



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Mestrado em Engenharia Civil
Especialização em Construção

**Comportamento à Tracção de Betões com Muito Elevado
Teor de Fibras de Aço**

PEDRO MIGUEL DE MEDEIROS CORREIA

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de
Engenharia Civil para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil pela Universidade de Évora

Orientador: Professor Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

Outubro de 2011

Mestrado em Engenharia Civil
Especialização em Construção

**Comportamento à Tracção de Betões com Muito Elevado
Teor de Fibras de Aço**

Pedro Miguel de Medeiros Correia

Orientador: Professor Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

Aos Meus Pais...

Agradecimentos

Ao chegar a esta fase terminal do meu percurso escolar não posso de deixar de dizer algumas palavras a quem tornou possível a realização desta dissertação.

Ao meu Orientador Científico, o Investigador Principal e chefe do Núcleo de Betões (NB) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Professor Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro, por todo o seu apoio, esclarecimentos, sugestões e revisão crítica no final do trabalho, bem como a experiência e conhecimentos transmitidos. Um muito obrigado...

A todos os Técnicos e Auxiliares de ensaio que tiveram um papel fundamental na realização deste trabalho. Ao Sr. João Balsinha, ao Pedro Amaral e ao Olivier Pinheiro pela paciência e amizade demonstrada tanto dentro, como fora do laboratório. Agradeço o conhecimento e a experiência que me transmitiram, o que os tornou certamente em pilares essenciais para a elaboração desta tese. Ao Sr. Milharadas, Sr. Bernardino, Gil, Hélder e Vítor e pelo apoio técnico prestado mesmo quando eu não podia estar presente.

Ao LNEC em geral pelas condições que me proporcionaram para poder realizar os meus trabalhos.

À minha namorada Sofia pelo carinho e apoio nas decisões que tomei estando sempre presente nos momentos em que mais precisava de alguém.

Aos meus colegas que me acompanharam ao desde o primeiro ano de universidade e que provaram ser fieis companheiros. Por mais tempo que possa passar, há amizades que serão para sempre.

A todas as entidades que contribuíram para o fornecimento de materiais necessários para o desenvolvimento desta tese:

À PAVILAJE S.A. pela cedência de algumas fibras.

À CIMPOR de Alhandra pelo fornecimento de cimentos.

À BASF fornecimento de adjuvantes.

À minha família pelo apoio constante que me deram ao longo de todo o meu percurso académico sempre prontos a ajudar no que fosse necessário.

Aos meus pais, dedico este trabalho...

Sumário

Comportamento à Tracção de Betões com Muito Elevado Teor de Fibras de Aço

O desenvolvimento de poderosas misturas químicas de redução e retenção de água tornou possível a criação de misturas cimentícias muito fluidas e altamente resistentes sem ocorrer segregação.

O método que estamos a desenvolver insere-se no campo dos Betões Reforçados com Fibras e é denominado de SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete). Neste método estas misturas preenchem espaços vazios entre as fibras pré-colocadas apenas por acção do próprio peso.

Neste trabalho, foram testadas amostras de SIFCON para avaliar o efeito das fibras na resistência à tracção e nas curvas tensão/deformação de vigas. Foram avaliadas duas misturas e dois tipos de fibra em diferentes quantidades. O aumento da quantidade de fibras leva-nos a maiores tensões de tracção e a um comportamento mais dúctil dos provetes. A melhoria da ligação entre a pasta de cimento e o aço é obtida por misturas de alta resistência, no entanto, a ancoragem das fibras de aço continua a ser um problema para ser resolvido.

Palavras-chave:

Betões Reforçados com Fibras

SIFCON

Resistência à tracção

Curvas tensão/deformação

Abstract

Behavior in Tensile of Concrete with High Level of Steel Fibers

The development of powerful water reduction and water retention mixtures has made it possible to create very fluid cement mixtures and highly resistant without segregation occurs.

The method we are developing is within the field of Fiber Reinforced Concrete and is called SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete). In this method, these mixtures can fill empty spaces between the fibers pre-placed only by action of their own weight.

In this work, SIFCON samples were tested to evaluate the effect of fibers on the tensile strength and load/deflection curves of beams. We evaluated two mixtures and two types of fiber in different quantities. The increased amount of fibers leads us to higher tensile stresses and a more ductile behavior of the specimens. Improving the bonding between the cement paste and steel is obtained by high strength slurries, however, the anchoring of steel fibers is still a problem to be solved.

Keywords:

Fiber Reinforced Concrete

SIFCON

Tensile Strength

Load/deflection curves

Índice de Siglas e Símbolos

Siglas

BRF – Betão Reforçado com Fibras

BRFA – Betão Reforçado com Fibras de Aço

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

SIFCON – Slurry Infiltrated Fiber Concrete

BISFA – International Bureau for the Standardization of Man-Made Fibers

Símbolos

L – Comprimento da fibra

D_e – Diâmetro equivalente da fibra

D_n – Diâmetro nominal da fibra

f_s – Factor de segurança

λ – Factor de forma

A – Área da secção da fibra

w – Largura da fibra

t – Espessura da fibra

m – Peso médio da fibra

ρ – Massa volúmica das fibras

γ – Peso específico

R_m – Resistência à tracção

l – Comprimento de ancoragem

h – Desnível da ancoragem

α – Ângulo da dobra da fibra

σ – Tensão de rotura

M – Momento flector

W – Módulo de flexão

ϵ – Extensão do provete

E – Módulo de elasticidade

Índice

Índice de Figuras	X
Índice de Tabelas	XV
Objectivos e Organização da Dissertação	1
Capítulo 1	
1. Introdução	3
1.1 Do Betão Simples ao Betão Armado	3
1.2 Betão Reforçado com Fibras (BRF)	3
1.2.1 Tipos de fibras	4
1.2.2 Comportamento do BRF	7
1.3 Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA)	9
1.4 Fibras de aço	11
1.4.1 Características Geométricas e Físicas	11
1.4.2 Factor de Forma	14
1.4.3 A Resistência à Tração	14
1.4.4 Processo de produção	15
1.5 SIFCON – Slurry Infiltrated Fiber Concrete	15
Capítulo 2	
2. Materiais e Misturas	18
2.1 Fibras de Aço	18
2.2 Matrizes	19
2.2.1 Matriz 1	19
2.2.2 Matriz 2	20
Capítulo 3	
3. Metodologias de Ensaio	23
3.1 Laboratório	23
3.2 Prismas 40x40x160	23
3.2.1 Moldes	23
3.2.2 Pesagem e colocação das fibras	24
3.2.3 Preparação das argamassas	25
3.2.4 Preparação dos provetes	28
3.2.5 Condicionamento dos provetes	29
3.2.6 Ensaio de flexão	31
3.2.7 Ensaio de compressão	32
3.3 Vigas 100x100x700	33
3.3.1 Moldes	33
3.3.2 Pesagem e colocação das fibras	33
3.3.3 Preparação das argamassas	34

3.3.4	Preparação dos provetes.....	35
3.3.5	Condicionamento dos provetes	36
3.3.6	Ensaio de flexão.....	37
3.3.7	Ensaio de compressão	39
3.4	Cilindros de secção variável 120x160	39
3.4.1	Moldes	39
3.4.2	Pesagem e colocação das fibras	40
3.4.3	Preparação das argamassas	41
3.4.4	Preparação dos provetes.....	42
3.4.5	Condicionamento dos provetes	42
3.4.6	Ensaio de tracção directa	43
Capítulo 4		
4.	Apresentação e discussão dos resultados.....	46
4.1	Prismas 40x40x160	46
4.1.1	Tensões de rotura à flexão	48
4.1.2	Deformações à flexão.....	57
4.1.3	Tensões de rotura à compressão	59
4.2	Vigas100x100x700	60
4.2.1	Tensões de rotura à flexão	60
4.2.2	Deformações à flexão	68
4.2.3	Tensões residuais	70
4.2.4	Deformações residuais.....	76
4.2.5	Tensões de rotura à compressão	78
4.3	Cilindros de secção variável 120x160	79
4.3.1	Tensões de rotura à tracção directa.....	79
4.3.2	Módulos de elasticidade.....	80
Capítulo 5		
5.	Considerações finais e desenvolvimentos futuros	84
BIBLIOGRAFIA		87
ANEXOS		89

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Andorinha - dos - beirais no ninho de palha e lama.....	3
Figura 1.2 – Egípcios a construírem tijolos de palha e barro.....	4
Figura 1.3 – Classificação das fibras segundo BISFA.....	5
Figura 1.4 – Exemplos de tipos de fibras.....	6
Figura 1.5 – Ensaio de Flexão.....	7
Figura 1.6 – Energia Absorvida x Factor de Forma (L/D)	8
Figura 1.7 – Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra-betão com a forma da fibra ...	9
Figura 1.8 – A importância da resistência à tracção da fibra	9
Figura 1.9 – Dosagem x factor de forma (L/D).....	10
Figura 1.10 – Ductilidade x Dosagem.....	10
Figura 1.11 – Exemplo de Fibra Metálica com Ancoragem nas Extremidades	12
Figura 1.12 – Exemplos de Diferentes Formas de Fibras Metálicas.....	12
Figura 2.1 – Modelo esquemático da Fibra 1.....	18
Figura 2.2 – Modelo esquemático da Fibra 2.....	18
Figura 2.3 – Fibras metálicas utilizadas: à esquerda Fibra 2, á direita Fibra 1.....	19
Figura 2.4 – À esquerda V-MAR 3 e à direita ADVA Flow 400	20
Figura 2.5 – GLENIUM ACE 426.....	21
Figura 3.1 – Exemplo de molde típico	23
Figura 3.2 – Molde utilizado no ensaio de flexão a prismas	24
Figura 3.3 – Pesagem das fibras.....	25
Figura 3.4 – Colocação das fibras nos moles 40x40x160.....	25
Figura 3.5 – Misturador automático	27
Figura 3.6 – Recipiente e pá misturadora típicos.....	27
Figura 3.7 – Aspecto da matriz após a amassadura	28
Figura 3.8 – Mesa de espalhamento e cone.....	28
Figura 3.9 – Modelo esquemático do cone	28
Figura 3.10 – Colocação da argamassa nos moldes prismáticos.....	29
Figura 3.11 – Molde preenchido e regularizado.....	29
Figura 3.12 – Câmara Condicionada.....	30
Figura 3.13 – Provetes desmoldados imersos em água.....	30
Figura 3.14 – Estufa.....	30
Figura 3.15 – Esquema da aplicação da carga no provete	31
Figura 3.16 – Ensaio de Flexão a um provete prismático 40x40x160	31
Figura 3.17 – Formação do gráfico força-deformação em tempo real	31
Figura 3.18 – Prensa de compressão de 200kN e flexão de 10kN.....	32
Figura 3.19 – Ensaio de compressão aos prismas	32
Figura 3.20 – Rotura satisfatória de um provete à compressão	32
Figura 3.21 – Comparação entre o mole utilizado para.....	33
Figura 3.22 – Colocação das fibras nos moles 100x100x700.....	34

Figura 3.23 – Misturador manual para argamassas	35
Figura 3.24 – Molde preenchido e regularizado	36
Figura 3.25 – Colocação de um vidro para evitar perdas de água por evaporação	36
Figura 3.26 – Interior da câmara de saturação	36
Figura 3.27 – Vigas 100×100×700	36
Figura 3.28 – Prensa de flexão de 100kN	37
Figura 3.29 – Esquema da aplicação da carga no provete	37
Figura 3.30 – Ensaio de flexão às vigas 100×100×700	38
Figura 3.31 – Colocação de um deflectómetro	38
Figura 3.32 – Prensa de compressão de 1500 kN	39
Figura 3.33 – Moldes para a produção dos provetes cilíndricos	40
Figura 3.34 – Modelo esquemático de um provete cilíndrico	40
Figura 3.35 – Colocação aleatória das fibras no molde	41
Figura 3.36 – Colocação da argamassa no molde cilíndrico	42
Figura 3.37 – Modelo esquemático de uma máquina de tração universal	43
Figura 3.38 – Provelte cilíndrico com os discos colocados	43
Figura 3.39 – Extensómetros	43
Figura 3.40 – Provelte com os transdutores colocados e fixos à prensa de tração	44
Figura 3.41 – Máquina de registo e armazenamento de dados	44
Figura 4.1 – Fissuração do provete	46
Figura 4.2 – Rotura total do provete	46
Figura 4.3 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M1F1	48
Figura 4.4 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1-0	48
Figura 4.5 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F1-75	48
Figura 4.6 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F1-100	49
Figura 4.7 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F1-125	49
Figura 4.8 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M1F2	49
Figura 4.9 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F2-75	50
Figura 4.10 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F2-100	50
Figura 4.11 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F2-125	50
Figura 4.12 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M2F1	51
Figura 4.13 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2-0	51
Figura 4.14 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F1-75	51
Figura 4.15 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F1-100	52
Figura 4.16 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F1-125	52
Figura 4.17 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M2F2	52
Figura 4.18 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F2-75	53
Figura 4.19 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F2-100	53
Figura 4.20 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F2-125	53
Figura 4.21 – Tensões rotura à flexão da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes	55

