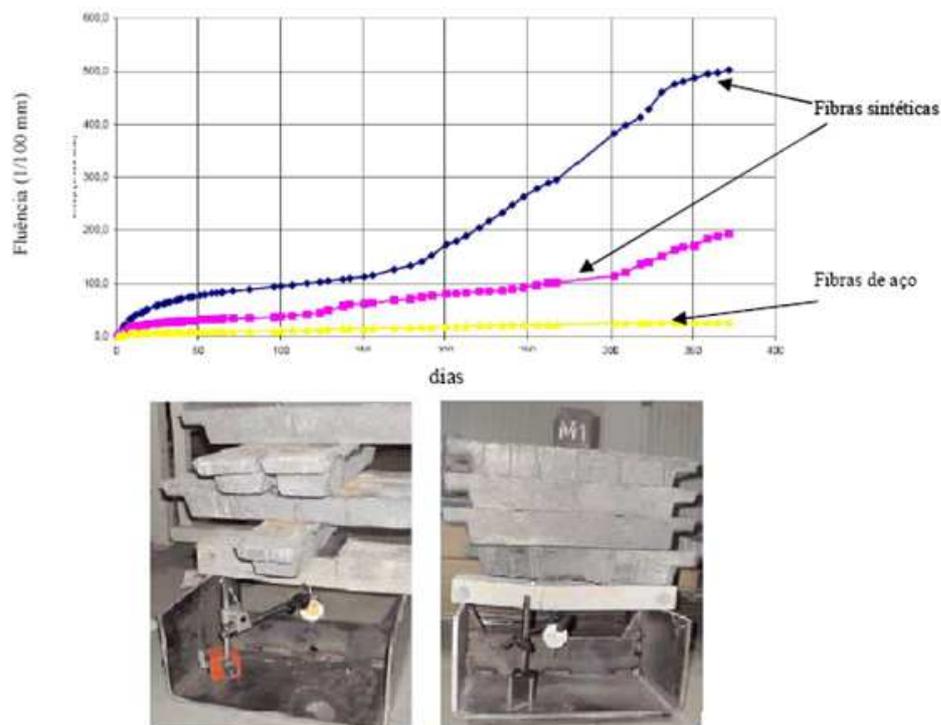


Fig. 18 – Comportamento em fluência de fibras macro-sintéticas e de aço, resultados e configuração de ensaio.

Fonte: Ferreira, 2008

O mau comportamento à fluência das fibras sintéticas comparativamente com as fibras de aço, sugere que só sejam utilizadas em pavimentos.

O aspeto referido em d) pode ser comprovado pelas experiências de Burati: [Ferreira, 2008]

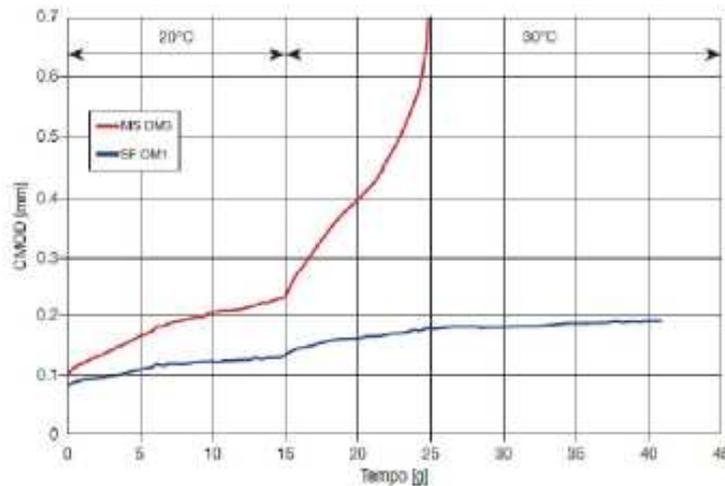


Fig. 19 – Comparação entre fibras metálicas SF (representadas com a linha azul) e macro fibras sintéticas MS (representadas com a linha vermelha), relativamente ao desenvolvimento da abertura de fenda com acréscimo de temperatura de 10°C após 15 dias. Fonte: Ferreira, 2008

Deve-se salientar que, no gráfico da Figura 19, a unidade do tempo é dias. Como se verifica, para o mesmo acréscimo de temperatura, a abertura de fenda aumenta consideravelmente com as fibras macrossintéticas.

O gráfico da Figura 20 representa uma comparação entre as fibras de aço mais utilizadas no mercado (Dramix) e diversas fibras sintéticas de polipropileno, no que respeita às cargas máximas atingidas e capacidade de absorção de energia.

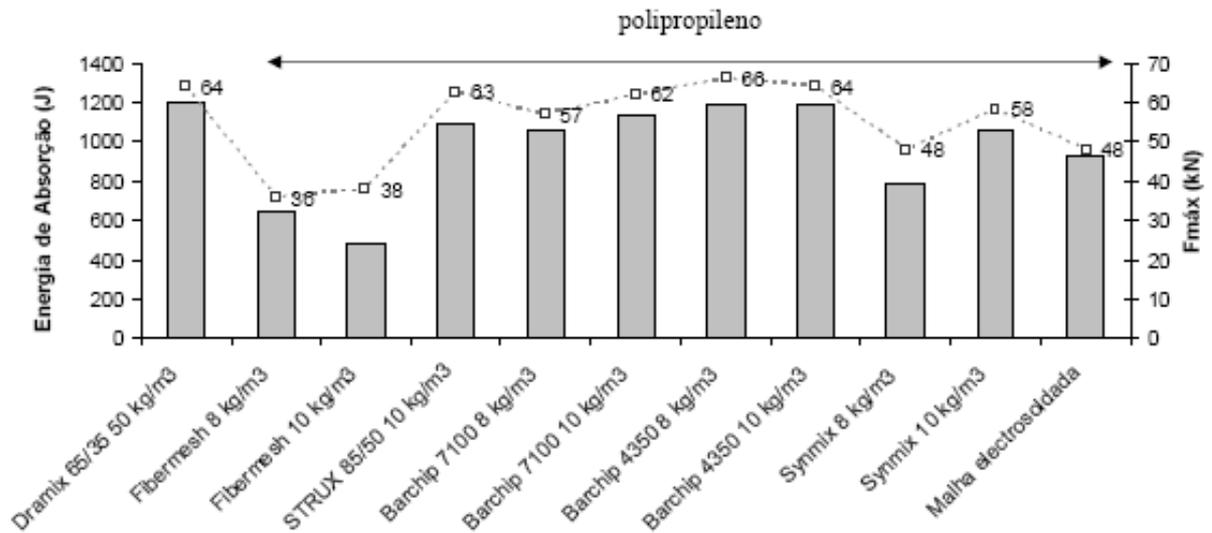


Fig. 20 – Carga máxima e absorção de energia – Painéis EFNARC, em que cada barra equivale à média de um mínimo de 3 placas. Fonte: Ferreira, 2008

Conclui-se então que, na generalidade, as fibras de aço atingem uma carga máxima maior e apresentam maior capacidade de absorção de energia do que as fibras sintéticas de polipropileno. No entanto, em certos casos a diferença não é muito grande. Aliando este aspeto ao fato de as fibras sintéticas não apresentarem um bom comportamento em relação à fluência, faz com que as fibras de aço sejam bastante mais utilizadas do que as fibras sintéticas, sendo estas últimas apenas utilizadas em situações muito específicas.

2.12. APLICAÇÕES DO BRFA

O Quadro 7 ilustra as aplicações onde podem ser utilizadas as fibras de aço.

Quadro 7 – Aplicações de BRFA. Fonte: Barros, 1996

Área de aplicação	Produto	Atributos
Pavimentos	Pavimentos de edifícios industriais; auto-estradas; pistas de aeroportos; estações de abastecimento de combustíveis; piscinas; courts de ténis.	Aumento da resistência às ações de fadiga e impacto; aumento da resistência à tração em flexão, o que permite: diminuir a espessura dos pavimentos ou aumentar a sua vida útil; diminuir o número de juntas devido à maior resistência à tração, capacidade de absorção de energia e controlo da fendilhação.
Estruturas hidráulicas	Barragens; canais; condutas; pilares submersos; estruturas offshore; elementos que servem de proteção de estruturas marítimas.	Maior resistência à cavitação, erosão e impacto.
Estruturas de betão projetado	Estabilização de taludes rochosos; estruturas subterrâneas; reparação e reabilitação de estruturas; construção de cascas delgadas; painéis de fachadas; reservatórios.	Economia de mão-de-obra e material; menor tempo de execução; execução de peças de geometria complexa.
Estruturas de betão refratário	Portas e paredes de fornos; compartimentos submetidos a elevadas temperaturas ou altos gradientes térmicos.	Maior resistência às tensões de origem térmica, ao choque térmico e às ações térmicas cíclicas.
Elementos pré-fabricados	Coberturas; canalizações; depósitos; fundações e estruturas de suporte de máquinas; paredes divisórias; lajes; muros de cerca ou vedação; varandas; estruturas resistentes de estufas e de pequenas arrecadações.	Manuseamento; facilidade de substituição; qualidade do acabamento; propriedades mecânicas, físicas e acústicas; economia.
Componentes Estruturais	Nós de ligação viga-pilar; consolas curtas; vigas altas; zonas de amarração de cabos de pré-esforço; estruturas offshore; portas resistentes a ações explosivas; elementos estruturais em regiões de considerável intensidade sísmica; componentes estruturais de instalações da indústria de energia nuclear.	Diminuição do congestionamento de armaduras convencionais; decréscimo do espaçamento e abertura das fendas; aumento da ductilidade do modo de rotura; maior resistência às ações cíclicas e de impacto.
Reparação e reforço de estruturas	Grande diversidade de elementos estruturais.	Economia de tempo, mão-de-obra e material.

Existem, no entanto, aplicações em que as fibras são particularmente mais eficazes:

- Materiais/estruturas de grande esbelteza em que os varões de aço não possam ser utilizados;
- Estruturas com grandes cargas e deformações locais (por exemplo, nos revestimentos de túneis, estruturas com resistência a explosões e estacas);

- Em lajes e pavimentos para controlar a fendilhação causada pela humidade ou variações térmicas.

Apresentam-se, a título ilustrativo, duas aplicações concretas onde o uso de fibras metálicas é particularmente vantajoso: lajes de fundação e túneis.

2.12.1. FIBRAS DE AÇO EM LAJES DE FUNDAÇÃO

2.12.1.1. Considerações gerais das fibras de aço em lajes de fundação

Este sub-capítulo vai analisar uma aplicação específica das fibras de aço: lajes de fundação.

As fibras de aço são uma boa alternativa em relação ao tradicional uso de armaduras ordinárias.

As lajes de fundação realizadas com fibras de aço constituem uma solução resistente às cargas de construção e aos momentos fletores atuantes. Por outro lado, constituem uma solução económica, de fácil execução e proporciona uma redução da fendilhação, sendo especialmente indicadas em: [Apunta, 2009]

- Casas familiares
- Pequenos apartamentos
- Edifícios residenciais e de serviço.

As fibras permitem: [Apunta, 2009]

- Simplicidade na construção: a aplicação das fibras é muito mais fácil do que a aplicação do reforço ordinário;
- Rapidez de execução: a aplicação das fibras é feita muito mais rapidamente do que a utilização de armaduras ordinárias, reduzindo o tempo de construção;
- Melhor economia: o dimensionamento com a melhor classe de fibras para cada caso apropriado permite uma melhoria também no aspeto económico;
- Reforço homogéneo: as fibras de aço DRAMIX garantem uma rápida e fácil mistura com uma distribuição uniforme;
- Controlo de risco: a substituição das armaduras ordinárias pelas fibras de aço traduz-se numa “substituição” de aço por aço.

A aplicação das tradicionais armaduras implica a presença das seguintes fases:

- Escavação da fundação;
- Colocação do betão de limpeza;
- Colocação da armadura ordinária;
- Colocação do betão;

Por sua vez, a aplicação das fibras compreende apenas as seguintes fases:

- Escavação da fundação;
- Colocação do betão de limpeza;
- Colocação do betão com fibras.

Desta forma, consegue-se eliminar uma etapa (colocação da armadura ordinária) com a utilização do betão com fibras, permitindo assim vantagens económicas e vantagens na duração da execução da laje.

2.12.1.2. Utilização das fibras de aço Dramix READY em lajes de fundação

O seguinte exemplo, para Betão C20/25 ou C25/30, diz respeito à utilização de fibras de aço tipo Dramix READY para lajes de fundação:

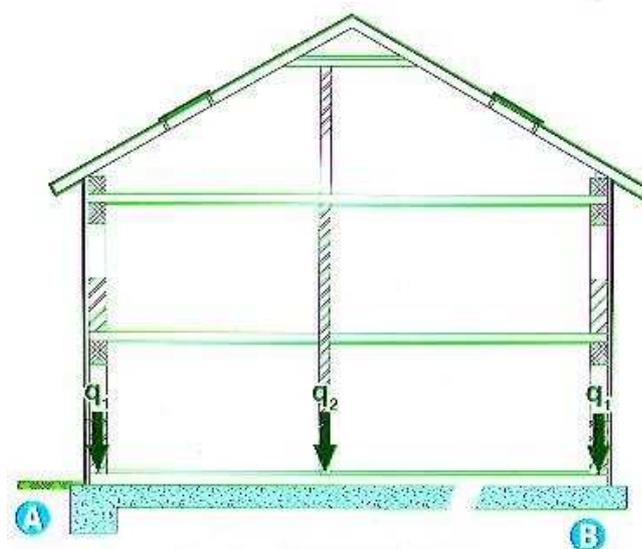


Fig. 21 – Exemplo da aplicação de fibras de aço em lajes de fundação. Fonte: Apunta, 2009

A carga q_1 é a exercida na fundação pela parede exterior, enquanto q_2 é a carga correspondente às paredes interiores.

Como se pode analisar na Figura 21, as fibras podem ser utilizadas em lajes com vigas de bordo (A) e em lajes sem vigas de bordo (B). Também podem ser utilizadas ocasionalmente com isolante térmico:

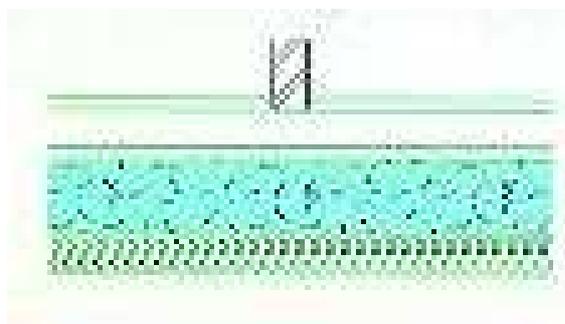


Fig. 22 – Aplicação de isolante térmico em lajes de fundação com fibras de aço. Fonte: Apunta, 2009

A pressão permitida no solo é de 150 kN/m^2 . [Apunta, 2009]

Quadro 8 – Cargas admissíveis permitidas com o reforço das fibras de aço Dramix em lajes de fundação para estruturas de madeira. Fonte: Apunta, 2009

Método de Construção – Estrutura de madeira				
Espessura da laje (mm)	Dosagem de fibras (kg/m^3)	Cargas admissíveis		
		q_1 (kN/m)	q_2 (kN/m)	
180	16	40	40	
200	16	45	65	

Quadro 9 – Cargas admissíveis permitidas com o reforço das fibras de aço Dramix em lajes de fundação para estruturas com paredes de alvenaria. Fonte: Apunta, 2009

Método de Construção – Paredes de alvenaria				
Espessura da laje (mm)	Dosagem de fibras (kg/m^3)	Cargas admissíveis		
		q_1 (kN/m)	q_2 (kN/m)	
220	20	55	75	
250	24	80	100	

No entanto, deve tomar-se as seguintes considerações: [Apunta, 2009]

- O sistema é apenas apropriado para fundações com sub-bases elásticas e sem pressão de água significativa;
- A espessura da madeira deve ser entre 180 e 300 mm. As dimensões máximas das lajes sem juntas de dilatação são: 15 m x 15 m;
- Manter reforço auxiliar para suportar momentos de pico (por exemplo, cargas pontuais, cargas pesadas, cantos, ...)

2.12.1.3. Redução de custos significativa

As fibras de aço nas lajes de fundação apresentam uma melhoria económica bastante considerável, podendo analisar-se o exemplo seguinte: [Apunta, 2009]

- Solução tradicional de 2 camadas 150/150/6/6 mm, em laje com espessura 180 mm:

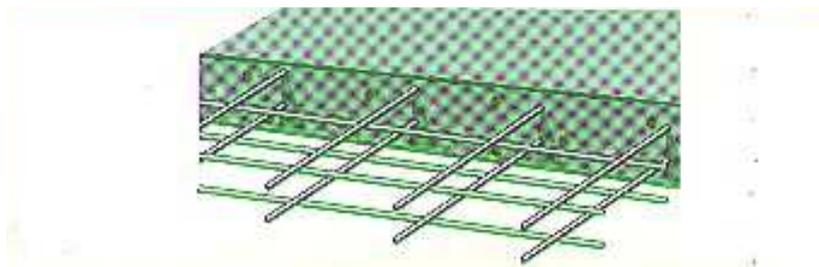


Fig. 23 – Solução tradicional de reforço de lajes de fundação. Fonte: Apunta, 2009

Quadro 10 – Representação do custo (%) da solução de reforço tradicional em lajes de fundação. Fonte: Apunta, 2009

Material	Custo (%)
Espaçadores da 1ª camada	2,7
Espaçadores de ponte para a 2ª camada	8,0
Malha 0,5 €/kg (15% de desperdício)	35,8
Mão-de-Obra: Manuseamento e Colocação	53,5
Custo total (%)	100

- Solução utilizando as Fibras de Aço Dramix READY, em laje com espessura 180 mm:

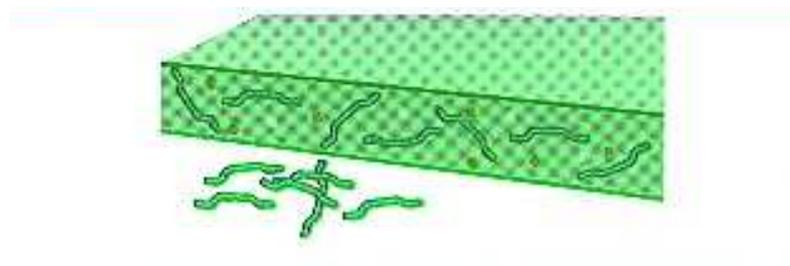


Fig. 24 – Solução de reforço com fibras de aço Dramix em lajes de fundação. Fonte: Apunta, 2009

Quadro 11 – Representação do custo (%) da solução de reforço com fibras de aço Dramix em lajes de fundação.
Fonte: Apunta, 2009

Material	Custo (%)
Espaçadores	0,0
Espaçadores de ponte para a 2ª camada	0,0
Dramix READY – dosagem 16 kg/m ³	69,3
Mão-de-Obra: Manuseamento e Colocação	0,0
Custo total (%)	69,3

Assim, analisando este exemplo, verifica-se que a aplicação das Fibras de Aço Dramix em relação à solução de reforço tradicional implica uma redução de custos de 30,7 %. [Apunta, 2009]

2.12.1.4. Fibras de Aço – Solução amiga do ambiente

As fibras de aço Dramix READY apresentam-se como uma solução vantajosa para o meio-ambiente, uma vez que: [Apunta, 2009]

- Consistem aproximadamente em 20% de materiais reciclados;
- São recicláveis sem qualquer efeito prejudicial químico ou impacto na poluição;
- Proporcionam melhoria da sustentabilidade ambiental.

Comparando a solução de reforço tradicional, com uma malha de 150/150/6/6 mm, numa laje com espessura de 180 mm com a solução da inclusão de 16 kg/m³ das fibras de aço Dramix READY numa laje com a mesma espessura, observa-se uma redução de consumo de energia de 13%, diminuindo também a emissão de CO₂. [Apunta, 2009]

2.12.1.5. Considerações finais da aplicação das fibras de aço em lajes de fundação

Conclui-se, com a análise deste sub-capítulo, que as fibras de aço nas lajes de fundação são: [Apunta, 2009]

- Uma solução de dimensionamento;
- Eficazes na redução da formação de fendas;
- Uma solução económica e com garantia de qualidade;
- Fáceis para se efetuar a dosagem e a mistura;
- Uma solução vantajosa para o ambiente: apresenta um menor consumo de energia por metro quadrado comparado com o reforço ordinário.

Por tudo isto, as fibras de aço apresentam-se como uma alternativa eficaz e inteligente de substituir a armadura ordinária nas lajes de fundação.

2.12.2. CASO DE ESTUDO – “THAMES WATER LEE TUNNEL”

Um outro exemplo de sucesso que recorre ao uso de fibras metálicas é o caso “Thames Water Lee Tunnel”. Trata-se de uma obra levada a cabo pelo consórcio MVB.

MVB é uma associação das empresas:

- Morgan Sindall;
- Vinci Construction Grands Projets
- Bachy Soletanche

Esta associação começou a construir o projeto do túnel em 2010.

O “Thames Water Lee Tunnel” é a primeira parte de um trabalho cuidadoso para um sistema de esgotos de Londres que vai remover a descarga da combinação da água da chuva com a água de esgotos para o Rio Thames e o Rio Lee.

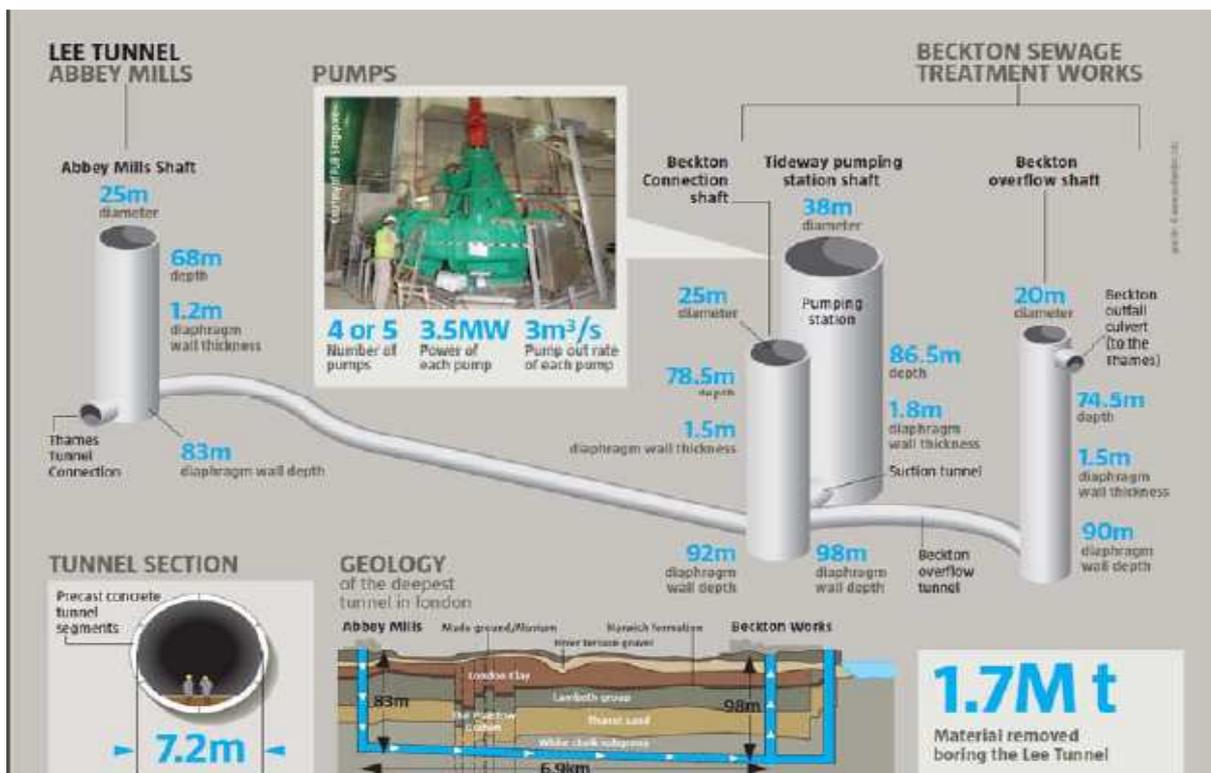


Fig. 25 – Pormenores a considerar no Thames Water Lee Tunnel. Fonte: Rivaz, (desconhecido)

Os componentes estruturais principais críticos para a segurança do túnel são:

- a parede;
- revestimento interno contra deslizamento;

Para aumentar a velocidade de execução e para eliminar juntas de construção, a MVB decidiu utilizar espessuras de revestimentos na ordem dos 700-750 mm. O betão utilizado foi o C50/60 com cimento GBBS (escória de alto forno) para minimizar o calor de hidratação e a resultante fendilhação térmica. Vários ensaios foram realizados em amostras para tentar induzir fendas e otimizar as quantidades das fibras de aço na mistura, para então controlar a fendilhação por retração.



Fig. 26 – Construção do Thames Water Lee Tunnel. Fonte: Rivaz, (desconhecido)

Dimensionou-se esta obra para ter um período de vida de 120 anos. Os parâmetros da durabilidade do betão considerados para o dimensionamento são:

- exposição ao ambiente exterior;
- resistência ao ataque químico interno e à abrasão dos fluxos de esgotos;
- redução dos riscos dos cloretos induzido pelo reforço à corrosão, através do dimensionamento de reforço da parede interior quando possível;
- minimização da fendilhação térmica e da fendilhação por retração, através de cura apropriada, moldagem bem planeada e reforço bem planeado.

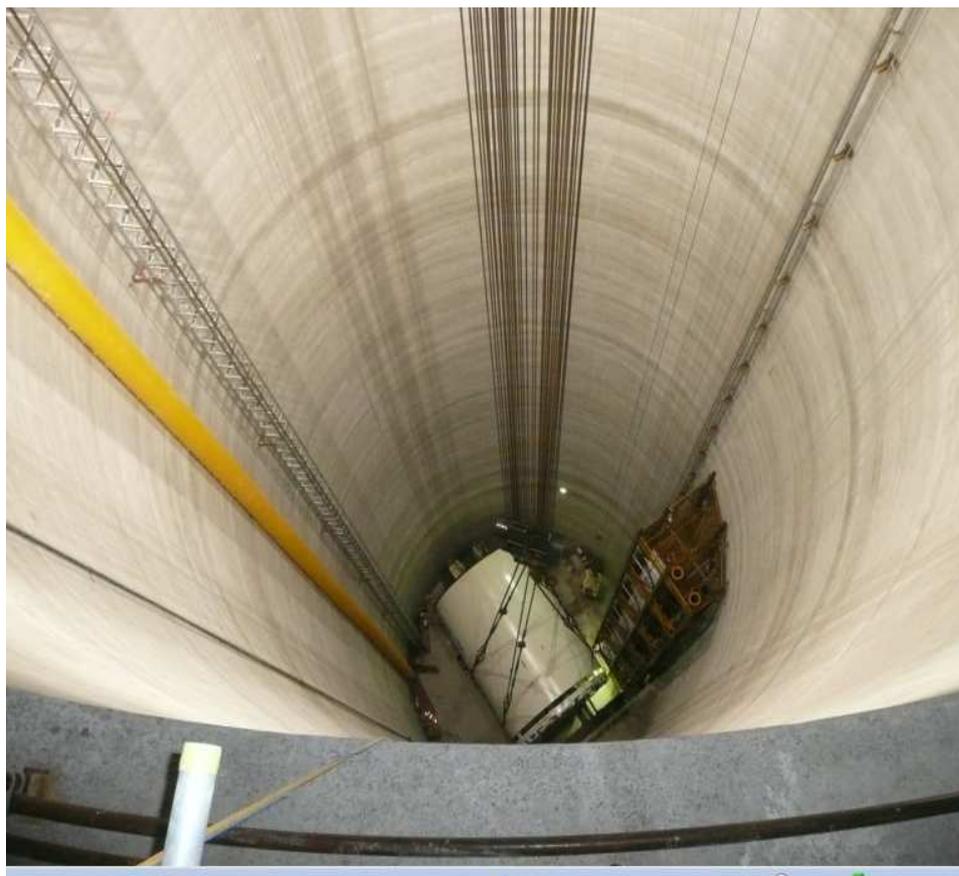


Fig. 27 – Construção do Thames Water Lee Tunnel. Fonte: Rivaz, (desconhecido)

Foi introduzido um volume de fibras Dramix RC-65/35-BN (comprimento: 35mm; diâmetro: 0,55 mm) de 30 kg/m³ na mistura.

As fibras permitiram:

- aumentar a ductilidade do betão não armado, eliminando o dano por fragmentação;
- auxiliar o controlo da fendilhação por retração por secagem.

Foi possível reduzir o revestimento de 600 a 800 toneladas para 20 a 100 toneladas.

O projeto demorou muito menos tempo (várias semanas) a ser realizado, devido à introdução das fibras.

A adoção desta metodologia de dimensionamento e de construção neste túnel levou já à decisão da aplicação da mesma metodologia noutros casos, permitindo assim uma redução significativa de aço.

As fibras permitiram, por isso, resultados muito mais económicos, rápidos e com qualidade (maior durabilidade das construções).

3

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista um maior conhecimento sobre o comportamento do BRFA, foram planeados ensaios experimentais sobre vigas com as dimensões 2,000x0,225x0,150 m³, com várias soluções de armaduras ordinárias e de dosagens de fibras. Com estes ensaios, que se enquadram num projeto mais alargado na área do BRFA que está a ser levado a cabo no “LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção”, foi possível comparar os esforços resistentes obtidos com os previsíveis, de acordo com as recomendações do RILEM TC-162-TDF (2003).

Para a produção do betão foi utilizado cimento, cinzas volantes, britas graníticas, areias naturais, fibras de aço, um adjuvante e água.

O cimento utilizado foi o CEM I 42,5R da SECIL, S.A. e a data de colheita foi em Janeiro de 2012.

As cinzas volantes são provenientes da Central Térmica de Compostilha.

As fibras utilizadas foram as Dramix RC-80/60-BN da Bekaert que apresentam as seguintes características:

- Comprimento: 60 mm;
- Diâmetro: 0,75 mm.

As britas foram disponibilizadas pela SECIL-Britas,S.A. e a data de colheita foi 2 de Maio de 2012.

A Areia 0/4 foi fornecida pela SOCASCA, S.A. e a Areia Fina pela SORGILA,S.A.. A data de colheita das areias foi em 3 de Maio de 2012.

O adjuvante utilizado foi o Sikaplast 805, disponibilizado pela SIKA PORTUGAL, S.A..

A composição do betão base, a que foi adicionada uma dosagem variável de fibras, encontra-se representada no Quadro 12:

Quadro 12 – Composição do betão base

Composição	Dosagem [kg/m³]
Brita 14/20	540
Brita 6/14	290
Brita 4/8	140
Areia 0/4	445
Areia Fina	290
Cimento CEM I 42,5R	380
Cinzas volantes (compostilha)	140
Água	170
Adjuvante SP 805	5,2

No Quadro 13 encontra-se a referência atribuída ao betão de acordo com a dosagem de fibras utilizada.

Quadro 13 – Referência das diferentes composições de BRFA

Referência	Dosagem de Fibras [kg/m³]
Composição 1	0
Composição 3	19,6
Composição 2	39,3
Composição 4	58,9

As composições 1, 2, 3 e 4 contêm a mesma quantidade de água (170 l) e apresentam a mesma trabalhabilidade.

As dimensões reais de todos os provetes utilizados nos ensaios experimentais estão no Anexo I. A quantidade e tipo de provetes moldados por Composição estão no Anexo III e as referências dos provetes no Anexo IV.

3.2. PEÇAS MOLDADAS

3.2.1. VIGAS PARA ENSAIOS DE FLEXÃO

Foram realizadas 4 composições (distinguíveis apenas pela dosagem de fibras) que, no total, deram origem a 6 séries de vigas (distinguindo-se estas séries através da quantidade de fibras e da armadura ordinária presente nas vigas), cada uma constituída por 3 vigas. Todas as vigas continham 3 varões de aço, exceto as vigas da série 6 que não apresentam qualquer armadura ordinária.

Quadro 14 – Definição das diferentes séries de vigas

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Composição	Série	Armadura ordinária	Nº de vigas
0	1	1	3φ8	3
19,6	3	4	3φ6	3
39,3	2	2	3φ8	3
		3	3φ6	3
58,9	4	5	3φ6	3
		6	0	3

Algumas das vigas, por razões várias, não puderam ser ensaiadas aos 28 dias. Assim, o Anexo II indica a idade exata das vigas aquando dos ensaios de flexão.

As dimensões reais exatas das seções de todas as vigas encontram-se no Anexo V.

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO BRFA

Tendo em vista a caracterização do BRFA, foram realizados diversos ensaios.

3.2.2.1. Resistência à Compressão

Para calcular a resistência à compressão do BRFA, foram utilizados 3 cilindros aos 28 dias em cada composição, estando os respetivos resultados apresentados no Quadro 15. Apesar de também terem sido ensaiados 3 cubos aos 28 dias para cada composição com o objetivo de depois se poder proceder a uma possível aproximação para os cilindros (a resistência dos cilindros seria, teoricamente, aproximadamente 85% da resistência dos cubos), verificou-se que essa aproximação não correspondia aos resultados obtidos experimentalmente, sendo que por isso adotou-se apenas a informação dos cilindros. No entanto, a título de curiosidade, o Quadro 16 indica os resultados dos cubos ensaiados.

Quadro 15 – Resistência à compressão do betão das diferentes composições, segundo a NP EN 12390-3

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Referência dos Cilindros	Resistência à compressão dos cilindros [MPa]	Resistência à compressão média dos cilindros [MPa]
0	1	62,5	61,2
	2	62,5	
	3	58,5	
19,6	7	63,0	63,3
	8	63,5	
	9	53,5	
39,3	4	63,0	62,8
	5	61,5	
	6	64,0	
58,9	10	64,0	63,0
	11	63,0	
	12	63,0	

Note-se que não se considerou o valor da resistência à compressão do cilindro 9, pois o resultado obtido está muito desfasado dos restantes valores obtidos da composição correspondente.

Quadro 16 – Resultados da resistência à compressão dos cubos das várias composições, segundo a NP EN 12390-3

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Referência dos Cubos	Resistência à compressão dos cubos [MPa]	Resistência média à compressão dos cubos [MPa]
0	4	60,5	62,2
	5	63,0	
	6	63,0	
19,6	18	60,5	62,3
	19	64,0	
	20	62,5	
39,3	10	69,0	69,8
	11	70,5	
	12	70,0	
58,9	24	66,5	64,7
	25	64,5	
	26	63,0	

3.2.2.2. Módulo de Elasticidade

Apresenta-se no Quadro 17 a informação sobre os resultados dos ensaios efetuados em cilindros para a obtenção do Módulo de Elasticidade do BRFA.

Quadro 17 – Módulo de Elasticidade, segundo a DIN 1048-5

Módulo de Elasticidade				
Dosagem de fibras [kg/m³]	Referência	Idade do Provete [dias]	Módulo de Elasticidade [MPa]	Módulo de Elasticidade médio [MPa]
0	Cilindro 1	28	(não calculado)	38550
	Cilindro 2	28	37700	
	Cilindro 3	28	39400	
19,6	Cilindro 7	27	(não calculado)	38000
	Cilindro 8	27	39000	
	Cilindro 9	27	37000	
39,3	Cilindro 4	28	(não calculado)	38100
	Cilindro 5	28	37500	
	Cilindro 6	28	38700	
58,9	Cilindro 10	27	(não calculado)	37950
	Cilindro 11	27	38400	
	Cilindro 12	27	37500	

3.2.2.3. Limite de Proporcionalidade e Resistências Residuais à Tração por Flexão

Foram realizados ensaios para a obtenção do Limite de Proporcionalidade e das Resistências Residuais à Tração por flexão das várias composições com fibras (composições 2, 3 e 4), de acordo com a norma EN 14651.

Os provetes utilizados, prismas, apresentam as características descritas no Quadro 18:

Quadro 18 – Características dos prismas ensaiados de acordo com a EN 14651

Dosagem de fibras [kg/m³]	Prismas	Idade [dias]	b [mm]	h [mm]	h_{sp} [mm]	l [mm]
19,6	20	35	151	150	125	500
	21	35	151	150	125	500
39,3	15	36	151	151	126	500
	16	36	151	151	126	500
58,9	26	35	150	150	125	500
	27	35	150	150	125	500

onde:

b : base do prisma;

h : altura do prisma;

l : vão livre do prisma;

h_{sp} : altura desde o topo do prisma até ao topo do corte.

No Quadro 19 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios.

Quadro 19 – Resultados obtidos no ensaio de acordo com a EN 14651

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Prismas	f_L [N/mm ²]	$f_{R,1}$ [N/mm ²]	$f_{R,2}$ [N/mm ²]	$f_{R,3}$ [N/mm ²]	$f_{R,4}$ [N/mm ²]
19,6	20	7,50	3,10	2,13	1,62	1,37
	21	6,90	3,17	2,91	1,97	1,56
	Média	7,20	3,14	2,52	1,80	1,47
39,3	15	7,36	7,33	7,13	6,27	5,15
	16	7,93	7,68	6,74	6,00	5,05
	Média	7,65	7,51	6,94	6,14	5,10
58,9	26	7,61	5,94	5,84	4,71	3,99
	27	4,89	8,06	7,61	5,82	4,72
	Média	6,25	7,00	6,73	5,27	4,36

onde, de acordo com a norma EN 14651:

f_L : Limite de Proporcionalidade;

$f_{R,1}$: Resistência Residual à Tração por flexão para deformação de 0,46 mm;

$f_{R,2}$: Resistência Residual à Tração por flexão para deformação de 1,32 mm;

$f_{R,3}$: Resistência Residual à Tração por flexão para deformação de 2,17 mm;

$f_{R,4}$: Resistência Residual à Tração por flexão para deformação de 3,00 mm.

Os valores de f_L e de $f_{R,i}$ calculam-se de acordo com as equações 1 e 2, respetivamente:

$$f_L = \frac{3}{2} \times F_L \times \frac{l}{b \times h^2} \quad (1)$$

em que:

F_L : máxima carga entre 0 e 0,05 mm de deformação;

$$f_{R,i} = \frac{3}{2} \times F_{R,i} \times \frac{l}{b \times h^2} \quad (2)$$

em que:

$F_{R,i}$: carga correspondente à respetiva deformação.

É de referir que na Composição 4, adotaram-se os valores do prisma 27 e não a média dos dois prismas referentes a essa composição, pelo fato de o prisma 26 apresentar valores pouco razoáveis.

Nas Figuras 28, 29 e 30, apresentam-se os diagramas carga-deformação dos prismas ensaiados e de onde se recolheram os valores das resistências residuais à tração por flexão constantes do Quadro 19.

Diagramas Carga-Deflexão dos prismas ensaiados da Composição 2 ($fibras = 39,3 \text{ kg/m}^3$):

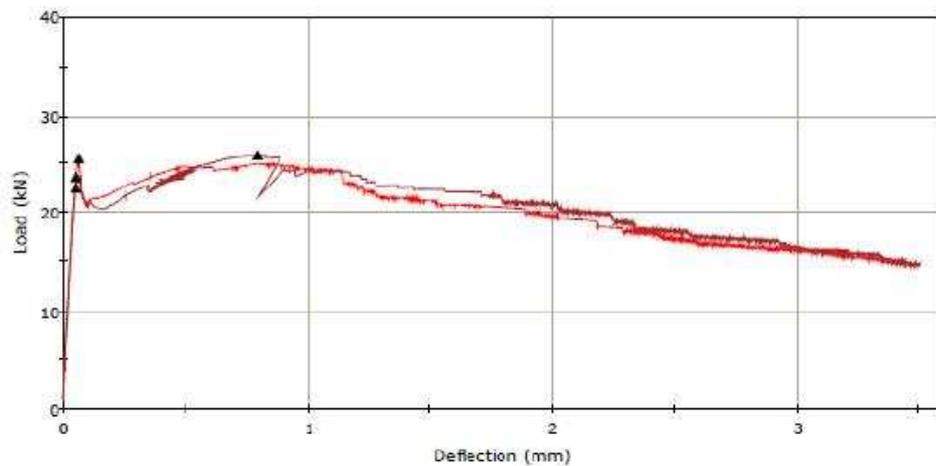


Fig. 28 - Diagramas Carga-Deformação dos prismas ensaiados da Composição 2 ($fibras = 39,3 \text{ kg/m}^3$)

Diagramas Carga-Deflexão dos prismas ensaiados da Composição 3 ($fibras = 19,6 \text{ kg/m}^3$):

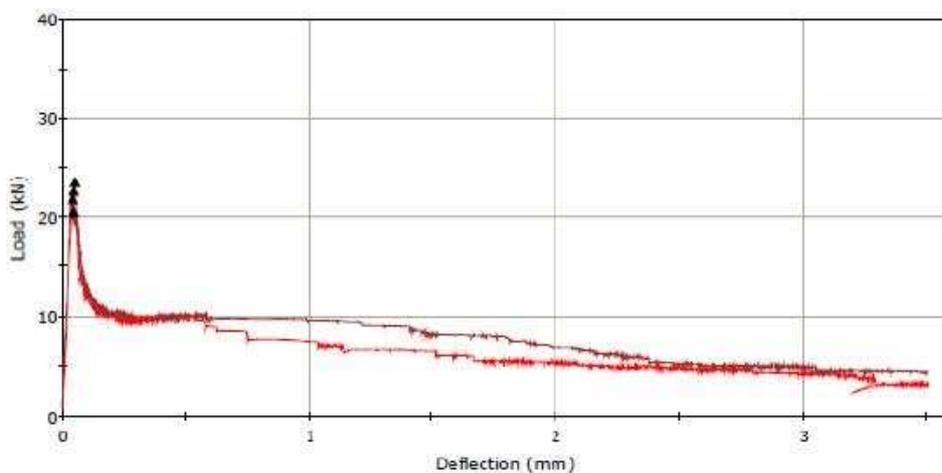


Fig. 29 - Diagramas Carga-Deformação dos prismas ensaiados da Composição 3 ($fibras = 19,6 \text{ kg/m}^3$)

Diagramas Carga-Deflexão dos prismas ensaiados da Composição 4 ($f_{\text{fibras}} = 58,9 \text{ kg/m}^3$):

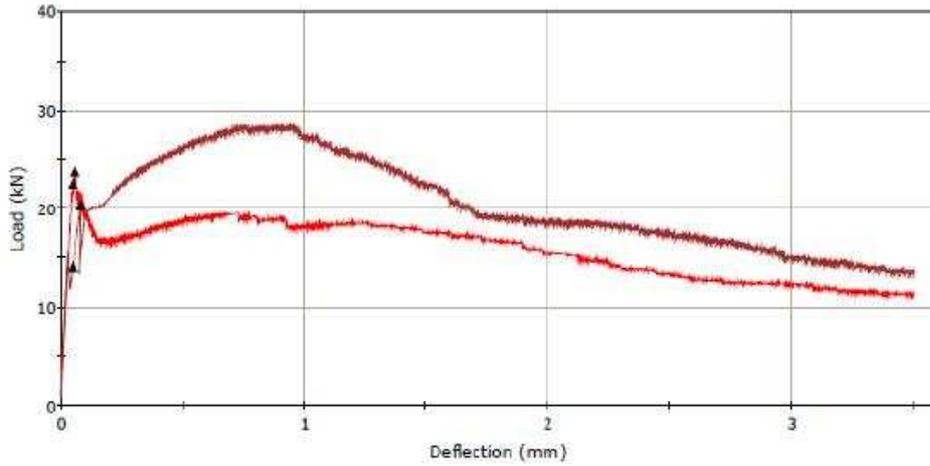


Fig. 30 - Diagramas Carga-Deformação dos prismas ensaiados da Composição 4 ($f_{\text{fibras}} = 58,9 \text{ kg/m}^3$)

No Quadro 20 apresenta-se uma síntese dos valores médios das resistências residuais à tração por flexão.

Quadro 20 – Valores médios, por composição, das Resistências Residuais à Tração por Flexão

Dosagem de fibras [kg/m^3]	Valores médios				
	f_L [N/mm^2]	$f_{R,1}$ [N/mm^2]	$f_{R,2}$ [N/mm^2]	$f_{R,3}$ [N/mm^2]	$f_{R,4}$ [N/mm^2]
19,6	7,20	3,14	2,52	1,80	1,47
39,3	7,65	7,51	6,94	6,14	5,10
58,9	6,25	7,00	6,73	5,27	4,36

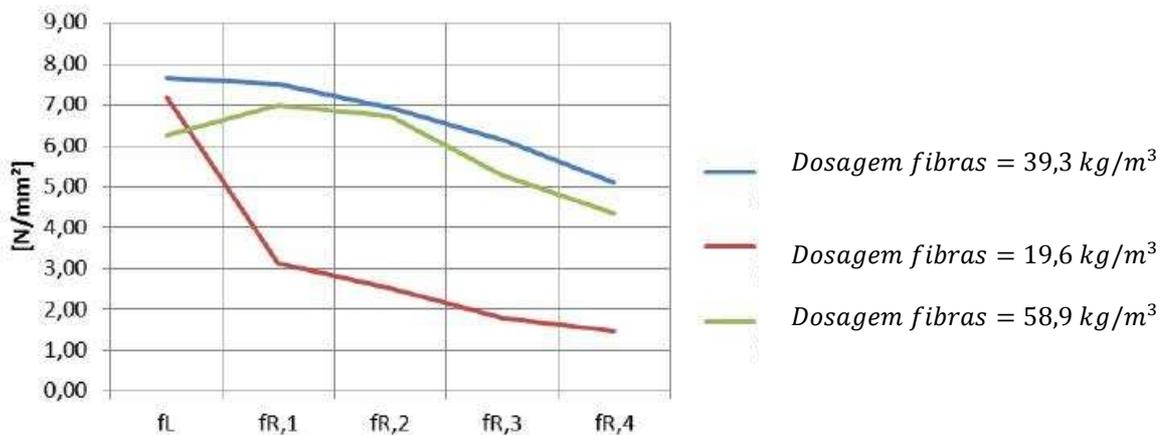


Fig. 31 – Gráficos dos valores médios, por composição, das Resistências Residuais à Tração por Flexão

3.2.3. ENSAIOS COMPLEMENTARES

3.2.3.1. Resistência à Tração Direta

Apresenta-se no Quadro 22 a informação sobre os resultados dos ensaios efetuados em carotes retiradas dos prismas (20x20x40 cm³) para a obtenção da Resistência à Tração Direta do BRFA.

Quadro 21 – Resistência à Tração Direta, segundo a RILEM CPC7

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Referência	Área da zona de rotura, A _c [mm ²]	Altura do Provete = 2x(área da zona de rotura) ^{1/2} [mm]	Força máxima [N]	Resistência à tração direta [MPa]	Ensaio válido	Resistência à tração direta média [MPa]
0	Carote 1	6789	165	24660	3,63	Sim	3,55
	Carote 2	6789	165	24600	3,62	Não	
	Carote 3	6789	165	23550	3,47	Sim	
19,6	Carote 7	6789	165				3,55
	Carote 8	6789	165	23260	3,43	Sim	
	Carote 9	6789	165	24950	3,67	Sim	
39,3	Carote 4	6789	165				-
	Carote 5	6789	165	25820	3,80	Não	
	Carote 6	6789	165	20130	2,96	Não	
58,9	Carote 10	6789	165	27570	4,06	Sim	3,47
	Carote 11	6789	165	20840	3,07	Sim	
	Carote 12	6789	165	22260	3,28	Sim	

Observações:

- A força foi aplicada com uma velocidade de 0,05±0,01 N/mm²/seg;
- O ensaio só é válido quando a rotura ocorre na zona central do provete com uma medida correspondente a 3/4 da altura do mesmo:



Fig. 32 - Representação esquemática da validade dos ensaios para a obtenção da Resistência à Tração Direta

- Algumas carotes não apresentam resultados no Quadro 22. Isto deve-se ao fato de, aquando do ensaio, essas carotes terem rompido pela cola inicialmente utilizada que ligava as patelas ao betão (o que significa que o betão é mais resistente do que a cola inicialmente utilizada), não sendo possível reensaia-los devido a, depois de retificadas novamente, não apresentarem altura suficiente (165 mm). Ao detetar-se o problema,

melhorou-se o processo de colagem, conseguindo assim fazer os ensaios às restantes carotes.

3.2.3.2. Resistência à Tração por Flexão

Para estimar a Resistência à Tração por Flexão do BRFA, foram efetuados ensaios de flexão em prismas.

Quadro 22 – Resistência à Tração por Flexão, segundo a NP EN 12390-5

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Referência	Idade do Provete [dias]	Resistência à Tração por Flexão [MPa]	Resistência à Tração por Flexão média [MPa]
0	Prisma 1	28	6,7	6,5
	Prisma 2	28	6,3	
	Prisma 3	28	6,4	
19,6	Prisma 7	28	7,7	7,2
	Prisma 8	28	6,8	
	Prisma 9	28	7,0	
39,3	Prisma 4	28	7,1	6,7
	Prisma 5	28	6,9	
	Prisma 6	28	6,0	
58,9	Prisma 10	28	6,8	6,7
	Prisma 11	28	7,0	
	Prisma 12	28	6,4	

Constata-se uma grande uniformidade nos resultados da Resistência à Tração por Flexão.

3.2.3.3. Ensaios dos varões de aço

Foi ensaiada a seguinte quantidade de varões de aço, usados nesta dissertação, para a determinação da tensão de cedência f_{sy} e da tensão de rotura f_{su} :

- 1 varão de 6 mm;
- 4 varões de 8 mm.

Quadro 23 – Tensão de cedência e tensão de rotura dos varões de aço com diâmetro 6 mm, segundo a ISO 6892-1

Referência do varão	Tensão de cedência, f_{sy} [MPa]	Tensão de rotura, f_{su} [MPa]
1	407,0	481,0

Quadro 24 – Tensão de cedência e tensão de rotura dos varões de aço com diâmetro 8 mm, segundo a ISO 6892-1

Referência do varão	Tensão de cedência, f_{sy}	Tensão de rotura, f_{su}
	[MPa]	[MPa]
8	547,0	606,0
9	547,0	589,0
10	547,0	609,0
11	547,0	610,0
Média	547,0	603,5

3.3. ENSAIOS DE FLEXÃO EM VIGAS

3.3.1. PROVETES/MODELOS E ESQUEMA DE ENSAIO

Tal como já foi referido, foram ensaiadas diversas vigas com 2 metros de comprimento e a secção 0,15x0,225 m², com diferentes dosagens de fibras e armadura ordinária.

Na Figura 33 apresenta-se uma descrição geral das vigas ensaiadas (excetuando as vigas da série 6 que não contêm armadura ordinária):

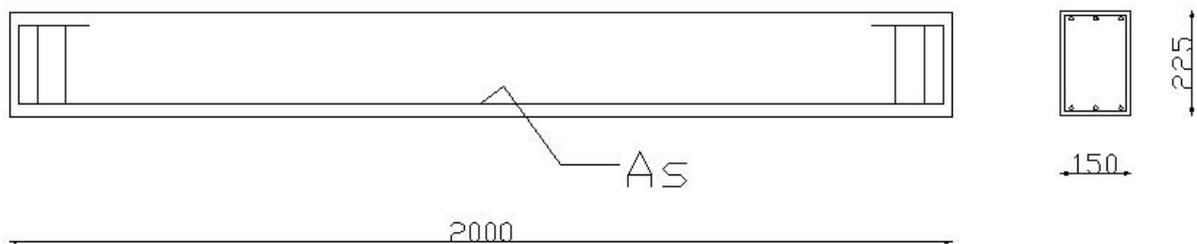


Fig. 33 - Descrição geral das vigas ensaiadas [dimensões em mm]

A Figura 34 apresenta um exemplo de uma viga a ser produzida:



Fig. 34 – Exemplo de viga a ser produzida

O Quadro 25 apresenta a caracterização de todas as vigas ensaiadas.

Quadro 25 – Totalidade das vigas ensaiadas e sua caracterização

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Composição	Série	Armadura ordinária	Referência da Viga
0	1	1	3Φ8	1
		1	3Φ8	2
		1	3Φ8	3
19,6	3	4	3Φ6	10
		4	3Φ6	11
		4	3Φ6	12
39,3	2	2	3Φ8	4
		2	3Φ8	5
		2	3Φ8	6
		3	3Φ6	7
		3	3Φ6	8
		3	3Φ6	9
58,9	4	5	3Φ6	13
		5	3Φ6	14
		5	3Φ6	15
		6	-	16
		6	-	17
		6	-	18

Na Figura 35 apresenta-se o esquema de ensaio realizado:

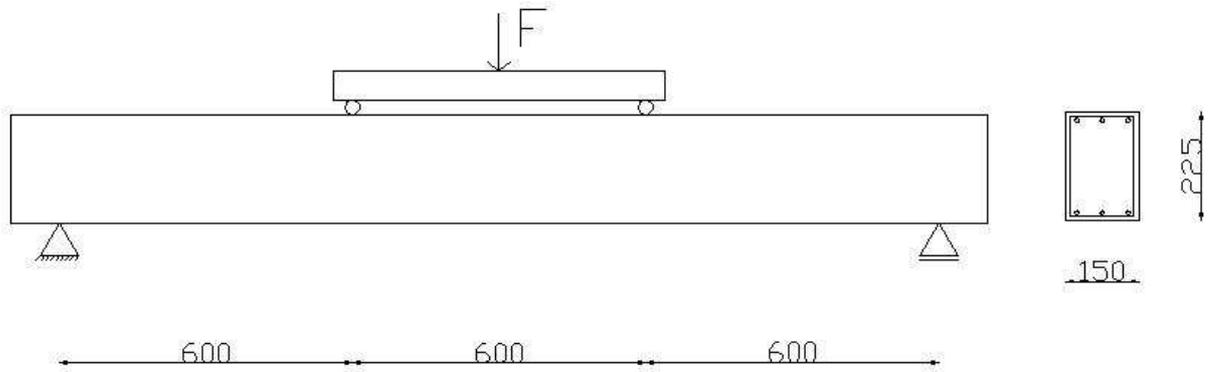


Fig. 35 - Esquema de ensaio [dimensões em mm]

A Figura 36 ilustra uma fotografia de um exemplo de uma viga pronta a ensaiar:



Fig. 36 - Exemplo de viga pronta a ensaiar

Foram avaliados os seguintes parâmetros durante o ensaio de flexão de cada viga:

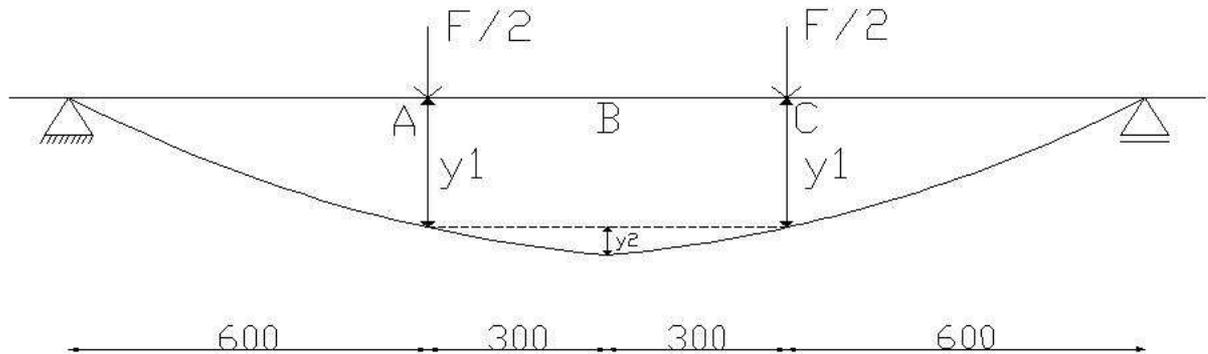


Fig. 37 - Parâmetros a avaliar durante o ensaio de flexão das vigas

em que:

y_1 : deslocamento do ponto de aplicação da força F (admitindo a rigidez infinita da viga metálica que distribui F);

y_2 : deslocamento relativo de B relativamente a A e a C;

F : força aplicada a meio vão.

3.3.2. ENSAIOS COM VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE DIÂMETRO 8 MM

3.3.2.1. Vigas 1, 2 e 3 ($3\Phi 8$; Dosagem de fibras = 0 kg/m^3)

Estas vigas foram realizadas com o betão da Composição 1, que corresponde às seguintes características:

$$f_{c,cil} = 61,2 \text{ MPa}; f_{ct,direta} = 3,55 \text{ MPa}; E = 38550 \text{ MPa};$$

Dosagem de Fibras = 0 kg/m^3 ; Armadura ordinária: $3\Phi 8$

A seção transversal das vigas 1, 2 e 3 apresenta as dimensões reais representadas no Quadro 26:

Quadro 26 – Dimensões da secção transversal das vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Viga	b [m]	h [m]	d [m]	$d_{médio}$ [m]
1	0,153	0,226	0,198	
2	0,150	0,227	0,205	0,201
3	0,150	0,225	0,200	

Na Figura 38 apresentam-se os gráficos Força F - Deslocamento y_1 das vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro:

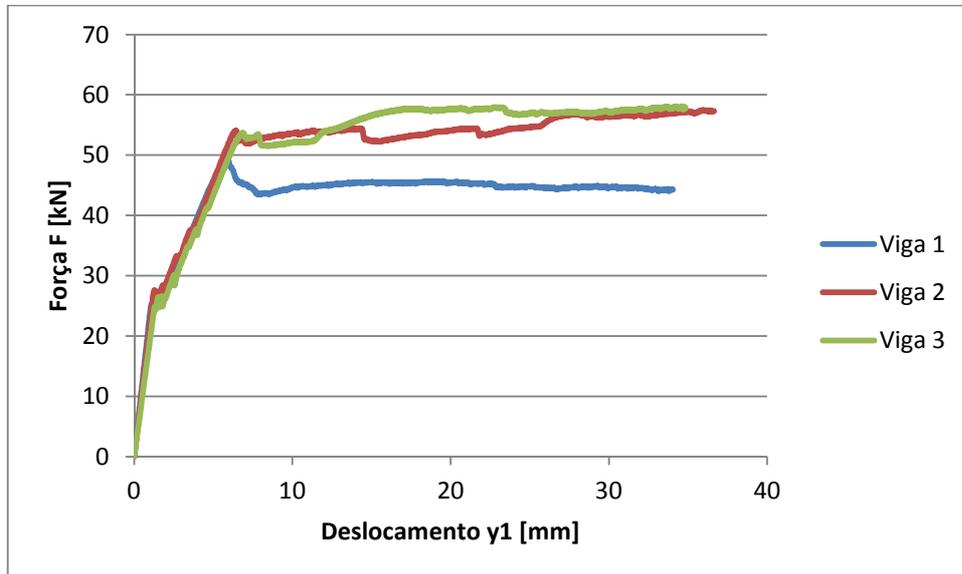


Fig. 38 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

No Quadro 27 apresentam-se alguns valores que caracterizam os gráficos obtidos:

F_{cr} : Força correspondente ao aparecimento da 1ª fenda;

δ_{Fcr} : Deslocamento correspondente a F_{cr} ;

F_{ry} : Força correspondente à entrada em cedência das armaduras;

δ_{Fry} : Deslocamento corresponde a F_{ry} .

Quadro 27 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	Ocorrência da 1ª fenda		Cedência das armaduras	
	F_{cr} [kN]	δ_{Fcr} [mm]	F_{ry} [kN]	δ_{Fry} [mm]
Viga 1	25,41	1,11	49,28	5,94
Viga 2	27,65	1,28	54,07	6,41
Viga 3	26,45	1,51	53,70	6,88
Média	26,50	1,30	52,35	6,41

As Figuras 39, 40 e 41 apresentam a forma de rotura das vigas 1, 2 e 3, respetivamente:



Fig. 39 – Forma de rotura da viga 1



Fig.40 – Forma de rotura da viga 2



Fig. 41 – Forma de rotura da viga 3

Constata-se que a 1ª fenda ocorre para uma tensão máxima de tração no betão com os seguintes valores calculados no Quadro 28:

Quadro 28 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	F_{cr} [kN]	$M_{cr} = 0,3 \times F_{cr}$ [kN.m]	b [m]	h [m]	$\sigma_t = (M_{cr}/(b \times h^2)) \times 6$ [MPa]
1	25,41	7,62	0,153	0,226	5,852
2	27,65	8,30	0,150	0,227	6,439
3	26,45	7,94	0,150	0,225	6,270

Note-se que os valores de b e h foram medidos nas próprias vigas, e não correspondem exatamente aos valores projetados (0,15 m e 0,225 m, respetivamente).

No Quadro 29 apresenta-se o cálculo do Momento de Cedência das armaduras (M_{ry}) destas vigas, obtido numericamente.

Quadro 29 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras e respetiva Força de Cedência das armaduras, para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	b [m]	h [m]	d [m]	$A_s = 3\phi 8$ [mm ²]	f_{sy} [MPa]	M_{ry} [kN.m]	$F_{ry} = M_{ry}/0,3$ [kN]
1	0,153	0,226	0,198	150,796	547,0	14,70	49,00
2	0,150	0,227	0,205	150,796	547,0	15,22	50,73
3	0,150	0,225	0,200	150,796	547,0	14,85	49,50

Note-se que admitiu-se para o cálculo do Momento de Cedência das armaduras, M_{ry} :

$$z = 0,9 \times d \quad (1)$$

Comparando as Forças de Cedência das armaduras (F_{ry}) encontradas no Quadro 29 com os respetivos valores obtidos no ensaio experimental, verifica-se uma significativa concordância nas vigas 2 e 3.

Quadro 30 – Comparação entre a Força de Cedência das armaduras calculada a partir do ensaio e o respetivo valor obtido diretamente do ensaio, para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Força de Cedência das armaduras, F_{ry}			
Vigas	1	2	3
Teórico	49,00	50,73	49,50
Valor experimental	49,28	54,07	53,70

Admitindo os valores das Forças de Cedência das armaduras (F_{ry}) dos gráficos F-y1 experimentais, obtém-se:

Quadro 31 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras, para as vigas sem fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	Força de Cedência as armaduras, F_{ry} [kN]	Momento de Cedência das armaduras, M_{ry} [kN.m]
1	49,28	14,78
2	54,07	16,22
3	53,70	16,11

3.3.2.2. Vigas 4, 5 e 6 (3Φ8; Dosagem de fibras =39,3 kg/m³)

Estas vigas foram realizadas com o betão da Composição 2, que corresponde às seguintes características:

$$f_{c,cil} = 62,8 \text{ MPa}; f_{ct,direta} = \text{desconhecido}; E = 38100 \text{ MPa};$$

Dosagem de Fibras = 39,3 kg/m³; Armadura ordinária: 3Φ8

A seção transversal das vigas 4, 5 e 6 apresenta as seguintes características:

Quadro 32 – Características da seção transversal, para as vigas com 39,3 kg/m³ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Viga	<i>b</i> [m]	<i>h</i> [m]	<i>d</i> [m]	<i>d</i> _{médio} [m]
4	0,151	0,225	0,205	
5	0,152	0,227	0,208	0,204
6	0,150	0,225	0,198	

Na Figura 42 apresentam-se os gráficos Força F - Deslocamento y_1 das vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro:

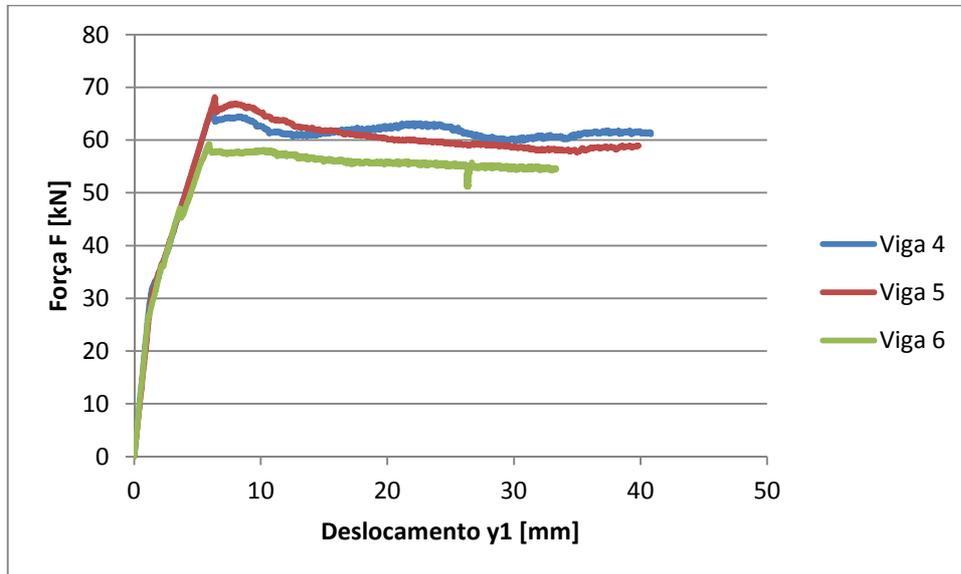


Fig. 42 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Identificando nos gráficos os valores da força F_{cr} correspondentes ao aparecimento da 1ª fenda (e o respetivo deslocamento $\delta_{F_{cr}}$) e da força de cedência das armaduras F_{ry} (e respetivo deslocamento $\delta_{F_{ry}}$) obtêm-se os valores descritos no Quadro 33:

Quadro 33 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	Ocorrência da 1ª fenda		Cedência das armaduras	
	F_{cr}	$\delta_{F_{cr}}$	F_{ry}	$\delta_{F_{ry}}$
Viga 4	32,36	1,48	66,05	6,19
Viga 5	31,95	1,53	68,11	6,37
Viga 6	26,70	1,15	59,21	5,90
Média	30,34	1,39	64,46	6,15

As Figuras 43, 44 e 45 apresentam a forma de rotura das vigas 4, 5 e 6, respetivamente:



Fig. 43 – Forma de rotura da viga 4



Fig. 44 – Forma de rotura da viga 5



Fig. 45 – Forma de rotura da viga 6

Constata-se que a 1ª fenda ocorre para uma tensão máxima de tração no betão com os seguintes valores calculados no Quadro 34:

Quadro 34 – Cálculo da tensão máxima de tração no betão, para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	F_{cr} [kN]	$M_{cr} = 0,3 \times F_{cr}$ [kN.m]	b [m]	h [m]	$\sigma_t = (M_{cr}/(b \times h^2)) \times 6$ [MPa]
4	32,36	9,71	0,150	0,225	7,671
5	31,95	9,59	0,150	0,227	7,440
6	26,70	8,01	0,150	0,225	6,329

Identificando nos gráficos as Forças de Cedência das armaduras (F_{ry}), obtém-se:

Quadro 35 – Cálculo do Momento de Rotura, para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	Força de cedência das armaduras, F_{ry} [kN]	Momento de Cedência das armaduras, M_{ry} [kN.m]
4	66,05	19,82
5	68,11	20,43
6	59,21	17,76

3.3.2.3 Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ8 e com diferentes dosagens de fibras

O Quadro 36 apresenta a média das tensões máximas de tração no betão no instante de fendilhação:

Quadro 36 – Cálculo da média das tensões máximas de tração no betão no instante de fendilhação, para as vigas com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Vigas	Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Tensão de tração no betão no instante da fendilhação [MPa]	Média das tensões máximas de tração no betão no instante da fendilhação [MPa]
1	0	5,852	6,187
2		6,439	
3		6,270	
4	39,3	7,671	7,147
5		7,440	
6		6,329	

Logo, no que diz respeito às resistências máximas à tração do betão das Composições em causa (Composição 1 e 2), pode afirmar-se que a presença de fibras (com uma dosagem de 39,3 kg/m³) introduziu uma melhoria nas tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção do betão de 15,5 %, tal como demonstrado na equação 2:

$$\left(\frac{7,147}{6,187}\right) - 1 = 0,155 = 15,5 \% \quad (2)$$

No que respeita ao Momento de Cedência das armaduras calculado a partir dos ensaios, tem-se:

Quadro 37 – Cálculo da média do Momento de Cedência das armaduras, a partir dos ensaios, para as vigas com varões de aço de 8 mm de diâmetro

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Vigas	F_{ry} [kN]	M_{ry} [kN.m]	$M_{ry,med}$ [kN.m]
0	1	49,28	14,78	15,71
	2	54,07	16,22	
	3	53,70	16,11	
39,3	4	66,05	19,82	19,34
	5	68,11	20,43	
	6	59,21	17,76	

Tendo em conta os reais valores da altura útil das vigas, pode concluir-se que a presença de fibras (com uma dosagem de 39,3 kg/m³) traduziu-se numa melhoria de momento de cedência das armaduras de 21,3%, tal como demonstra a equação 3:

$$\left(\frac{19,34}{15,71} \times \frac{0,201}{0,204}\right) - 1 = 0,213 = 21,3 \% \quad (3)$$

A Figura 46 apresenta a comparação do diagrama Momento-y1 da viga 2 (viga que parece ter o comportamento mais representativo em termos de F_{ry} , F_{cr} e F_{ru} da série respetiva, ou seja, dosagem de fibras = 0 kg/m³) com o diagrama Momento-y1 da viga 4 (viga que parece ter o comportamento mais representativo em termos de F_{ry} , F_{cr} e F_{ru} da série respetiva, ou seja, dosagem de fibras = 39,3 kg/m³):

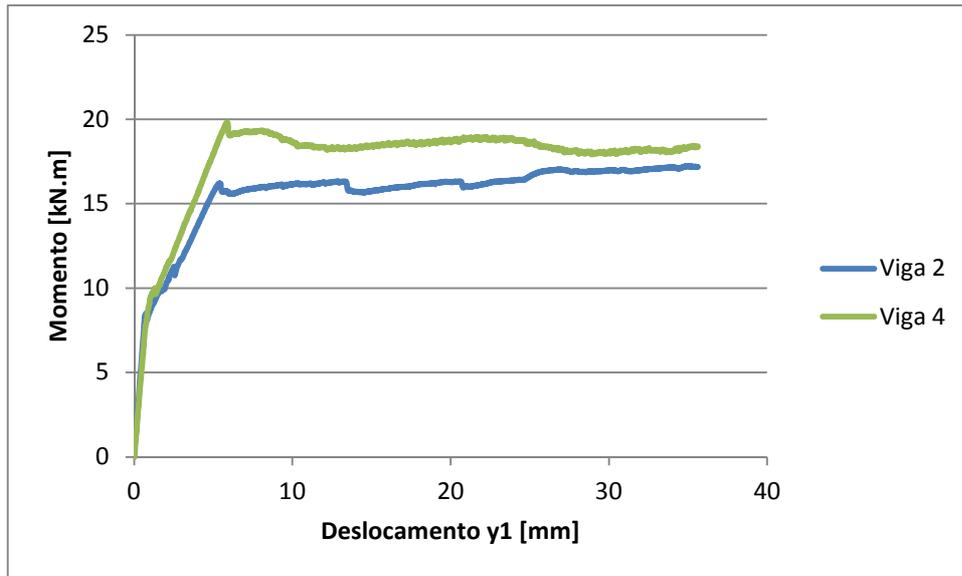


Fig. 46 – Comparação dos diagramas Momento-y1 das vigas 2 e 4

O Quadro 38 apresenta um resumo dos valores dos Momentos obtidos:

Quadro 38 – Resumo dos valores dos Momentos das vigas 2 e 4

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Vigas	Momento de Fendilhação, M_{cr} [kN.m]	Momento de Cedência das armaduras, M_{ry} [kN.m]	Momento Residual, M_{ru} [kN.m]
0	2	8,30	16,22	≈17,00
39,3	4	9,71	19,82	≈18,00
Benefício das fibras [%]		14,1	22,2	5,9

Ou seja, por análise da Figura 46 e do Quadro 39, pode-se constatar que a presença de fibras aumentou o Momento de Fendilhação (14,1%), o Momento associado à entrada em cedência das armaduras (22,2%) e ainda o Momento Residual (5,9%).