Figura 4.22 – Tensões rotura à flexão da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes.....	55
Figura 4.23 – Tensões rotura à flexão da Matriz 1 combinada com ambas as fibras.....	55
Figura 4.24 – Tensões rotura à flexão da Matriz 2 combinada com ambas as fibras.....	56
Figura 4.25 – Flecha da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes.....	57
Figura 4.26 – Flecha da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes.....	58
Figura 4.27 – Flecha da Matriz 1 combinada com ambas as fibras.....	58
Figura 4.28 – Flecha da Matriz 2 combinada com ambas as fibras.....	58
Figura 4.29 – Forma do provete após o ensaio de compressão.....	59
Figura 4.30 – Valores médios da resistência à compressão das Matrizes 1 e 2.....	60
Figura 4.31 – Fissuras iniciais do provete.....	61
Figura 4.32 – Curvas Tensão – Flecha para todas as vigas produzidas.....	62
Figura 4.33 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M2F1.....	62
Figura 4.34 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M2F2.....	63
Figura 4.35 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M1F1.....	63
Figura 4.36 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M1F2.....	63
Figura 4.37 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas compostas pelas matrizes 1 e 2.....	64
Figura 4.38 – Tensões de rotura à flexão da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes.....	65
Figura 4.39 – Tensões de rotura à flexão da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes.....	65
Figura 4.40 – Tensões de rotura à flexão da Matriz 1 combinada com ambas as fibras.....	65
Figura 4.41 – Tensões de rotura à flexão da Matriz 2 combinada com ambas as fibras.....	66
Figura 4.42 – Tensões de rotura à flexão em função do número de fibras – Fibra 1.....	67
Figura 4.43 – Tensões de rotura à flexão em função do número de fibras – Fibra 2.....	67
Figura 4.44 – Tensões de rotura dos primas VS tensões de rotura das vigas.....	68
Figura 4.45 – Deformação das vigas com Fibra 1 combinada com ambas as matrizes.....	69
Figura 4.46 – Deformação das vigas com Fibra 2 combinada com ambas as matrizes.....	69
Figura 4.47 – Deformação das vigas com Matriz 1 combinada com ambas as fibras.....	69
Figura 4.48 – Deformação das vigas com Matriz 2 combinada com ambas as fibras.....	70
Figura 4.49 – Viga fracturada após o segundo carregamento.....	71
Figura 4.50 – Curvas Tensão Residual – Flecha para todas as vigas.....	71
Figura 4.51 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do compósito M2F1.....	71
Figura 4.52 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do compósito M2F2.....	72
Figura 4.53 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do compósito M1F1.....	72
Figura 4.54 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do compósito M1F2.....	72
Figura 4.55 – Tensões de rotura residuais da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes.....	73
Figura 4.56 – Tensões de rotura residuais da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes.....	73
Figura 4.57 – Tensões de rotura residuais da Matriz 1 combinada com ambas as fibras.....	74
Figura 4.58 – Tensões de rotura residuais da Matriz 2 combinada com ambas as fibras.....	74
Figura 4.59 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M1F1... 75	75
Figura 4.60 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M1F2... 75	75
Figura 4.61 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M2F1... 75	75

Figura 4.62 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M2F2 ...	76
Figura 4.63 – Flecha residual das vigas com Fibra 1 combinadas com ambas as matrizes	77
Figura 4.64 – Flecha residual das vigas com Fibra 2 combinadas com ambas as matrizes	77
Figura 4.65 – Flecha residual das vigas com Matriz 1 combinadas com ambas as fibras	77
Figura 4.66 – Flecha residual das vigas com Matriz 2 combinadas com ambas as fibras	78
Figura 4.67 – Valores médios da resistência à compressão das Matrizes 1 e 2 das vigas	78
Figura 4.68 – Exemplo de um provete após o ensaio de tração.....	79
Figura 4.69 – Curvas Tensão – Extensão para todos os provetes cilíndricos	80
Figura 4.70 – Módulo de elasticidade do provete M1F1	81
Figura 4.71 – Módulos de elasticidade do provete M1F2.....	81
Figura 4.72 – Módulo de elasticidade do provete M2F1	81
Figura 4.73 – Módulos de elasticidade do provete M2F2.....	82

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Características mecânicas das fibras	5
Tabela 1.2 – Resistência à tração para 3 classes de fibras segundo a norma UNI 11037.....	14
Tabela 2.1 – Materiais utilizados na Matriz 1	20
Tabela 2.2 – Materiais utilizados na Matriz 2	21
Tabela 3.1 – Prismas produzidos.....	24
Tabela 3.2 – Matriz 1 – Quantidades (volume para 1 molde)	25
Tabela 3.3 – Matriz 2 – Quantidades (volume para 1 molde)	26
Tabela 3.4 – Velocidades da pá misturadora	26
Tabela 3.5 – Tempos de amassadura.....	27
Tabela 3.6 – Vigas produzidas	34
Tabela 3.7 – Matriz 1 – Quantidades (volume para uma viga).....	34
Tabela 3.8 – Matriz 2 – Quantidades (volume para uma viga).....	35
Tabela 3.9 – Cilindros produzidos.....	41
Tabela 3.10 – Matriz 1 – Quantidades (volume para um provete).....	41
Tabela 3.11 – Matriz 2 – Quantidades (volume para um provete).....	42
Tabela 4.1 – Prismas produzidos e respectivas cargas de rotura e deformações na rotura	47
Tabela 4.2 – Tensões de rotura médias dos prismas	54
Tabela 4.3 – Flechas no instante da rotura dos prismas	57
Tabela 4.4 – Vigas produzidas com a Matriz 1	61
Tabela 4.5 – Vigas produzidas com a Matriz 2.....	61
Tabela 4.6 – Tensões de rotura das vigas	64
Tabela 4.7 – Flechas no instante da rotura das vigas.....	68
Tabela 4.8 – Tensões residuais máximas das vigas	73
Tabela 4.9 – Flechas residuais das vigas	76
Tabela 4.10 – Cilindros produzidos e respectivas cargas de rotura e deformações	79

Objectivos e Organização da Dissertação

Há mais de um século que as estruturas de betão armado têm vindo a ser construídas com um grau de segurança razoável ao nível do seu comportamento estrutural. São poucas as roturas ou colapsos de estruturas que são reflexo de regulamentações de códigos mal elaborados ou inapropriados, excepção feita, no que diz respeito à regulamentação sísmica, pois esta ainda apresenta alguma insegurança devido à imprevisibilidade do fenómeno sísmico. No entanto, embora as estruturas em betão armado continuem a demonstrar que oferecem segurança ao longo dos tempos, e além disso, o seu método de cálculo permite aos projectistas alguma margem para erros de concepção e dimensionamento, sem que a estabilidade do edifício ou outro tipo de estrutura seja posta em causa, estas estruturas com armaduras ordinárias apresentam potencial para desenvolvimento ao nível da concepção e desempenho. O trabalho de armação e colocação dos varões de aço implica gastos de tempo e custos significativos e as estruturas apresentam problemas ao nível de controlo da fendilhação.

As fibras de aço já são utilizadas no betão, mas essencialmente em pequenas quantidades devido à reduzida trabalhabilidade associada, o que limita o seu campo de aplicação. O problema principal e que nos leva à realização deste estudo é, portanto, o facto de que com a mistura de fibras na central de betão estaremos sempre limitados às quantidades de aço que poderão ser aplicadas.^[1] Pretende-se com este trabalho avaliar a possibilidade de contornar este problema recorrendo à utilização de grandes quantidades de fibra metálica pré-colocada. Para esse efeito foram produzidas amostras as quais foram submetidas a ensaios de flexão, tração directa e compressão com a finalidade de determinar as suas resistências mecânicas e deformabilidade. Foram utilizados três tipos diferentes de provetes na forma de prismas 40×40×160, vigas 100×100×700 e cilindros de secção variável 120×160 (unidades em mm), utilizando duas matrizes diferentes e dois tipos de fibras em diferentes quantidades, os quais foram submetidos diferentes ensaios de resistência. As vigas foram produzidas pela simples razão de os prismas possuírem dimensões pequenas relativamente ao tamanho das fibras o que poderia condicionar a colocação aleatória das mesmas. Foi determinada a resistência à flexão dos prismas e das vigas e a resistência à tração directa dos cilindros assim como a deformação que estes sofreram para que se pudesse avaliar a influência das fibras na capacidade resistente e ductilidade das misturas.

CAPÍTULO 1

Introdução

1. Introdução

1.1 Do Betão Simples ao Betão Armado

Sabe-se que o betão simples resiste bem aos esforços de compressão e muito pouco aos esforços de flexão. No entanto, elementos estruturais como lajes, vigas e pilares, são solicitados por vários esforços (tracção, flexão, corte, compressão e punçoamento), aos quais o betão simples não é capaz de apresentar globalmente resistência suficiente. Por isso torna-se necessária a adição ao betão simples de um material que resista bem a estes esforços, destacando-se o aço. A junção desses dois materiais, aço e betão, forma um terceiro, o betão armado, que se apresenta como uma excelente opção para quase todo o tipo de estruturas.

A característica mais importante que se pode realçar em relação ao betão armado é a combinação de um material que resiste muito bem à compressão, o betão, com um material que resiste muito bem à tracção, o aço. De maneira geral, pode-se dizer que, nas peças de betão armado, o betão é o responsável por resistir aos esforços de compressão e o aço aos esforços de tracção. Nas peças essencialmente comprimidas, o aço aumenta a capacidade resistente do elemento pois este resiste tanto à tracção como à compressão. Porém o betão possui uma baixa resistência à tracção, na ordem de 10% da sua resistência à compressão, para os betões de baixa resistência. Para resistências à compressão mais altas, essa percentagem diminui.^[1]

As primeiras referências ao betão armado datam de 1830, no entanto um barco em ferrocimento realizado pelo francês Jean-Louis Lambot em 1848 é reconhecido como a obra mais antiga de betão armado ainda existente. Este barco foi apresentado na célebre Exposição Universal de Paris de 1855 e está ainda preservado até aos nossos dias.^[2]

1.2 Betão Reforçado com Fibras (BRF)

Desde a antiguidade que o conceito de reforçar materiais mais frágeis com fibras formando um compósito tem vindo a ser utilizado. Aliás, para ser correcto este conceito remonta ainda a épocas anteriores à própria existência do homem. Por exemplo, muitos pássaros partilham deste princípio



Figura 1.1 – Andorinha - dos - beirais no ninho de palha e lama

para construírem o seu ninho. Um exemplo concreto e que todos nós conhecemos é o caso da andorinha-dos-beirais (*Delichon urbicum*). Esta é uma pequena ave migratória pertencente à família das andorinhas (*Hirundinidae*) que migra no Verão para a Europa, Norte de África e regiões temperadas da Ásia e passa o Inverno na África Subsariana e Ásia Tropical. Esta ave constrói ninhos fechados em forma de taça com lama e palha sob os beirais dos edifícios ou locais semelhantes, normalmente em colónias (Figura 1.1).^{[3][4]}

Os compósitos são materiais cuja utilização pelo homem já ocorre desde o Antigo Egipto, como nos reportam as Sagradas Escrituras (Figura 1.2). “Nesse mesmo dia, o Faraó deu a seguinte ordem aos inspectores do povo e aos capatazes: *Não mais fornecereis ao povo palha para fazer os tijolos, como antigamente, que eles próprios a vão buscar.*”^[5]

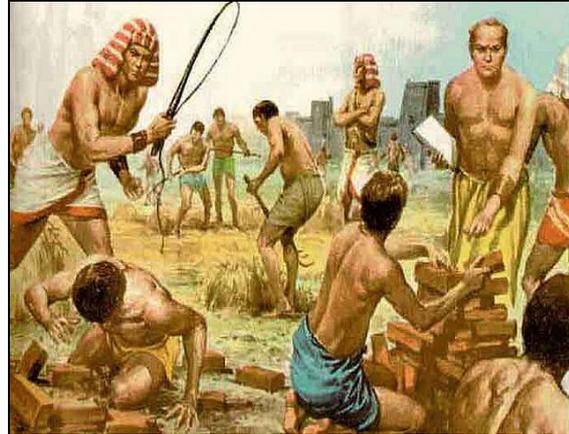


Figura 1.2 – Egípcios a construírem tijolos de palha e barro

Como o próprio nome diz, os compósitos são materiais compostos basicamente por duas fases: a matriz e as fibras. As fibras podem actuar como um reforço da matriz em função das propriedades desta e das próprias fibras.

Hoje a utilização de compósitos na construção civil é bastante diversa. Estes podem ser encontrados em várias aplicações tais como telhas, painéis de vedação vertical e estruturas de betão como túneis e pavimentos, onde denota-se cada vez mais a utilização do betão reforçado com fibras (BRF).

Um exemplo tradicional de um compósito aplicado na construção civil é o fibrocimento. Este consiste numa matriz de pasta de cimento reforçada com fibras de amianto, isto é, dois materiais de características frágeis trabalhando em conjunto.^[5] O amianto tem vindo a ser substituído por outros materiais devido aos problemas de saúde a ele associados.

1.2.1 Tipos de fibras

Actualmente existe uma vasta gama de fibras destinadas ao reforço de betão, classificadas em função da matéria-prima com a qual são produzidas (Tabela 1.1 e Figura 1.3)

Tabela 1.1 – Características mecânicas das fibras [6]

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (10 ³ Kglm ⁻³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Aço	5 - 500	7,84	200	0,5 - 2	0,5 - 3,5
Vidro	9 - 15	2,60	70 - 80	2-4	2 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,04	3,00	180	3,30	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0,90	5 - 7	0,5 - 0,75	8
Nylon	-	1,10	4	0,90	13 - 15
Poliétileno	-	0,95	0,30	0,0007	10
Carbono	9	1,90	230	2,60	1
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,60	2,1 - 4
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1	3

De uma maneira geral, as fibras são classificadas pelo BISFA (The International Bureau for the Standardisation of Man-Made Fibres), de acordo com o apresentado na figura 1.3.