3.3.3. ENSAIOS COM VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE DIÂMETRO 6 MM

Foram preparadas 4 séries de 3 vigas cada uma, com diferentes dosagens de fibras e igual armadura ordinária (3Φ6). As referências das vigas e as suas dimensões reais constam no Quadro 39.

Quadro 39 – Referências (das vigas e composições) e dimensões reais das vigas, para as vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Referência da viga	<i>b</i> [m]	<i>h</i> [m]	<i>d</i> [m]	<i>d</i> _{médio} [m]
19,6	10	0,152	0,228	0,203	0,204
	11	0,152	0,226	0,208	
	12	0,154	0,226	0,202	
39,3	7	0,154	0,226	0,205	0,202
	8	0,151	0,224	0,200	
	9	0,150	0,227	0,200	
58,9	13	0,152	0,226	0,211	0,205
	14	0,150	0,226	0,207	
	15	0,152	0,227	0,198	

3.3.3.1. Vigas 10, 11 e 12 (3Φ6; Dosagem de fibras = 19,6 kg/m³)

Estas vigas foram realizadas com o betão da Composição 3, que corresponde às seguintes características:

$$f_{c,cil} = 63,0 \text{ MPa}; f_{ct,direta} = 3,55 \text{ MPa}; E = 38000 \text{ MPa};$$

Dosagem de Fibras = 19,6 kg/m³; Armadura ordinária: 3Φ6

Na Figura 47 apresenta-se o gráfico Força F - Deslocamento y_1 das vigas com $19,6 \text{ kg/m}^3$ de fibras e varões de aço de 6 mm de diâmetro:

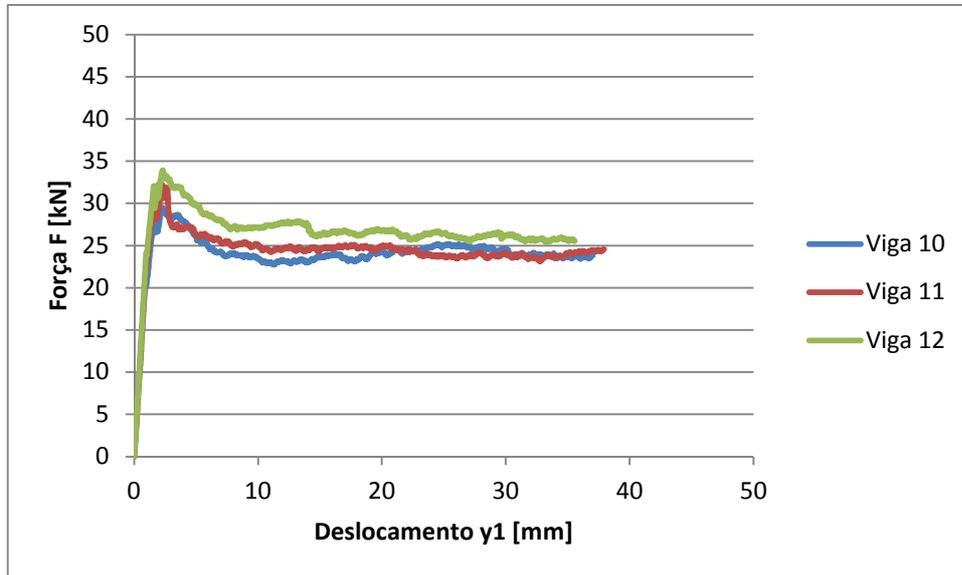


Fig. 47 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com $19,6 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Quadro 40 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com $19,6 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	Ocorrência da 1ª fenda		Cedência das armaduras	
	F_{cr}	δ_{Fcr}	F_{ry}	δ_{Fry}
Viga 10	20,94	0,90	29,49	2,32
Viga 11	20,65	0,85	32,21	2,26
Viga 12	24,11	0,97	33,90	2,30
Média	21,90	0,91	31,87	2,29

As Figuras 48, 49 e 50 apresentam a forma de rotura das vigas 10, 11 e 12, respetivamente:



Fig.48 – Forma de rotura da viga 10



Fig. 49 – Forma de rotura da viga 11



Fig. 50 – Forma de rotura da viga 12

Constata-se que a 1ª fenda ocorre para uma tensão máxima de tração no betão com os seguintes valores calculados no Quadro 41:

Quadro 41 - Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com $19,6 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	F_{cr} [kN]	$M_{cr} = 0,3 \times F_{cr}$ [kN.m]	b [m]	h [m]	$\sigma_t = (M_{cr}/(b \times h^2)) \times 6$ [MPa]
10	20,94	6,28	0,152	0,228	4,834
11	20,65	6,20	0,152	0,226	4,852
12	24,11	7,23	0,154	0,226	5,664

Identificando nos gráficos as Forças de Cedência das armaduras (F_{ry}), obtém-se:

Quadro 42 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras para as vigas com $19,6 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	Força de Cedência das armaduras, F_{ry} [kN]	Momento de Cedência das armaduras, M_{ry} [kN.m]
10	29,49	8,85
11	32,21	9,66
12	33,90	10,17

3.3.3.2. Vigas 7, 8 e 9 ($3\Phi 6$; Dosagem de fibras = $39,3 \text{ kg/m}^3$)

Estas vigas foram realizadas com o betão da Composição 2, que corresponde às seguintes características:

$$f_{c,cil} = 62,8 \text{ MPa}; f_{ct,direta} = \text{desconhecido}; E = 38100 \text{ MPa};$$

Dosagem de Fibras = $39,3 \text{ kg/m}^3$; Armadura ordinária: $3\Phi 6$

Na Figura 51 apresenta-se o gráfico Força F - Deslocamento y_1 das vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e varões de aço de 6 mm de diâmetro:

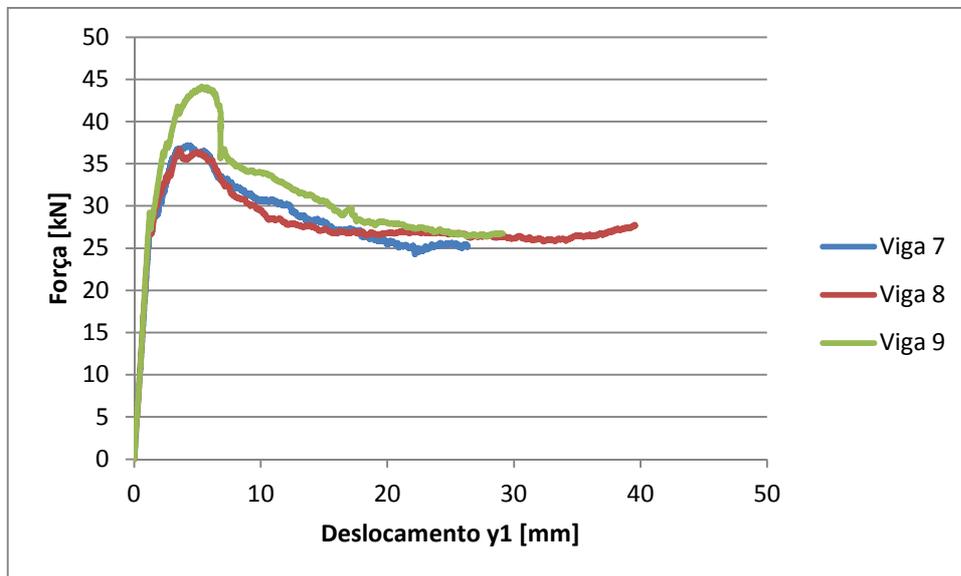


Fig. 51 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Quadro 43 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	Ocorrência da 1ª fenda		Cedência das armaduras	
	F_{cr}	δ_{Fcr}	F_{ry}	δ_{Fry}
Viga 7	27,94	1,31	37,20	4,21
Viga 8	28,62	1,29	36,70	3,61
Viga 9	29,2	1,21	44,14	5,33
Média	28,59	1,27	39,35	4,38

As Figuras 52, 53 e 54 apresentam a forma de rotura das vigas 7, 8 e 9, respetivamente:



Fig. 52 – Forma de rotura da viga 7



Fig. 53 – Forma de rotura da viga 8



Fig. 54 – Forma de rotura da viga 9

Constata-se que a 1ª fenda ocorre para uma tensão máxima de tração no betão com os seguintes valores calculados no Quadro 44:

Quadro 44 - Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	F_{cr} [kN]	$M_{cr} = 0,3 \times F_{cr}$ [kN.m]	b [m]	h [m]	$\sigma_t = (M_{cr}/(b \times h^2)) \times 6$ [MPa]
7	27,94	8,38	0,154	0,226	6,564
8	28,62	8,59	0,151	0,224	6,845
9	29,20	8,76	0,150	0,227	6,800

Identificando nos gráficos as Forças de Cedência das armaduras (F_{ry}), obtém-se:

Quadro 45 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras para as vigas com $39,3 \text{ kg/m}^3$ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	Força de Cedência das armaduras, F_{ry} [kN]	Momento de Cedência das armaduras, M_{ry} [kN.m]
7	37,20	11,16
8	36,70	11,01
9	44,14	13,24

3.3.3.3. Vigas 13, 14 e 15 (3Φ6; Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³)

Estas vigas foram realizadas com o betão da Composição 4, que corresponde às seguintes características:

$$f_{c,cil} = 63,0 \text{ MPa}; f_{ct,direta} = 3,47 \text{ MPa}; E = 37950 \text{ MPa};$$

Dosagem de Fibras = 58,9 kg/m³; Armadura ordinária: 3Φ6

Na Figura 55 apresenta-se o gráfico Força F - Deslocamento y1 das vigas com 58,9 kg/m³ de fibras e varões de aço de 6 mm de diâmetro:

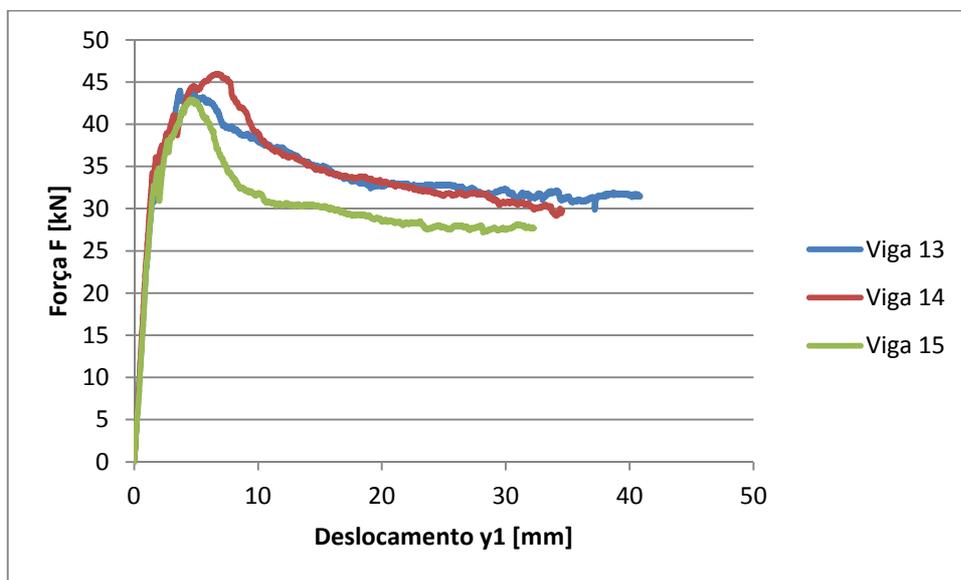


Fig. 55 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com 58,9 kg/m³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Quadro 46 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da entrada em cedência das armaduras, para as vigas com 58,9 kg/m³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	Ocorrência da 1ª fenda		Cedência das armaduras	
	F_{cr}	δ_{Fcr}	F_{ry}	δ_{Fry}
Viga 13	31,63	1,50	43,78	4,74
Viga 14	34,28	1,47	45,98	6,69
Viga 15	32,75	1,59	42,93	4,52
Média	32,89	1,52	44,23	5,32

As Figuras 56, 57 e 58 apresentam a forma de rotura das vigas 13, 14 e 15, respetivamente:



Fig. 56 – Forma de rotura da viga 13



Fig. 57 – Forma de rotura da viga 14



Fig. 58 – Forma de rotura da viga 15

Constata-se que a 1ª fenda ocorre para uma tensão máxima de tração no betão com os seguintes valores calculados no Quadro 47:

Quadro 47 - Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com 58,9 kg/m³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	F_{cr} [kN]	$M_{cr} = 0,3 \times F_{cr}$ [kN.m]	b [m]	h [m]	$\sigma_t = (M_{cr}/(b \times h^2)) \times 6$ [MPa]
13	31,63	9,49	0,152	0,226	7,431
14	34,28	10,28	0,150	0,226	8,054
15	32,75	9,83	0,152	0,227	7,627

Identificando nos gráficos as Forças de Cedência das armaduras (F_{ry}), obtém-se:

Quadro 48 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras para as vigas com 58,9 kg/m³ de fibras e com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	Força de Cedência das armaduras, F_{ry} [kN]	Momento de Cedência das armaduras, M_{ry} [kN.m]
13	43,78	13,13
14	45,98	13,79
15	42,93	12,88

3.3.3.4. Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ6 e com diferentes dosagens de fibras

O Quadro 49 apresenta a média das tensões de tração máximas no betão no instante de fendilhação:

Quadro 49 – Cálculo da média das tensões máximas de tração no betão no instante de fendilhação para as vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Vigas	Dosagem de fibras [kg/m ³]	Tensão máxima de tração no betão no instante da fendilhação [MPa]	Média das tensões máximas de tração no betão no instante da fendilhação [MPa]
10	19,6	4,834	5,117
11		4,852	
12		5,664	
7	39,3	6,564	6,736
8		6,845	
9		6,800	
13	58,9	7,431	7,704
14		8,054	
15		7,627	

Assim, no Quadro 50 apresenta-se o benefício do aumento da dosagem de fibras nas tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção das vigas:

Quadro 50 – Benefício do aumento da dosagem de fibras nas tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção das vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Média das tensões de tração máximas, σ_t [MPa]	Benefício do aumento da dosagem de fibras em σ_t
19,6	5,117	Base
39,3	6,736	+ 31,6 %
58,9	7,704	+ 50,6 %

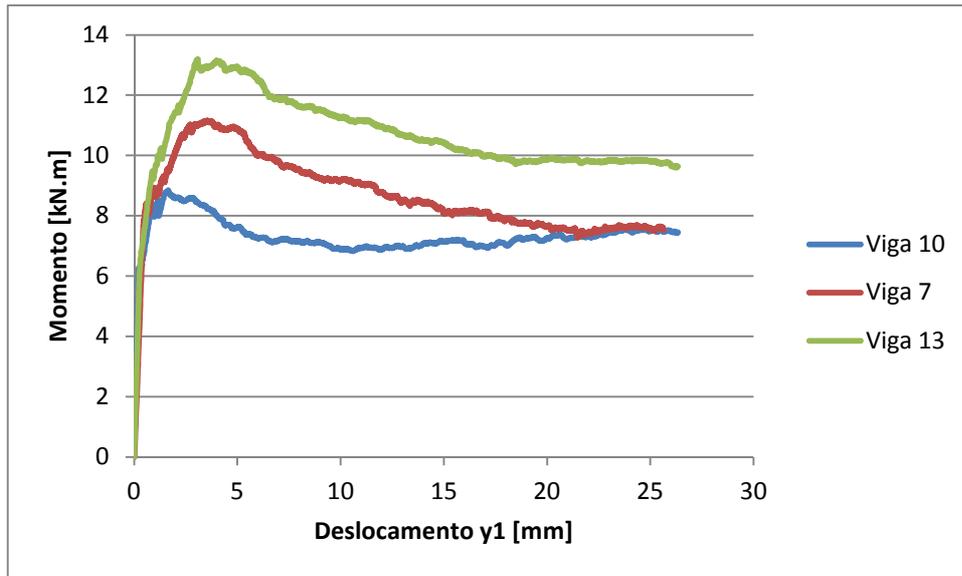
O Quadro 51 apresenta o Momento de Cedência das armaduras calculado a partir dos ensaios, bem como o benefício do aumento da dosagem de fibras sobre o mesmo.

Quadro 51 – Cálculo do Momento de Cedência das armaduras a partir dos ensaios e benefício do aumento da dosagem de fibras sobre o mesmo, para as vigas com varões de aço de 6 mm de diâmetro

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Vigas	F_{ry} [kN]	M_{ry} [kN.m]	$M_{ry,med}$ [kN.m]	Benefício do aumento da dosagem de fibras em $M_{ry,med}$
19,6	10	29,49	8,85	9,56	Base
	11	32,21	9,66		
	12	33,90	10,17		
39,3	7	37,20	11,16	11,80	+23,47 %
	8	36,70	11,01		
	9	44,14	13,24		
58,9	13	43,78	13,13	13,27	+38,80 %
	14	45,98	13,79		
	15	42,93	12,88		

A Figura 59 apresenta a comparação dos diagramas Momento-y1 das seguintes vigas:

- viga 10 (viga que parece ter o comportamento mais representativo em termos de F_{ry} , F_{cr} e F_{ru} da série respetiva, ou seja, dosagem de fibras = 19,6 kg/m³);
- viga 7 (viga que parece ter o comportamento mais representativo em termos de F_{ry} , F_{cr} e F_{ru} da série respetiva, ou seja, dosagem de fibras = 39,3 kg/m³);
- viga 13 (viga que parece ter o comportamento mais representativo em termos de F_{ry} , F_{cr} e F_{ru} da série respetiva, ou seja, dosagem de fibras = 58,9 kg/m³).

Fig. 59 – Comparação dos diagramas Momento- y_1 das vigas 10,7 e 13

O Quadro 52 apresenta um resumo dos valores dos Momentos obtidos:

Quadro 52 – Resumo dos valores dos Momentos das vigas 10, 7 e 13

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Vigas	Momento de Fendilhação, M_{cr} [kN.m]	Momento de Cedência das armaduras, M_{max} [kN.m]	Momento Residual, M_{ru} [kN.m]
19,6	10	6,28	8,85	≈ 7,5
39,3	7	8,38	11,16	≈ 7,5
58,9	13	9,49	13,13	≈ 9,7

O Quadro 53 apresenta o benefício do aumento da dosagem de fibras nos Momentos de Fendilhação, de Cedência das armaduras e Residual:

Quadro 53 – Benefício das fibras nos valores dos Momentos de Fendilhação, de Cedência das armaduras e Residual [%]

Dosagem de fibras [kg/m ³]	Vigas	Momento de Fendilhação, M_{cr} [kN.m]	Momento de Cedência das armaduras, $M_{r,y}$ [kN.m]	Momento Residual, M_{ru} [kN.m]
19,6	10	Base	Base	Base
39,3	7	+ 33,4 %	+ 26,1 %	+ 0 %
58,9	13	+ 51,1 %	+ 48,4 %	+ 29,3 %

3.3.4. ENSAIOS COM VIGAS SEM ARMADURA ORDINÁRIA

Foi preparada uma série de 3 vigas com $58,9 \text{ kg/m}^3$ de fibras, sem varões de aço. As referências (das vigas e da composição) e as dimensões reais das vigas constam no Quadro 54:

Quadro 54 – Características da seção transversal das vigas com $58,9 \text{ kg/m}^3$ de fibras e sem armadura ordinária

Dosagem de fibras [kg/m^3]	Referência da viga	b [m]	h [m]
58,9	16	0,152	0,227
	17	0,153	0,228
	18	0,153	0,226

3.3.4.1. Vigas 16, 17 e 18 (Sem armadura ordinária; Dosagem de fibras = $58,9 \text{ kg/m}^3$)

Estas vigas foram realizadas com o betão da Composição 4, que corresponde às seguintes características:

$$f_{c,cil} = 63,0 \text{ MPa}; f_{ct,direta} = 3,47 \text{ MPa}; E = 37950 \text{ MPa};$$

Dosagem de Fibras = $58,9 \text{ kg/m}^3$; Sem armadura ordinária

Na Figura 60 apresenta-se o gráfico Força F - Deslocamento y_1 das vigas com $58,9 \text{ kg/m}^3$ de fibras e sem varões de aço:

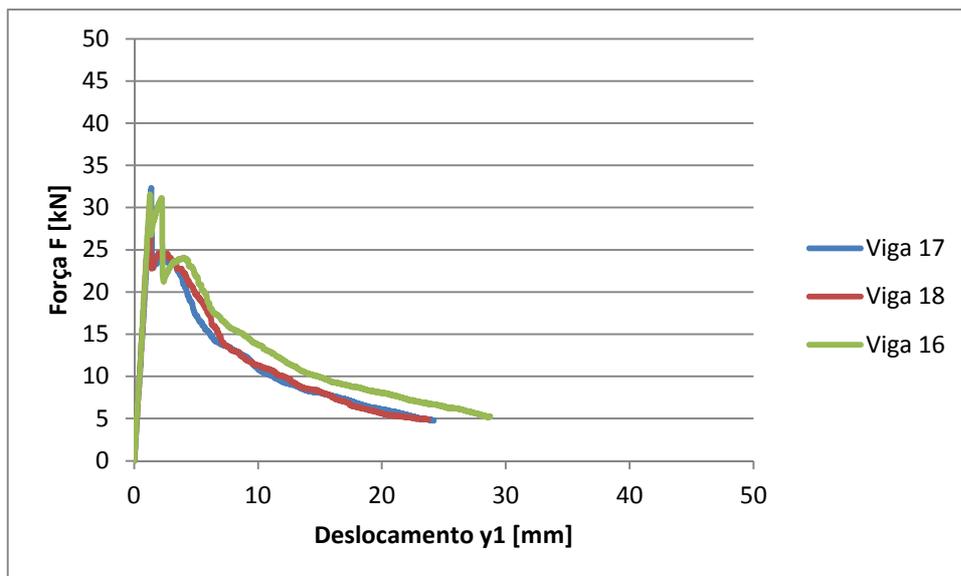


Fig. 60 – Comparação dos gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente para as vigas com $58,9 \text{ kg/m}^3$ de fibras e sem varões de aço

Quadro 55 – Valores da Força e do Deslocamento experimentais, aquando da 1ª fenda e da fendilhação, para as vigas com 58,9 kg/m³ de fibras e sem armadura ordinária

Vigas	Fendilhação	
	F_{cr}	δ_{Fcr}
Viga 16	31,55	1,29
Viga 17	32,32	1,37
Viga 18	30,97	1,27
Média	31,61	1,31

As Figuras 61, 62 e 63 apresentam a forma de rotura das vigas 16, 17 e 18, respetivamente:



Fig. 61 – Forma de rotura da viga 16



Fig. 62 – Forma de rotura da viga 17



Fig. 63 – Forma de rotura da viga 18

Constata-se que a 1ª fenda ocorre para uma tensão máxima de tração no betão com os seguintes valores calculados no Quadro 56:

Quadro 56 - Cálculo da tensão máxima de tração no betão para as vigas com 58,9 kg/m³ de fibras e sem armadura ordinária

Vigas	F_{cr} [kN]	$M_{cr} = 0,3 \times F_{cr}$ [kN.m]	b [m]	h [m]	$\sigma_t = (M_{cr}/(b \times h^2)) \times 6$ [MPa]
16	31,55	9,47	0,152	0,227	7,254
17	32,32	9,70	0,153	0,228	7,317
18	30,97	9,29	0,153	0,226	7,133

3.4. INFORMAÇÃO ADICIONAL RELATIVA AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

No Anexo VII encontram-se os diagramas Força-Deslocamento, Força-Deslocamento médio dos LVDT e Momento-Curvatura, obtidos a partir dos ensaios de flexão de todas as vigas.

No “Relatório interno de ensaio de diversas vigas com BRF”, elaborado por Lima em 2012, encontra-se informação adicional, nomeadamente no que diz respeito a:

- fotografias no LEMC durante a realização das moldagens;
- fotografias dos vários ensaios realizados no LEMC;
- tabelas com a demonstração da obtenção dos diversos gráficos obtidos.

3.5. CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Em relação aos ensaios experimentais, deve salientar-se que assumiu-se a viga metálica que distribui F (da Figura 37) de rigidez infinita, o que não é completamente rigoroso. Assim, os deslocamentos y_1 e y_2 (da Figura 37) medidos não são exatamente os reais, embora estejam muito próximos da realidade.

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 8 mm:

- A introdução de fibras (com uma dosagem de $39,3 \text{ kg/m}^3$) traduziu-se numa melhoria de aproximadamente 15,5 % nas tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção (14,47% no Momento de Fendilhação), de 21,3 % no Momento de Cedência das armaduras e de 5,9 % no Momento Residual.

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 6 mm:

- Ocorre um acréscimo das tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção de 31,6% aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$ e de 14,4% aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$;
- Ocorre um acréscimo do Momento de Cedência das armaduras de 23,47 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$ e de 12,46 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$;
- Em relação ao Momento Residual, não se verificou um aumento significativo aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$, mas verificou-se um aumento de aproximadamente 29,3 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$.

Note-se portanto que, analisando os resultados experimentais, a introdução/aumento da dosagem de fibras tem sempre um efeito benéfico nos Momentos de Fendilhação, Cedência das armaduras e Residual.

4

RILEM TC 162-TDF

4.1. INTRODUÇÃO

A regulamentação relacionada com o betão estrutural apresenta disposições aplicáveis ao BRFA. O Model Code apresenta uma seção para tratar as estruturas constituídas por BRFA. O regulamento espanhol EHE-08 também desenvolve esta matéria. Finalmente, o RILEM TC-162-TDF (2003) também define regras para tratar o projeto de elementos estruturais com BRFA. Neste trabalho seguiremos este último.

O RILEM é um comité internacional de especialistas que procura desenvolver o conhecimento científico em estruturas, sistemas e materiais de construção. Um dos objetivos do RILEM é avaliar dados de pesquisas científicas e publicar as suas recomendações como normas. O método σ - ϵ é um método de dimensionamento de BRFA. [Abid, Franzén, 2011]

Neste capítulo serão apresentados os resultados teóricos dos Momentos de Fendilhação, Cedência de armaduras e Residual e da Resistência ao Corte em Estado Limite Último de todas as vigas que foram ensaiadas, segundo o RILEM TC 162-TDF (2003). Também se apresenta o cálculo da Largura de Fendas em Estado Limite de Serviço, admitindo uma altura útil fixa para todas as vigas para se poder proceder a uma comparação confiável. Para a explicação do método utilizado pelo RILEM TC 162-TDF (2003), a presente dissertação baseou-se na tese de mestrado realizada por Abid e Franzén em 2011.

4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Foi determinada a resistência à compressão do betão, através dos ensaios dos cilindros (ver ponto 3.2.2.1). Se só fosse conhecida essa resistência conhecida, podia-se estimar a resistência à tração por flexão média e característica do BRFA fazendo os seguintes passos:

- Calcula-se a resistência à tração média (f_{fctm}) a partir da resistência à compressão do cilindro do betão (f_{fck}):

$$f_{fctm} = 0,3 \times (f_{fck})^{2/3} \quad (4)$$

- Calcula-se o valor característico da resistência à tração (f_{fctk}):

$$f_{fctk} = 0,7 \times f_{fctm} \quad (5)$$

- Calcula-se a resistência à tração (f_{fct}) a partir da resistência à tração por flexão ($f_{fct,fl}$):

$$f_{fct} = 0,6 \times f_{fct,fl} \quad (6)$$

- Calcula-se o valor característico da resistência à tração por flexão a partir da resistência à tração por flexão média ($f_{fctm,fl}$):

$$f_{fctk,fl} = 0,7 \times f_{fctm,fl} \quad (7)$$

No entanto, foram utilizados os resultados da resistência à tração por flexão que se obteve através do Momento de Fendilhação dos ensaios experimentais.

4.3. RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO

A resistência residual à tração é caracterizada pelos valores de $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$ correspondentes a deformações a meio vão $\delta_{R,1} = 0,46 \text{ mm}$ e $\delta_{R,4} = 3,00 \text{ mm}$, em ensaio realizado sobre prismas, de acordo com a norma EN 14651.

$$f_{R,i} = 3 \times \frac{F_{R,i} \times L}{2 \times b \times h_{sp}^2} \quad (8)$$

onde:

$f_{R,i}$: resistência à tração residual correspondente a $\delta_{R,i}$;

$F_{R,i}$: carga correspondente a $\delta_{R,i}$;

$\delta_{R,i}$: deformação a meio vão;

L : vão do provete;

b : largura da espécie;

h_{sp} : altura dos prismas utilizados para a obtenção da resistência à tração por flexão.

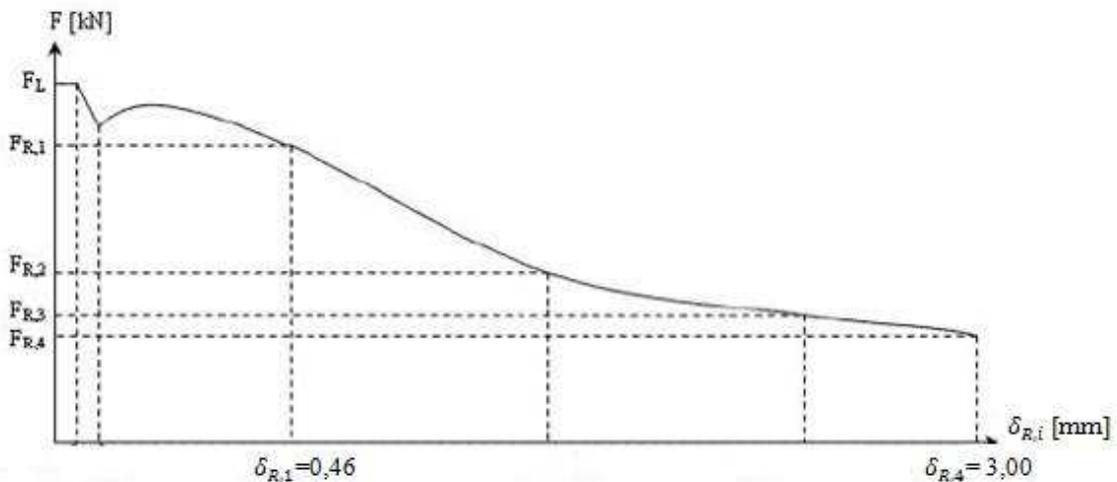


Fig. 64 – Diagrama Carga-Deformação a meio vão, usado para obter a Resistência Residual à Tração por Flexão. Fonte: RILEM TC-162-TDF (2003)

4.4. DIMENSIONAMENTO EM ESTADO LIMITE ÚLTIMO

4.4.1. GENERALIDADES

Para tal dimensionamento, o RILEM TC-162-TDF faz as seguintes suposições:

- Seções planas mantêm-se planas;
- As tensões no BRFA em tração, bem como em compressão, são obtidas através do diagrama tensão-extensão mostrado na Figura 65;
- Para seções transversais submetidas a esforço axial puro de compressão, a extensão de compressão no BRFA fica limitada a -2 ‰. Para seções transversais não completamente em compressão, a extensão de compressão limite é -3.5 ‰. Nas situações intermédias, o diagrama das extensões é definido assumindo que a extensão é -2 ‰ a (3/7) da altura da zona comprimida, medida a partir da face mais comprimida.
- Para BRFA em que é adicionada armadura ordinária realizada com varões de aço, a extensão é limitada a 25‰ na posição do reforço;
- Para garantir capacidade de ancoragem suficiente para as fibras de aço, a máxima deformação no estado limite último fica limitada a 3.5 mm. Se existirem larguras de fendas superiores a 3,5 mm, a resistência à tração residual correspondente a essas larguras de fendas e medida durante o ensaio de flexão tem de ser usada para calcular σ_3 . É recomendável que este valor, que substitui $f_{R,4}$ não seja menor do que 1N/mm^2 .

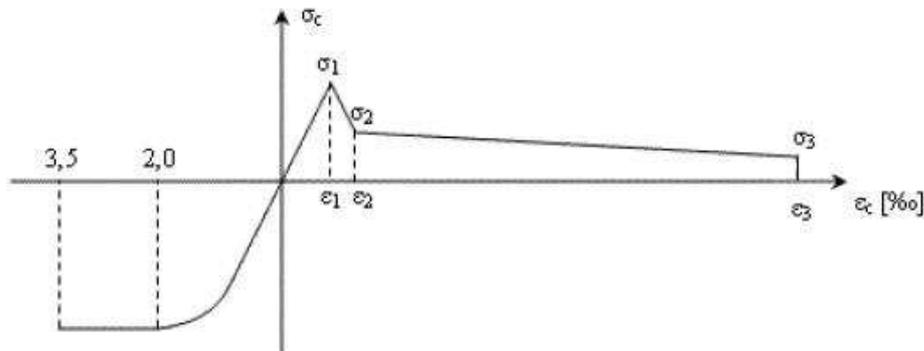


Fig. 65 – Diagrama tensão-extensão para a contribuição das fibras. Fonte: RILEM TC-162-TDF (2003)

Os valores da Figura 65 são calculados da seguinte forma:

$$\sigma_1 = 0,7 \times f_{fctm,fl} \times (1,6 - d) \quad (9)$$

onde:

$f_{fctm,fl}$: resistência média à tração por flexão do betão;

d : altura útil, em metros.

$$\sigma_2 = 0,45 \times f_{R1} \times k_h \quad (10)$$

onde:

k_h : fator escala;

$f_{R,1}$: Resistência residual à tração para deformação de 0,46 mm;

$$\sigma_3 = 0,37 \times f_{R,4} \times k_h \quad (11)$$

onde:

k_h : fator escala;

$f_{R,4}$: Resistência residual à tração para deformação de 3,00 mm;

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_c} \quad (12)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,1\text{‰} \quad (13)$$

$$\varepsilon_3 = 25\text{‰} \quad (14)$$

O fator escala k_h encontrado nas expressões de σ_1 e σ_2 procura fazer a compensação da capacidade de carga que foi detetada nos resultados do dimensionamento em comparação com os ensaios experimentais. Isto acontece devido à alteração das propriedades do material nas diversas amostras e/ou aspetos técnicos. Este fator é estimado segundo a Figura 66:

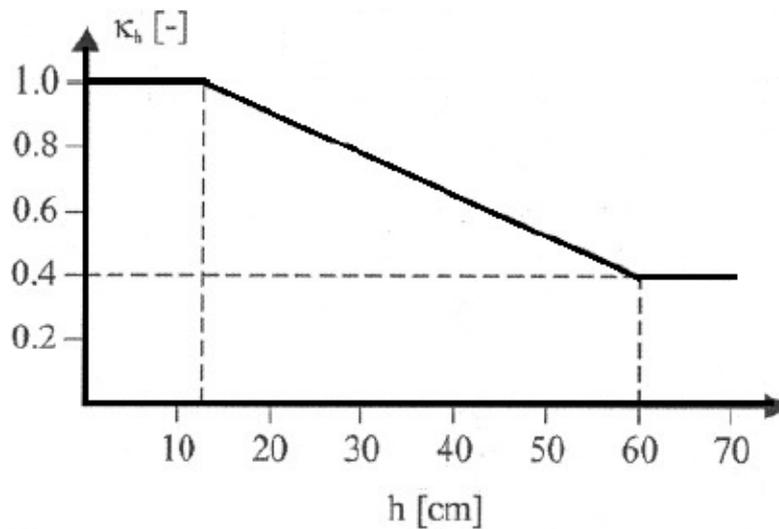


Fig. 66 – Fator de escala k_h . Fonte: RILEM TC-162-TDF (2003)

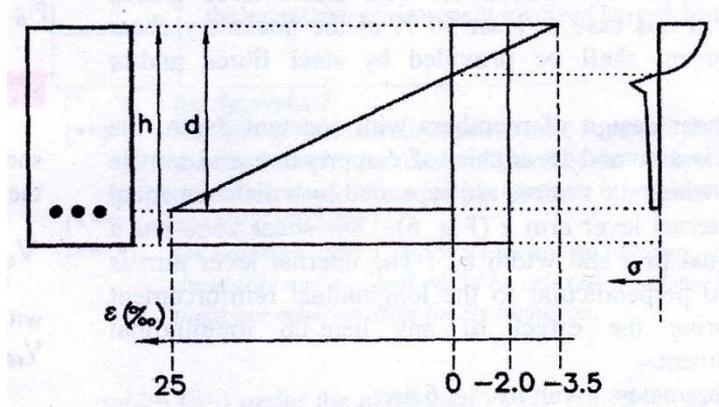


Fig. 67 – Distribuição das tensões e extensões. Fonte: RILEM TC-162-TDF (2003)

4.4.2. VALORES DOS MOMENTOS

Foi calculado o Momento de Fendilhação apenas para as séries constituídas exclusivamente por fibras (série 6), uma vez que não é claro o cálculo do Momento de Fendilhação para as séries constituídas simultaneamente por armadura ordinária e fibras.

O Momento de Fendilhação pode ser calculado por:

$$M_{cr} = W_1 \times f_{ctm} \quad (15)$$

em que:

W_1 : módulo de flexão, dado pela expressão:

$$W_1 = \frac{b \times h^2}{6} \quad (16)$$

sendo b a base da viga e h a altura.

Os Momentos de Cedência das Armaduras (M_{Ry}) e Residual (M_{ru}) foram calculados para todas as séries de vigas (excetuando, como é evidente, o caso de M_{Ry} para a série 6, pois esta série não apresenta armadura ordinária).

Em relação aos Momentos de Cedência das Armaduras e Residual, pode-se distinguir para o caso das vigas sem fibras ou com fibras:

- **Sem fibras:** calculados por análise da seção;
- **Com fibras:** calculados pela Figura 65 e pela Figura 67. Neste caso, calculou-se o bloco resultante da tensão de tração da fibra e o eixo neutro pelo equilíbrio das forças, segundo a Figura 68.

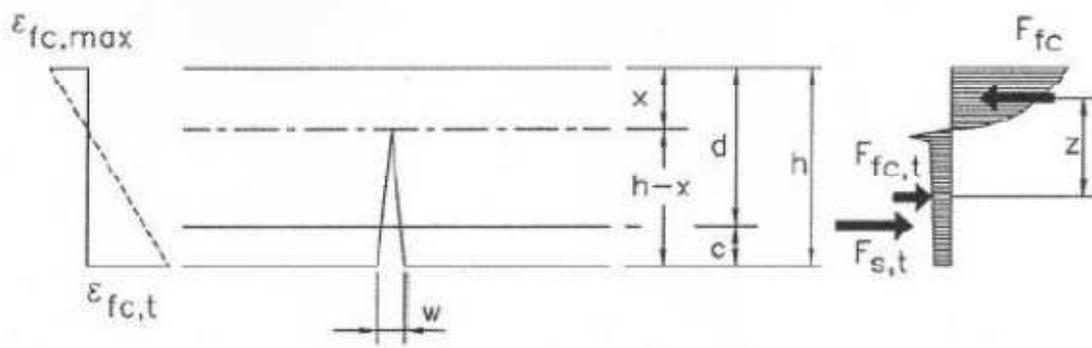


Fig. 68 – Relação tensões-extensões para o BRFA com armadura ordinária. Fonte: Abid,A., Franzén,K. (2011)

Sem fibras:

$$M_{Ry} = A_s \times f_{sy} \times (d - \beta \times x) \quad (17)$$

$$M_{Ru} = A_s \times f_{sy} \times (d - \beta \times x) \quad (18)$$

onde:

f_{sy} : tensão de cedência da armadura ordinária;

$\beta \times x$: distância desde o topo da viga até ao centro da zona comprimida do betão;

A_s : área dos varões de armadura ordinária;

d : altura efetiva;

x : distância desde o topo da viga até ao eixo neutro.

Com fibras:

$$M_{Ry} = A_s \times f_{sy} \times \left(d - \frac{2}{3} \times x \right) + F_{fc,t} \times (h - x) \times b \times z \quad (19)$$

$$M_{Ru} = A_s \times f_{sy} \times (d - \beta \times x) + F_{fc,t} \times (h - x) \times b \times z \quad (20)$$

onde:

$F_{fc,t}$: tensão de tração residual resultante das fibras;

z : braço interno (ver Figura 68), dado pela expressão:

$$z = [\beta \times x + x_T \times (h - x)] \quad (21)$$

x_T : centro de gravidade para a zona de tração da tensão da fibra, dada como uma percentagem da altura total da zona traccionada;

f_{sy} : tensão de cedência da armadura ordinária;

$\beta \times x$: distância do eixo neutro da viga à posição da resultante das tensões de compressões no betão;

A_s : área dos varões de armadura ordinária;

d : altura útil;

h : altura da viga;

x : distância desde o topo da viga até ao eixo neutro

Deve-se referir que se as vigas não tiverem varões de aço (casos das viga 16, 17 e 18), os Momentos de Cedência das Armaduras e Residual são determinados exatamente da mesma maneira como no caso de existirem esses varões mas excluindo, como é evidente, a contribuição desses varões:

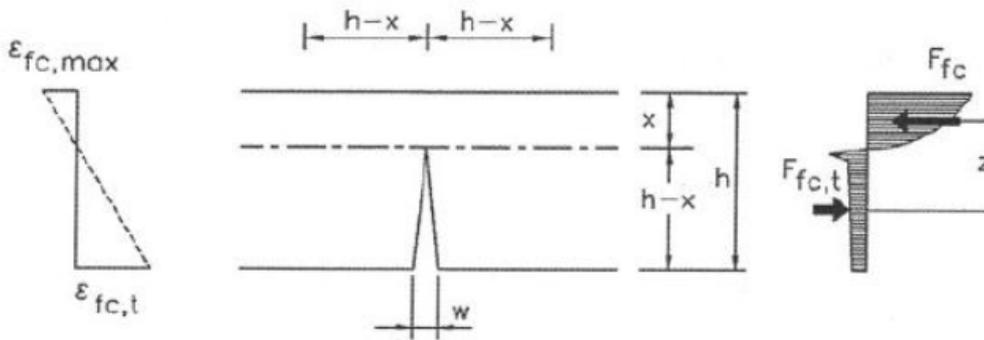


Fig. 69 – Distribuição tensões-extensões para as vigas sem armadura ordinária. Fonte: RILEM TC-162-TDF (2003)

4.4.3. RESISTÊNCIA AO CORTE

Segundo o RILEM TC-162-TDF (2003), a resistência ao corte é definida por:

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (22)$$

sendo:

V_{cd} : resistência ao corte para elementos sem armadura de esforço transversal;

V_{fd} : contributo das fibras para a resistência ao corte;

V_{wd} : contributo dos estribos ou barras inclinadas para a resistência ao corte.

4.4.3.1. Resistência ao Corte para elementos sem reforço ao corte (V_{cd})

$$V_{cd} = \left[0,12 \times k \times \left[100 \times \rho_1 \times f_{fck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b \times d \quad (23)$$

sendo:

k : fator escala. A sua expressão é:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (24)$$

d : altura útil em mm;

ρ_1 : Proporção do aço relativamente ao betão. A sua expressão é:

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b \times d} \leq 2\% \quad (25)$$

σ_{cp} : Considera os esforços de compressão (N_{sd}) na seção causadas por presença de esforço axial ou pré-esforço. A sua expressão é:

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \quad (26)$$

sendo:

N_{sd} : esforço axial causado por ações ou pré-esforço;

A_c : área da seção.

Note-se que, para as vigas em análise, na expressão de V_{cd} , $\sigma_{cp} = 0$ devido à ausência de esforços axiais.

4.4.3.2. Contributo das Fibras para a Resistência ao Corte (V_{fd})

$$V_{fd} = 0,7 \times k_f \times k_1 \times \tau_{fd} \times b \times d \quad (27)$$

sendo:

k_1 : fator escala. É dado pela expressão:

$$k_1 = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (28)$$

d : altura útil em mm;

τ_{fd} : valor de dimensionamento do incremento na resistência ao corte causado pelas fibras de aço. É dado pela expressão:

$$\tau_{fd} = 0,12 \times f_{Rk,4} \quad (29)$$

k_f : coeficiente que atende o contributo dos banzos na seção em T. É dado pela expressão:

$$k_f = 1 + n \times \left(\frac{h_f}{b_w}\right) \times \left(\frac{h_f}{d}\right) \leq 1,5 \quad (30)$$

sendo:

h_f : espessura dos banzos;

b_w : largura da alma.

$$n = \frac{b_f - b_w}{h_f} \leq \frac{3 \times b_w}{h_f} \leq 3 \quad (31)$$

onde:

b_f : largura dos banzos.

4.4.3.3. Contributo dos estribos ou barras inclinadas para a Resistência ao Corte (V_{wd})

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \times 0,9 \times d \times f_{ywd} \times (1 + \cot \alpha) \times \sin \alpha \quad (32)$$

sendo:

s : espaçamento entre o reforço ao corte;

α : ângulo do reforço ao corte;

f_{ywd} : tensão de cedência;

A_{sw} : área do reforço ao corte.

$V_{wd} = 0$ devido à inexistência de estribos ou varões inclinados.

Então, a expressão da resistência ao corte fica:

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} \quad (33)$$

Note-se que não há nenhum cálculo de dimensionamento de resistência ao corte aprovado nos seguintes casos:

- Inexistência de varões de aço;
- Inexistência de zona comprimida.

Sendo assim, não foi calculada a resistência ao corte para as vigas 16, 17 e 18.

4.5. DIMENSIONAMENTO PARA ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

O valor característico da largura de fendas (w_k) pode ser calculado pela expressão 34,

$$w_k = \beta \times s_{rm} \times \varepsilon_{sm} \quad (34)$$

4.5.1. COEFICIENTE β

O coeficiente β depende das condições de carga. O Quadro 57 indica os seus valores.

Quadro 57 – Valores do Coeficiente β

	Valor	Situações
β	1,7	Cargas que induzem fendas
	1,3	Deformações impedidas

4.5.2 EXTENSÃO MÉDIA DO AÇO DE REFORÇO, ε_{sm}

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \times \left[1 - \beta_1 \times \beta_2 \times \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \quad (35)$$

sendo:

σ_s : Tensão real na armadura de tração na seção fendilhada;

σ_{sr} : Tensão na armadura de tração no instante de início de formação da fenda;

β_1 : Coeficiente que atende às propriedades de aderência do aço (1.0 para varões com grande aderência e 0.5 para varões lisos);

β_2 : Coeficiente que atende a duração da carga (1.0 para cargas únicas pouco duradouras e 0.5 para cargas permanentes).

4.5.3. EXPRESSÃO DE S_{rm}

$$s_{rm} = \left(50 + 0,25 \times k_1 \times k_2 \times \frac{\phi_b}{\rho_r} \right) \times \left(\frac{50}{L/\phi} \right) \quad (36)$$

onde:

$\left(\frac{50}{L/\phi} \right) \leq 1$, em que L é o comprimento da fibra de aço (mm) e ϕ o diâmetro da fibra de aço (mm);

ϕ_b : diâmetro dos varões de aço. Quando forem usados vários diâmetros de varões numa seção, deve-se usar o diâmetro médio dos varões;

k_1 : coeficiente que atende às propriedades de aderência dos varões de aço. Assume o valor de 0,8 para varões de grande colagem e 1,6 para varões lisos;

k_2 : coeficiente que atende a distribuição das extensões. Assume o valor de 0.5 para flexão e 1.0 para tração pura;

ρ_r : relação entre a área de aço (A_s) e a área efetiva de betão ($A_{c,eff}$), dada pela expressão:

$$\rho_r = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (37)$$

O RILEM TC-162-TDF (2003) não faz nenhuma referência ao cálculo das larguras de fendas para vigas sem armadura ordinária.

Como se verifica, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003), a dosagem de fibras metálicas no BRFA não vai afetar significativamente o cálculo da largura de fendas. Assim, o único parâmetro que varia consideravelmente entre um betão com fibras e um betão sem fibras é $\left(\frac{50}{L/\phi}\right)$ na equação 36. Isto é, num betão sem fibras adota-se $\left(\frac{50}{L/\phi}\right) = 1$.

Assim, chega-se à conclusão que para duas vigas com a mesma seção e a mesma armadura ordinária, mas com dosagens de fibras diferentes, a viga com fibras (do tipo deste trabalho, ou seja, $L=60$ mm e $\phi=0,75$ mm) apresenta uma redução de largura de fendas de:

$$\frac{\left[1-\left(\frac{50}{L/\phi}\right)\right]}{1} = \frac{\left[1-\left(\frac{50}{60/0,75}\right)\right]}{1} = 0,375 = 37,5 \% \quad (38)$$

4.6. RESULTADOS DOS CÁLCULOS DO MOMENTO DE CEDÊNCIA DE ARMADURAS E MOMENTO RESIDUAL E DA RESISTÊNCIA AO CORTE DAS VIGAS, SEGUNDO O RILEM-TC-162-TDF (2003)

No Anexo VI apresentam-se três exemplos de cálculo:

- Viga de betão armado exclusivamente por armadura ordinária (viga 1);
- Viga de betão armado por fibras e armadura ordinária (viga 9);
- Viga de betão armado apenas com fibras (viga 18).

Não foi utilizado nenhum fator de segurança para fazer uma comparação direta com os resultados experimentais.

Os resultados obtidos para as restantes vigas podem ser encontrados no Relatório Interno de ensaio de diversas vigas com BRF, realizado por Lima em 2012.

4.6.1. CÁLCULO DO MOMENTO DE CEDÊNCIA DAS ARMADURAS, MOMENTO RESIDUAL E RESISTÊNCIA AO CORTE PARA AS VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE 8 MM DE DIÂMETRO

4.6.1.1. Vigas 1, 2 e 3 (3Φ8; Dosagem de fibras = 0 kg/m³)

Quadro 58 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 8 mm e sem fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Vigas	M_{ry} [kN.m]	M_{ru} [kN.m]	$V_{rd,3}$ [kN]
1	15,28	16,00	21,67
2	15,78	16,57	21,78
3	15,38	16,15	21,53
Média	15,48	16,24	21,66

4.6.1.2. Vigas 4, 5 e 6 (3Φ8; Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³)

Quadro 59 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 8 mm e com 39,3 kg/m³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Vigas	M_{ry} [kN.m]	M_{ru} [kN.m]	$V_{rd,3}$ [kN]
4	22,27	23,45	48,48
5	22,66	23,86	49,11
6	21,69	22,82	47,05
Média	22,21	23,38	48,21

4.6.1.3. Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ8 e com diferentes dosagens de fibras

Quadro 60 – Benefício da inclusão de fibras no Momento de Cedência das armaduras e Residual e na Resistência ao Corte, nas vigas com varões de diâmetro 8 mm, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	$M_{ry,med}$ [kN.m]	$M_{ru,med}$ [kN.m]	$V_{rd,3,med}$ [kN]
0	15,48	16,24	21,66
39,3	22,21	23,38	48,21
Benefício das fibras	+ 43,5 %	+ 44,0 %	+ 122,6 %

4.6.2. CÁLCULO DO MOMENTO DE CEDÊNCIA DAS ARMADURAS, MOMENTO RESIDUAL E RESISTÊNCIA AO CORTE PARA AS VIGAS COM VARÕES DE AÇO DE 6 MM DE DIÂMETRO

4.6.2.1. Vigas 10, 11 e 12 (3Φ6; Dosagem de fibras = 19,6 kg/m³)

Quadro 61 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e com 19,6 kg/m³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Vigas	M_{ry} [kN.m]	M_{ru} [kN.m]	$V_{rd,3}$ [kN]
10	9,16	9,67	25,82
11	9,27	9,79	26,17
12	9,14	9,65	26,12
Média	9,19	9,70	26,04

4.6.2.2. Vigas 7, 8 e 9 (3Φ6; Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³)

Quadro 62 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e com 39,3 kg/m³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Vigas	M_{ry} [kN.m]	M_{ru} [kN.m]	$V_{rd,3}$ [kN]
7	13,56	14,51	45,39
8	13,16	14,07	43,91
9	13,27	14,18	43,65
Média	13,33	14,25	44,32

4.6.2.3. Vigas 13, 14 e 15 (3Φ6; Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³)

Quadro 63 – Momentos de Cedência das armaduras e Residual e Resistência ao Corte, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e com 58,9 kg/m³ de fibras, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Vigas	M_{ry} [kN.m]	M_{ru} [kN.m]	$V_{rd,3}$ [kN]
13	13,65	14,58	43,54
14	13,44	14,34	42,57
15	13,33	14,19	41,86
Média	13,47	14,37	42,66

4.6.2.4. Comparação dos resultados obtidos nas vigas com 3Φ6 e com diferentes dosagens de fibras

Quadro 64 – Valores médios dos Momentos de Cedência das armaduras e Residual e da Resistência ao Corte, das vigas com varões de diâmetro 6 mm, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	$M_{ry,med}$ [kN.m]	$M_{ru,med}$ [kN.m]	$V_{rd,3,med}$ [kN]
19,6	9,19	9,70	26,04
39,3	13,33	14,25	44,32
58,9	13,47	14,37	42,66

Quadro 65 – Benefício do aumento da dosagem de fibras no Momento de Cedência das armaduras e Residual e na Resistência ao Corte, nas vigas com varões de diâmetro 6 mm, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	$M_{ry,med}$ [kN.m]	$M_{ru,med}$ [kN.m]	$V_{rd,3,med}$ [kN]
19,6	Base	Base	Base
39,3	+ 45,0 %	+ 46,9 %	+ 70,2 %
58,9	+ 46,6 %	+ 48,1 %	+ 63,8 %

4.6.3. CÁLCULO DO MOMENTO DE FENDILHAÇÃO E MOMENTO RESIDUAL PARA AS VIGAS SEM ARMADURA ORDINÁRIA

4.6.3.1. Vigas 16, 17 e 18 (Sem armadura ordinária; Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³)

Quadro 66 – Momentos de Fendilhação e Residual, para as vigas com varões de diâmetro 6 mm e sem armadura ordinária, segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Vigas	M_{cr} [kN.m]	M_{ru} [kN.m]
16	8,85	7,70
17	8,92	7,82
18	8,92	7,71
Média	8,90	7,74

4.7. CONCLUSÃO SOBRE OS CÁLCULOS EFETUADOS SEGUNDO O RILEM-TC-162-TDF

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 8 mm:

- A introdução de fibras (com uma dosagem de 39,3 kg/m³) traduziu-se numa melhoria de aproximadamente 43,5 % no Momento de Cedência das armaduras, de 44,0 % no Momento Residual e de 122,6 % na Resistência ao Corte;

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 6 mm:

- Ocorre um acréscimo do Momento de Cedência das armaduras de 45,0 % aquando do aumento de dosagem de fibras de 19,6 kg/m³ para 39,3 kg/m³ e de 1,1 % aquando do aumento de dosagem de fibras de 39,3 kg/m³ para 58,9 kg/m³;
- Ocorre um acréscimo do Momento Residual de 46,9 % aquando do aumento de dosagem de fibras de 19,6 kg/m³ para 39,3 kg/m³ e de 0,8 % aquando do aumento de dosagem de fibras de 39,3 kg/m³ para 58,9 kg/m³;
- Ocorre um acréscimo da Resistência ao Corte de 70,2 % aquando do aumento de dosagem de fibras de 19,6 kg/m³ para 39,3 kg/m³ e uma redução de 3,7 % aquando do aumento de dosagem de fibras de 39,3 kg/m³ para 58,9 kg/m³;

Para duas vigas com a mesma seção e a mesma armadura ordinária, mas com dosagens de fibras diferentes, a viga com fibras (do tipo deste trabalho, ou seja, $L= 60$ mm e $\phi= 0,75$ mm) apresenta uma redução de largura de fendas de 37,5 % comparativamente com a viga sem fibras.

5

Comparação entre os resultados experimentais e do RILEM TC 162-TDF

5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo comparar os diversos momentos fletores obtidos através dos ensaios experimentais e os valores previsíveis pelo RILEM TC-162-TDF (2003), para as diversas vigas.

5.2. MOMENTO DE FENDILHAÇÃO

Quadro 67 – Comparação entre os valores dos Momentos de Fendilhação obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003), das vigas constituídas exclusivamente por fibras

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Série	Armadura Ordinária	Vigas	Momento de Fendilhação [kN.m]		Diferença entre resultados do RILEM TC-162-TDF e os experimentais [%]
				Experimental	RILEM TC-162-TDF	
58,9	6	0	16	9,47	8,85	- 6,6
			17	9,70	8,92	- 8,0
			18	9,29	8,92	- 4,0

Quadro 68 – Comparação entre os valores médios dos Momentos de Fendilhação, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003), das 3 vigas da série constituída exclusivamente por fibras

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Série	Armadura Ordinária	Momento de Fendilhação [kN.m]		Diferença entre resultados do RILEM TC-162-TDF e os experimentais [%]
			Experimental	RILEM TC-162-TDF	
58,9	6	0	9,49	8,90	- 6,2

5.3. MOMENTO DE CEDÊNCIA DAS ARMADURAS

Quadro 69 – Comparação entre os valores dos Momentos de Cedência das armaduras para cada viga, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Série	Armadura Ordinária	Vigas	Momento de Cedência das armaduras [kN.m]		Diferença entre resultados do RILEM TC-162-TDF e os experimentais [%]
				Experimental	RILEM TC-162-TDF	
0	1	3Φ8	1	14,78	15,28	+ 3,4
			2	16,22	15,78	- 2,7
			3	16,11	15,38	- 4,5
19,6	4	3Φ6	10	8,85	9,16	+ 3,5
			11	9,66	9,27	- 4,0
			12	10,17	9,14	-10,1
39,3	2	3Φ8	4	19,82	22,27	+12,4
			5	20,43	22,66	+ 10,9
			6	17,76	21,69	+ 22,1
	3	3Φ6	7	11,16	13,56	+21,5
			8	11,01	13,16	+ 19,5
			9	13,24	13,27	+ 0,2
58,9	5	3Φ6	13	13,13	13,65	+ 4,0
			14	13,79	13,44	- 2,5
			15	12,88	13,33	+ 3,5
	6	0	16	-	-	-
			17	-	-	-
			18	-	-	-

Quadro 70 – Comparação entre os valores médios dos Momentos de Cedência das armaduras das 3 vigas de cada série, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Série	Armadura Ordinária	Momento de Cedência das armaduras [kN.m]		Diferença entre resultados do RILEM TC-162-TDF e os experimentais [%]
			Experimental	RILEM TC-162-TDF	
0	1	3Φ8	15,70	15,48	- 1,4
19,6	4	3Φ6	9,56	9,19	- 3,9
39,3	2	3Φ8	19,34	22,21	+ 14,8
	3	3Φ6	11,80	13,33	+ 13,0
58,9	5	3Φ6	13,27	13,47	+ 1,5
	6	0	-	-	-

Pela análise dos valores obtidos, pode constatar-se uma grande concordância entre os valores experimentais e os previsíveis de acordo com os modelos de cálculo sugeridos pelo RILEM TC-162-TDF (2003).

5.4. MOMENTO RESIDUAL

Quadro 71 – Comparação entre os valores dos Momentos Residuais para cada viga, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Série	Armadura Ordinária	Vigas	Momento Residual [kN.m]		Diferença entre resultados do RILEM TC-162-TDF e os experimentais [%]
				Experimental	RILEM TC-162-TDF	
0	1	3Φ8	1	≈ 14,00	16,00	+ 14,3
			2	≈ 17,00	16,57	- 2,5
			3	≈ 17,00	16,15	- 5,0
19,6	4	3Φ6	10	≈ 7,50	9,67	+ 28,9
			11	≈ 7,25	9,79	+ 35,0
			12	≈ 8,00	9,65	+ 20,6
39,3	2	3Φ8	4	≈ 18,00	23,45	+ 30,3
			5	≈ 17,50	23,86	+ 36,3
			6	≈ 16,00	22,82	+ 42,6
	3	3Φ6	7	≈ 7,50	14,51	+ 93,5
			8	≈ 8,00	14,07	+ 75,9
			9	≈ 8,00	14,18	+ 77,3
58,9	5	3Φ6	13	≈ 9,70	14,58	+ 50,3
			14	≈ 9,00	14,34	+ 59,3
			15	≈ 8,25	14,19	+ 72,0
	6	0	16	≈ 4,00	7,70	+ 92,5
			17	≈ 2,00	7,82	+ 291,0
			18	≈ 2,00	7,74	+ 287,0

Quadro 72 – Comparação entre os valores médios dos Momentos Residuais das 3 vigas de cada série, obtidos através dos resultados experimentais e segundo o RILEM TC-162-TDF (2003)

Dosagem de Fibras [kg/m ³]	Série	Armadura Ordinária	Momento Residual [kN.m]		Diferença entre resultados do RILEM TC-162-TDF e os experimentais [%]
			Experimental	RILEM TC-162-TDF	
0	1	3Φ8	≈ 16,00	16,24	+ 1,5
19,6	4	3Φ6	≈ 7,58	9,70	+ 28,0
39,3	2	3Φ8	≈ 17,17	23,38	+ 36,2
	3	3Φ6	≈ 7,83	14,25	+ 82,0
58,9	5	3Φ6	≈ 8,98	14,37	+ 60,0
	6	0	≈ 2,67	7,75	+190,3

5.5. CONCLUSÕES SOBRE A COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS PREVISÍVEIS PELO RILEM TC-162-TDF (2003)

Analisando o valor médio dos Momentos de Fendilhação das 3 vigas da série 6 (série com 58,9 kg/m³ de fibras e sem armadura ordinária), observou-se que os resultados teóricos obtidos através do RILEM TC-162-TDF (2003) são satisfatórios quando comparados com os resultados experimentais, pois dão inferiores e com uma diferença de apenas 6,2 %.

Analisando os valores médios dos Momentos de Cedência das armaduras das 3 vigas de cada série, observou-se que os resultados teóricos obtidos através do RILEM TC-162-TDF (2003) são satisfatórios para as séries 1, 4 e 5, apresentando valores inferiores aos resultados experimentais, e com uma diferença menor do que 10 %. Em relação às séries 2 e 3, os resultados teóricos não se podem considerar satisfatórios pois são superiores aos resultados experimentais.

No que respeita aos momentos residuais, constata-se uma grande divergência entre os valores obtidos experimentalmente e os valores a que conduziu o cálculo de acordo com o RILEM TC-162-TDF (2003). Por exemplo, para a série de vigas 3 ($A_s=3\Phi6$; dosagem de fibras = 39,3 kg/m³), o momento residual experimental obtido foi de cerca de 7,83 kN.m, enquanto o valor previsível pelo RILEM TC-162-TDF (2003) seria de 14,25 kN.m. Esta situação, que se repetiu para outras situações de armaduras ordinárias e dosagens de fibras, explica-se pelo fato de ter sido utilizado um betão de resistência à compressão demasiado alta. Nestes casos, quando o betão fendilha, as fibras que “cozem” a fenda acabam por romper de forma frágil, não contribuindo assim para o desenvolvimento do momento fletor residual. É, por isso, conveniente em estudos posteriores corrigir este aspeto relacionado com a classe de resistência do betão e, se possível, utilizar fibras com maior comprimento e maior ductilidade.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. INTRODUÇÃO

Como foi referido, os trabalhos desenvolvidos enquadram-se num projeto mais alargado sobre o uso das fibras metálicas no betão estrutural. Este trabalho consistiu assim um primeiro passo, que teve o mérito de permitir testar os equipamentos disponíveis, contribuir para melhorar o “know-how” nesta área e obter um conjunto de primeiras conclusões que, por certo, muito ajudarão nos trabalhos futuros.

As principais conclusões a tirar podem agrupar-se em três grupos, a saber:

- Resultados experimentais;
- Resultados previsíveis pelo RILEM TC-162-TDF (2003);
- Comparação entre os resultados experimentais com os previsíveis segundo o RILEM TC-162-TDF (2003).

6.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Em relação aos ensaios experimentais, deve salientar-se que assumiu-se a viga metálica que distribui F (da Figura 37) de rigidez infinita, o que não é completamente rigoroso. Assim, os deslocamentos y_1 e y_2 (da Figura 37) medidos não são exatamente os reais, embora estejam muito próximos da realidade.

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 8 mm:

- A introdução de fibras (com uma dosagem de $39,3 \text{ kg/m}^3$) traduziu-se numa melhoria de aproximadamente 15,5 % nas tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção (14,47% no Momento de Fendilhação), de 21,3 % no Momento de Cedência das armaduras e de 5,9 % no Momento Residual.

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 6 mm:

- Ocorre um acréscimo das tensões máximas de tração nos pontos inferiores da seção de 31,6% aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$ e de 14,4% aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$;
- Ocorre um acréscimo do Momento de Cedência das armaduras de 23,47 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$ e de 12,46 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$;
- Em relação ao Momento Residual, não se verificou um aumento significativo aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$, mas verificou-se um aumento de aproximadamente 29,3 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$.

Note-se portanto que, analisando os resultados experimentais, a introdução/aumento da dosagem de fibras tem sempre um efeito benéfico nos Momentos de Fendilhação, Cedência das armaduras e Residual.