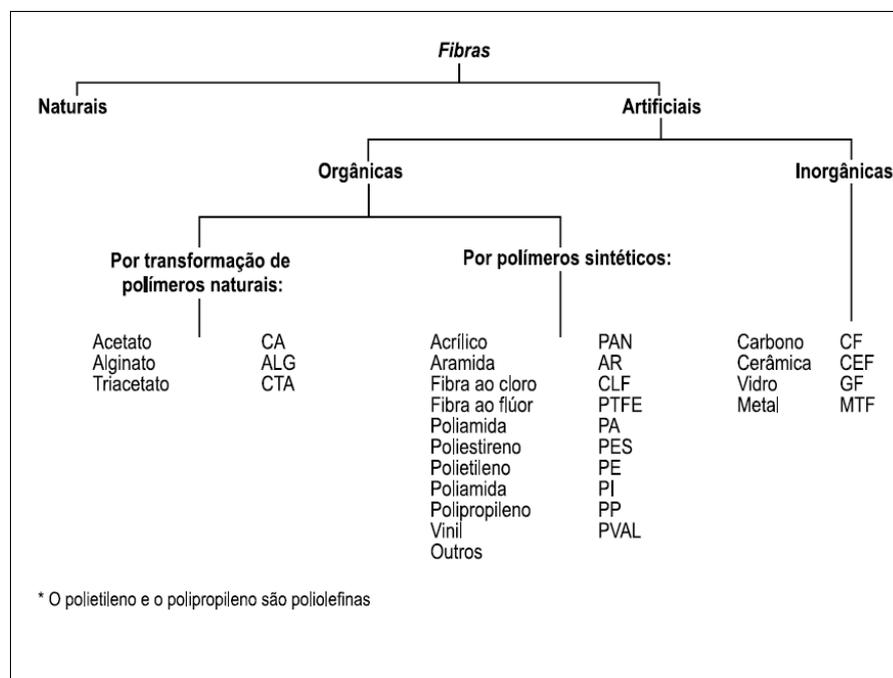
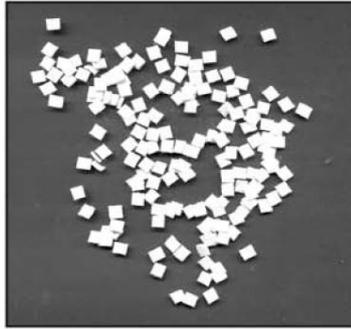


Figura 1.3 – Classificação das fibras segundo BISFA [6]

Em baixo apresentam-se alguns exemplos de tipos de fibras:



Microfibras de vidro.



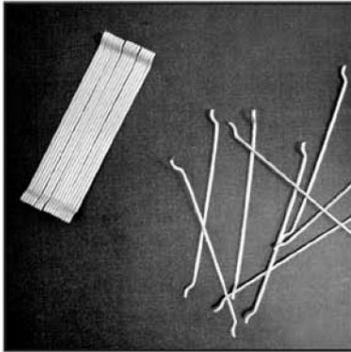
Microfibras de celulose.



Macrofibras metálicas fresadas.



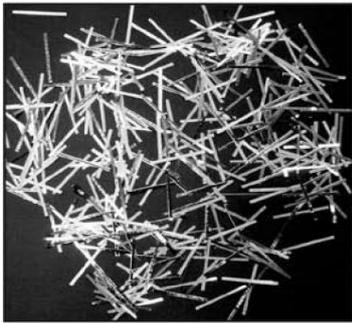
Macrofibras de aço soltas.



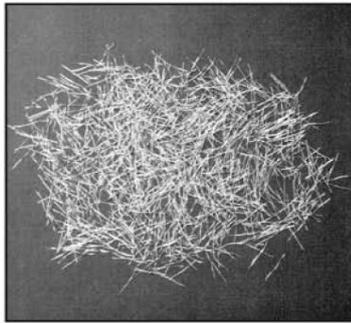
Macrofibras de aço coladas.



Microfibras de polipropileno.



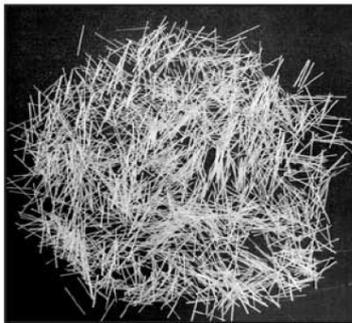
Macrofibras metálicas laminadas.



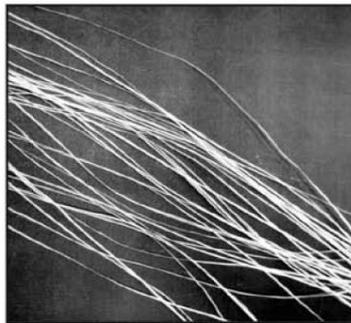
Microfibras metálicas.



Macrofibras de polipileno de alta tenacidade.



Microfibras de polipropileno.



Macrofibras sintéticas.



Microfibras metálicas.

Figura 1.4 – Exemplos de tipos de fibras [6]

1.2.2 Comportamento do BRF

As fibras, com adequada resistência mecânica à tração e distribuídas de forma homogênea dentro do betão, constituem uma micro-armadura que se mostra extremamente eficaz para combater o fenómeno da fissuração por retracção, além de conferir uma considerável ductilidade à medida que aumenta a quantidade e resistência das mesmas. Nestas circunstâncias proporciona-se grande tenacidade ao betão.

Como já sabemos, a resistência à tração do betão é normalmente desprezada para efeitos de cálculo dos estados limites últimos. Com a inclusão de uma matriz reforçada com fibras, é possível estabilizar a propriedade de resistência à tração de tal maneira que esta possa ser aproveitada como propriedade mecânica para considerações de projecto. Embora seja possível, geralmente não se realizam ensaios de tração directa no betão devido às dificuldades operativas. A avaliação desta propriedade, assim como da ductilidade e da tenacidade, é realizada indirectamente por meio de ensaios de flexão sobre vigas ou placas, como será detalhado adiante. A Figura 1.5 ilustra as possíveis respostas que podem ser obtidas através dos ensaios de flexão sobre elementos de betão reforçado com fibras, representadas, na sua maioria, através de gráficos de *Carga vs Abertura de fissura* ou *Carga vs Deformação*. Sob cargas moderadas, inferiores às de ruptura do betão à tração, o comportamento do material é sempre elástico e não se produz nenhuma fissuração no provete durante o ensaio de flexão, independentemente da presença ou da qualidade e quantidade de fibras. Porém, continuando o ensaio, podem ser verificados comportamentos distintos, ou seja, aumentando a carga a partir do ponto A, denominado “ponto de primeira fissuração”:

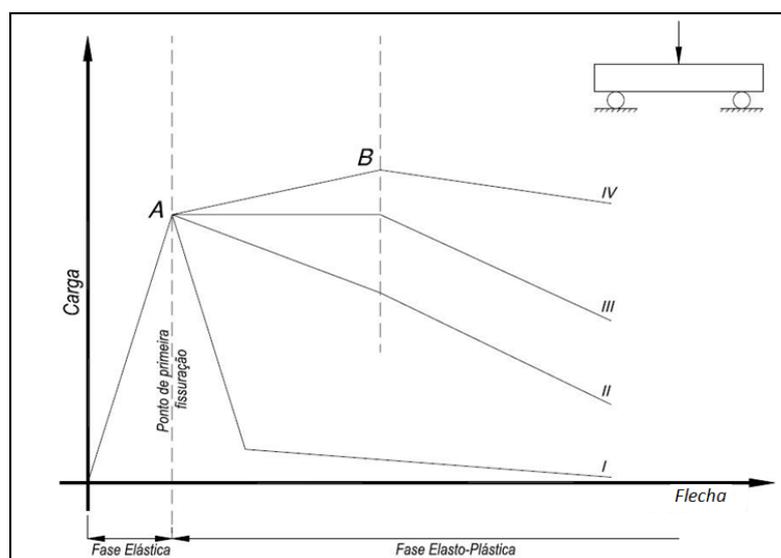


Figura 1.5 – Ensaio de Flexão [6]

A curva I esquematiza o comportamento de um betão simples sem reforço que, sendo um material rígido e com estrutura isostática (viga simplesmente apoiada), uma vez alcançada a carga de primeira fissuração, esta irá colapsar imediatamente, caracterizando o comportamento típico de um material frágil.

A curva II mostra a capacidade de um BRF para, após o ponto de primeira fissuração, colapsar mais lentamente (comportamento suavizado).

A curva III é típica de um material dúctil e demonstra um betão capaz de suportar, a partir do ponto de primeira fissuração, um deslocamento (A-B) sob carga constante, muito antes do colapso que é verificado de uma maneira mais lenta (comportamento plástico).

A curva IV evidencia um betão reforçado com fibras com um certo incremento de carga portante, sob um amplo deslocamento (A-B), após o ponto de primeira fissuração, (comportamento endurecido).

É importante destacar que todos estes possíveis comportamentos, ou graus de ductilidade e tenacidade adquiridos pelo betão, dependem da quantidade, das características mecânicas e da geometria das fibras presentes no mesmo.

No que se refere à influência da geometria das fibras (forma e dimensões) no comportamento do BRF, a relação comprimento (L) / diâmetro equivalente (D_e) (denominada factor de forma), é considerada o elemento mais importante, pois do seu valor dependem a ductilidade e a tenacidade do BRF (Figura 1.6).

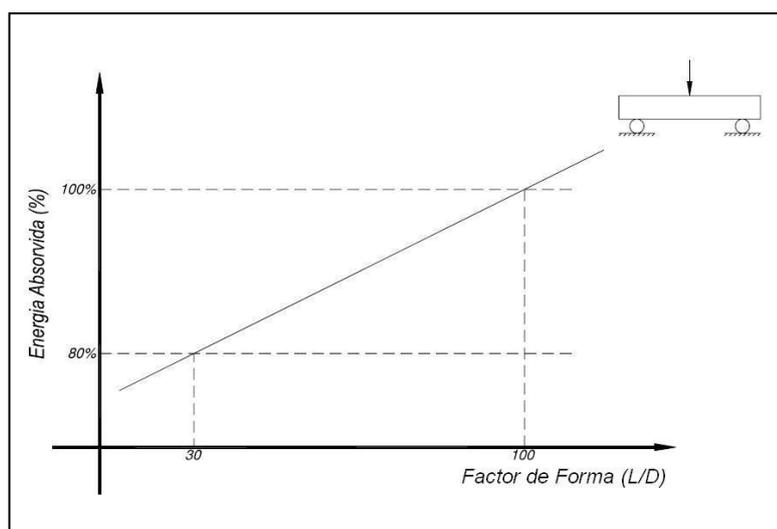


Figura 1.6 – Energia Absorvida x Factor de Forma (L/D) [6]

1.3 Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA)

Como a dissertação incide no reforço de betões com fibras de aço, nesta secção aborda-se o comportamento e características destas fibras.

As características mecânicas das fibras de aço, essencialmente a sua resistência à tração, possuem um papel fundamental no comportamento do betão reforçado com fibras de aço, pois, ao não ocorrer o arrancamento da fibra, impedido pela aderência imposta entre a interface fibra-betão (Figura 1.7), pode ocorrer a ruptura da fibra devido à sua insuficiente resistência à tração (Figura 1.8).

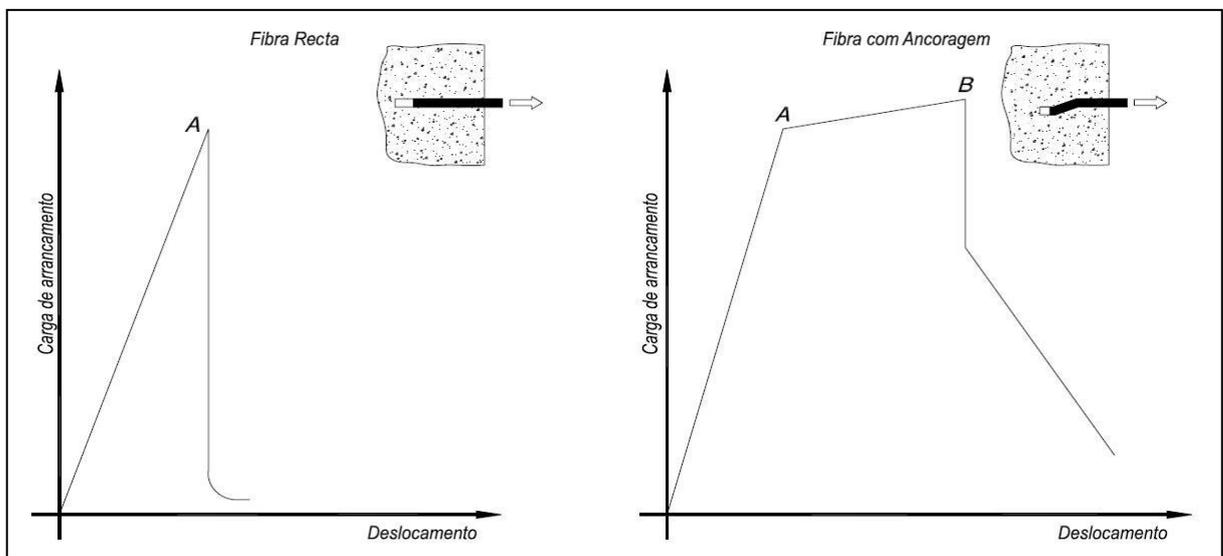


Figura 1.7 – Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra-betão com a forma da fibra ^[6]

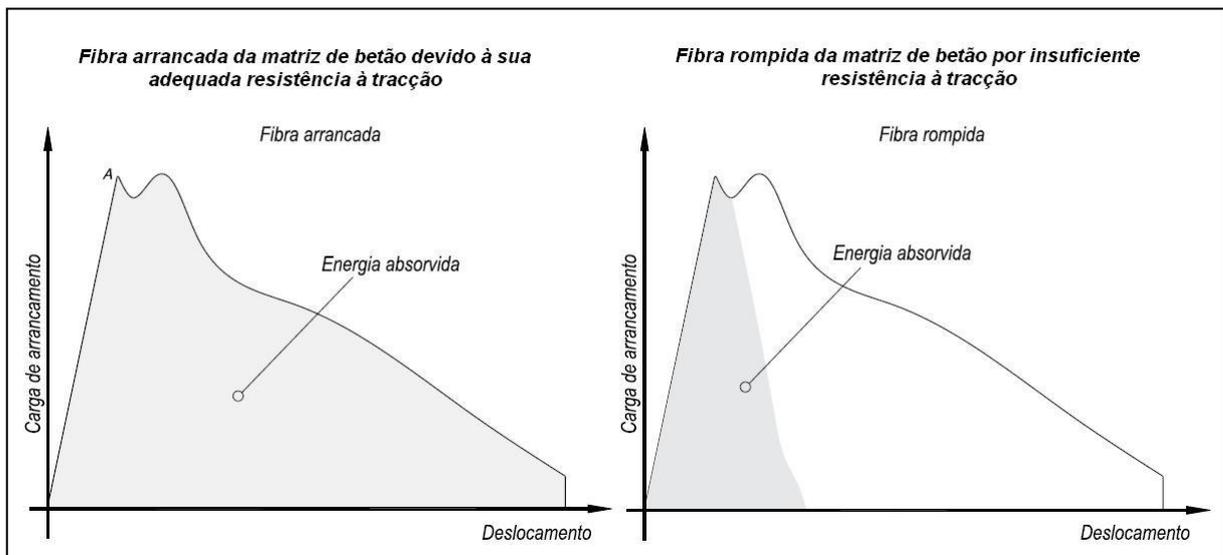


Figura 1.8 – A importância da resistência à tração da fibra ^[6]

É interessante observar que com o incremento do factor de forma (L/D) diminui-se, dentro de certos limites, a quantidade de fibras (dosagem) necessária para alcançar um determinado resultado (Figura 1.9). Tal facto ocorre devido ao incremento na resistência à tracção, observado estatisticamente quando são ensaiadas fibras de maior comprimento.

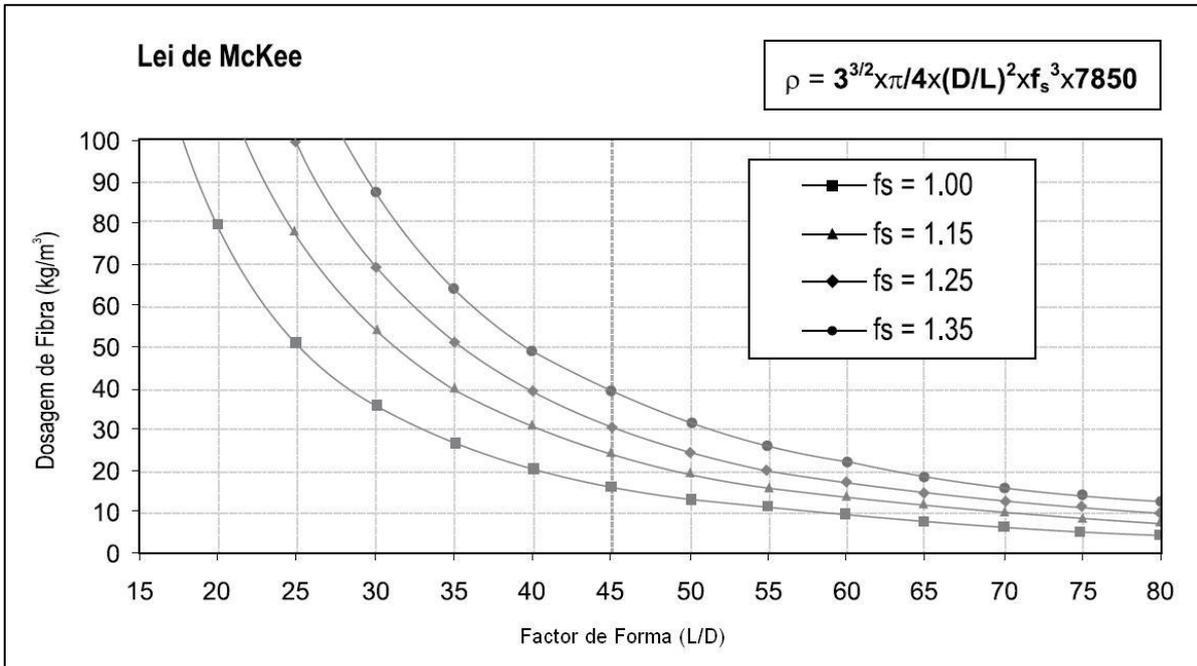


Figura 1.9 – Dosagem x factor de forma (L/D) [6]

Finalmente, a dosagem, ou seja, a quantidade efectiva de fibras presentes no betão (kg/m³) influencia, juntamente com as características geométricas e mecânicas, o grau de ductilidade e tenacidade do BRFA (Figura 1.10)

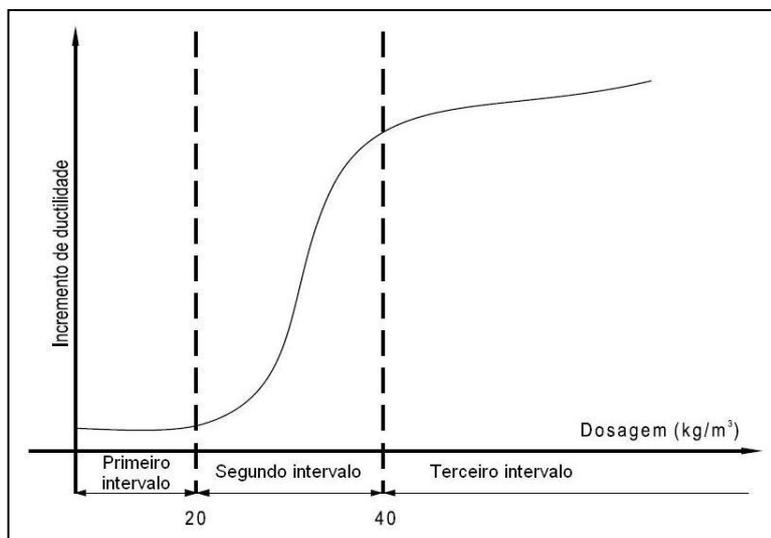


Figura 1.10 – Ductilidade x Dosagem [6]

É importante destacar que a adequada combinação de todas estas características é utilizada para obter o resultado ideal no comportamento do betão reforçado com fibras de aço. Cada característica possui um limite na sua influência, que quando é ultrapassado pode ser prejudicial como é claramente evidenciado na Figura 1.10, para o caso da dosagem.

O primeiro intervalo da curva mostra que uma dosagem muito baixa praticamente não tem efeitos (comportamento suavizado), já que dispersando poucas fibras na mistura, a distância relativa entre as mesmas é tão grande que não produz consequência alguma relevante.

O segundo intervalo mostra que, aumentando o número das fibras alcançam-se configurações com boas possibilidades de interação (comportamento plástico), produzindo-se um incremento na ductilidade do betão.

Finalmente o terceiro intervalo mostra que acima de uma determinada dosagem (comportamento enrijecido), o incremento da ductilidade não é significativo, aumentando as dificuldades de se realizar uma mistura uniforme.

1.4 Fibras de aço

1.4.1 Características Geométricas e Físicas

A fibra de aço é um produto caracterizado geometricamente por uma das dimensões (comprimento) que prevalece sobre a outra (diâmetro), podendo apresentar superfície lisa ou corrugada, formas rectilíneas ou com ancoragem nas extremidades. O seu uso como reforço no betão leva em consideração a dispersão homogénea na massa, sem alterar as características geométricas da mesma.

Basicamente, a fibra é caracterizada geometricamente pelo seu comprimento (L), pela forma e pelo seu diâmetro ou diâmetro equivalente (D_e), (Figura 1.11).

Da relação entre o comprimento e o diâmetro ou diâmetro equivalente, é obtida a relação de esbeltez, ou o factor de forma, ($\lambda=L/D_e$).

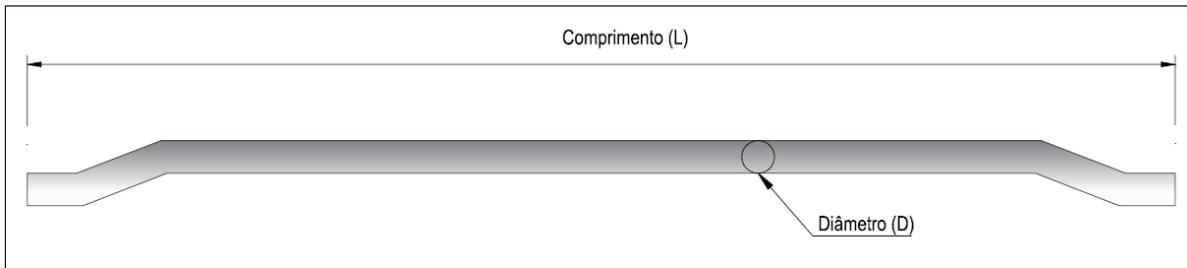


Figura 1.11 – Exemplo de Fibra Metálica com Ancoragem nas Extremidades ^[6]

Uma fibra é classificada como rectilínea quando apresenta sobre o eixo longitudinal, deformações localizadas menores que $L/30$ e não maiores que o seu diâmetro equivalente.

O comprimento L (mm) é a distância entre as duas extremidades da fibra.

Axialmente, a forma pode ser rectilínea ou corrugada e, transversalmente, a fibra pode apresentar secção circular, rectangular ou variada (Figura 1.12)

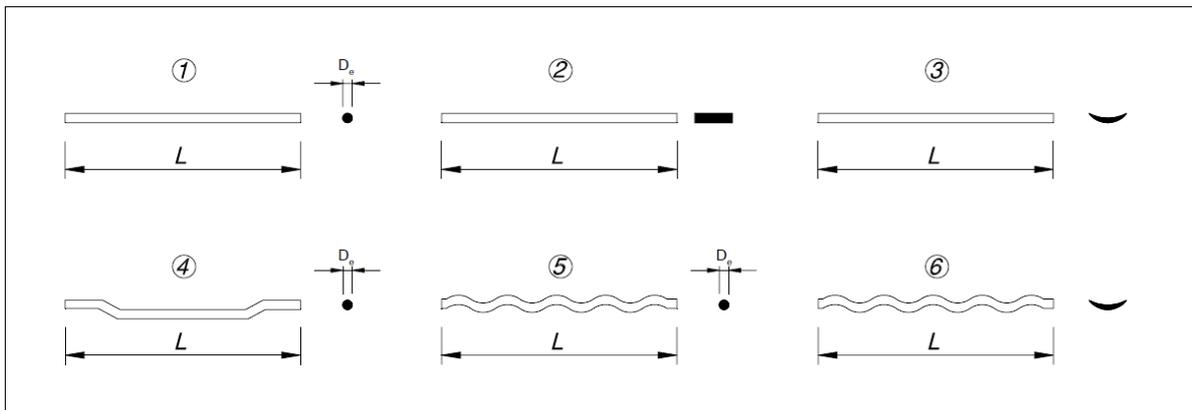


Figura 1.12 – Exemplos de Diferentes Formas de Fibras Metálicas ^[6]

Diâmetro equivalente

O diâmetro equivalente D_e (mm) é definido por diferentes métodos, em função da forma transversal e do processo de produção.

Método directo

Para fibras produzidas de arame, e com qualquer forma longitudinal, o diâmetro equivalente (D_e) é igual ao diâmetro nominal do arame de partida ou da fibra acabada.

$$D_e = D_n \quad (1.1)$$

Método indirecto geométrico

Para as fibras produzidas de chapa, e com qualquer forma longitudinal, o diâmetro equivalente (D_e) é igual ao diâmetro de uma circunferência com área igual àquela da secção transversal da fibra, dada pela seguinte fórmula:

$$D_e = \left(4 \cdot \frac{A}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

Onde A é a área da secção transversal de fibra (mm^2).

$$A = w \cdot t \quad (1.3)$$

Com w = largura (mm), t = espessura (mm) [5]

Método indirecto gravimétrico

Para as fibras obtidas através de outros processos de produção, com secção variável, e com qualquer forma longitudinal, o diâmetro equivalente é calculado a partir do comprimento médio (L) da fibra e do peso médio (m) de um determinado número de fibras, com base na sua massa volúmica, segundo a fórmula:

$$D_e = \left(\frac{4 \cdot m \cdot 10^6}{\pi \cdot L \cdot \rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

No caso das fibras de aço em que $\rho=7,85\text{g/cm}^3$ temos:

$$D_e = 12,74 \cdot \left(\frac{m}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

Número de fibras por quilo (n°/kg)

O número de fibras por quilo é estimado com a seguinte fórmula:

$$n^\circ/\text{kg} = \left(\frac{4000000}{L \cdot D_e^2 \cdot \pi \cdot \gamma}\right) \quad (1.6)$$

onde:

L = comprimento da fibra (mm);

D_e = diâmetro equivalente da fibra (mm);

γ = peso específico (kg/m^3).

1.4.2 Factor de Forma

O factor de forma ($\lambda=L/D_e$) define a esbelteza da fibra. Na igualdade de comprimento, quanto mais elevado for o factor de forma, mais reduzido será o diâmetro equivalente, ou seja a fibra é mais esbelta. Ou ainda, em igualdade de comprimento, quanto mais elevado for o factor de forma, mais leve será a fibra, e conseqüentemente, teremos um maior número de fibras por unidade de massa.

1.4.3 A Resistência à Tracção

A resistência à tracção R_m (N/mm² ou MPa) é calculada dividindo o esforço necessário para a ruptura, pela área da secção da fibra ou do arame semi-acabado [7].

Além da resistência à tracção, a norma UNI 11037 [8] (norma italiana) exige limitar a resistência a 0,2 % do limite de proporcionalidade, $R_{p0,2}$. Ainda nesta norma, a resistência à tracção é dividida em três classes, R1, R2 e R3. Cada uma destas três classes é novamente subdividida, da seguinte forma.

1- Fibras rectilíneas: caso a resistência à tracção esteja relacionada com arame semi-acabado das fibras (neste caso não existe diferença em ensaiar a fibra ou o arame semi-acabado).

2- Fibras com ancoragens: neste caso a resistência do arame deverá ser maior, presumindo-se que o processo de dobra reduzirá sua resistência final. A classificação ainda considera o diâmetro da fibra em que, para diâmetros gradualmente menores correspondem maiores resistências.