6.3. RESULTADOS PREVISÍVEIS DE ACORDO COM O RILEM TC-162-TDF (2003)

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 8 mm:

- A introdução de fibras (com uma dosagem de $39,3 \text{ kg/m}^3$) traduziu-se numa melhoria de aproximadamente 43,5 % no Momento de Cedência das armaduras, de 44,0 % no Momento Residual e de 122,6 % na Resistência ao Corte;

Para as vigas com varões de aço de diâmetro 6 mm:

- Ocorre um acréscimo do Momento de Cedência das armaduras de 45,0 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$ e de 1,1 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$;
- Ocorre um acréscimo do Momento Residual de 46,9 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$ e de 0,8 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$;
- Ocorre um acréscimo da Resistência ao Corte de 70,2 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $19,6 \text{ kg/m}^3$ para $39,3 \text{ kg/m}^3$ e uma redução de 3,7 % aquando do aumento de dosagem de fibras de $39,3 \text{ kg/m}^3$ para $58,9 \text{ kg/m}^3$;

Para duas vigas com a mesma seção e a mesma armadura ordinária, mas com dosagens de fibras diferentes, a viga com fibras (do tipo deste trabalho, ou seja, $L = 60 \text{ mm}$ e $\phi = 0,75 \text{ mm}$) apresenta uma redução de largura de fendas de 37,5 % comparativamente com a viga sem fibras.

6.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DO RILEM TC-162-TDF (2003)

Analisando o valor médio dos Momentos de Fendilhação das 3 vigas da série 6 (série com $58,9 \text{ kg/m}^3$ de fibras e sem armadura ordinária), observou-se que os resultados teóricos obtidos através do RILEM TC-162-TDF (2003) são satisfatórios quando comparados com os resultados experimentais, pois dão inferiores e com uma diferença de apenas 6,2 %.

Analisando os valores médios dos Momentos de Cedência das armaduras das 3 vigas de cada série, observou-se que os resultados teóricos obtidos através do RILEM TC-162-TDF (2003) são satisfatórios para as séries 1, 4 e 5, apresentando valores inferiores aos resultados experimentais, e com uma diferença menor do que 10 %. Em relação às séries 2 e 3, os resultados teóricos não se podem considerar satisfatórios pois são superiores aos resultados experimentais.

Analisando os valores médios dos Momentos Residuais das 3 vigas de cada série, observou-se que os resultados teóricos obtidos através do RILEM TC-162-TDF (2003) são muito insatisfatórios, pois deram valores muito mais elevados do que os resultados experimentais. O erro em causa é o mesmo que o explicado no ponto 7.2 aquando da crítica aos valores teóricos da Largura de Fendas obtido.

6.5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os futuros desenvolvimentos devem envolver ensaios experimentais que permitam comprovar e avaliar o comportamento das peças de BRFA ao esforço transversal e à flexão. Devem também ser efetuados trabalhos experimentais destinados a avaliar e/ou confirmar o comportamento do BRFA à fendilhação.

Pode também ter particular interesse a avaliação experimental do desenvolvimento da fendilhação numa peça de BRFA com deformação impedida.

A experimentação em protótipos ou mesmo obras reais realizadas com BRFA pode também proporcionar ensinamentos importantes.

Todos os trabalhos futuros devem ter em conta recentes desenvolvimentos tecnológicos relacionados com o aparecimento de fibras de outros comprimentos, outras formas de ancoragem/aderência ao betão, e ainda de outras características mecânicas (resistência e ductilidade maiores).

BIBLIOGRAFIA

- Abid, A., Franzén, K. (2011). *Design of Fibre Reinforced Concrete Beams and Slabs*.
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/146607.pdf>. Data de acesso: 22 de Março de 2012
- Apunta (2009). *Dramix READY, reinforcement for foundation slabs*. (Desconhecido). Outubro 2009, Zwevegem, 4, Bekaertstraat, Zwevegem.
- Balaguru, P., Shah, S. (1992). *Fiber reinforced cement composites*. McGraw-Hill, USA
- Barros, J. (desconhecido). *Lajes de betão reforçado com fibras de aço submetidas aos principais casos de carga*. http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/12901/1/NC_14.pdf. Data de acesso: 19 de Março de 2012.
- Barros, A. (1996). *Caracterização do comportamento do betão reforçado com fibras de aço por intermédio de ensaios experimentais*.
http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/12829/1/CB_1.pdf. Data de acesso: 19 de Março de 2012.
- Barros, J. (1996). *Estado-da-arte dos betões reforçados com Fibras*.
http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num3/Num3_pag_29_47.pdf. Data de acesso: 19 de Março de 2012.
- Bentur, A., Mindess, S. (1990). *Fibre reinforced cementitious composites*. Elsevier, Barking.
- Bentur, A., Mindess, S. (1990). *Fibre Reinforced Cementitious Composites (1ª Ed)*.
Elsevier Science Publishers Ltd., Essex
- Brandt (1995). *Cement-Based Composites – Materials, Mechanical Prop. And Performances*. Chapman & Hall, London.
- Chanh, N. (desconhecido). *Steel fiber reinforced concrete*.
http://www.refwin.com/Final_ed/UploadFile/2011820153554520.pdf. Data de acesso: 17 de Março de 2012.
- DIN (1991). Ensaio para betão. *DIN 1048-5 Ensaio para betão endurecido (provetes preparados em moldes)*

Evangelista, L. (2003). *Betão Reforçado com Fibras de Aço – Aplicação em Pavimentos Industriais*. http://www.construlink.com/2003_ConstrulinkPress/Ficheiros/MonografiasPrimeirasPaginas/Mono11_6.pdf. Data de acesso: 19 de Março de 2012.

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

Figueiredo, A. (2000). *Concreto com fibras de aço*. <http://www.allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/A-000222006526153128.pdf>. Data de acesso: 19 de Março de 2012.

Figueiredo, A. (1992) *Concreto Projetado: Fatores Intervenientes no Controle da Qualidade do Processo*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Figueiredo, A. (1997). *Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço*. Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Gustafsson, M., Karlsson, S. (2006): *Fiberarmerade betongkonstruktioner-Analys av sprickavstand och sprickbredd*. Dissertação de Mestrado, Chalmers University of Technology

Hannant, D. (1978). *Fibre cements and fibre concretes*. John Wiley, Chichester.

ICS (2007). *EN 14651 Test method for metallic fibre concrete –Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*.

IPQ (2000). *Análise granulométrica - Método de peneiração. NP EN 933-1 Ensaios das propriedades geométricas dos agregados*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2002). *Métodos de redução de amostras laboratoriais. NP EN 932-2 Ensaios das propriedades gerais dos agregados*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2003). *Determinação da massa volúmica e da absorção de água. NP EN 1097-6 Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

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

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

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

IPQ (2008c). Fibras de aço, definições, especificações e conformidade. *NP EN 14889-1 Fibras para betão*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2008d). Resistência à flexão (máxima, última e residual) de vigas reforçadas com fibras. *NP EN 14488-3:2008 Ensaio do betão projectado*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2008e). Determinação da capacidade de absorção de energia de provetes de lajes reforçadas com fibras. *NP EN 14488-5:2005 Ensaio do betão projectado*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2008f). Dosagem de fibras no betão reforçado com fibras. *NP EN 14488-7:2008 Ensaio do betão projectado*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

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

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

IPQ (2008i). Resistência de aderência em carotes à tração simples. *NP EN 14488-4:2008 Ensaio do betão projectado*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2009a). Resistência à compressão. *NP EN 12390-3:2009 Ensaio do betão endurecido*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2009b). Resistência à flexão de provetes. *NP EN 12390-5:2009 Ensaio do betão endurecido*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

ISO (2009). Method of test at room temperature. *ISO 6892-1:2009 Metallic materials – Tensile testing*.

Lima, Rui (2012). *Relatório interno de ensaio de diversas vigas com BRF*. LEMC, FEUP, Porto.

Löfgren, I (2005).: *Fibre Reinforced Concrete for Industrial Construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Dissertação de doutoramento. Chalmers University of Technology.

RILEM (1975). CPC7. Direct tension of concrete specimens. *Materials and Structures*, vol. 6, Nov 1975, RILEM.

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.

Rivaz, B. *Fibre Reinforced Concrete, Slip formed permanent shaft lining – Lee Tunnel Case Study*. (Desconhecido). (Desconhecido). (Desconhecido).

Tanesi, J. (1999). *A Influência das Fibras de Polipropileno no controle da fissuração por retração*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Teixeira, A., Martins, J. (2003). *Materiais de Construção – Betões de Elevado Desempenho*. <http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Materiais/MCI%20-%20Betao%20Elevado%20Desempenho.pdf>. Data de acesso: 19 de Março de 2012.

Vandewalle, M. *Tunnelling is an Art*. Bekaertstraat, Zwevegem, (desconhecido).

Vitt, G. (2011). *Guidance to comprehending an extraordinary material*. NV Bekaert SA Zwevegem – Belgium.

ANEXO I – Dimensões reais dos provetes

Este anexo indica as dimensões reais dos provetes.

Dimensões reais dos provetes [cm]				
Número	Cubos	Cilindros	Prismas	Vigas
1	15,0x15,1x15,0	$\Phi=15,0$; h=29,8	15,0x15,0x60,0	15,3x22,6x200,2
2	15,0x15,3x15,0	$\Phi=15,0$; h=30	15,0x15,0x60,0	15,0x22,7x200,3
3	15,0x15,2x15,0	$\Phi=15,0$; h=29,7	15,0x15,0x60,0	15,0x22,8x200,1
4	15,0x15,2x15,0	$\Phi=15,0$; h=29,8	15,0x15,0x60,0	15,1x22,5x200,3
5	15,0x15,2x15,0	$\Phi=15,0$; h=30	15,0x15,0x60,0	15,2x22,7x200,4
6	15,0x15,0x15,0	$\Phi=15,0$; h=30	15,0x15,0x60,0	15,0x22,5x200,1
7	15,0x15,2x15,0	$\Phi=15,0$; h=29,8	15,0x15,0x60,0	15,4x22,6x200,4
8	15,0x15,2x15,0	$\Phi=15,0$; h=30	15,0x15,0x60,0	15,1x22,4x200,2
9	15,0x15,1x15,0	$\Phi=15,0$; h=30	15,0x15,0x60,0	15,0x22,7x200,0
10	15,0x15,1x15,0	$\Phi=15,0$; h=29,9	15,0x15,0x60,0	15,2x22,8x200,4
11	15,0x15,1x15,0	$\Phi=15,0$; h=29,8	15,0x15,0x60,0	15,2x22,6x200,4
12	15,0x15,1x15,0	$\Phi=15,0$; h=29,8	15,0x15,0x60,0	15,4x22,7x200,3
13	15,0x15,0x15,0		20,0x20,0x40,0	15,2x22,6x200,2
14	15,0x15,1x15,0		20,0x20,0x40,0	15,0x22,6x200,6
15	15,0x15,2x15,0		15,1x15,1x60,0	15,2x22,7x200,1
16	15,0x15,3x15,0		15,1x15,1x60,0	15,2x22,7x200,2
17	15,0x15,2x15,0		-	15,3x22,8x200,3
18	15,0x15,2x15,0		-	15,3x22,6x200,3
19	15,0x15,3x15,0		20,0x20,0x40,0	
20	15,0x15,2x15,0		15,1x15,0x60,0	
21	15,0x15,1x15,0		15,1x15,0x60,0	
22	15,0x15,2x15,0		-	
23	15,0x15,3x15,0		-	
24	15,0x15,2x15,0		20,0x20,0x40,0	
25	15,0x15,3x15,0		-	
26	15,0x15,3x15,0		15,0x15,0x60,0	
27			15,0x15,0x60,0	
28			-	

Apesar de os prismas 17, 18, 22, 23, 25 e 28 terem sido moldados no decorrer desta dissertação, não foram ensaiados, pelo que servirão para futuras investigações.

ANEXO II – Idades das vigas aquando dos ensaios de flexão

Apesar de os ensaios de flexão nas vigas estarem previstos, inicialmente, para idade de 28 dias, em certos casos tal não foi possível, por isso no quadro abaixo apresentam-se as idades reais das vigas aquando dos ensaios de flexão.

Idades das vigas aquando dos ensaios de flexão			
Viga	Data de moldagem	Data de ensaio	Idade da viga (dias)
1	08-05-2012	06-06-2012	29
2	08-05-2012	06-06-2012	29
3	08-05-2012	06-06-2012	29
4	08-05-2012	06-06-2012	29
5	08-05-2012	06-06-2012	29
6	08-05-2012	05-06-2012	28
7	08-05-2012	04-06-2012	27
8	08-05-2012	05-06-2012	28
9	08-05-2012	05-06-2012	28
10	10-05-2012	08-06-2012	29
11	10-05-2012	08-06-2012	29
12	10-05-2012	08-06-2012	29
13	10-05-2012	08-06-2012	29
14	10-05-2012	11-06-2012	32
15	10-05-2012	11-06-2012	32
16	10-05-2012	11-06-2012	32
17	10-05-2012	11-06-2012	32
18	10-05-2012	11-06-2012	32

ANEXO III – Quantidade e tipo de provetes moldados por Composição

Composição	Dosagem de fibras [kg/m ³]	Data de moldagem	Número de Provetes Moldados								
			Cubos - Resistência à Compressão (15x15x15)		Prismas - Resistência à Tração por Flexão (15x15x60)	Prismas-Carote para tração direta (20x20x40)	Prismas - Flexão com rasgo	Cilindros-Módulo de Elasticidade (φ=15; h=30)	Vigas-Flexão (15x22,5x200)		
			7 dias	28 dias	28 dias	28 dias		28 dias	28 dias		
							As=0	3φ6	3φ8		
1	0	08-05-2012	3	3	3	0	0	3	0	0	3
		17-05-2012	0	0	0	1 (para extração de 3 carotes de φ=9,3 cm; h=16,5 cm)	0	0	0	0	0
2	39,3	08-05-2012	3	3	3	0	0	3	0	3	3
		17-05-2012	0	0	0	1 (para extração de 3 carotes de φ=9,3 cm; h=16,5 cm)	2	0	0	0	0
3	19,6	10-05-2012	3	3	3	0	0	3	0	3	0
		22-05-2012	0	0	0	1 (para extração de 3 carotes de φ=9,3 cm; h=16,5 cm)	2	0	0	0	0
4	58,9	10-05-2012	3	3	3	0	0	3	3	3	0
		22-05-2012	0	0	0	1 (para extração de 3 carotes de φ=9,3 cm; h=16,5 cm)	2	0	0	0	0

ANEXO IV – Referências dos Provetes

Referências dos Provetes											
Composição	Dosagem de fibras [kg/m ³]	Data de moldagem	Cubos-Resistência à Compressão (15x15x15)		Prismas-Resistência à Tração por Flexão	Prismas - Ensaio de flexão com rasgos (15x15x60)	Prismas - Ensaio para tração direta (20x20x40)	Cilindros - Módulo de Elasticidade ($\phi=15$; h=30)	Vigas - Ensaio de Flexão (15x22,5x200)		
			7 dias	28 dias					As=0	3 ϕ 6	3 ϕ 8
1	0	08-05-2012	Cubo 1; Cubo 2; Cubo 3	Cubo 4; Cubo 5; Cubo 6	Prisma 1; Prisma 2; Prisma 3			Cilindro 1; Cilindro 2; Cilindro 3			Viga 1; Viga 2; Viga 3
		17-05-2012					Prisma 13				
2	39,3	08-05-2012	Cubo 7; Cubo 8; Cubo 9	Cubo 10; Cubo 11; Cubo 12	Prisma 4; Prisma 5; Prisma 6			Cilindro 4; Cilindro 5; Cilindro 6		Viga 7; Viga 8; Viga 9	Viga 4; Viga 5; Viga 6
		17-05-2012				Prisma 15; Prisma 16	Prisma 14				
3	19,6	10-05-2012	Cubo 15; Cubo 16; Cubo 17	Cubo 18; Cubo 19; Cubo 20	Prisma 7; Prisma 8; Prisma 9			Cilindro 7; Cilindro 8; Cilindro 9		Viga 10; Viga 11; Viga 12	
		22-05-2012				Prisma 20; Prisma 21	Prisma 19				
4	58,9	10-05-2012	Cubo 21; Cubo 22; Cubo 23	Cubo 24; Cubo 25; Cubo 26	Prisma 10; Prisma 11; Prisma 12			Cilindro 10; Cilindro 11; Cilindro 12	Viga 16; Viga 17; Viga 18	Viga 13; Viga 14; Viga 15	
		22-05-2012				Prisma 26; Prisma 27	Prisma 24				

ANEXO V – Dimensões reais das secções de todas as vigas

Vigas	h [mm]	Diâmetro dos varões [mm]	d [mm]	b [mm]
1	226	8	198	153
2	227	8	205	150
3	228	8	200	150
4	225	8	205	151
5	227	8	208	152
6	225	8	198	150
7	226	6	205	154
8	224	6	200	151
9	227	6	200	150
10	228	6	203	152
11	226	6	208	152
12	227	6	202	154
13	226	6	211	152
14	226	6	207	150
15	227	6	198	152
16	227	(não se aplica)	(não se aplica)	152
17	228	(não se aplica)	(não se aplica)	153
18	226	(não se aplica)	(não se aplica)	153

**ANEXO VI – Cálculo dos Momentos e Resistência
ao Corte das vigas 1, 9 e 18, utilizando o RILEM TC-
162-TDF (2003)**

Viga 1 (*Dosagem de fibras = 0 kg/ m³ ; $\phi = 8$ mm*)

Para a explicação dos cálculos efetuados utilizando o RILEM TC 162-TDF (2003), a presente dissertação baseou-se na tese de mestrado realizada por Abid e Franzén em 2011.

Não foi utilizado nenhum fator de segurança para fazer uma comparação direta com os resultados experimentais.

DIMENSÕES DA VIGA

Largura da seção: $b = 153$ mm

Altura da seção: $h = 226$ mm

Altura útil: $d = 198$ mm

Comprimento do vão livre: $l_s = 1800$ mm

Comprimento do vão total: $l_t = 2002$ mm

MATERIAIS

Betão

$$f_{cm} = f_{c,cyl} = 61,2 \text{ MPa}$$

Aço

$$f_{sy} = 547,0 \text{ MPa}$$

$$f_{su} = 603,5 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

$$\epsilon_y = \frac{f_{sy}}{E_s} = \frac{547,0}{200 \times 10^3} = 0,002735$$

DIMENSIONAMENTO

$$\phi_s = 8 \text{ mm}$$

$$A_{si} = \frac{\pi \times \phi_s^2}{4} = 50,265 \text{ mm}^2$$

$$\text{N}^\circ \text{ de varões: } n = 3$$

$$A_s = n \times A_{si} = 150,796 \text{ mm}^2$$

$$f_{cm} = 61,2 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \leftrightarrow f_{ck} = 61,2 - 8 = 53,2 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 38,55 \text{ GPa}$$

$$f_{fctm,fl} = 5,852 \text{ MPa}$$

Momento de Cedência das Armaduras:

A cedência inicia-se quando $\varepsilon_s = \varepsilon_{sy}$

$$\varepsilon_{sy} = f_{sy} / E_s = 0,002735$$

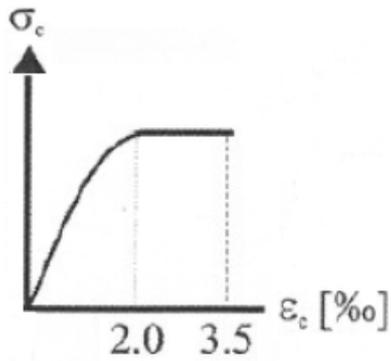
A tensão média do bloco de tensão de tração é igual à área do bloco de tensão:

$$\sigma_c = E_{cm} \times \varepsilon_c = E_{cm} \times \left[\frac{\varepsilon_{sy}}{\left(\frac{d-x_y}{x_y} \right)} \right]$$

$$\frac{1}{2} \times b \times x_y \times \sigma_c = f_{sy} \times A_s \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \frac{1}{2} \times b \times x_y \times E_{cm} \times \left[\frac{\varepsilon_{sy}}{\left(\frac{d-x_y}{x_y} \right)} \right] = f_{sy} \times A_s \leftrightarrow x_y = 40,175 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = \left[\frac{\varepsilon_{sy}}{\left(\frac{d-x_y}{x_y} \right)} \right] = \left[\frac{0,002735}{\left(\frac{0,198-0,040175}{0,040175} \right)} \right] = 6,962 \times 10^{-4}$$



$\varepsilon_c = 6,962 \times 10^{-4} \leq 2,0 \times 10^{-3}$: o bloco de tensões de compressão é triangular

$$M_{Ry} = f_{sy} \times A_s \times \left(d - \frac{1}{3} \times x_y \right) = 15,28 \text{ kN.m}$$

Momento Residual:

Tendo em conta a área do bloco de tensões parábola/retângulo:

$$\frac{3}{7} \times b \times x_u \times f_{cm} + \frac{4}{7} \times b \times x_u \times \frac{2}{3} \times f_{cm} = f_{sy} \times A_s \leftrightarrow x_u = 10,882 \text{ mm}$$

$$\beta = 0,375$$

$$M_{Ru} = f_{sy} \times A_s \times (d - \beta \times x_u) = 16,00 \text{ kN.m}$$

Resistência ao Corte

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd}$$

$V_{wd} = 0$ pois a viga não tem estribos nem varões inclinados

$V_{fd} = 0$ pois a viga não tem fibras

Fator escala:

$$k_1 = 1 + \sqrt{200/d} = 1 + \sqrt{200/198} = 2,01 \leq 2,00 \leftrightarrow k_1 = 2$$

Razão entre área de aço e área de betão:

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b \times d} = \frac{150,796}{153 \times 198} = 0,0049778$$

$\sigma_{cp} = 0$ pois não existe esforço axial ou pré-esforço

$$f_{fck} = 53,2 \text{ MPa}$$

$$V_{cd} = \left[0,12 \times k_1 \times (100 \times \rho_1 \times f_{fck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b \times d =$$

$$= \left[0,12 \times 2 \times (100 \times 0,0049778 \times 53,2)^{1/3} + 0,15 \times 0 \right] \times 153 \times 198 = 21671 \text{ N} = 21,67 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} = 21,67 + 0 + 0 = 21,67 \text{ kN}$$

Viga 9 (*Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³ ; $\phi = 6\text{ mm}$*)

Para a explicação dos cálculos efetuados utilizando o RILEM TC 162-TDF (2003), a presente dissertação baseou-se na tese de mestrado realizada por Abid e Franzén em 2011.

Não foi utilizado nenhum fator de segurança para fazer uma comparação direta com os resultados experimentais.

DIMENSÕES DA VIGA

Largura da seção: $b = 150\text{ mm}$

Altura da seção: $h = 227\text{ mm}$

Altura útil: $d = 200\text{ mm}$

Comprimento do vão livre: $l_s = 1800\text{ mm}$

Comprimento do vão total: $l_t = 2000\text{ mm}$

PRISMAS (COM RASGO) UTILIZADOS NOS ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO POR FLEXÃO

Vão livre: $L = 500\text{ mm}$

Altura: $h = 151\text{ mm}$

Distância entre o topo do corte e o topo da seção transversal do prisma: $h_{sp} = 126\text{ mm}$

Base: $b = 151\text{ mm}$

MATERIAIS

Betão

$$f_{cm} = f_{c,cyl} = 62,8\text{ MPa}$$

Aço

$$f_{sy} = 407,0 \text{ MPa}$$

$$f_{su} = 481,0 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

$$\epsilon_y = \frac{f_{sy}}{E_s} = \frac{407,0}{200 \times 10^3} = 0,002035$$

Fibras de aço Dramix RC-80/60-BN

Dosagem de fibras na matriz cimentícia: $39,3 \text{ kg/m}^3$

Comprimento da fibra: $L = 60 \text{ mm}$

Diâmetro da fibra: $\phi = 0,75 \text{ mm}$

DIMENSIONAMENTO

$$\phi_s = 6 \text{ mm}$$

$$A_{si} = \frac{\pi \times \phi_s^2}{4} = 28,274 \text{ mm}^2$$

Nº de varões: $n = 3$

$$A_s = n \times A_{si} = 84,823 \text{ mm}^2$$

$$f_{cm} = 62,8 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \leftrightarrow f_{ck} = 62,8 - 8 = 54,8 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 38,10 \text{ GPa}$$

$$f_{fctm,fl} = 6,800 \text{ MPa}$$

Resistência residual à tração por flexão em Estado Limite de Serviço:

Carga correspondente a $\delta_{R,1} = 0,47 \text{ mm} \rightarrow f_{R,1} = 7,51$

Resistência residual à tração por flexão em Estado Limite Último:

Carga correspondente a $\delta_{R,4} = 3,02 \text{ mm} \rightarrow f_{R,4} = 5,10$

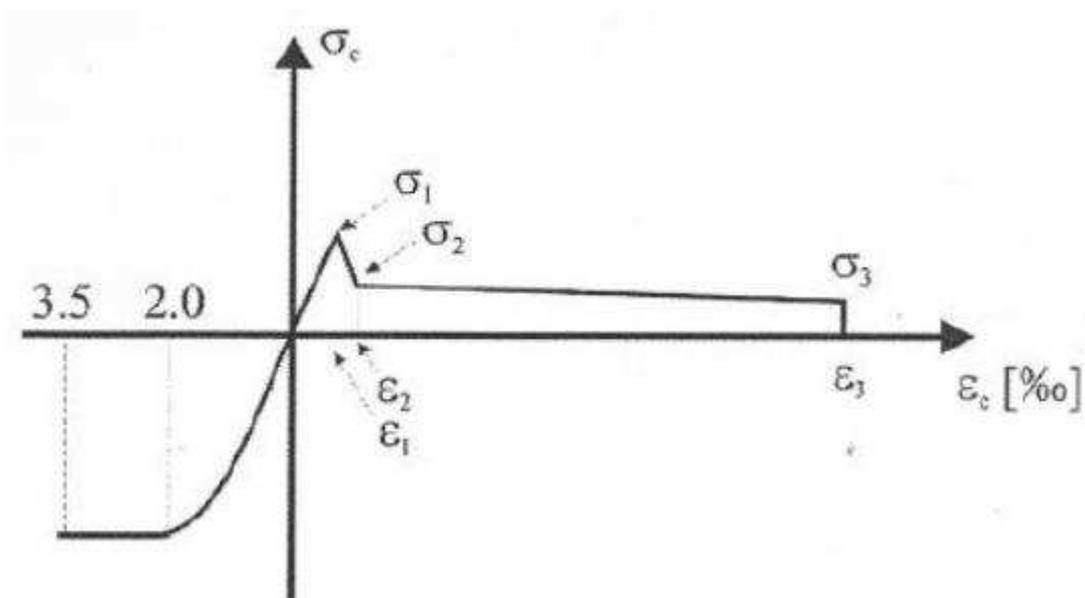
Cálculo:

Altura da viga: $h = 227 \text{ mm}$

Fator de escala para $12,5 \leq h \leq 60 \text{ (cm)}$: $k_h = 1 - 0,6 \times \frac{h-12,5}{47,5} = 0,871$

$$\sigma_2 = 0,45 \times f_{R,1} \times k_h = 0,45 \times 7,51 \times 0,871 = 2,944 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 0,37 \times f_{R,4} \times k_h = 0,37 \times 5,10 \times 0,871 = 1,644 \text{ MPa}$$



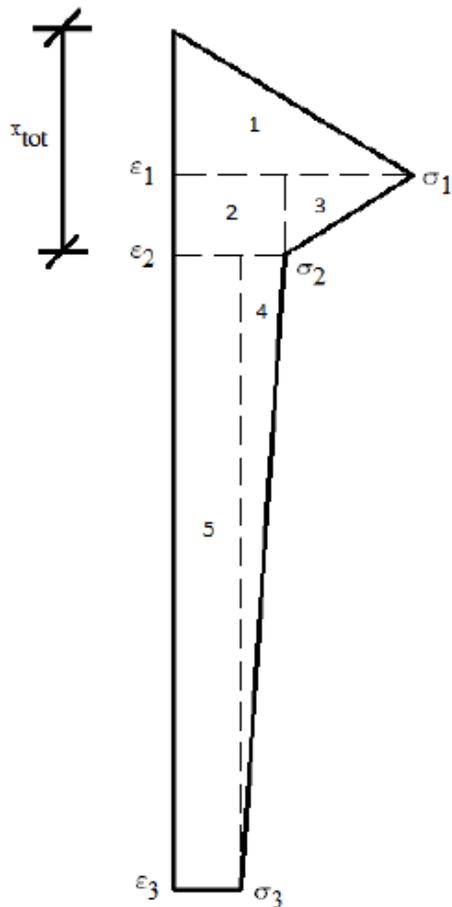
Altura útil da seção: $d = 0,200 \text{ m}$

$$\sigma_1 = 0,7 \times f_{ctm,fl} \times (1,6 - d) = 0,7 \times 6,800 \times (1,6 - 0,200) = 6,664 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}} = \frac{6,664}{38,10 \times 10^3} = 1,749 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{0,1}{1000} = 1,749 \times 10^{-4} + \frac{0,1}{1000} = 2,749 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_3 = 0,025$$



$$p_1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_3 = 1,749 \times 10^{-4} / 0,025 = 0,006996$$

$$p_2 = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / \varepsilon_3 = (2,749 \times 10^{-4} - 1,749 \times 10^{-4}) / 0,025 = 0,004000$$

$$p_3 = (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)/\varepsilon_3 = (0,025 - 2,749 \times 10^{-4})/0,025 = 0,989004$$

$$A_1 = \frac{1}{2} \times p_1 \times \sigma_1 = \frac{1}{2} \times 0,006996 \times 6,664 = 0,023311 \text{ MPa}$$

$$A_2 = p_2 \times \sigma_2 = 0,004000 \times 2,944 = 0,011776 \text{ MPa}$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \times p_2 \times (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{1}{2} \times 0,004000 \times (6,664 - 2,944) = 0,007440 \text{ MPa}$$

$$A_4 = \frac{1}{2} \times p_3 \times (\sigma_2 - \sigma_3) = \frac{1}{2} \times 0,989004 \times (2,944 - 1,644) = 0,642853 \text{ MPa}$$

$$A_5 = p_3 \times \sigma_3 = 0,989004 \times 1,644 = 1,625923 \text{ MPa}$$

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 2,311303 \text{ MPa}$$

Posição do centro de gravidade para as diversas áreas individuais:

$$x_1 = \frac{2}{3} \times p_1 = \frac{2}{3} \times 0,006996 = 0,004664$$

$$x_2 = \frac{1}{2} \times p_2 + p_1 = \frac{1}{2} \times 0,004000 + 0,006996 = 0,008996$$

$$x_3 = \frac{1}{3} \times p_2 + p_1 = \frac{1}{3} \times 0,004000 + 0,006996 = 0,008329$$

$$x_4 = \frac{1}{3} \times p_3 + p_1 + p_2 = \frac{1}{3} \times 0,989004 + 0,006996 + 0,004000 = 0,340664$$

$$x_5 = \frac{1}{2} \times p_3 + p_1 + p_2 = \frac{1}{2} \times 0,989004 + 0,006996 + 0,004000 = 0,505498$$

Eixo neutro para o bloco de tensões de tração:

$$x_{tot} \times A_{tot} = A_1 \times x_1 + A_2 \times x_2 + A_3 \times x_3 + A_4 \times x_4 + A_5 \times x_5$$

$$x_{tot} = \frac{A_1 \times x_1 + A_2 \times x_2 + A_3 \times x_3 + A_4 \times x_4 + A_5 \times x_5}{A_{tot}} = 0,450$$

Momento de Cedência das armaduras:

A cedência inicia-se quando $\varepsilon_s = \varepsilon_{sy}$

$$\varepsilon_{sy} = f_{sy}/E_s = 0,002035$$

A tensão média de tração do betão na zona tracionada da seção é igual à área do bloco de tensão:

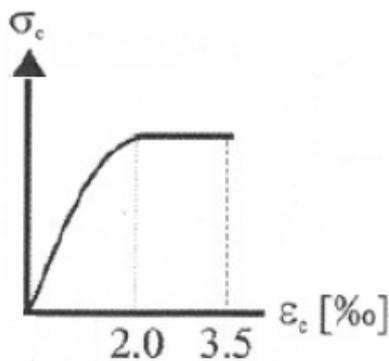
$$\sigma_m = A_{tot} = 2,311 \text{ MPa}$$

$$\sigma_c = E_{cm} \times \varepsilon_c = E_{cm} \times \left[\frac{\varepsilon_{sy}}{\left(\frac{d-x_y}{x_y} \right)} \right]$$

$$\frac{1}{2} \times b \times x_y \times \sigma_c = f_{sy} \times A_s + \sigma_m \times b \times (h - x_y) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \frac{1}{2} \times b \times x_y \times E_{cm} \times \left[\frac{\varepsilon_{sy}}{\left(\frac{d-x_y}{x_y} \right)} \right] = f_{sy} \times A_s + \sigma_m \times b \times (h - x_y) \leftrightarrow x_y = 49,785 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = \left[\frac{\varepsilon_{sy}}{\left(\frac{d-x_y}{x_y} \right)} \right] = \left[\frac{0,002035}{\left(\frac{0,200-0,049785}{0,049785} \right)} \right] = 6,744 \times 10^{-4}$$



$\varepsilon_c = 6,744 \times 10^{-4} \leq 2,0 \times 10^{-3}$: o bloco de tensões de compressão é triangular

$$M_{Ry} = f_{sy} \times A_s \times \left(d - \frac{1}{3} \times x_y \right) + \sigma_m \times (h - x_y) \times b \times \left[\frac{2}{3} \times x_y + x_{tot} \times (h - x_y) \right] = 13,27 \text{ kN.m}$$

Momento Residual:

Tendo em conta a área do bloco de tensões parábola/retângulo:

$$\frac{3}{7} \times b \times x_u \times f_{cm} + \frac{4}{7} \times b \times x_u \times \frac{2}{3} \times f_{cm} = f_{sy} \times A_s + \sigma_m \times b \times (h - x_u) \leftrightarrow x_u = 14,199 \text{ mm}$$

$$\beta = 0,375$$

$$M_{Ru} = f_{sy} \times A_s \times (d - \beta \times x_u) + \sigma_m \times (h - x_u) \times b \times [\beta \times x_u + x_{tot} \times (h - x_u)] = 14,18 \text{ kN.m}$$

Resistência ao Corte

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd}$$

$V_{wd} = 0$ pois a viga não tem estribos nem varões inclinados

Fator escala:

$$k_1 = 1 + \sqrt{200/d} = 1 + \sqrt{200/200} = 2,00 \leq 2,00 \leftrightarrow k_1 = 2$$

Valor de dimensionamento do incremento da resistência ao corte devido às fibras de aço:

$$\tau_{fd} = 0,12 \times f_{R,4} = 0,12 \times 5,10 = 0,612 \text{ MPa}$$

$$k_f = 1 + n \times \left(\frac{h_f}{b}\right) \times \left(\frac{h_f}{d}\right)$$

h_f é a altura do banzo que é 0 neste caso, logo $k_f = 1$.

$$V_{fd} = 0,7 \times k_f \times k_1 \times \tau_{fd} \times b \times d = 0,7 \times 1 \times 2 \times 0,612 \times 150 \times 200 = 25704 \text{ N} = 25,70 \text{ kN}$$

Razão entre área de aço e área de betão:

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b \times d} = \frac{84,823}{150 \times 200} = 0,00282743$$

$\sigma_{cp} = 0$ pois não existe esforço axial ou pré-esforço

$$f_{fck} = 54,8 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} V_{cd} &= \left[0,12 \times k_1 \times (100 \times \rho_1 \times f_{fck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b \times d = \\ &= \left[0,12 \times 2 \times (100 \times 0,00282743 \times 54,8)^{1/3} + 0,15 \times 0 \right] \times 150 \times 200 = \\ &= 17950 \text{ N} = 17,95 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} = 17,95 + 25,70 = 43,65 \text{ kN}$$

Viga 18 (*Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³ ; sem armadura ordinária*)

Para a explicação dos cálculos efetuados utilizando o RILEM TC 162-TDF (2003), a presente dissertação baseou-se na tese de mestrado realizada por Abid e Franzén em 2011.