Tabela 1.2 – Resistência à tracção para 3 classes de fibras segundo a norma UNI 11037 [8]

Diâmetro equivalente (mm)	Resistência à tracção (N/mm ²)												Ensaio de resistência à tracção
	R 1				R 2				R 3				Classes
	1)		2)		1)		2)		1)		2)		
	Rm	Rp _{0,2}	Rm	Rp _{0,2}	Rm	Rp _{0,2}	Rm	Rp _{0,2}	Rm	Rp _{0,2}	Rm	Rp _{0,2}	Resistência à tracção
0,15 ≤ D _e < 0,50	400	320	480	400	900	720	1.080	900	1.700	1.360	2.040	1.700	
0,50 ≤ D _e < 0,80	350	280	450	350	800	640	1.040	800	1.550	1.240	2.015	1.550	
0,80 ≤ D _e < 1,20	300	240	390	300	700	560	910	700	1.400	1.120	1.820	1.400	

NOTA: As propriedades mecânicas indicadas na presente tabela referem-se a todos os tipos de fibras de aço.
 1) Fibras rectilíneas.
 2) Fibras perfiladas.

1.4.4 Processo de produção

As fibras de aço devem ser classificadas em um dos seguintes grupos, de acordo com o material de base utilizado na sua produção:

Grupo I: fio estirado a frio;

Grupo II: cortado de chapa;

Grupo III: extraído a quente;

Grupo IV: fio estirado a frio por aplainamento;

Grupo V: extraído de blocos de aço por fresagem.

1.5 SIFCON – Slurry Infiltrated Fiber Concrete

SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete), que traduzindo para português significa betão obtido pela infiltração de argamassa através dos espaços vazios entre as fibras, é um desenvolvimento relativamente recente no campo do BRFA. O primeiro a introduzir um compósito com um alto teor de fibras infiltradas por um material baseado em cimento Portland foi Haynes em 1968. ^[9] Este foi o primeiro homem a utilizar o princípio da introdução de fibras num molde e só depois infiltrar a argamassa por entre as fibras. Mais tarde, em 1979, Lankard deu o nome de SIFCON a um método de fabrico em que as fibras são pré-colocadas em moldes até ficarem totalmente ou parcialmente preenchidos, em vez de serem misturadas e colocadas juntamente com o cimento. Após a colocação das fibras, uma argamassa muito fluida é derramada ou bombeada para dentro da rede de fibras, preenchendo assim os espaços vazios tomando depois a forma do molde. Podem ser adicionadas vibrações externas para facilitar a infiltração da mistura mas no caso do presente estudo não foi efectuada qualquer tipo de vibração. A principal vantagem do método de SIFCON é que se podem obter teores de fibras muito elevados. Normalmente, o betão reforçado com fibras contém 1 a 3% de fibras em volume, enquanto que com o SIFCON pode obter-se entre 4 a 25% de fibras. O volume das fibras é influenciado pelo tipo de fibras e pela maneira como são colocadas. Com quantidades de fibras desta magnitude é espectável um aumento dramático na resistência e ductilidade do provete. ^[10]

Naaman^[10] propôs a utilização do método de SIFCON em articulações de estruturas de betão armado para resistirem a cargas sísmicas. Este método seria apenas utilizado em pequenas partes das estruturas. Estas partes seriam projectadas para serem afectadas durante a carga sísmica e formar “rótulas plásticas”, que absorveriam a energia e iriam proteger as construções de colapsar. O desafio é assegurar que a estrutura partiria nas

zonas onde se colocaria SIFCON de moderada/baixa resistência. Depois do endurecimento pode apresentar uma grande absorção da energia e é ainda capaz de transferir a carga depois de alguma deformação considerável. Além disso, o SIFCON pode ser reparado.

Há uns anos atrás, a infiltração através das fibras só conseguia ser feita assistida de uma intensa vibração. Marrs^[12] veio com uma ideia de produzir SIFCON sem ocorrência de vibração. Fez pesquisas sobre SIFCON autocompactável particularmente no que diz respeito ao comportamento de argamassas de cimento no estado fresco contendo calcário em pó.

CAPÍTULO 2

Materiais e Misturas

2. Materiais e Misturas

Como foi referido na introdução foram ensaiadas amostras utilizando dois tipos diferentes de fibras metálicas com diferentes quantidades e duas matrizes diferentes.

2.1 Fibras de Aço

As fibras escolhidas para a realização dos ensaios têm como referência HE75/50 e XR1050 a que chamaremos respectivamente de Fibra 1 e Fibra 2 e possuem as seguintes especificações:

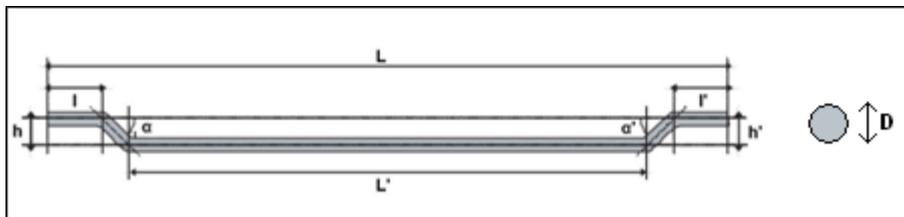


Figura 2.1 – Modelo esquemático da Fibra 1

Diâmetro (D) – 0,75mm

Comprimento (L) – 50mm

Comprimento da ancoragem (l e l') – 1 a 4 mm

Desnível da ancoragem (h e h') – 1,80mm

Ângulo da dobra (α e α') – 45°

Factor de forma (L/D) – 67

Resistência à tracção – 1100 N/mm²

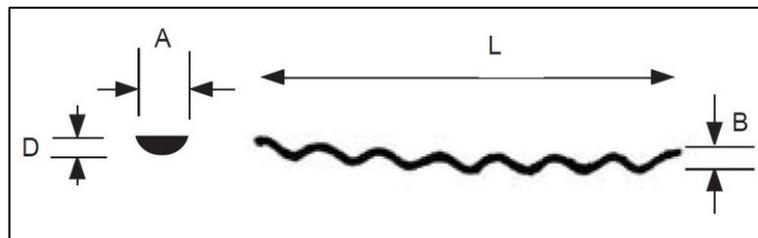


Figura 2.2 – Modelo esquemático da Fibra 2

Diâmetro equivalente (D_e) – 1,0mm

Comprimento da fibra (L) – 50mm

Factor de forma (L/ D_e) – 50

Outras dimensões:

A - 2,30mm a 2,70mm

B - 2,00mm a 2,50mm

D - 0,50mm a 0,80mm

Resistência à tração – 1000 N/mm²



Figura 2.3 – Fibras metálicas utilizadas: à esquerda Fibra 2, à direita Fibra 1

2.2 Matrizes

As matrizes a utilizar no método de SIFCON terão obrigatoriamente de ser muito fluidas. Caso contrário a matriz não irá infiltrar-se pela rede formada pelas fibras. O grau de espalhamento mínimo aceitável que foi estabelecido para que a matriz se pudesse infiltrar foi de 300mm medido pelo método do cone ^[3]. Para menor fluidez já poderemos encontrar vazios que não foram preenchidos pela matriz invalidando assim o provete. Duas matrizes foram criadas com resistências diferentes a que chamaremos de Matriz 1 e Matriz 2.

2.2.1 Matriz 1

A primeira matriz que denominamos de Matriz 1 é composta por um ligante constituído por um cimento CEM I32,5R, ou seja, 32,5MPa de resistência característica mínima à compressão aos 28 dias. A letra R na designação do cimento significa que a resistência à compressão já é elevada nos primeiros dias. Foram utilizadas também cinzas volantes para substituir em parte o cimento. Os restantes constituintes da matriz foram água, areia e adjuvantes. A relação A/L utilizada nesta matriz é de 0,42. Os adjuvantes utilizados nesta composição são denominados por ADVA Flow 400 e V-MAR3 (Figura 2.4). O ADVA Flow

400 é um superplastificante, com forte capacidade de redução de água. A sua função nesta composição é tornar a mistura bastante fluida de modo a utilizarmos pouca água para não perder resistência. O V-MAR3 é um agente que aumenta a viscosidade da mistura permitindo que esta flua sem haver segregação.



Figura 2.4 – À esquerda V-MAR 3 e à direita ADVA Flow 400

Tabela 2.1 – Materiais utilizados na Matriz 1

Matriz 1	
Material	Massa Volúmica (kg/m ³)
Areia	2610
CEM I32,5R	3100
Cinzas Volantes	2390
Água	1000
ADVA Flow 400	1050
V-MAR 3	1060

2.2.2 Matriz 2

A segunda matriz, que denominaremos por Matriz 2, possui uma resistência muito mais elevada que a anterior. Esta já é composta por um cimento CEM I52,5R e uma relação A/L de 0,30. Como esta mistura possui menos quantidade de água que a anterior tivemos de recorrer a outro adjuvante para a tornar mais fluida. Assim, o único adjuvante utilizado denomina-se GLENIUM ACE 426. Este adjuvante tem as mesmas características que o ADVA Flow 400 mas actua com mais intensidade. Nota-se que ao diminuirmos a relação A/L estamos a dar resistência à mistura pois reduz-se a quantidade de água. Nesta mistura

não foi necessário introduzir o V-MAR 3 uma vez que a concentração de sólidos é muito superior.

Tabela 2.2 – Materiais utilizados na Matriz 2

Matriz 2	
Material	Massa Volúmica (kg/m ³)
Areia	2610
CEM I52,5R	3100
Água	1000
GLENIUM ACE426	1070



Figura 2.5 – GLENIUM ACE 426

CAPÍTULO 3

Metodologias de Ensaio

3. Metodologias de Ensaio

3.1 Laboratório

O laboratório onde se efectuou a preparação dos provetes manteve-se a uma temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa não inferior a 50%.

A câmara condicionada para a conservação dos provetes foi mantida a uma temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa não inferior a 90%.

A estufa para a conservação dos provetes foi mantida à temperatura de 40°C durante o tempo de endurecimento dos mesmos.

Os recipientes para a conservação dos provetes em água e respectivas grelhas eram feitos de um material que não reagia com o cimento.

A temperatura e a humidade relativa do ar no laboratório, assim como a temperatura da água dos recipientes de conservação, foram registadas pelo menos uma vez por dia durante as horas de trabalho. A temperatura e humidade relativa na câmara condicionada foram registadas pelo menos de 24 em 24 horas.

3.2 Prismas 40x40x160

3.2.1 Moldes

Os moldes possuíam três compartimentos horizontais permitindo a preparação simultânea de três provetes prismáticos com a secção transversal de 40 mm x 40 mm e com 160 mm de comprimento. A Figura 3.1 apresenta um exemplo de molde.

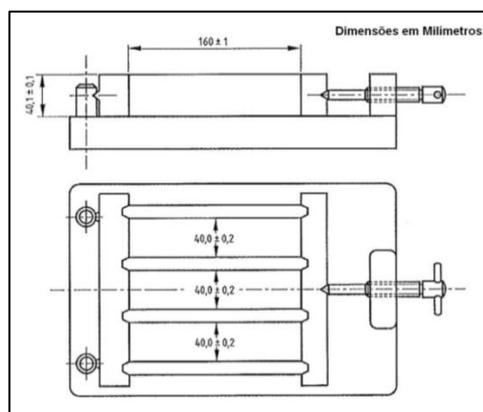


Figura 3.1 – Exemplo de molde típico ^[13]



Figura 3.2 – Molde utilizado no ensaio de flexão a prismas

O conjunto do molde deve manter-se rígido e firmemente fixado à base. A junção foi feita de maneira a que não houvesse distorções nem falta de estanqueidade. Os moldes foram barrados com óleo para facilitar a desmoldagem dos provetes. ^[13]

3.2.2 Pesagem e colocação das fibras

Foram testadas dois tipos de fibras combinadas com as duas matrizes obtendo-se assim quatro compósitos diferentes. Em cada compósito foram testadas quatro quantidades de fibras metálicas, 0g, 75g, 100g e 125g por provete. Deste modo, no total das combinações obtiveram-se 14 amostras diferentes.

Tabela 3.1 – Prismas produzidos

PRISMAS 40x40x160								
	Matriz 1				Matriz 2			
Fibra 1	125g	100g	75g	0g	125g	100g	75g	0g
Fibra 2	125g	100g	75g		125g	100g	75g	

Os 3 provetes de cada molde foram iguais para que depois se pudesse apurar a média dos resultados. As fibras foram pesadas numa balança analítica e colocadas de forma aleatória nos moldes. Foi extremamente importante a colocação aleatória das fibras pois só assim se simularia uma situação real de betonagem.



Figura 3.3 – Pesagem das fibras



Figura 3.4 – Colocação das fibras nos moles 40x40x160

3.2.3 Preparação das argamassas

As argamassas que se utilizam no método de SIFCON, como já se referiu anteriormente, são extremamente fluidas para que se possam infiltrar através dos vazios entre as fibras. Como as razões entre a água e o ligante são baixas foi necessário recorrer ao uso de adjuvantes como foi referido em 2.2. Foram efectuadas algumas tentativas alterando a quantidade dos adjuvantes até encontrar uma argamassa muito fluida em que não houvesse ocorrência de segregação nem de exsudação. As composições das argamassas utilizadas encontram-se nas tabelas seguintes:

Tabela 3.2 – Matriz 1 – Quantidades (volume para 1 molde)

Matriz 1			
Material	Massa (g)	Percentagem em massa na matriz	Kg/m ³ de mistura
Areia	888,34	45,51%	964,76
CEM I32,5R	526,8	26,99%	572,12
Cinzas Volantes	216,29	11,08%	234,90
Água	312,1	15,99%	338,95
ADVA Flow 400	5,71	0,29%	6,20
V-MAR 3	2,6	0,13%	2,82

Tabela 3.3 – Matriz 2 – Quantidades (volume para 1 molde)

Matriz 2			
Material	Massa (g)	Percentagem em massa na matriz	Kg/m ³ de mistura
Areia	1000	43,10%	976,17
CEM I52,5R	1000	43,10%	976,17
Água	300	12,93%	292,85
GLENIUM ACE426	20	0,86%	19,52

Nestas tabelas é perfeitamente perceptível que a Matriz 1 foi calculada para ter uma resistência muito mais baixa que a Matriz 2. Na Matriz 1 uma parte do ligante é composta por cinzas volantes, a relação A/L é de 0,42 e o cimento utilizado foi o CEM I32,5R. Todos estes factores contribuem para uma menor resistência desta matriz relativamente à Matriz 2. Na Matriz 2 diminuiu-se a relação A/L para 0,3 conferindo uma maior resistência à mistura pois sabe-se que quanto mais água se adicionar menos resistente esta fica. O factor determinante para lhe proporcionar uma elevada resistência foi a utilização de um cimento de 52,5 MPa de resistência à compressão.