Não foi utilizado nenhum fator de segurança para fazer uma comparação direta com os resultados experimentais.

DIMENSÕES DA VIGA

Largura da seção: $b = 153 \text{ mm}$

Altura da seção: $h = 226 \text{ mm}$

Comprimento do vão livre: $l_s = 1800 \text{ mm}$

Comprimento do vão total: $l_t = 2003 \text{ mm}$

PRISMAS (COM RASGO) UTILIZADOS NOS ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO POR FLEXÃO

Vão livre: $L = 500 \text{ mm}$

Altura: $h = 150 \text{ mm}$

Distância entre o topo do corte e o topo da seção transversal do prisma: $h_{sp} = 125 \text{ mm}$

Base: $b = 150 \text{ mm}$

MATERIAIS

Betão

$$f_{cm} = f_{c,cyl} = 63,0 \text{ MPa}$$

Fibras de aço Dramix RC-80/60-BN

Dosagem de fibras na matriz cimentícia: $58,9 \text{ kg/m}^3$

Comprimento da fibra: $L = 60 \text{ mm}$

Diâmetro da fibra: $\phi = 0,75 \text{ mm}$

DIMENSIONAMENTO

$$f_{cm} = 63,0 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \leftrightarrow f_{ck} = 63,0 - 8 = 55,0 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 37,95 \text{ GPa}$$

$$f_{fctm,fl} = 7,133 \text{ MPa}$$

Resistência residual à tração por flexão em Estado Limite de Serviço:

Carga correspondente a $\delta_{R,1} = 0,47 \text{ mm} \rightarrow f_{R,1} = 8,06$

Resistência residual à tração por flexão em Estado Limite Último:

Carga correspondente a $\delta_{R,4} = 3,02 \text{ mm} \rightarrow f_{R,4} = 4,72$

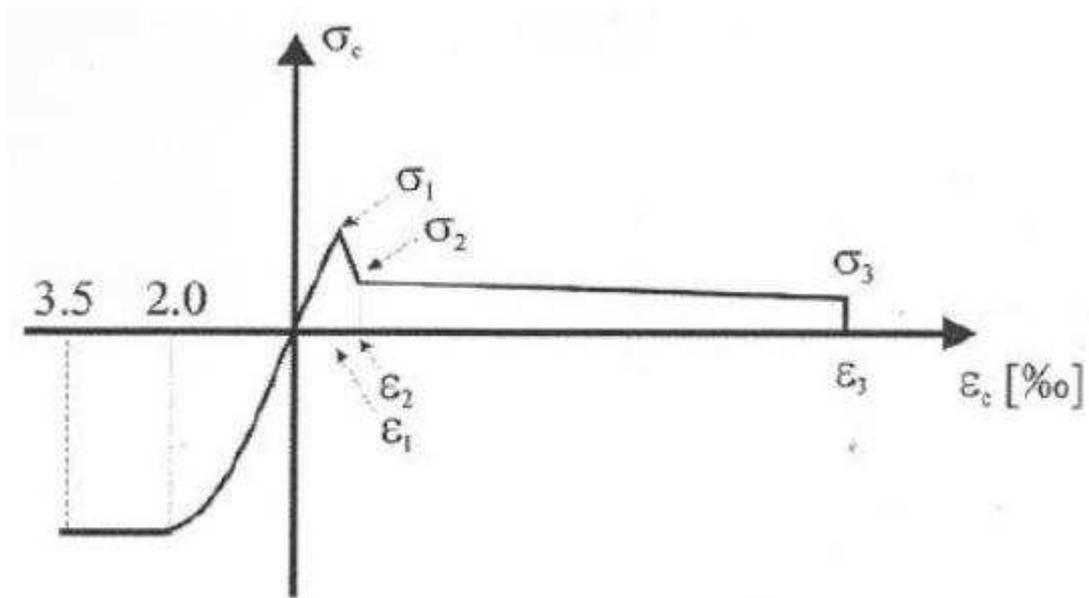
Cálculo:

Altura da viga: $h = 226 \text{ mm}$

Fator de escala para $12,5 \leq h \leq 60 \text{ (cm)}$: $k_h = 1 - 0,6 \times \frac{h-12,5}{47,5} = 0,872$

$$\sigma_2 = 0,45 \times f_{R,1} \times k_h = 0,45 \times 8,06 \times 0,872 = 3,163 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 0,37 \times f_{R,4} \times k_h = 0,37 \times 4,72 \times 0,872 = 1,523 \text{ MPa}$$

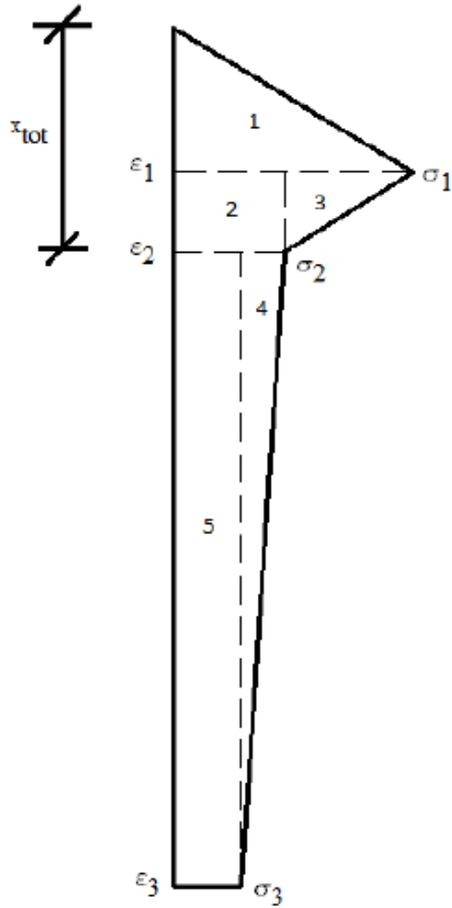


$$\sigma_1 = 0,7 \times f_{ctm,fl} \times (1,6 - h) = 0,7 \times 7,133 \times (1,6 - 0,226) = 6,861 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}} = \frac{6,861}{37,95 \times 10^3} = 1,808 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{0,1}{1000} = 1,808 \times 10^{-4} + \frac{0,1}{1000} = 2,808 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_3 = 0,025$$



$$p_1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_3 = 1,808 \times 10^{-4} / 0,025 = 0,007232$$

$$p_2 = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / \varepsilon_3 = (2,808 \times 10^{-4} - 1,808 \times 10^{-4}) / 0,025 = 0,004000$$

$$p_3 = (\varepsilon_3 - \varepsilon_2) / \varepsilon_3 = (0,025 - 2,808 \times 10^{-4}) / 0,025 = 0,988768$$

$$A_1 = \frac{1}{2} \times p_1 \times \sigma_1 = \frac{1}{2} \times 0,007232 \times 6,861 = 0,024809 \text{ MPa}$$

$$A_2 = p_2 \times \sigma_2 = 0,004000 \times 3,163 = 0,012652 \text{ MPa}$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \times p_2 \times (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{1}{2} \times 0,004000 \times (6,861 - 3,163) = 0,007396 \text{ MPa}$$

$$A_4 = \frac{1}{2} \times p_3 \times (\sigma_2 - \sigma_3) = \frac{1}{2} \times 0,988768 \times (3,163 - 1,523) = 0,810790 \text{ MPa}$$

$$A_5 = p_3 \times \sigma_3 = 0,988768 \times 1,523 = 1,505894 \text{ MPa}$$

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 2,361541 \text{ MPa}$$

Posição do centro de gravidade para as diversas áreas individuais:

$$x_1 = \frac{2}{3} \times p_1 = \frac{2}{3} \times 0,007232 = 0,004821$$

$$x_2 = \frac{1}{2} \times p_2 + p_1 = \frac{1}{2} \times 0,004000 + 0,007232 = 0,009232$$

$$x_3 = \frac{1}{3} \times p_2 + p_1 = \frac{1}{3} \times 0,004000 + 0,007232 = 0,008565$$

$$x_4 = \frac{1}{3} \times p_3 + p_1 + p_2 = \frac{1}{3} \times 0,988768 + 0,007232 + 0,004000 = 0,340821$$

$$x_5 = \frac{1}{2} \times p_3 + p_1 + p_2 = \frac{1}{2} \times 0,988768 + 0,007232 + 0,004000 = 0,505616$$

Eixo neutro para o bloco de tensões de tração:

$$x_{tot} \times A_{tot} = A_1 \times x_1 + A_2 \times x_2 + A_3 \times x_3 + A_4 \times x_4 + A_5 \times x_5$$

$$x_{tot} = \frac{A_1 \times x_1 + A_2 \times x_2 + A_3 \times x_3 + A_4 \times x_4 + A_5 \times x_5}{A_{tot}} = 0,440$$

Momento de Fendilhação:

$$w = \frac{b \times h^2}{6} = \frac{0,153 \times 0,226^2}{6} = 0,00130 \text{ m}^3 \quad (\text{módulo de flexão})$$

$$M_{cr} = w \times \sigma_1 = 0,00130 \times 6,861 \times 10^3 = 8,92 \text{ kN.m}$$

Momento Residual:

A área do bloco de tensões parabólico é aproximadamente (2/3) da área do bloco de tensões retangular, logo:

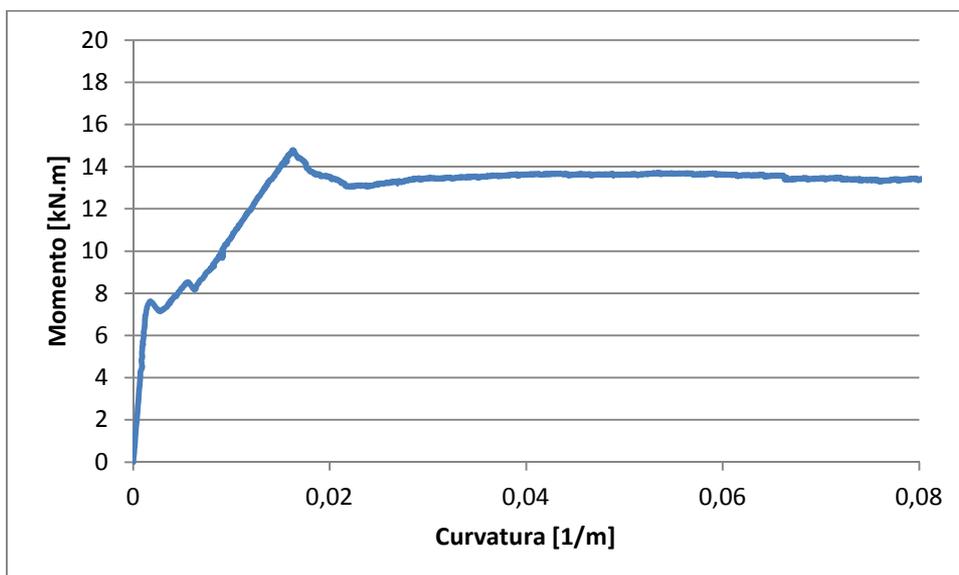
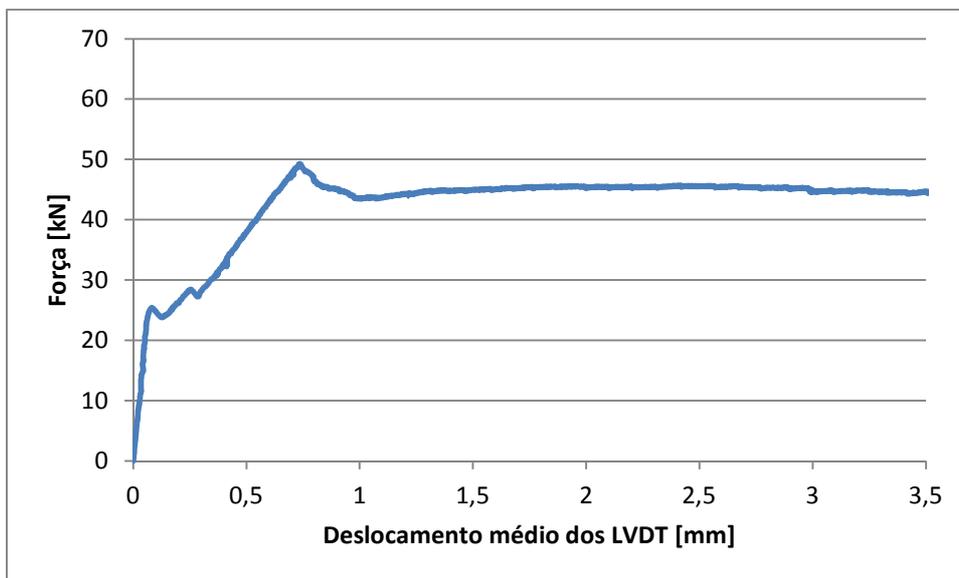
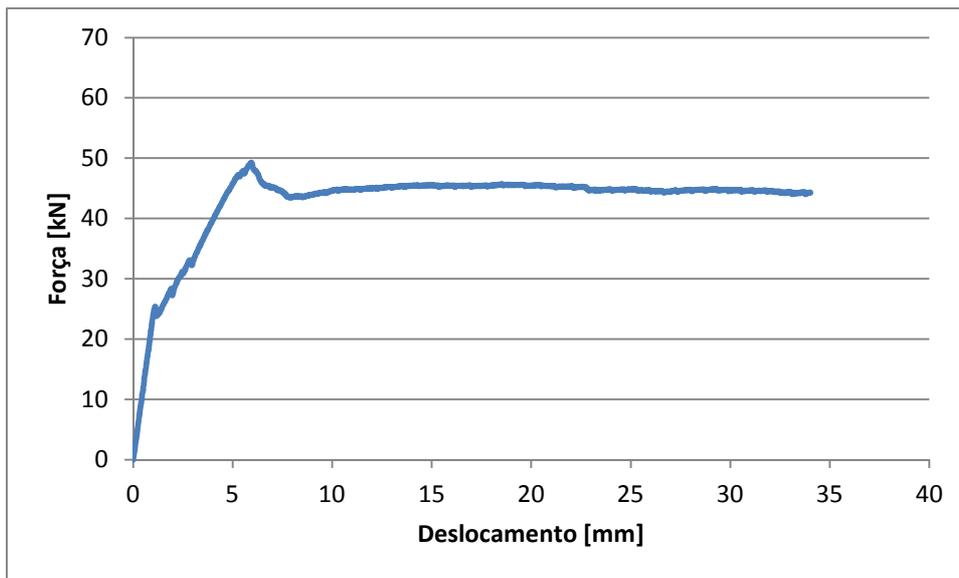
$$\frac{3}{7} \times b \times x_u \times f_{cm} + \frac{4}{7} \times b \times x_u \times \frac{2}{3} \times f_{cm} = \sigma_m \times b \times (h - x_u) \leftrightarrow x_u = 9,991 \text{ mm}$$

$$\beta = 0,375$$

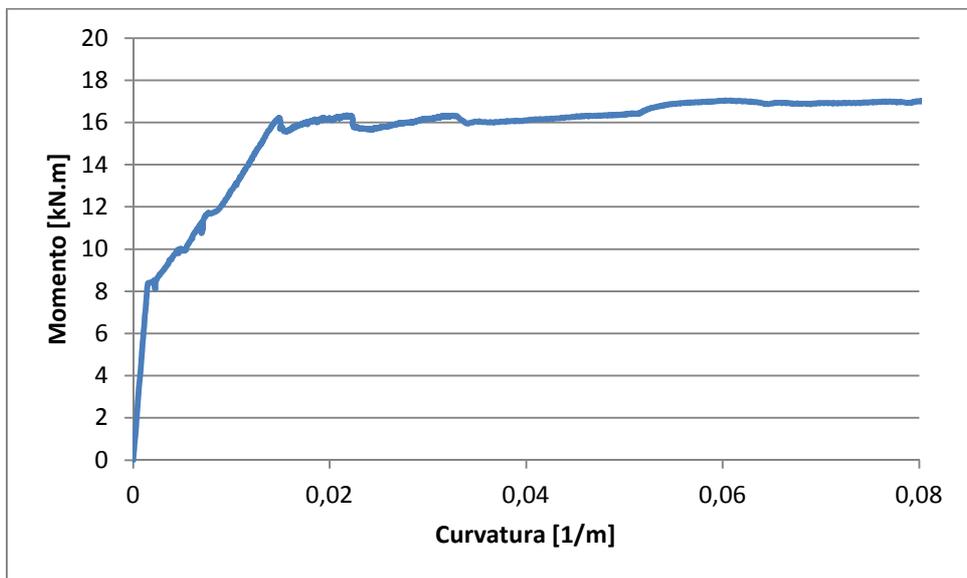
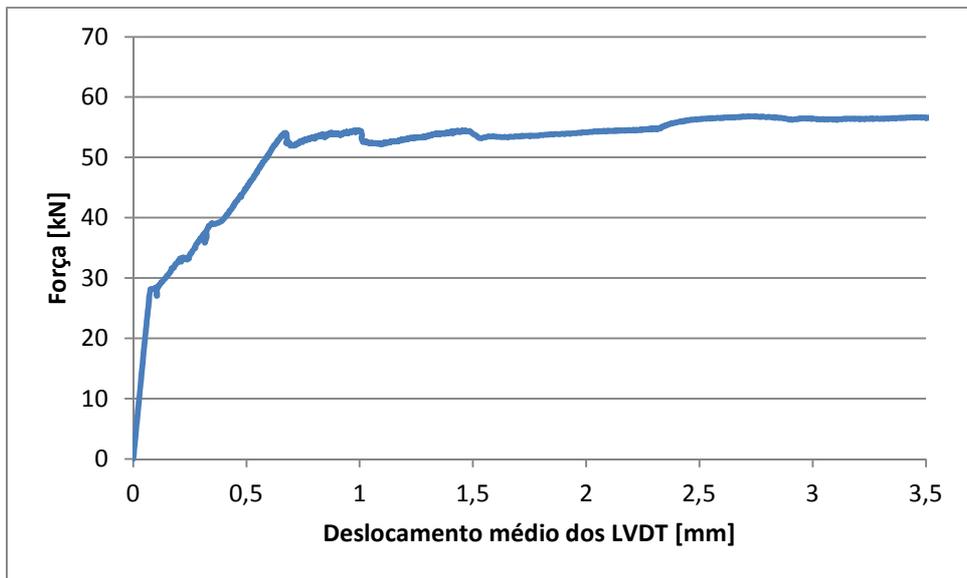
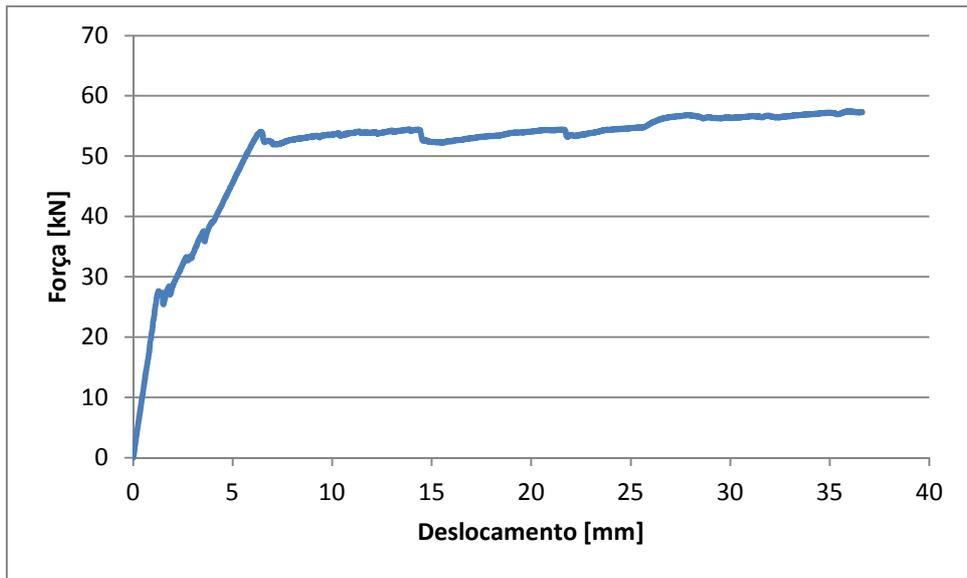
$$M_{Ru} = \sigma_m \times (h - x_u) \times b \times [\beta \times x_u + x_{tot} \times (h - x_u)] = 7,71 \text{ kN.m}$$

ANEXO VII – Diagramas Força-Deslocamento, Força-Deslocamento médio dos LVDT e Momento-Curvatura, obtidos a partir dos ensaios de flexão de todas as vigas

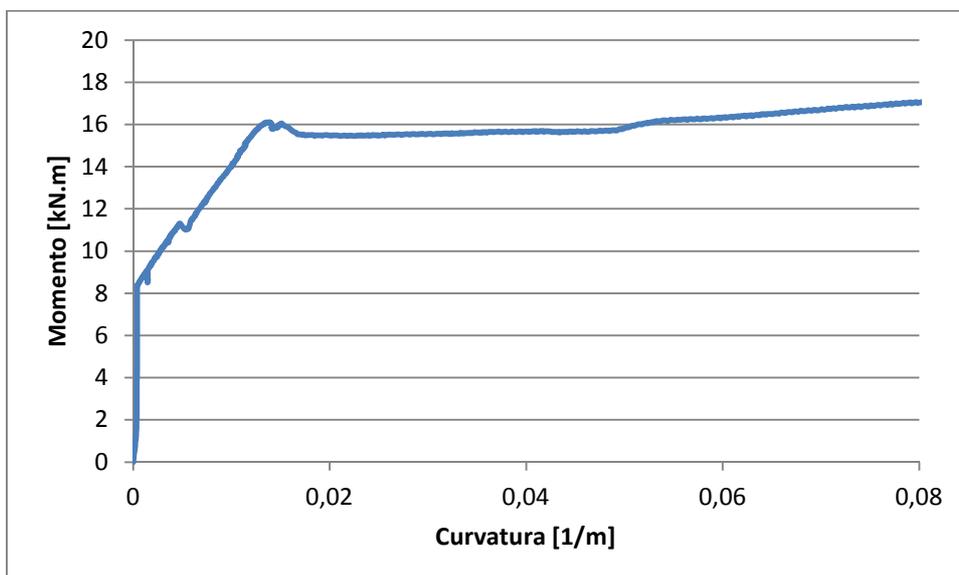
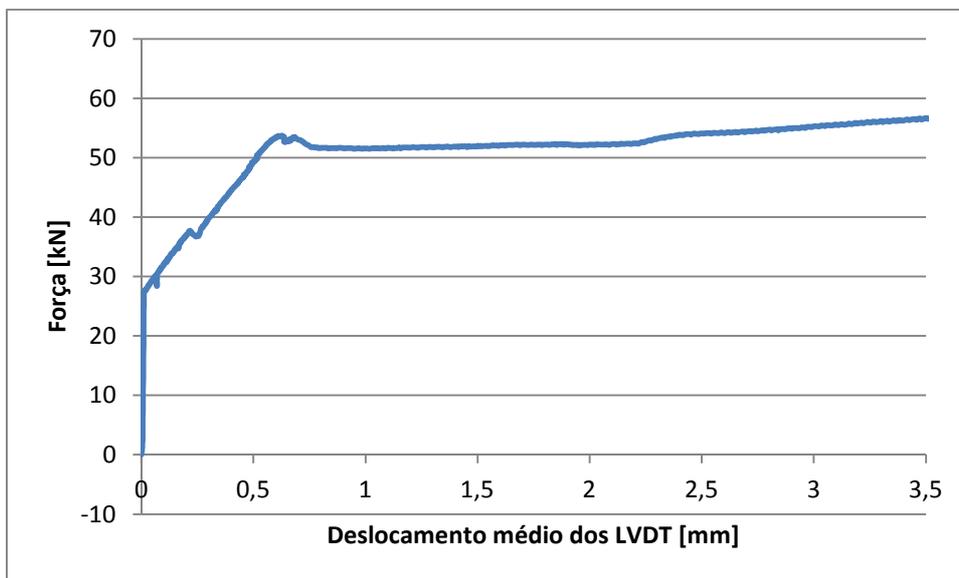
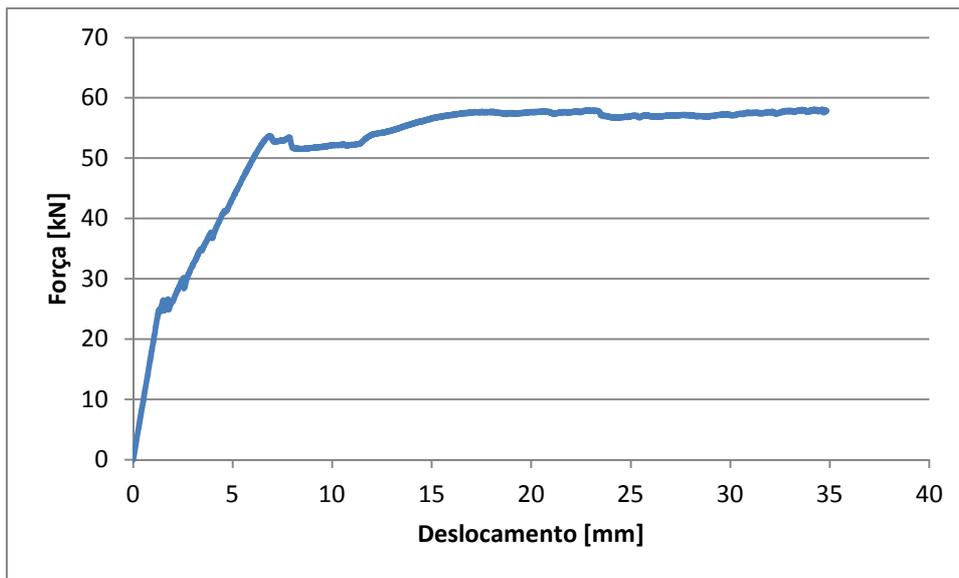
Viga 1 (Dosagem de fibras = 0 kg/m³; ϕ = 8 mm):



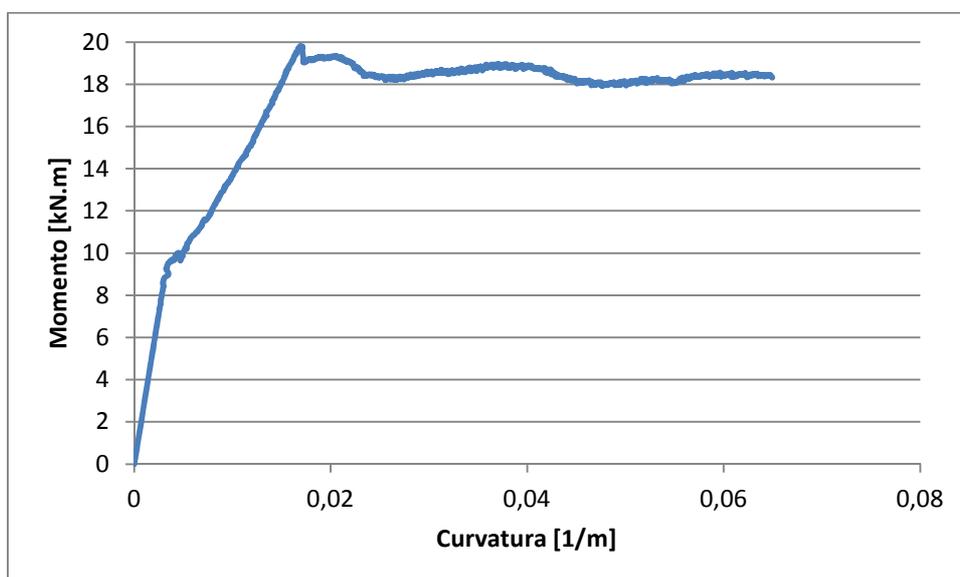
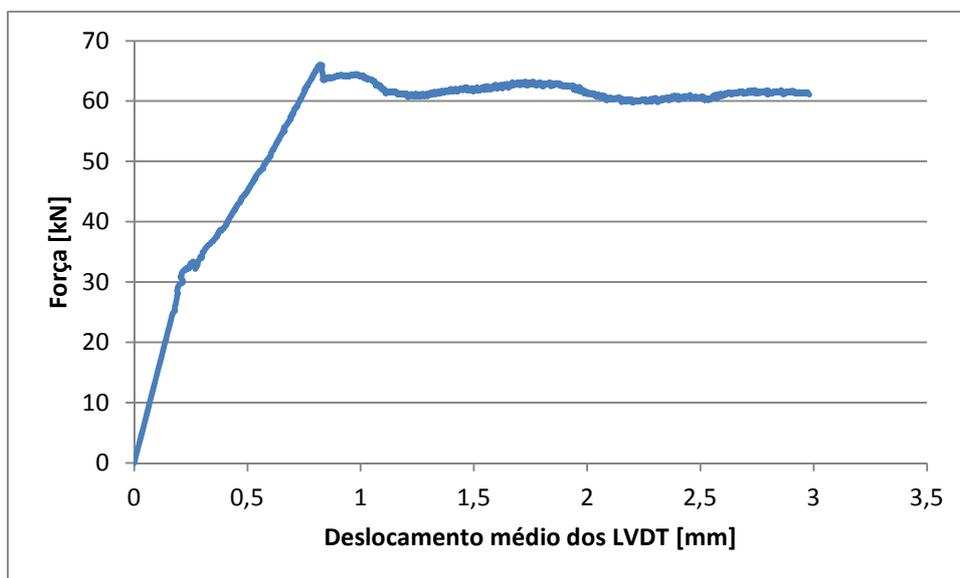
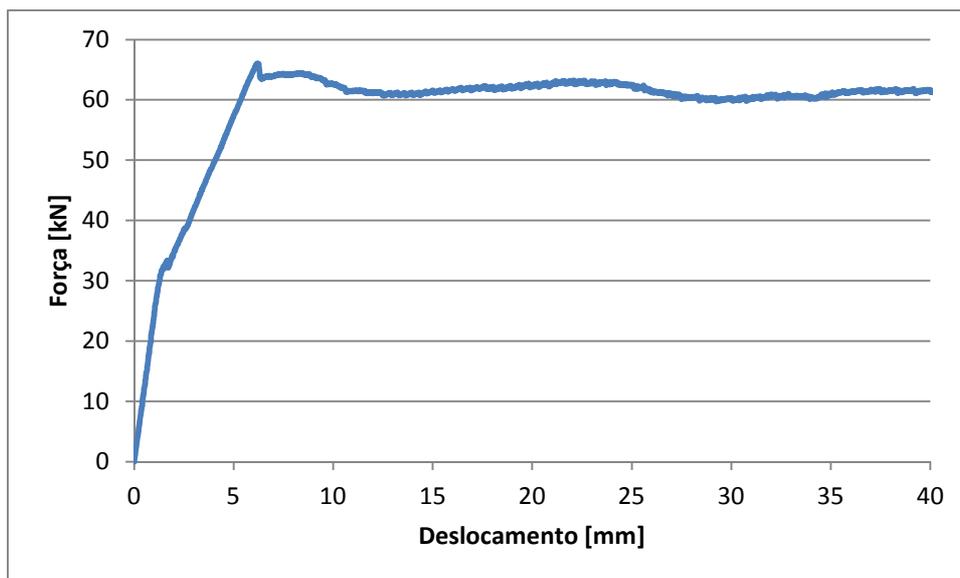
Viga 2 (Dosagem de fibras = 0 kg/m³; ϕ = 8 mm):



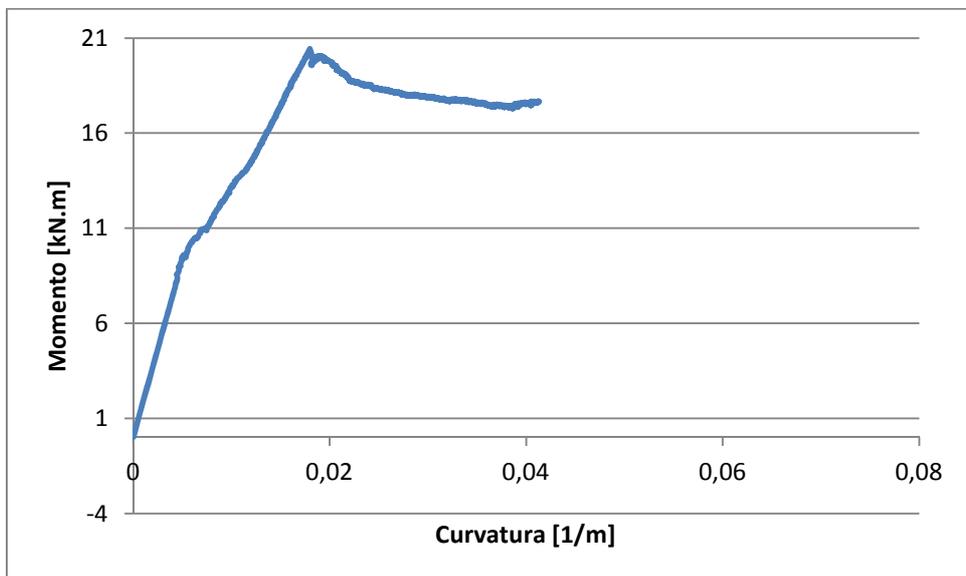
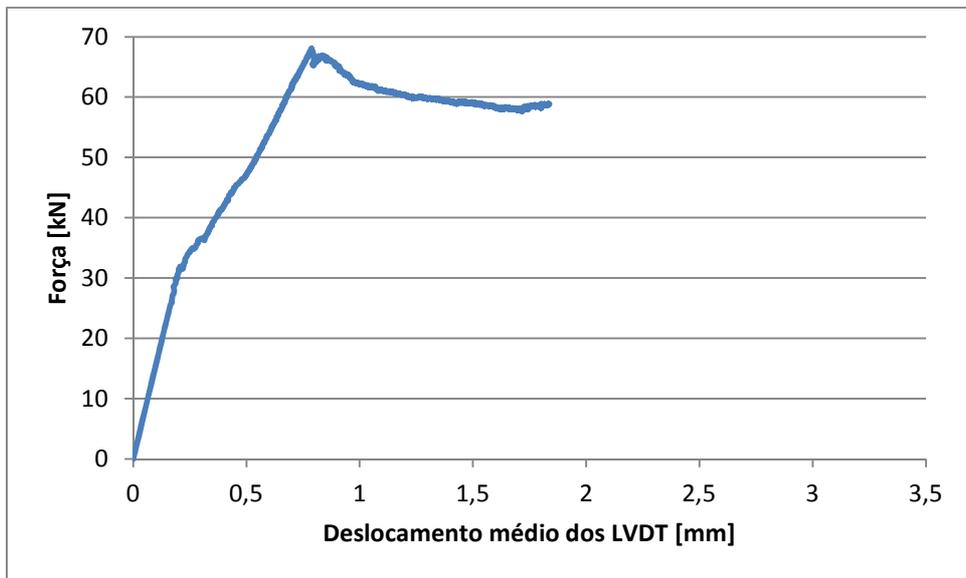
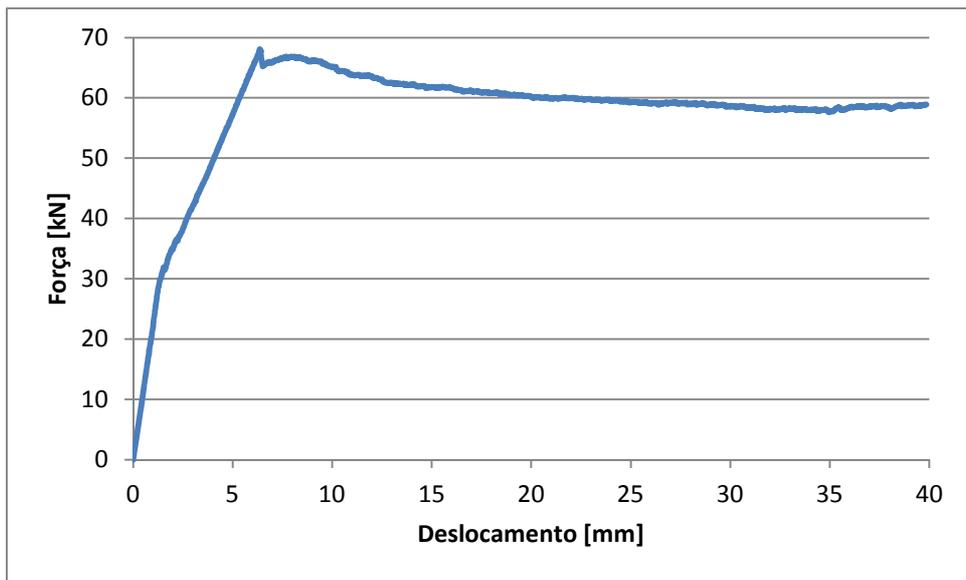
Viga 3 (Dosagem de fibras = 0 kg/m³; ϕ = 8 mm):



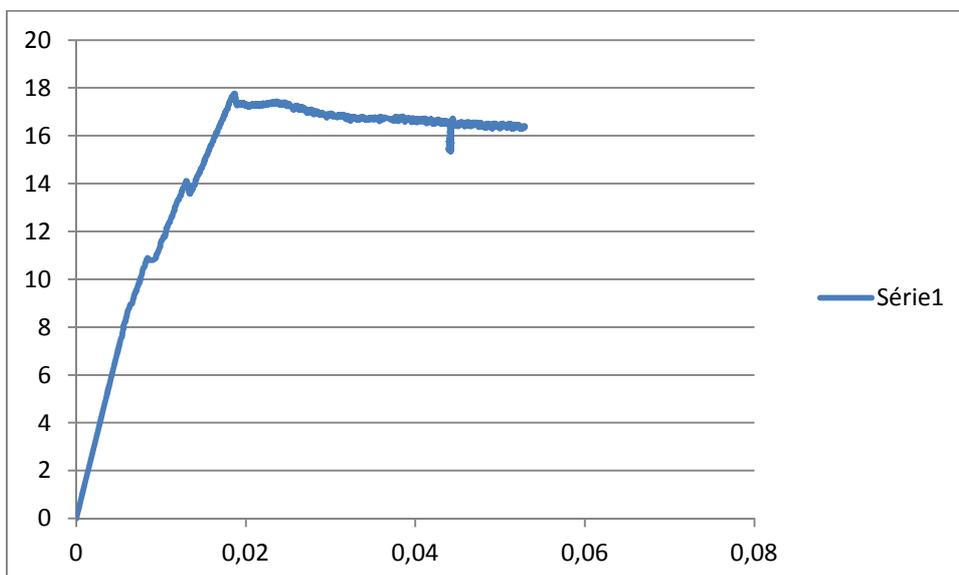
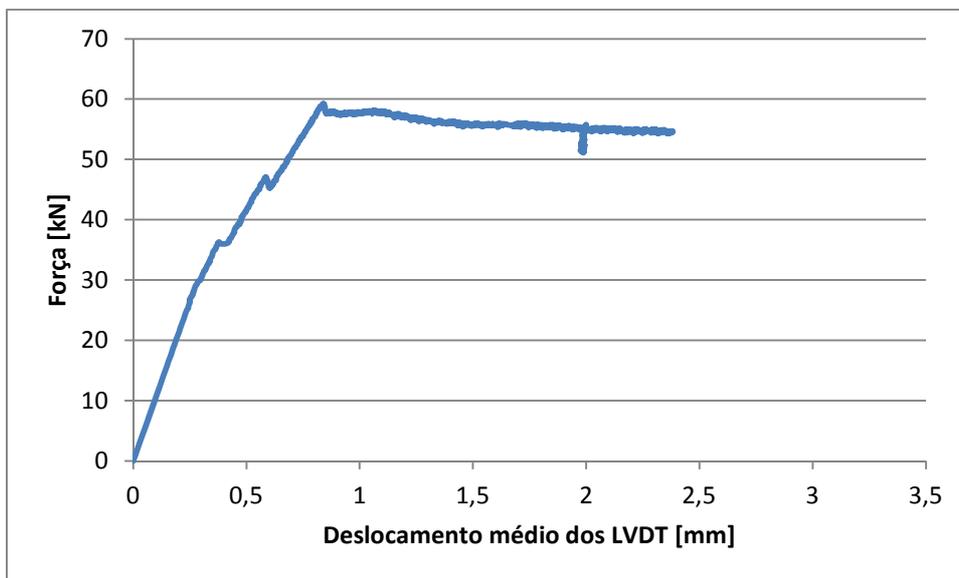
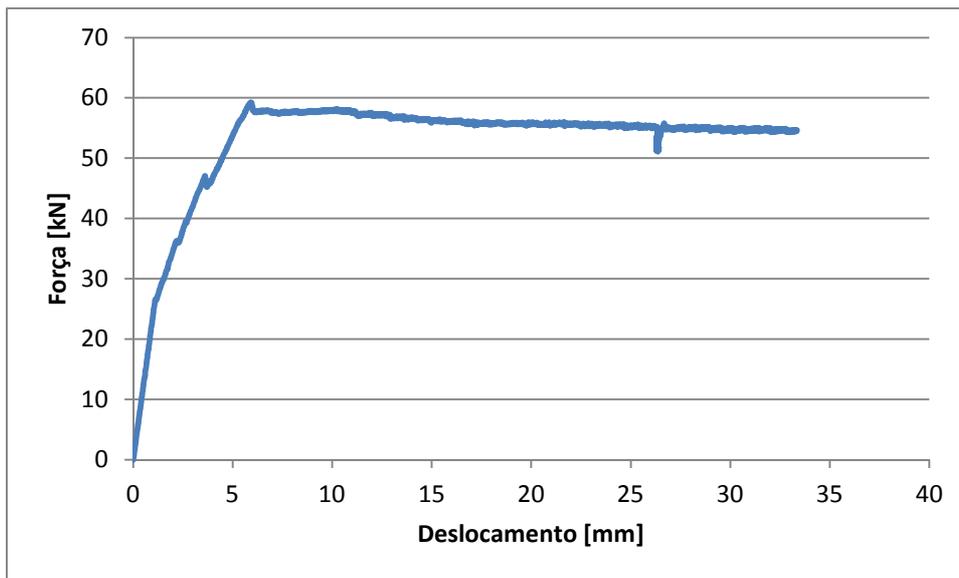
Viga 4 (Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³; ϕ = 8 mm):



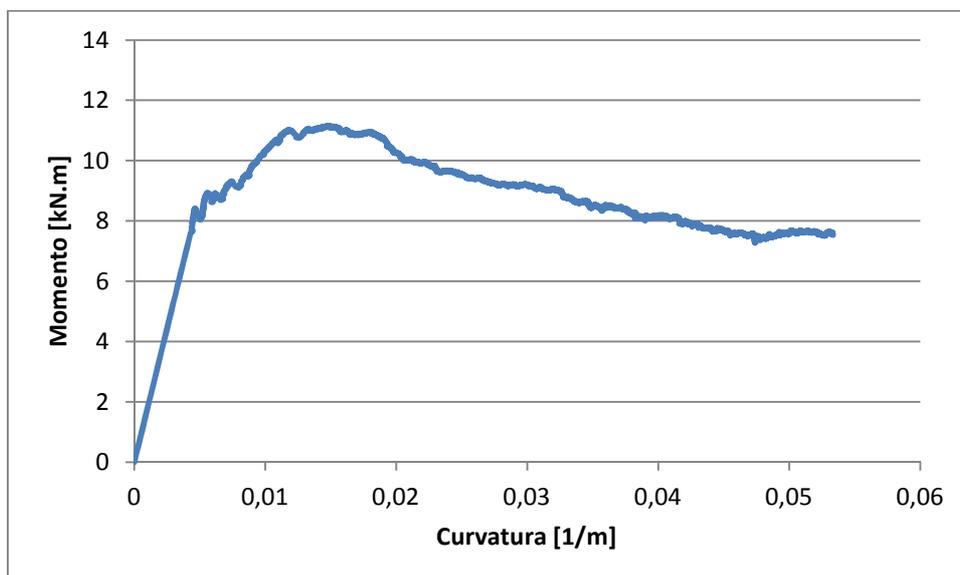
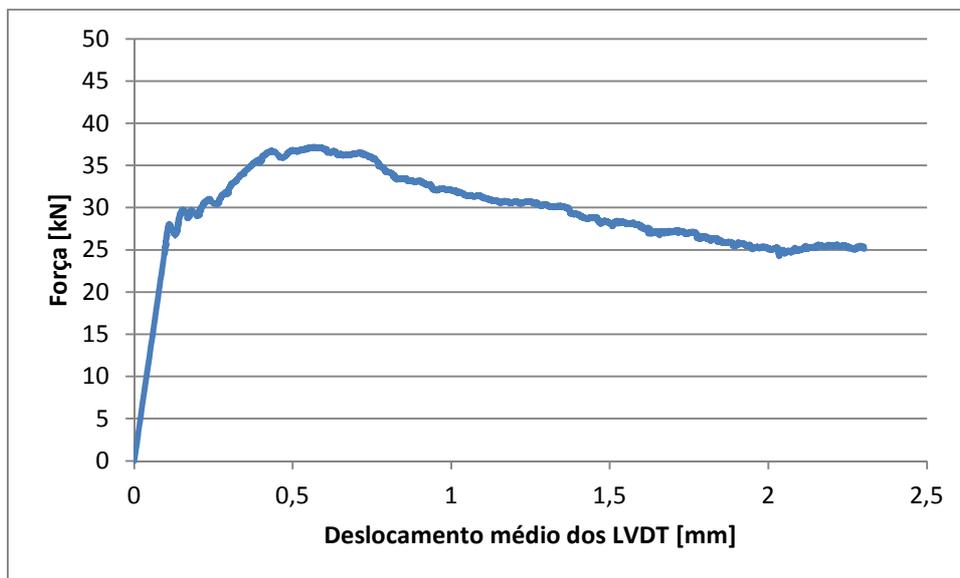
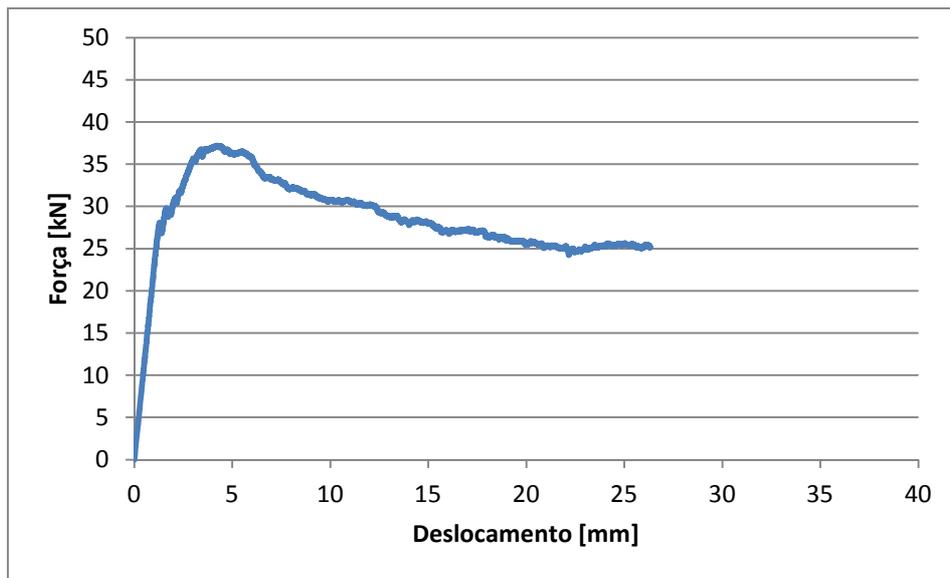
Viga 5 (Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³; ϕ = 8 mm):



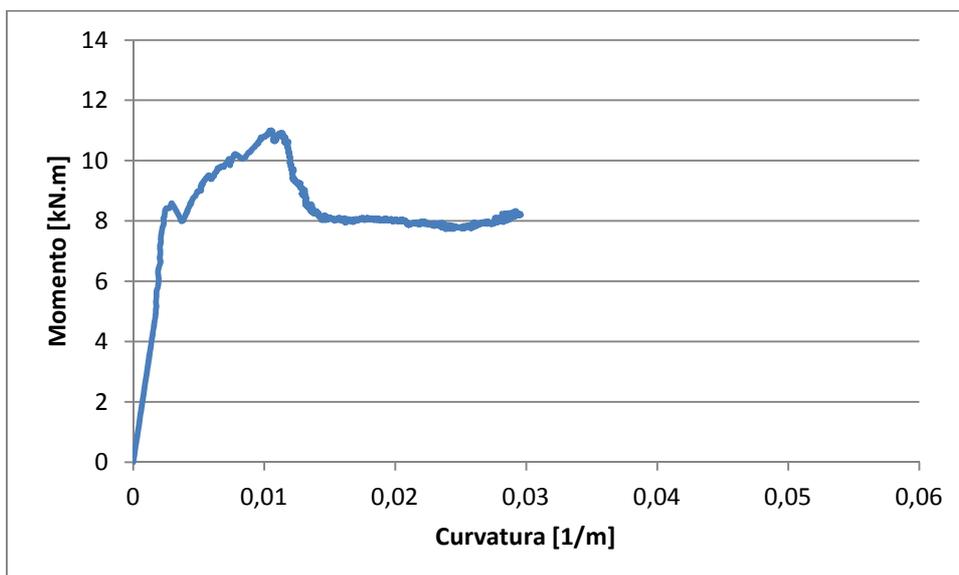
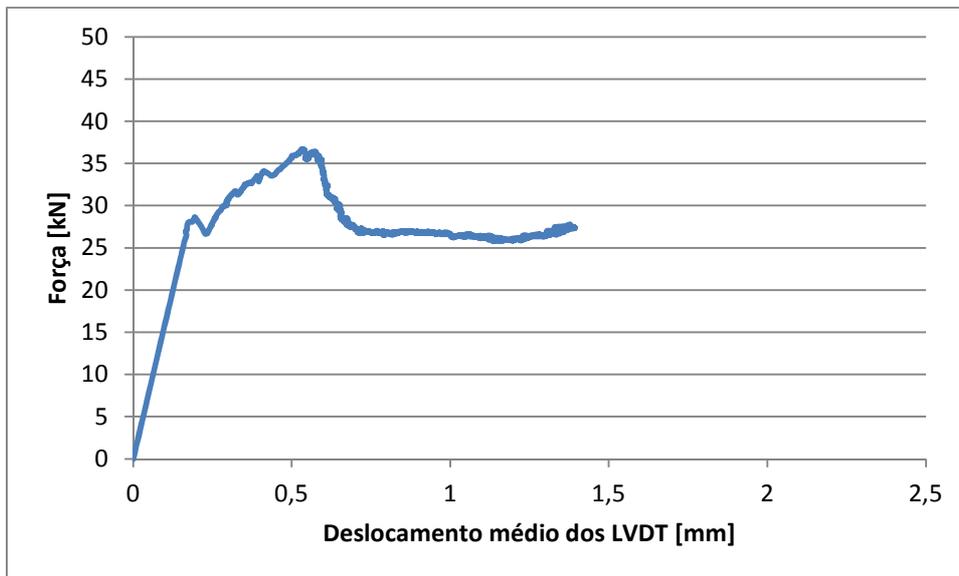
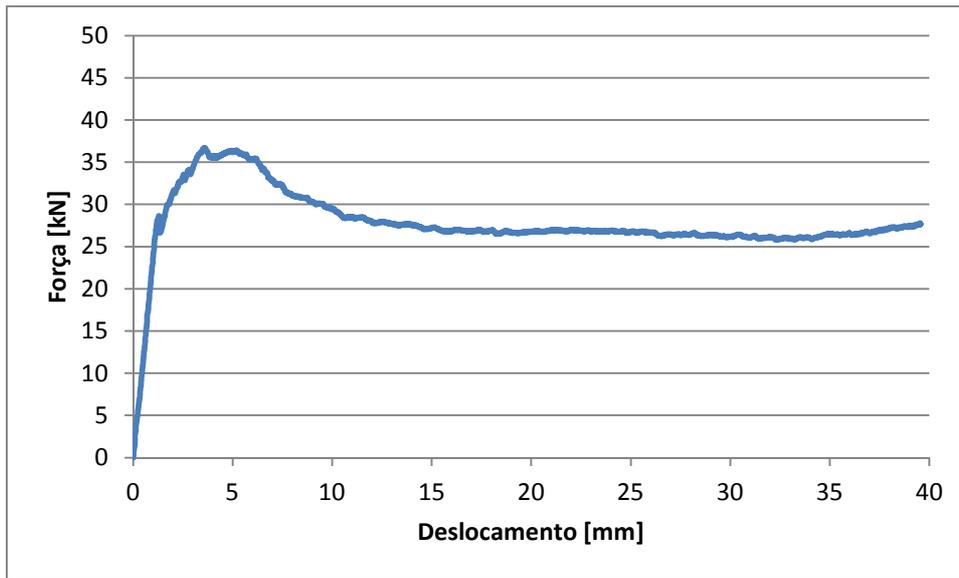
Viga 6 (Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³; ϕ = 8 mm):



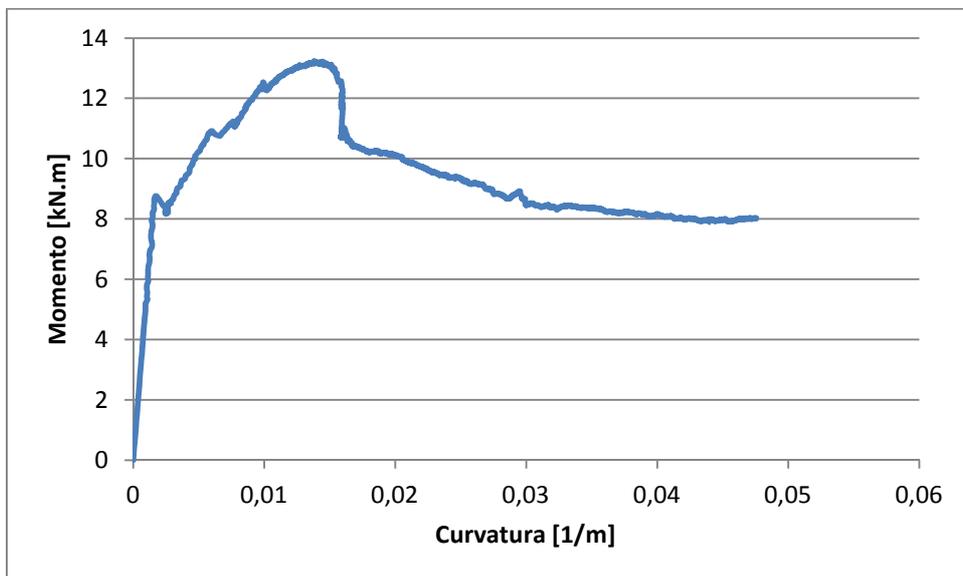
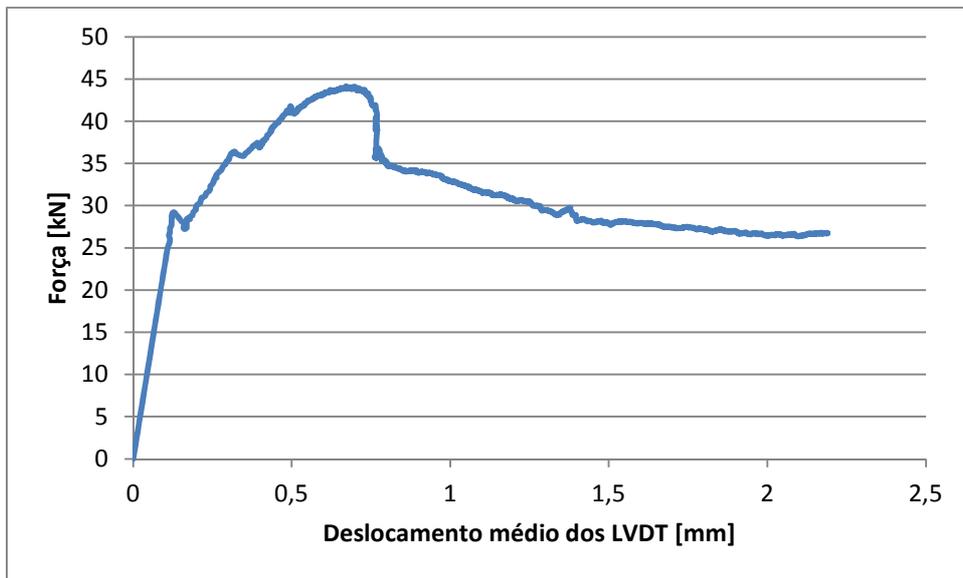
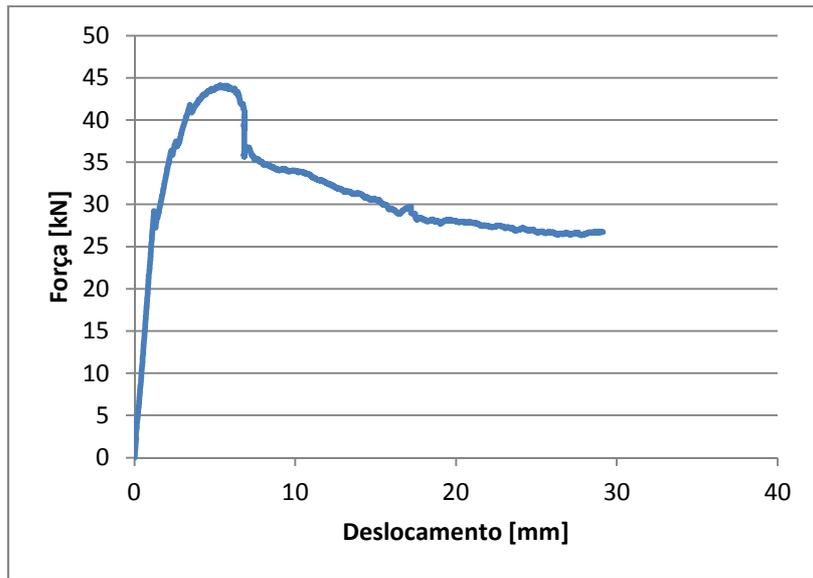
Viga7 (Dosagem de fibras = $39,3 \text{ kg/m}^3$; $\phi = 6 \text{ mm}$):



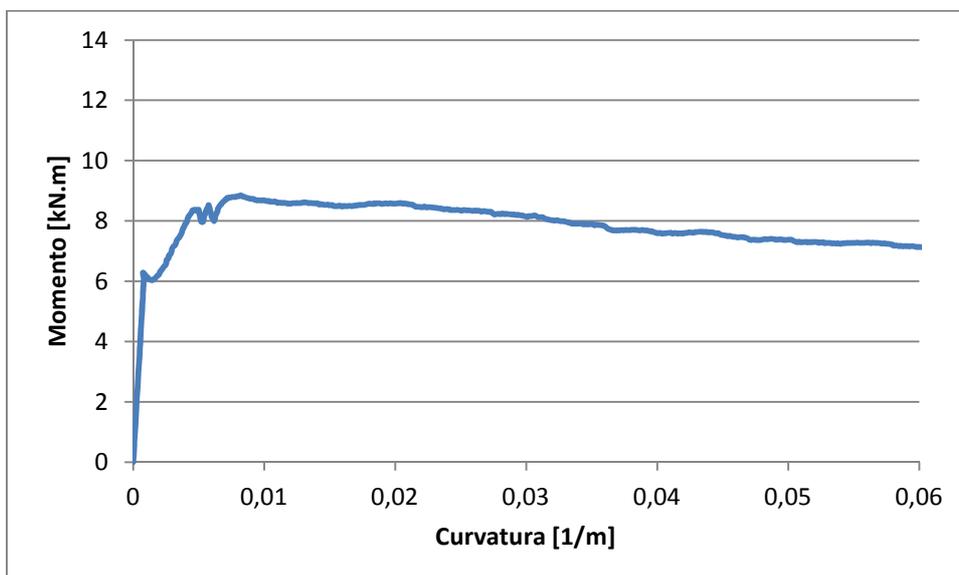
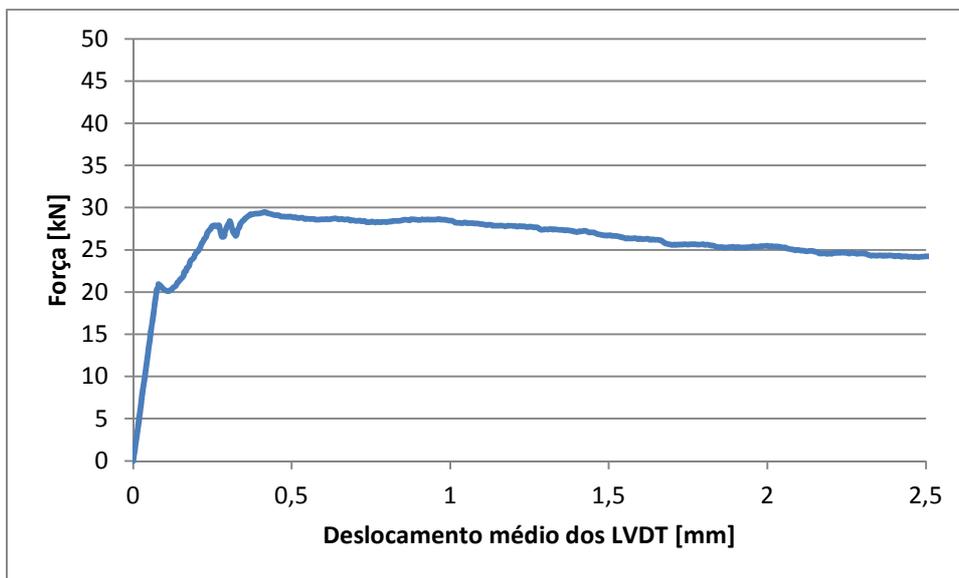
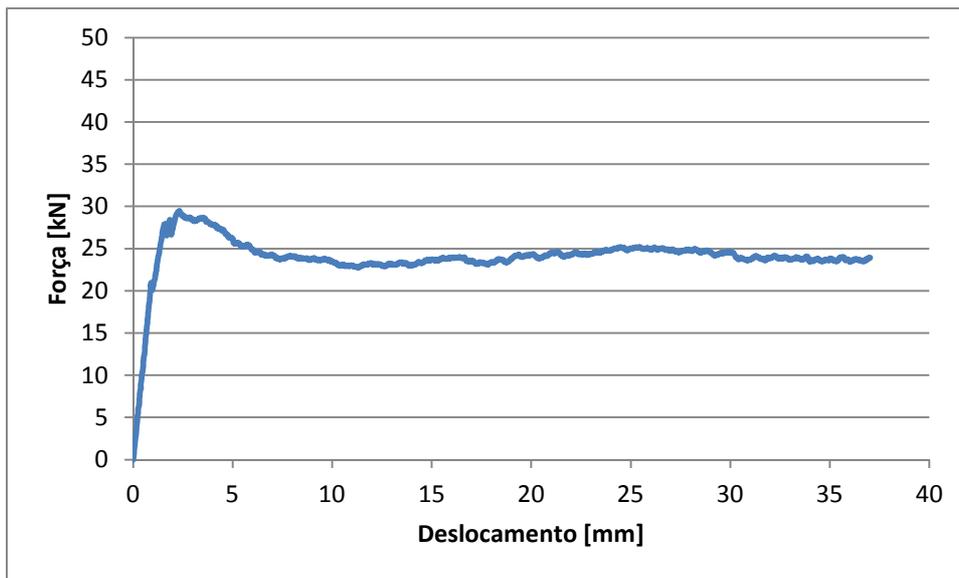
Viga 8 (Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³; ϕ = 6 mm):



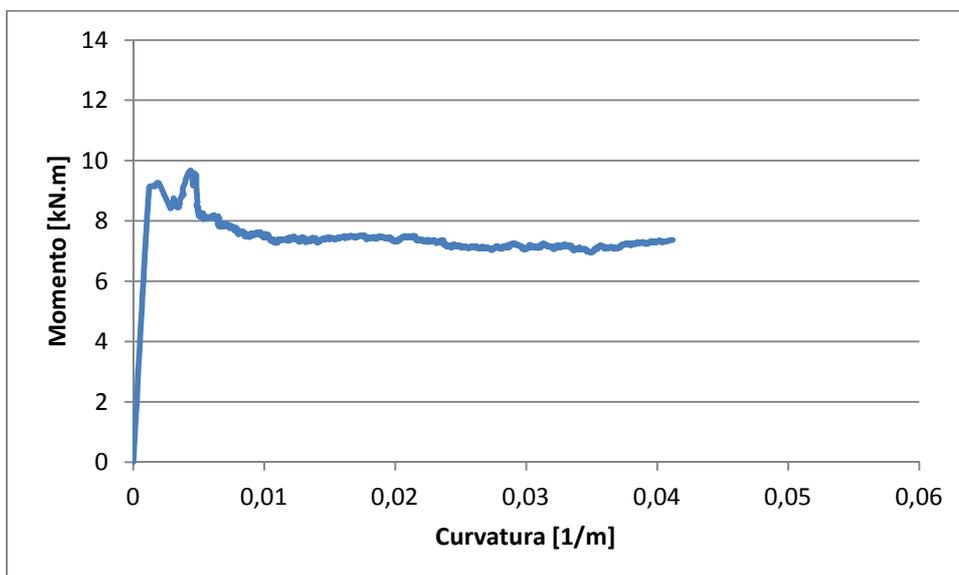
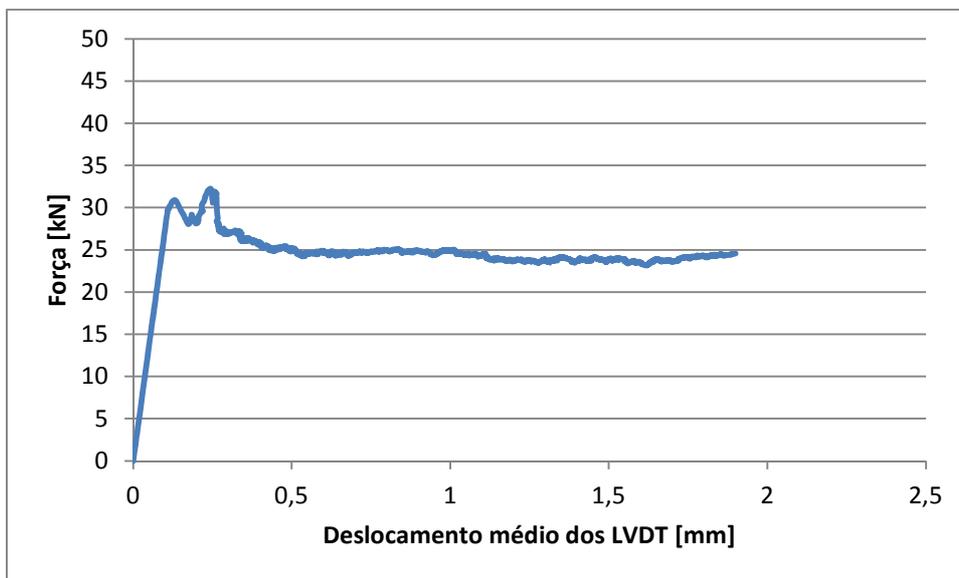
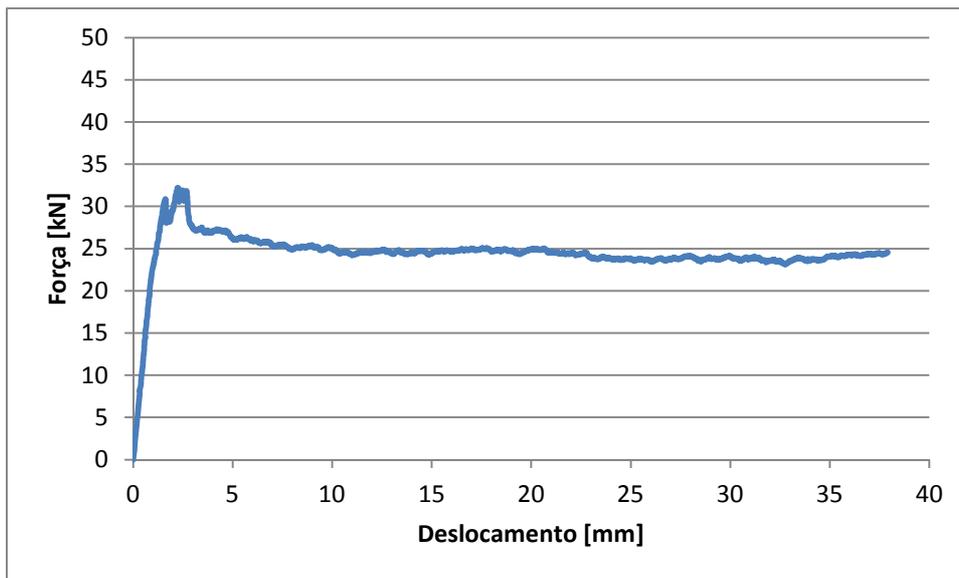
Viga 9 (Dosagem de fibras = 39,3 kg/m³; ϕ = 6 mm):