A pesagem dos materiais foi feita por meio de uma balança semi-analítica e as argamassas foram efectuadas por meio de um misturador automático (Figura 3.5).

O misturador consta essencialmente de um recipiente em aço inoxidável com uma capacidade de cerca de 5 L, e uma pá misturadora de aço inoxidável tendo a forma, dimensões e tolerâncias gerais indicadas na Figura 3.6, accionada por um motor eléctrico, com velocidade regulável, num movimento de rotação sobre si mesma, acompanhado de um movimento planetário em torno do eixo do recipiente. Os dois sentidos de rotação são opostos e a relação das duas velocidades não deve ser um número inteiro.^[15]

Tabela 3.4 – Velocidades da pá misturadora^[13]

	Rotação (min ⁻¹)	Movimento Planetário (min ⁻¹)
Lenta	140 ± 5	62 ± 5
Rápida	285 ± 10	125 ± 10



Figura 3.5 – Misturador automático

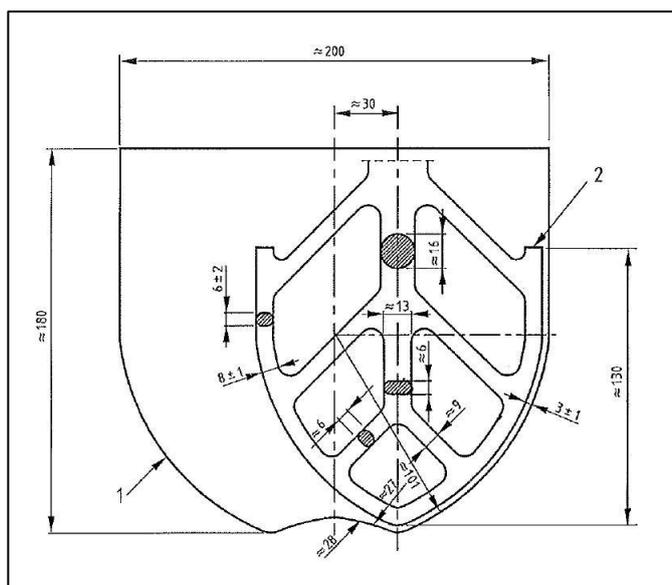


Figura 3.6 – Recipiente e pá misturadora típicos [13]

Os ligantes e a areia foram colocados no recipiente da misturadora. Seguidamente procedeu-se a homogeneização dos ligantes e da areia colocando em funcionamento a misturadora durante 30 segundos na velocidade lenta. Depois de homogeneizados os materiais, foi iniciada uma sequência de tempos onde se introduziu a água e os adjuvantes como se indica na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Tempos de amassadura

Tempo	Velocidade	Tarefa
0s - 60s (60s)	Lenta	Juntar água no recipiente tendo o cuidado de evitar perdas.
60s - 150s (90s)	Parado	Retirar por meio de uma espátula de borracha ou plástico toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente e colocá-la no meio deste.
150s - 180s (30s)	Lenta	Juntar os adjuvantes.
180s - 240s (60s)	Rápida	—

Após esta sequência de operações, como se pode observar na Figura 3.7, obteve-se uma argamassa bastante fluida e sem segregação do material.



Figura 3.7 – Aspecto da matriz após a amassadura

De seguida fez-se um ensaio de espalhamento e registou-se o seu valor para verificar se a argamassa era suficientemente fluida para se infiltrar por entre as fibras. O ensaio de espalhamento permitiu-nos determinar a consistência da matriz no seu estado fresco através do seu espalhamento numa mesa plana. Colocou-se a argamassa no molde (Figuras 3.8 e 3.9), até à sua face superior, este foi levantado suavemente e a matriz espalhou-se através de uma forma aproximadamente circular. Quando a argamassa parou de se expandir mediu-se o seu diâmetro maior e o diâmetro perpendicular a este. Fez-se a média dos dois diâmetros e obteve-se o diâmetro de espalhamento.



Figura 3.8 – Mesa de espalhamento e cone

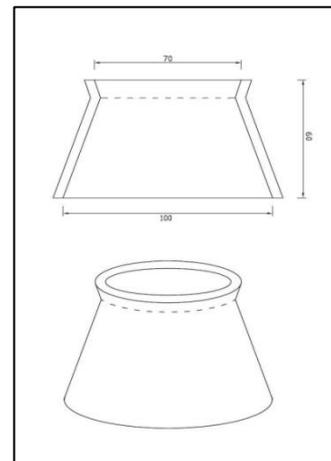


Figura 3.9 – Modelo esquemático do cone

3.2.4 Preparação dos provetes

Após o ensaio de espalhamento homogeneizou-se novamente a mistura com uma espátula de borracha e procedeu-se à sua colocação nos moldes. A colocação da argamassa foi efectuada lentamente de modo a dar-se tempo para esta escorrer até ao

fundo do molde e ocupar todos os espaços vazios. Após o molde estar completamente preenchido retirou-se imediatamente o excesso de argamassa com uma régua metálica mantendo-a quase vertical com lentos movimentos transversais em forma de serra, uma vez em cada direcção. Alisou-se a superfície dos provetes utilizando a mesma régua mantida a um ângulo mais agudo. Retirou-se o resíduo de argamassa que ficou no perímetro do molde na sequência do nivelamento. Etiquetaram-se os moldes para permitir a sua identificação (Figuras 3.10 e 3.11).



Figura 3.10 – Colocação da argamassa nos moldes prismáticos



Figura 3.11 – Molde preenchido e regularizado

3.2.5 Condicionamento dos provetes

3.2.5.1 Manuseamento e conservação antes da desmoldagem

Colocou-se um vidro sobre a superfície regularizada para evitar perdas de água por evaporação. De seguida colocaram-se os moldes, devidamente identificados, na câmara condicionada durante 24 horas. A câmara condicionada armazena os provetes a $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e com 90% de humidade relativa (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Câmara Condicionada

3.2.5.2 Desmoldagem e conservação dos provetes

Após 24 horas, os provetes foram desmoldados utilizando um martelo de borracha com cuidado para não existir a deterioração, e foram colocados posteriormente durante seis dias numa estufa a 40°C garantindo que estes continuassem sempre imersos em água durante esse período. O aumento da temperatura para 40°C acelera o processo de endurecimento dos provetes (Figuras 3.13 e 3.14).



Figura 3.13 – Provetes desmoldados imersos em água



Figura 3.14 – Estufa

3.2.6 Ensaio de flexão

Passados os seis dias de endurecimento retiraram-se os provetes da estufa, e rectificaram-se as faces de enchimento com um esmerilador. Removeu-se a água superficial em excesso e realizaram-se as suas pesagens, obtendo o peso saturado dos provetes.

Como os provetes estavam altamente reforçados com fibra metálica não foi possível realizar o ensaio de flexão na prensa de flexão de prismas pois esta não conseguia exercer força suficiente para provocar o seu rebentamento. Assim, foi necessário encontrar uma solução para contornar este problema. Foi feita uma adaptação a uma prensa de compressão de 600kN de modo a que esta pudesse também realizar ensaios de flexão.

No ensaio de determinação da resistência à flexão os provetes são submetidos a um momento flector por meio da aplicação de uma carga através de roletes de 10mm de diâmetro colocados superior e inferiormente como está ilustrado na Figura 3.15.

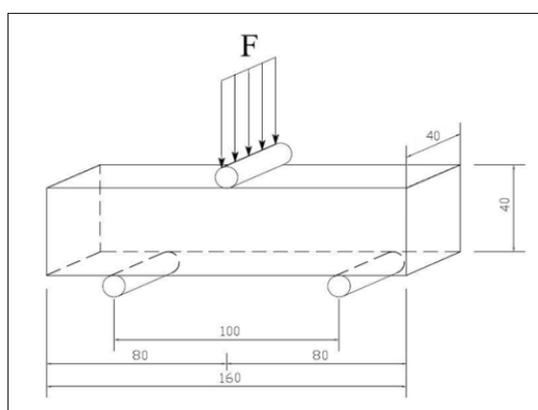


Figura 3.15 – Esquema da aplicação da carga no provete

O rolete superior encontrava-se ao meio do provete e, como é nesta zona que se verifica o maior momento, foi aplicado um transdutor para registar o deslocamento vertical. A velocidade que foi estabelecida para a aplicação da força foi de 20N/s. A deformação registada pelo transdutor foi transferida para um computador que por sua vez desenhou o gráfico carga-deformação em tempo real.



Figura 3.16 – Ensaio de Flexão a um provete prismático 40x40x160

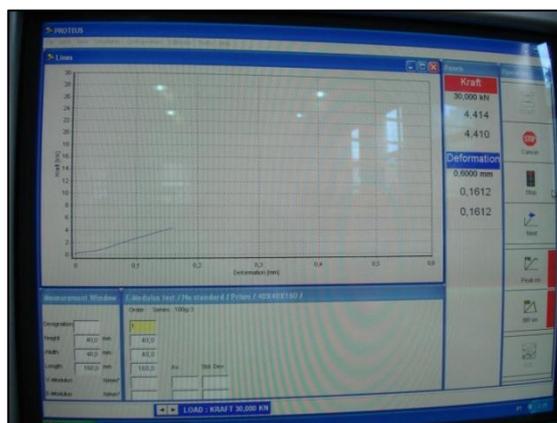


Figura 3.17 – Formação do gráfico força-deformação em tempo real

3.2.7 Ensaio de compressão

As resistências à compressão da Matriz 1 e da Matriz 2 foram determinadas com os semi-prismas que não possuíam fibras resultantes do ensaio à flexão. Avaliaram-se assim apenas a resistência à compressão das matrizes 1 e 2, sem fibras incluídas (Figura 3.18).

Cada metade foi colocada na prensa de compressão de 200kN e o valor da resistência à compressão da matriz foi a média das duas metades ensaiadas. A prensa de compressão aplica uma carga vertical ao provete a uma velocidade de 2,55 kN/s até atingir a sua rotura (Figura 3.19). Após a rotura, o provete teria de apresentar uma forma como se demonstra na Figura 3.20, caso contrário o ensaio não seria válido.



Figura 3.18 – Prensa de compressão de 200kN e flexão de 10kN



Figura 3.19 – Ensaio de compressão aos prismas

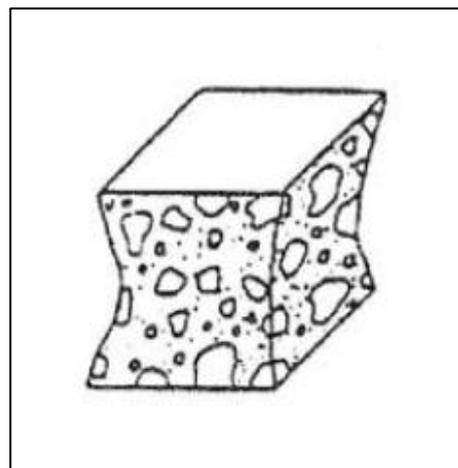


Figura 3.20 – Rotura satisfatória de um provete à compressão

3.3 Vigas 100×100×700

3.3.1 Moldes

Os moldes possuíam dois compartimentos horizontais permitindo a preparação simultânea de duas vigas prismáticas com a secção transversal de 100 mm × 100 mm e com 700 mm de comprimento. Na figura abaixo podemos observar a diferença entre o molde utilizado para fazer os prismas do ensaio anterior e o molde para as vigas do ensaio actual.



Figura 3.21 – Comparação entre o mole utilizado para produzir as vigas e o molde para produzir os prismas

Novamente o conjunto do molde teve de manter-se rígido e firmemente fixado à base para que não houvessem distorções nem falta de estanqueidade. Os moldes foram barrados com óleo para facilitar a desmoldagem dos provetes. ^[13]

3.3.2 Pesagem e colocação das fibras

Novamente foram combinadas as Fibras 1 e 2 com as Matrizes 1 e 2 obtendo assim quatro compósitos diferentes. Em cada compósito foram testadas quatro quantidades de fibras, 0g, 1700g, 2200g e 2700g. Assim no total das combinações obtiveram-se 14 amostras diferentes. As fibras foram pesadas numa balança analítica e colocadas de forma aleatória nos moldes para não comprometer a viabilidade dos ensaios.

Tabela 3.6 – Vigas produzidas

VIGAS 100x100x700							
	Matriz 1				Matriz 2		
Fibra 1	2700g	2200g	1700g	0g	2700g	2200g	1700g
Fibra 2	2700g	2200g	1700g		2700g	2200g	1700g



Figura 3.22 – Colocação das fibras nos moles 100x100x700

3.3.3 Preparação das argamassas

As matrizes utilizadas para as vigas foram novamente a Matriz 1 e a Matriz 2 mas em maiores quantidades (Tabela 3.7 e Tabela 3.8). Como a misturadora automática não possuía capacidade suficiente para realizar uma amassadura com o volume pretendido utilizamos uma misturadora de maiores dimensões (Figura 3.23). Nesta misturadora o controlo dos tempos foi feito manualmente respeitando a Tabela 3.5.