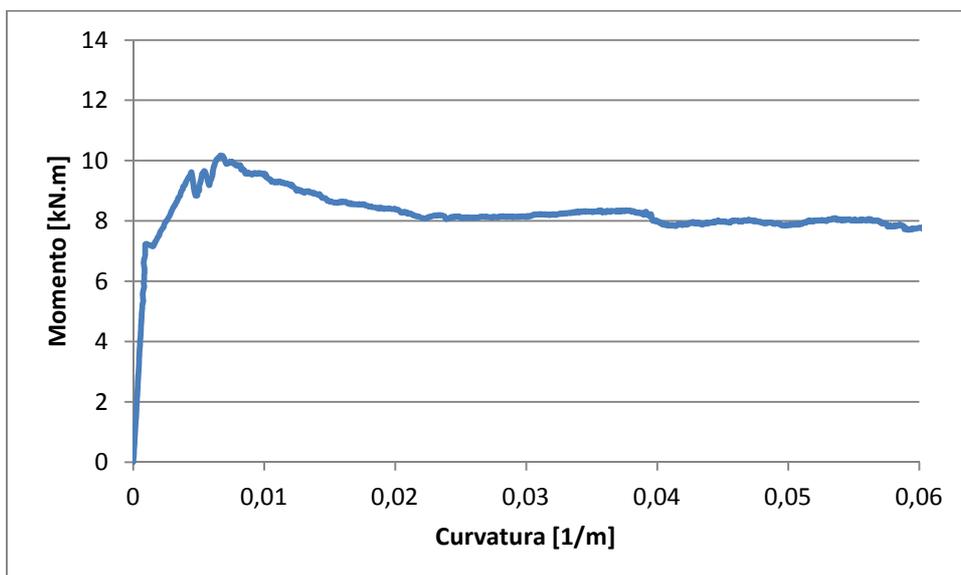
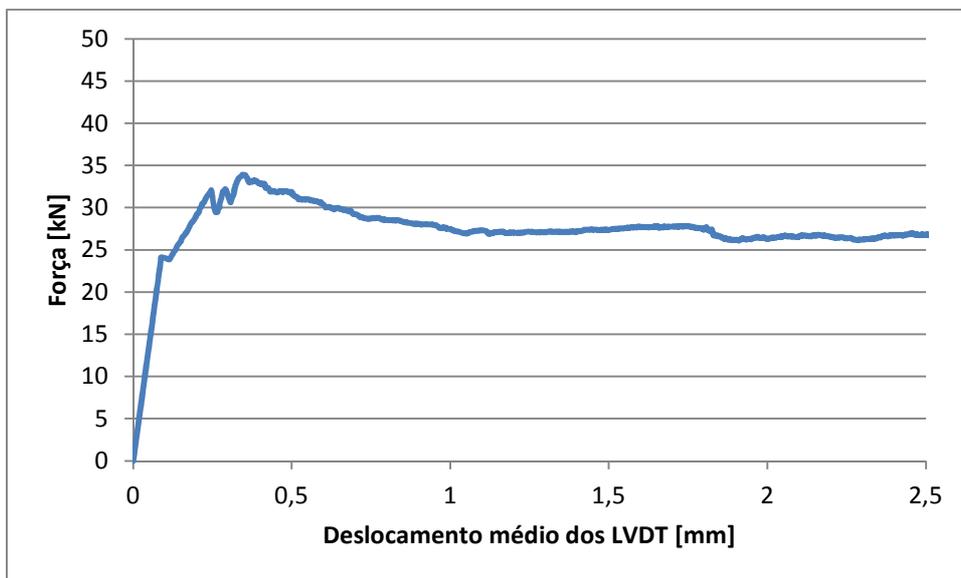
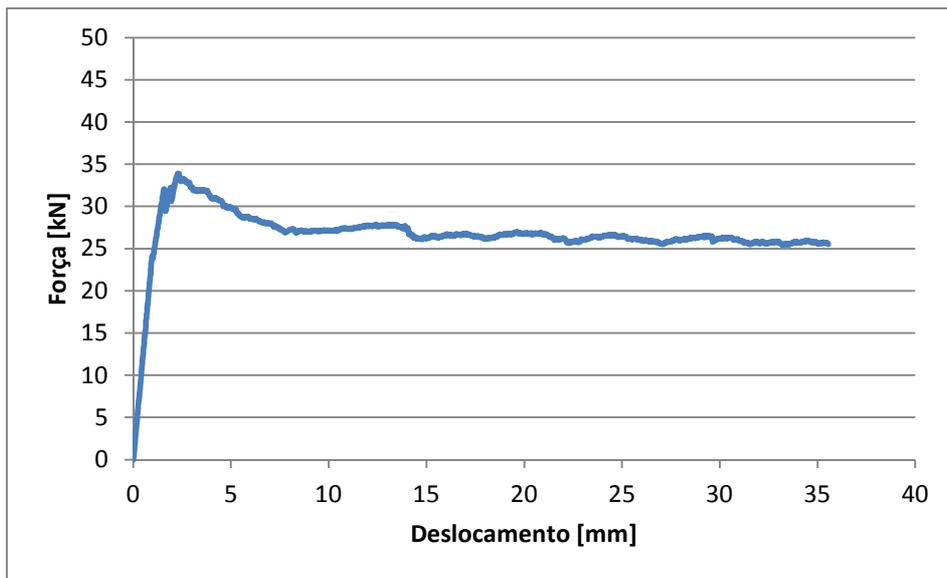
Viga 10 (Dosagem de fibras = 19,6 kg/m³; ϕ = 6 mm):



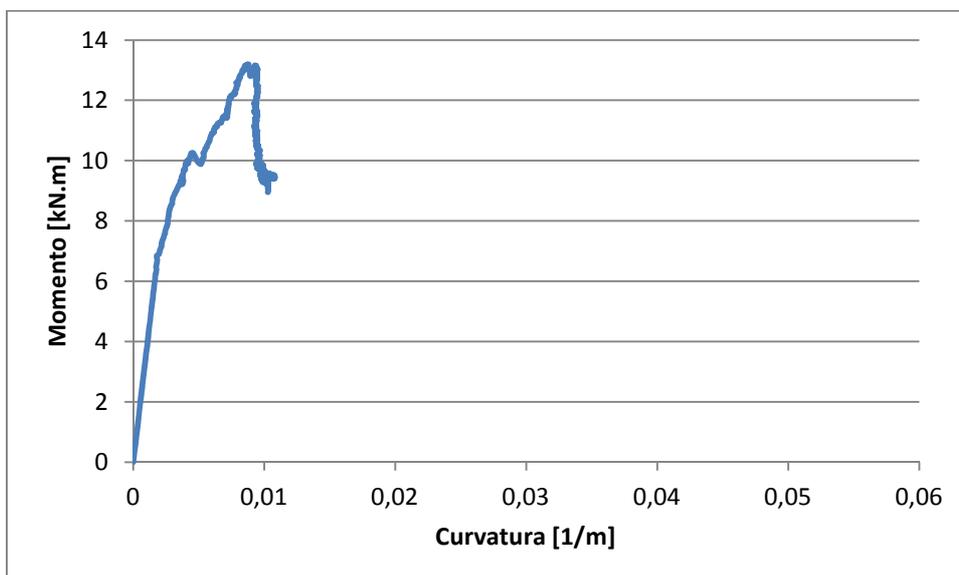
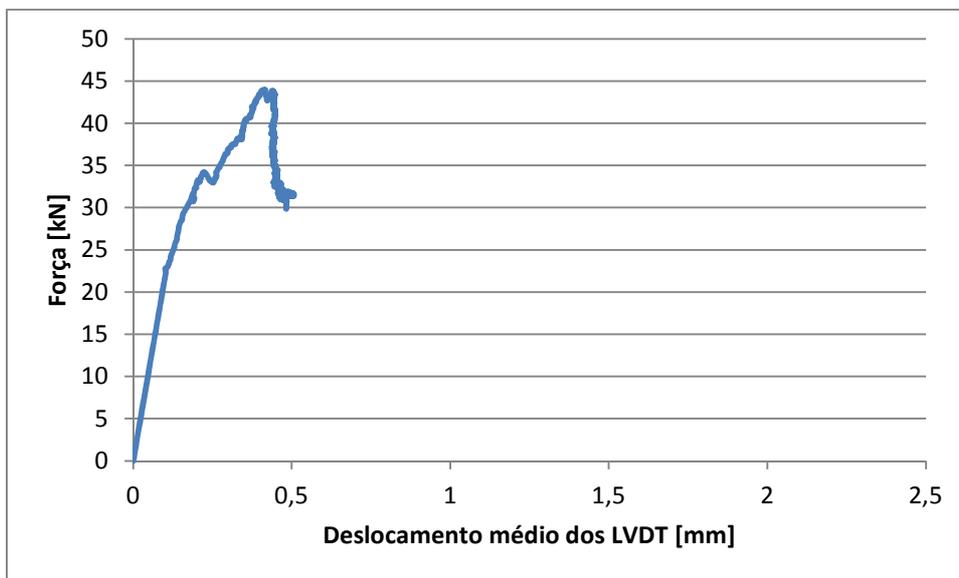
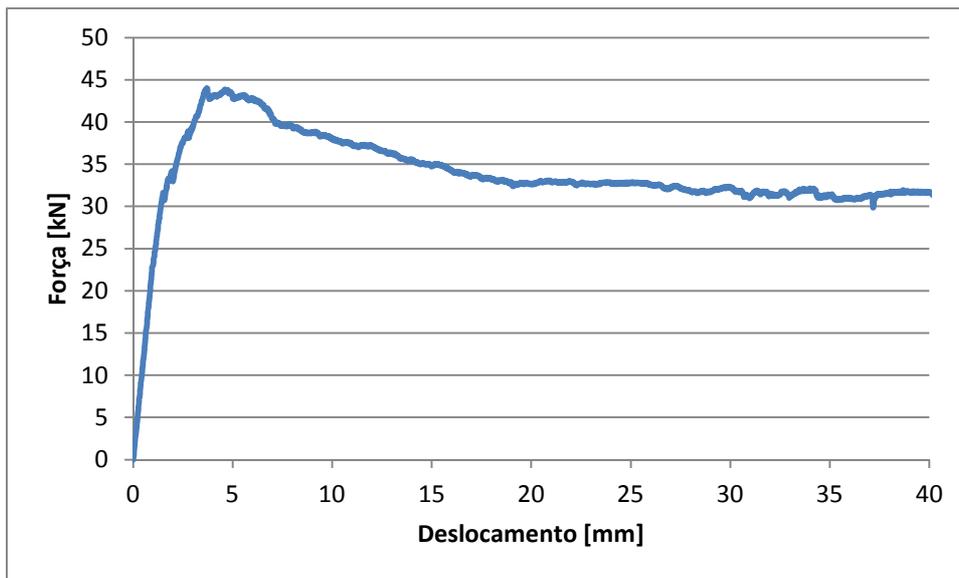
Viga 11 (Dosagem de fibras = 19,6 kg/m³; ϕ = 6 mm):



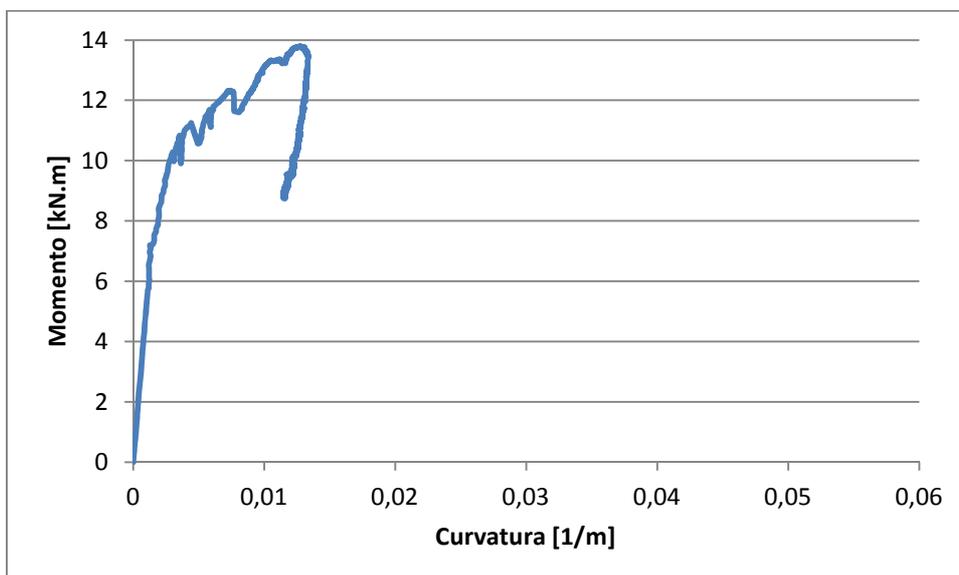
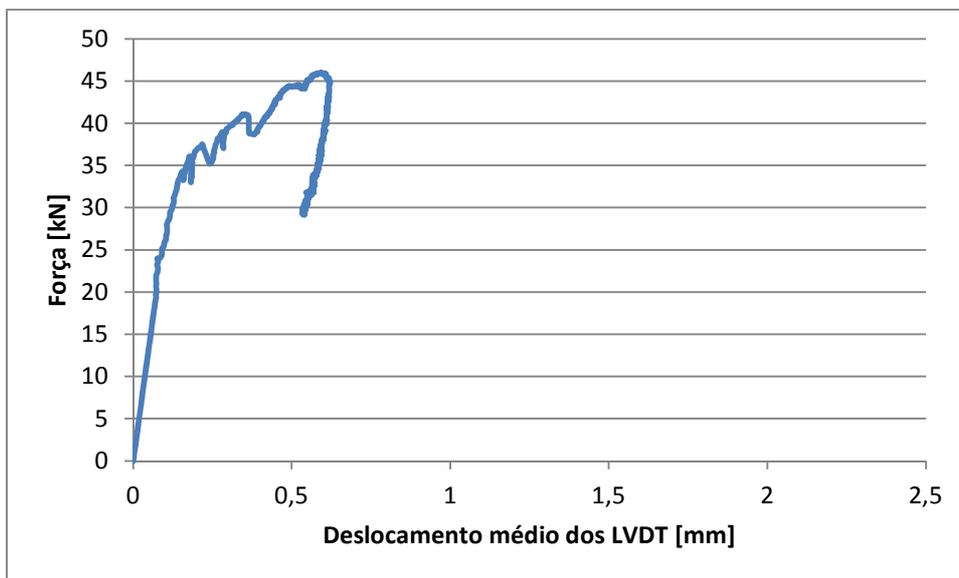
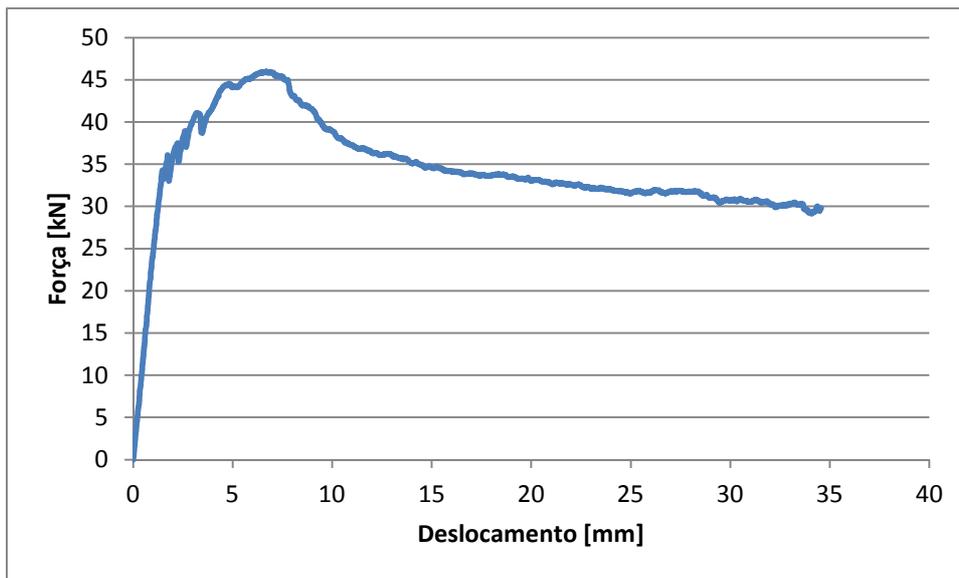
Viga 12 (Dosagem de fibras = 19,6 kg/m³; ϕ = 6 mm):



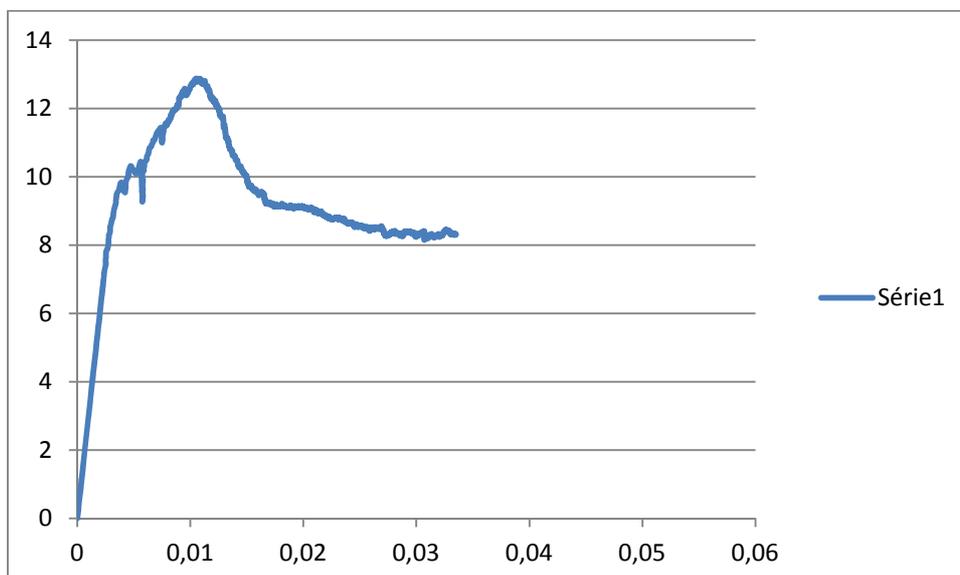
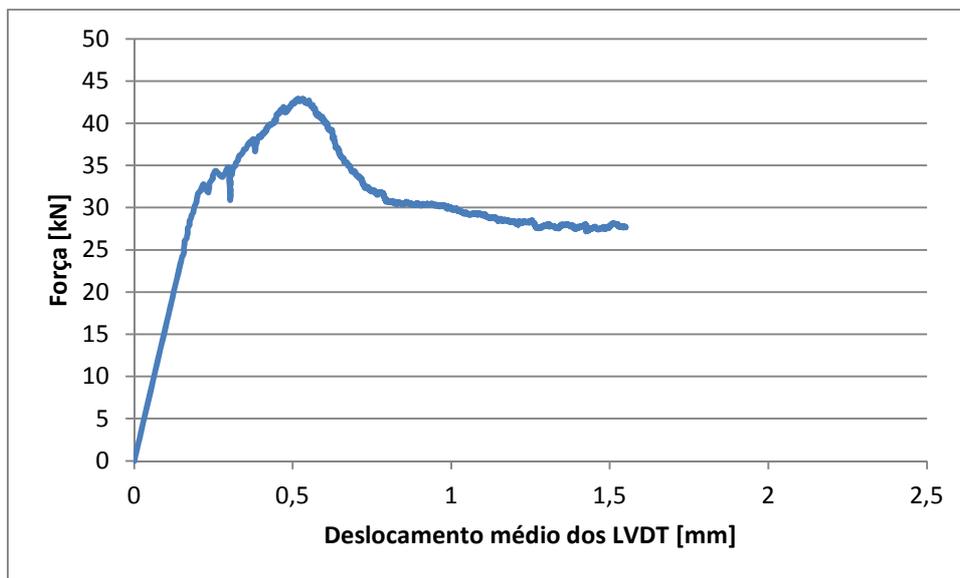
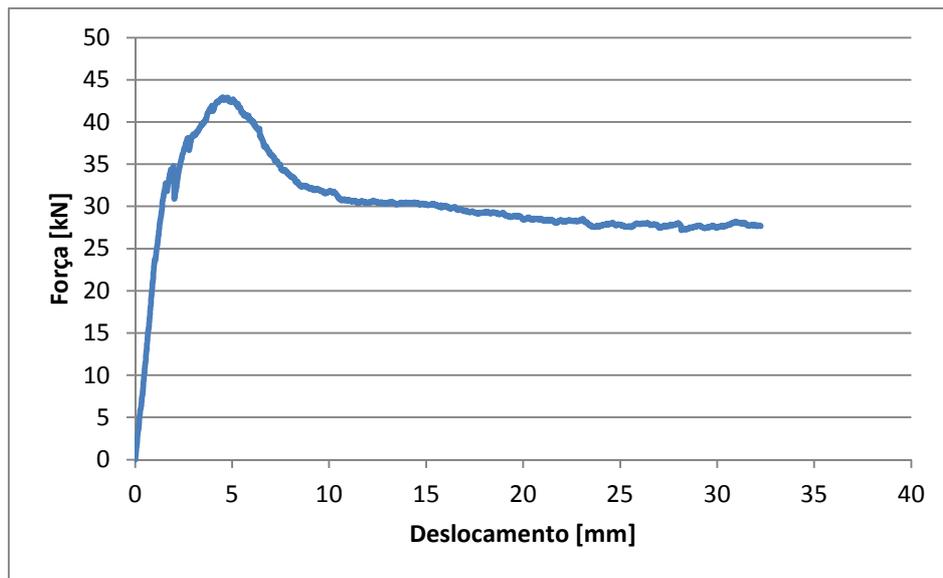
Viga 13 (Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³; ϕ = 6 mm):



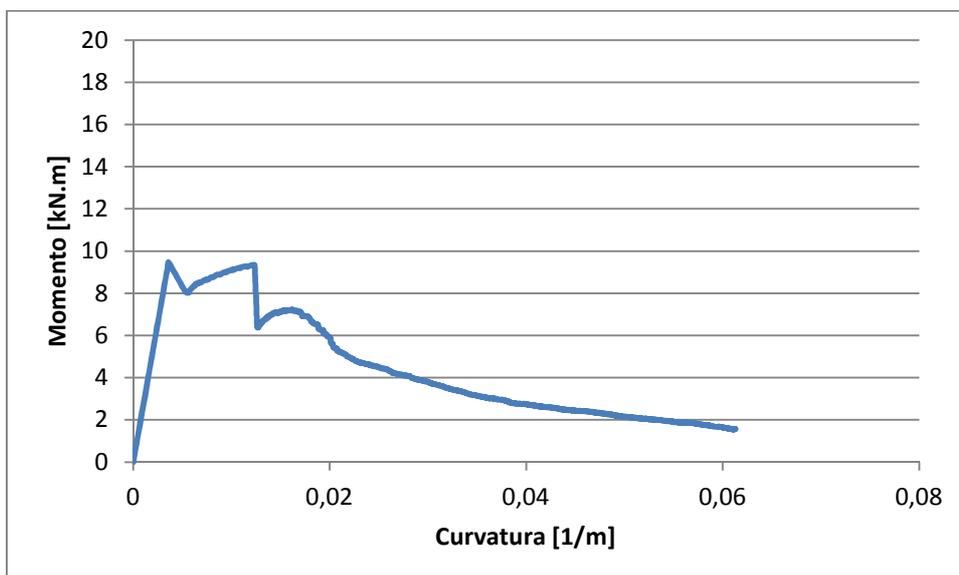
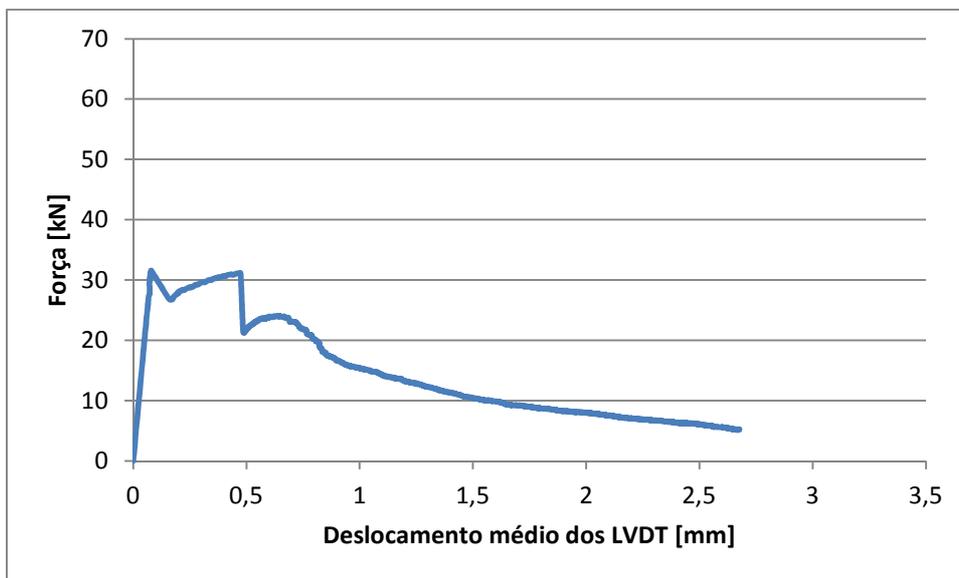
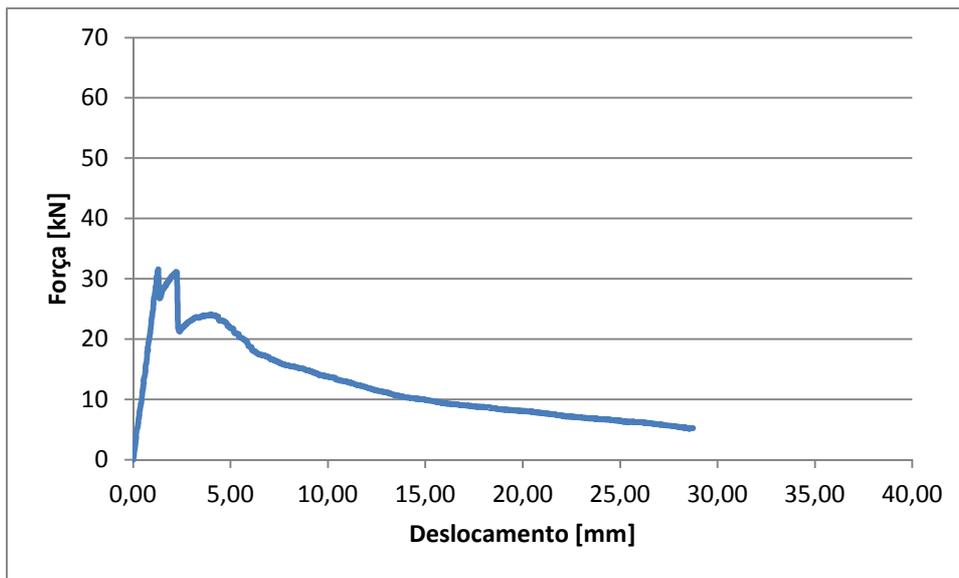
Viga 14 (Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³; ϕ = 6 mm):



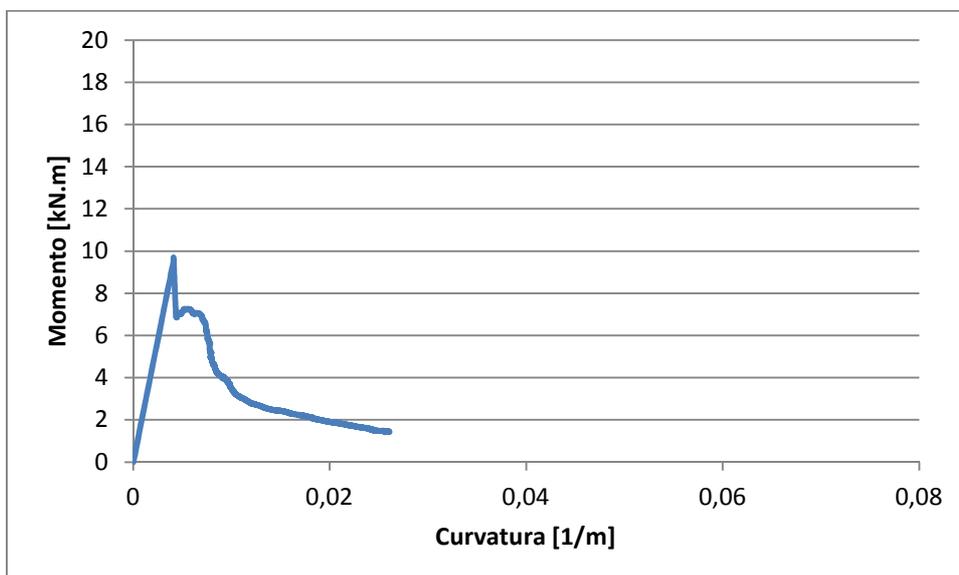
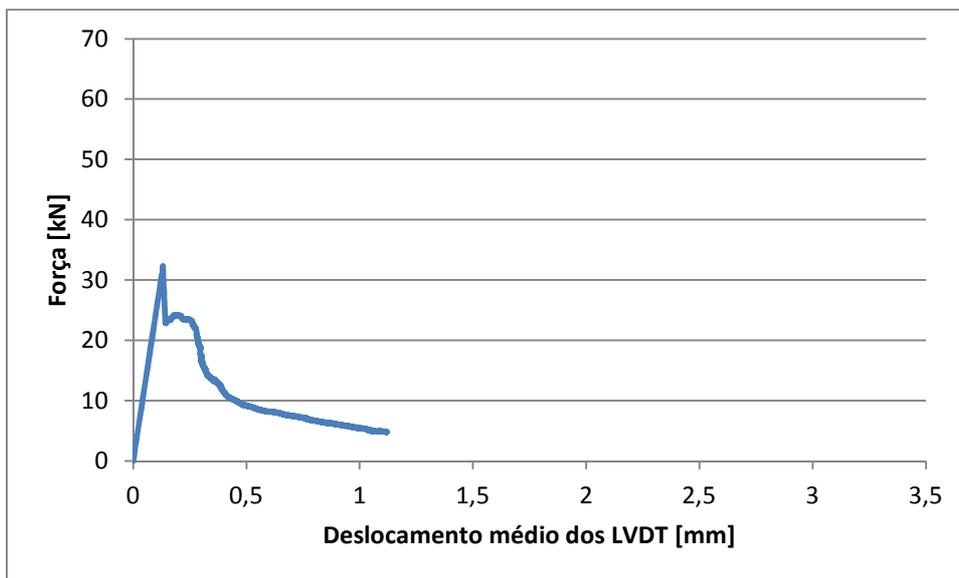
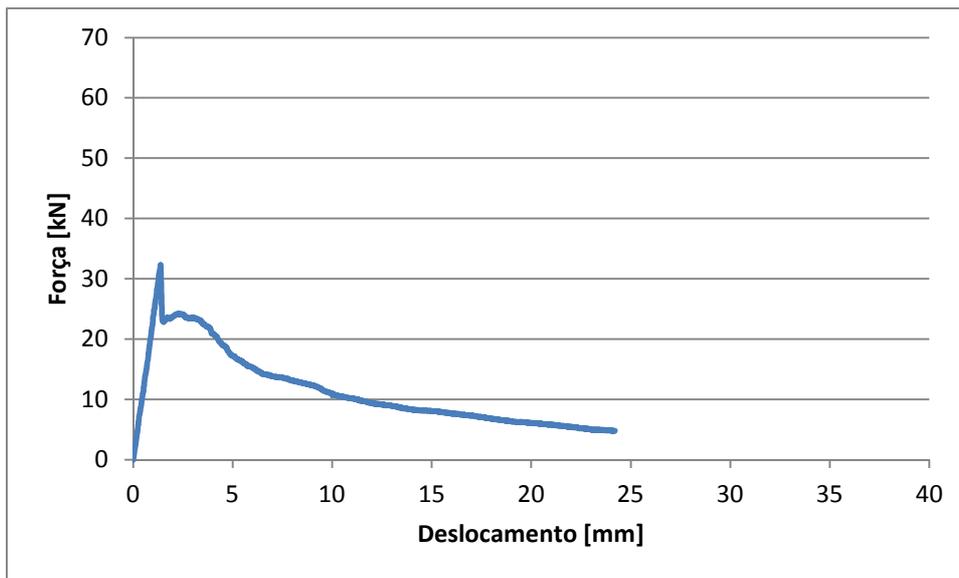
Viga 15 (Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³; ϕ = 6 mm):



Viga 16 (Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³; sem armadura ordinaria):



Viga 17 (Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³; sem armadura ordinaria):



Viga 18 (Dosagem de fibras = 58,9 kg/m³; sem armadura ordinaria):