Tabela 3.7 – Matriz 1 – Quantidades (volume para uma viga)

Matriz 1			
Material	Massa (g)	Percentagem em massa na matriz	kg/m ³ de mistura
Areia	7106,72	45,51%	964,76
CEM I32,5R	4214,4	26,99%	572,12
Cinzas Volantes	1730,32	11,08%	234,90
Água	2496,8	15,99%	338,95
ADVA Flow 400	45,68	0,29%	6,20
V-MAR 3	20,8	0,13%	2,82

Tabela 3.8 – Matriz 2 – Quantidades (volume para uma viga)

Matriz 2			
Material	Massa (g)	Percentagem em massa na matriz	kg/m ³ de mistura
Areia	8000	43,10%	976,17
CEM I52,5R	8000	43,10%	976,17
Água	2400	12,93%	292,85
GLENIUM ACE426	160	0,86%	19,52

Quando concluída a mistura fez-se o ensaio de espalhamento e registou-se o seu valor.

**Figura 3.23 – Misturador manual para argamassas**

3.3.4 Preparação dos provetes

Após o ensaio de espalhamento homogeneizou-se a mistura e colocou-se nos moldes. A colocação da argamassa no molde foi feita por apenas um dos lados para eliminar todos os espaços vazios e de forma lenta para que esta tivesse tempo de chegar ao fundo do molde. Depois de o molde estar preenchido regularizou-se a sua superfície com uma régua ou com uma espátula e etiquetaram-se os moldes para permitir a sua identificação, Figuras 3.24 e 3.25.



Figura 3.24 – Molde preenchido e regularizado



Figura 3.25 – Colocação de um vidro para evitar perdas de água por evaporação

3.3.5 Condicionamento dos provetes

3.3.5.1 Manuseamento e conservação antes da descofragem

Colocou-se um vidro sobre os provetes para evitar perdas de água por evaporação. Os provetes ficaram 24 horas na sala do laboratório com os valores de temperatura e humidade indicados em 3.1.

3.3.5.2 Desmoldagem e conservação dos provetes

Após as 24 horas os provetes foram desmoldados utilizando um martelo de borracha tendo o cuidado para não os deteriorar e foram colocados durante seis dias numa câmara de saturação à temperatura ambiente. A câmara de saturação fornece um ambiente saturado simulando um efeito semelhante ao resultante de estarem totalmente imersos em água.



Figura 3.26 – Interior da câmara de saturação



Figura 3.27 – Vigas 100x100x700

3.3.6 Ensaio de flexão

Após 6 dias de endurecimento dos provetes em câmara saturada procedeu-se às suas pesagens após a remoção da água superficial em excesso.

Os ensaios de flexão foram realizados numa prensa de flexão de 100kN (Figura 3.28).

Tal como no caso dos prismas, no ensaio de determinação da resistência à flexão das vigas, estas são submetidas a um momento flector por meio da aplicação de uma carga através de roletes colocados superior e inferiormente como está ilustrado na Figura 3.29. Neste ensaio, para determinar a flecha da viga provocada pela carga foi utilizado um deflectómetro digital como se ilustra nas Figuras 3.31 e 3.32. O deflectómetro foi colocado a meio vão, na face inferior da viga. A introdução da carga foi feita manualmente em intervalos de 1 kN. No início foi dada uma pré-carga de 0,45kN para ajuste do rolete à viga e 30 segundos depois registou-se a respectiva deformação. De seguida aumentou-se a carga para 1kN e dando sempre um intervalo de 30 segundos para registar o deslocamento. Foi-se sempre incrementando 1kN de carga à viga até sua rotura.



Figura 3.28 – Prensa de flexão de 100kN

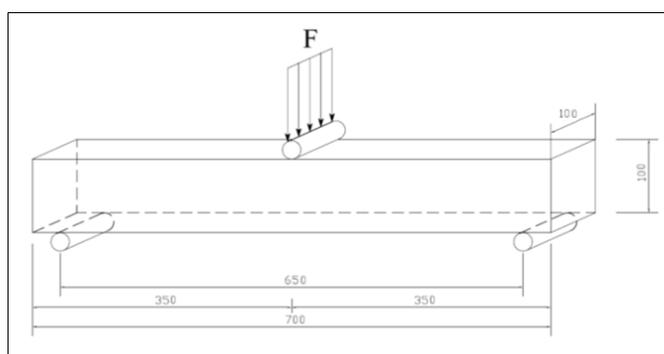


Figura 3.29 – Esquema da aplicação da carga no provete



Figura 3.30 – Ensaio de flexão às vigas 100x100x700



Figura 3.31 – Colocação de um deflectómetro digital a meio vão da face inferior da viga

Após a rotura da viga, aliviou-se a carga para zero e deu-se início a um novo carregamento mas desta vez registando os valores para incrementos de carga de dois em dois kN. Este segundo carregamento tem como objectivo a determinação da carga residual, ou seja, determinar qual a carga que a viga consegue suportar mesmo já estando fissurada. Nesta fase só as fibras estão em tracção, mantendo assim a viga com alguma resistência.

3.3.7 Ensaio de compressão

A resistência à compressão, tal como indicado em 3.2, foi determinada com as metades das vigas que não possuíam fibras resultantes do ensaio à flexão.

Cada metade foi colocada na prensa de compressão de 1500kN, o valor da resistência à compressão da matriz foi a média das duas metades ensaiadas. A prensa de compressão aplica uma carga vertical ao provete até atingir a sua rotura. Após a rotura, o provete teria de possuir uma forma como se mostrou em 3.2.7, caso contrário o ensaio não seria válido.



Figura 3.32 – Prensa de compressão de 1500 kN

3.4 Cilindros de secção variável 120×160

A resistência à tração para além de ser determinada por ensaios de flexão pode ser determinada também directamente. A esta chamamos de tração uniaxial e é determinada por meio de uma prensa de tração que tracciona as duas extremidades de um provete com zona central cilíndrica em sentidos opostos até provocar a sua rotura.

3.4.1 Moldes

Os moldes utilizados para produzir estes provetes são cilíndricos e possuíam um enchimento no seu interior de modo a que a zona central do provete tivesse um diâmetro menor que as extremidades (Figura 3.33). Assim, existia uma maior tendência em haver uma rotura na zona central onde se colocaram os transdutores de leitura da deformação (Figura 3.34).



Figura 3.33 – Moldes para a produção dos provetes cilíndricos

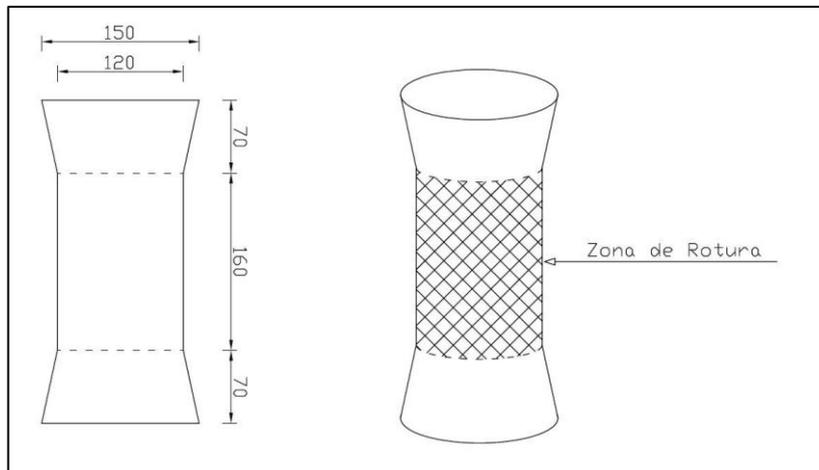


Figura 3.34 – Modelo esquemático de um provete cilíndrico

Tal como os moldes dos ensaios anteriores, estes também foram barrados com óleo descofrante e devidamente bem apertados.

3.4.2 Pesagem e colocação das fibras

O ensaio de tracção directa foi realizado em apenas 4 provetes. Neste ensaio não foram testadas diferentes quantidades de fibras para o mesmo compósito. Em todos os provetes foi colocado 1500g de fibras metálicas, pois este é o valor ao qual o provete fica

completamente preenchido por fibras (Figura 3.35). Assim, as duas matrizes foram combinadas com os dois tipos de fibras sempre com a mesma quantidade.

Tabela 3.9 – Cilindros produzidos

Cilindros 120×170		
	Matriz 1	Matriz 2
Fibra 1	1500g	1500g
Fibra 2	1500g	1500g



Figura 3.35 – Colocação aleatória das fibras no molde

3.4.3 Preparação das argamassas

As Matrizes 1 e 2 foram misturadas na misturadora manual com os tempos que constam na Tabela 3.5. As quantidades utilizadas para cada provete encontram-se nas Tabelas 3.10 e 3.11. Após a mistura de cada argamassa realizou-se o ensaio de espalhamento e registou-se o seu valor.

Tabela 3.10 – Matriz 1 – Quantidades (volume para um provete)

Matriz 1			
Material	Massa (g)	Percentagem em massa na matriz	kg/m ³ de mistura
Areia	3908,70	45,51%	964,76
CEM I32,5R	2317,92	26,99%	572,12
Cinzas Volantes	951,68	11,08%	234,90
Água	1373,24	15,99%	338,95
ADVA Flow 400	25,12	0,29%	6,20
V-MAR 3	11,44	0,13%	2,82

Tabela 3.11 – Matriz 2 – Quantidades (volume para um provete)

Matriz 2			
Material	Massa (g)	Percentagem em massa na matriz	kg/m ³ de mistura
Areia	4400	37,40%	976,17
CEM I52,5R	4400	31,49%	976,17
Água	1320	29,29%	292,85
GLENIUM ACE426	88	1,82%	19,52

3.4.4 Preparação dos provetes

Depois de registar o valor do espalhamento colocaram-se as argamassas nos moldes tendo mais atenção, pois nestes moldes as argamassas tiveram de se infiltrar através de uma altura de 30cm de fibras de aço (Figura 3.36). Depois de estarem completamente preenchidos regularizaram-se as superfícies com uma régua metálica e etiquetaram-se os provetes.



Figura 3.36 – Colocação da argamassa no molde cilíndrico

3.4.5 Condicionamento dos provetes

3.4.5.1 Manuseamento e conservação antes da descofragem

Colocou-se um vidro sobre os provetes para evitar perdas de água por evaporação e deixou-se repousar 24 horas na sala do laboratório com os valores de temperatura e humidade mencionados em 3.1.

3.4.5.2 Desmoldagem e conservação dos provetes

Após 24 horas, os provetes foram desmoldados, com cuidado para não os deteriorar, e foram levados para a câmara saturada onde permaneceram durante seis dias à temperatura ambiente.

3.4.6 Ensaio de tracção directa

Após o sexto dia de câmara saturada os provetes foram retirados e as bases foram regularizadas num esmerilador. Os provetes ficaram 24 horas a secar em laboratório à temperatura ambiente. Como já foi referido, o ensaio de tracção directa consiste em puxar os provetes pelas bases em sentidos opostos com uma prensa de ensaios à tracção (Figura 3.37).

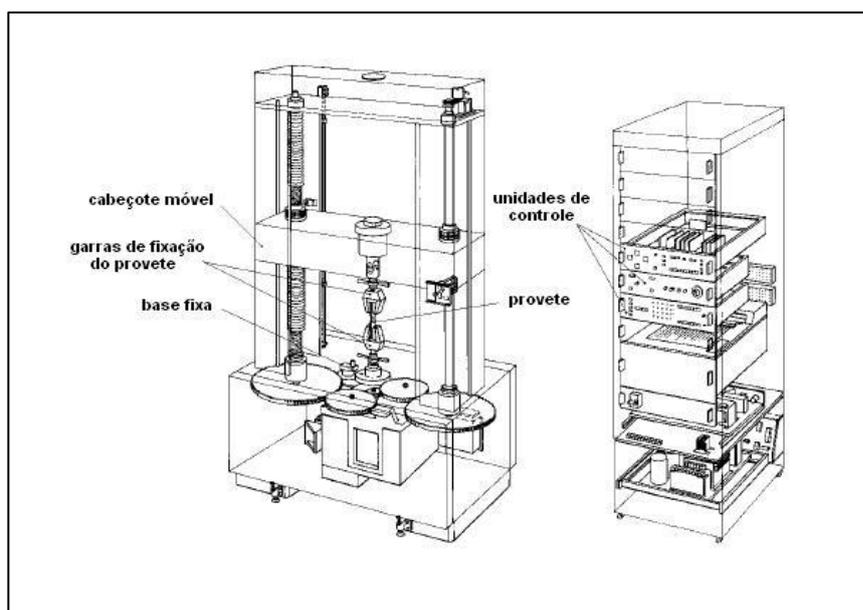


Figura 3.37 – Modelo esquemático de uma máquina de tracção universal

Para que os provetes pudessem ser fixados à máquina de tracção, foi colado um disco em cada base que possuía uma rosca onde se fixa um parafuso ao qual as garras de fixação vão agarrar. Estes discos foram colados com uma cola à base de resina epoxi pois esta é mais resistente que a argamassa utilizada. Caso contrário correríamos o risco de estes discos se descolarem a meio do ensaio.



Figura 3.38 – Provete cilíndrico com os discos colocados



Figura 3.39 – Extensómetros

Depois de estarem os discos colados, os provetes ficaram novamente em repouso durante 24 horas para que a cola pudesse secar (Figura 3.38). Por fim, após as 24 horas de secagem da cola procedeu-se ao ensaio dos provetes. Colocaram-se ambos os parafusos nos discos e foram colocados extensómetros (Figura 3.39) a abranger toda a zona de rotura do provete com uma base de medida de 135mm. Fixou-se o provete à máquina e deu-se início ao ensaio incrementando carga ao provete (Figura 3.40). Os extensómetros transferiram os valores de deformação para um sistema de aquisição de dados (Figura 3.41). Fizeram-se leituras da deformação para cargas de 1 em 1 kN, trinta segundos após o incremento da carga. Caso a rotura fosse fora da base de medida o ensaio não seria válido.



Figura 3.40 – Provette com os transdutores colocados e fixos à prensa de tracção



Figura 3.41 – Máquina de registo e armazenamento de dados

CAPÍTULO 4

Apresentação e discussão dos resultados

4. Apresentação e discussão dos resultados

4.1 Prismas 40x40x160

Durante o ensaio de flexão, na fase de início de rotura, os provetes reforçados com fibras começaram por apresentar fissuras diagonais que tiveram origem na sua face inferior direccionando-se ao rolete superior situado a meio vão (Figura 4.1). Os provetes permaneceram algum tempo a suportar os aumentos de carga mesmo estando fendilhados pois as fibras possuíam boa aderência à matriz. A rotura total do provete deu-se quando a matriz já não conferia aderência suficiente e as fibras cederam por deslizamento (Figura 4.2).



Figura 4.1 – Fissuração do provete



Figura 4.2 – Rotura total do provete

A tabela 4.1 apresenta as informações sobre os provetes produzidos bem como os seus resultados de carga de rotura e flecha na rotura.

Tabela 4.1 – Prismas produzidos e respectivas cargas de rotura e deformações na rotura

Matriz	MATRIZ 1							MATRIZ 2						
	FIBRA 1				FIBRA 2			FIBRA 1				FIBRA 2		
Espalhamento	345mm:343mm				350mm:343mm			354mm:351mm				314mm:308mm		
Data da Amassadura	26-04-2011				19-04-2011			24-03-2011				27-04-2011		
Hora	15:00				16:00			17:00				16:00		
Data de Ensaio	03-05-2011				26-04-2011			31-03-2011				04-05-2011		
Identificação do Molde	M1F1-75	M1F1-100	M1F1-125	M1-0	M1F2-75	M1F2-100	M1F2-125	M2F1-75	M2F1-100	M2F1-125	M2-0	M2F2-75	M2F2-100	M2F2-125
Quantidade de Fibras	75g	100g	125g	0g	75g	100g	125g	75g	100g	125g	0g	75g	100g	125g
Carga de Rotura (kN)	8,87	9,43	11,67	3,03	6,37	7,83	8,90	15,33	16,40	18,77	5,50	8,70	10,00	12,87
Flecha (mm)	2,512	3,011	2,181	0,297	2,652	1,822	1,109	2,640	2,394	2,000	0,373	2,379	1,866	0,848

A partir dos pares força flecha que foram registados durante os ensaios, elaboraram--se as curvas dos provetes ensaiados. A tensão foi obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (4.1)$$

Em que M é o momento flector a meio vão e W é o módulo de flexão dado pela expressão:

$$W = \frac{I}{Y_{max}} \quad (4.2)$$

Desenvolvendo para a situação dos provetes prismáticos obtemos a seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{3PL}{2B^3} \quad (4.3)$$

em que P é a carga aplicada, L é a distância entre os roletes inferiores e B é o lado da secção transversal quadrada.

Nas Figuras 4.3 a 4.20 estão representadas as curvas tensão-flecha obtidas dos ensaios de todos os provetes. Optou-se por utilizar a mesma escala para todos os provetes para que se possa fazer uma análise comparativa de ambos os compósitos. ^[14]

Acrescenta-se que o valor da tensão não é igual após a fissuração da matriz, representando apenas o valor que se obteria caso se mantivesse o comportamento elástico, onde a expressão 4.3 tem validade.

4.1.1 Tensões de rotura à flexão

Compósito Matriz 1 - Fibra 1

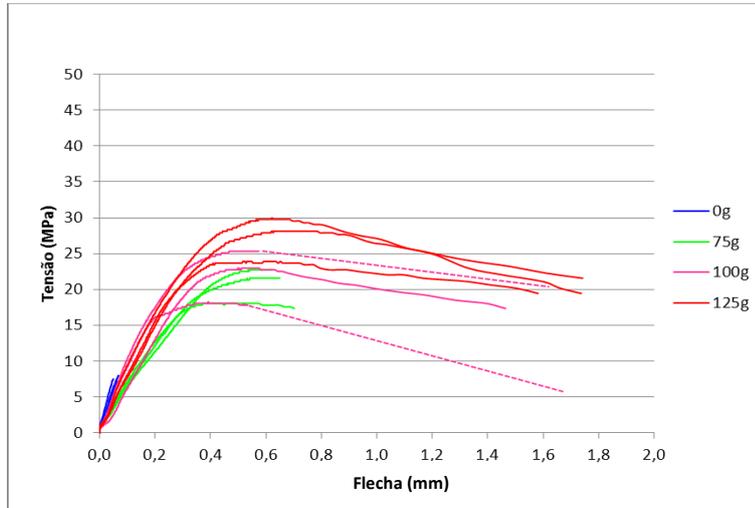


Figura 4.3 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M1F1

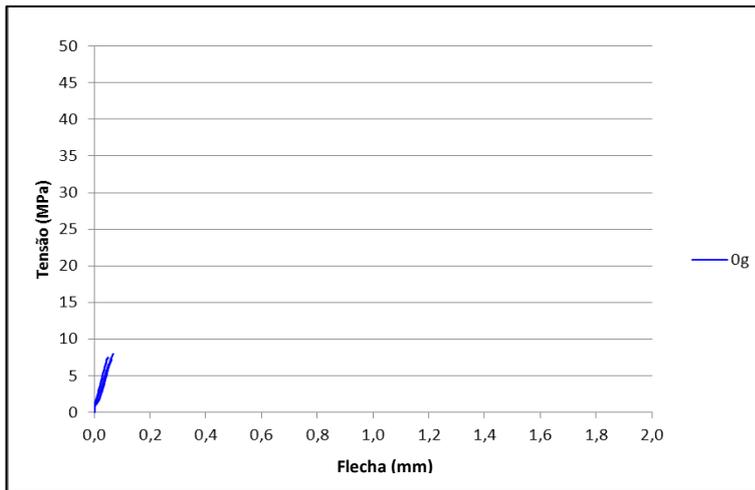


Figura 4.4 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1-0

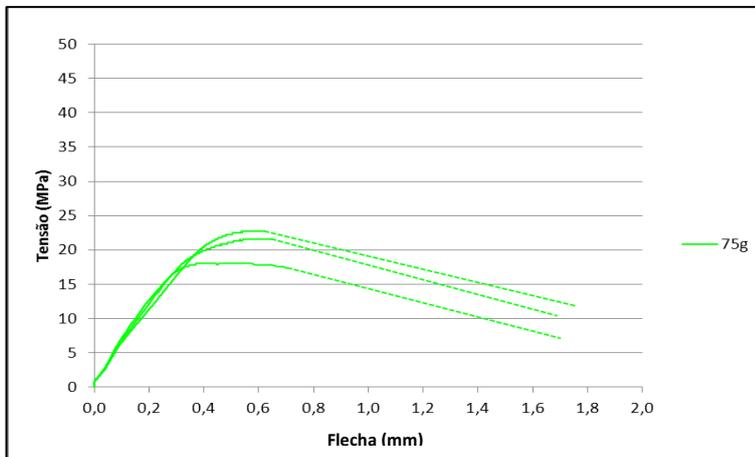


Figura 4.5 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F1-75

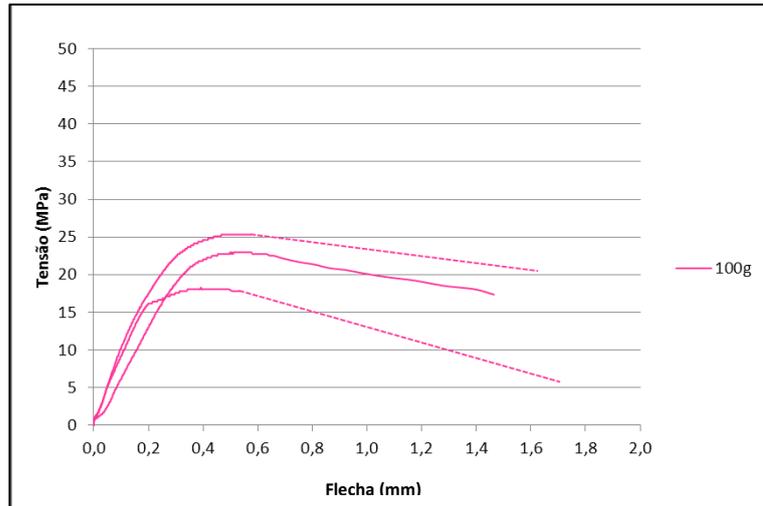


Figura 4.6 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F1-100

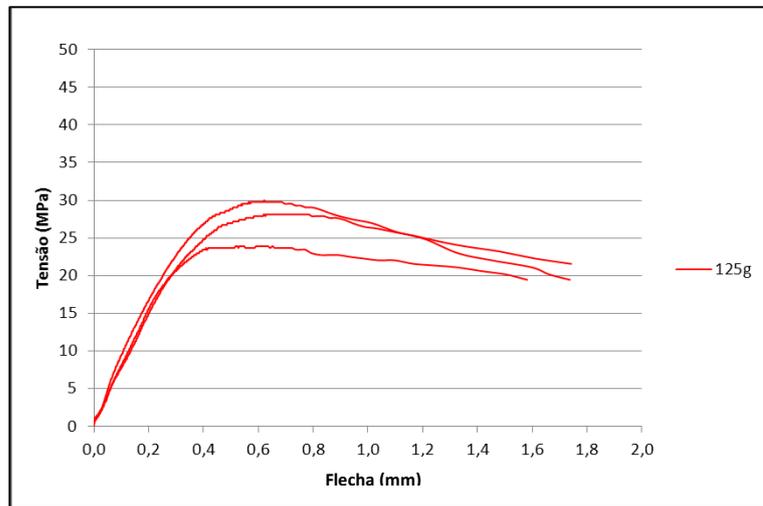


Figura 4.7 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F1-125

Compósito Matriz 1 - Fibra 2

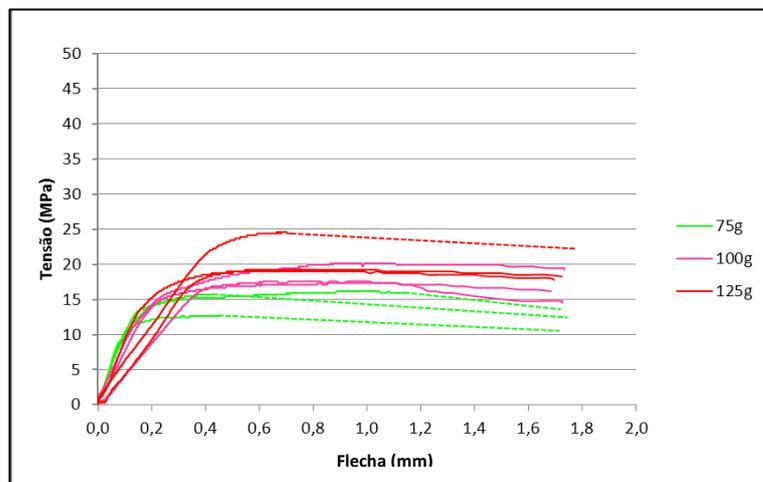


Figura 4.8 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M1F2

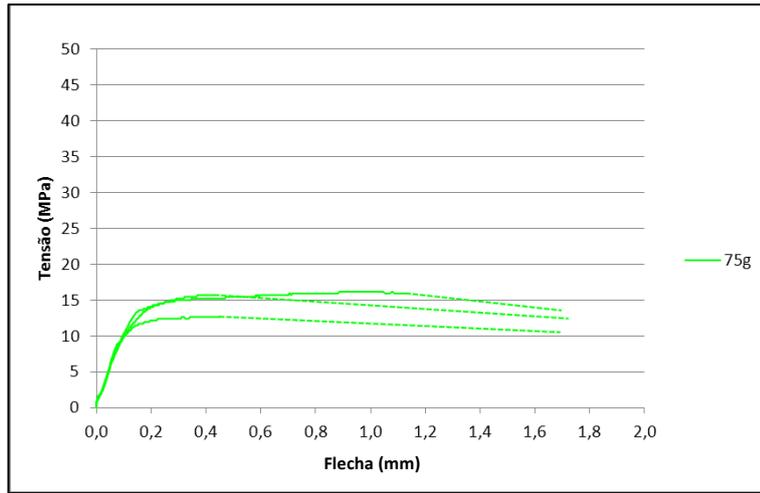


Figura 4.9 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F2-75

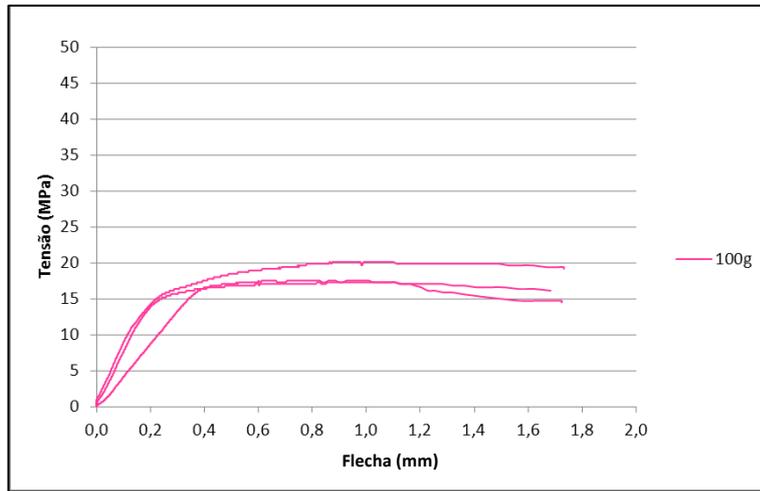


Figura 4.10 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F2-100

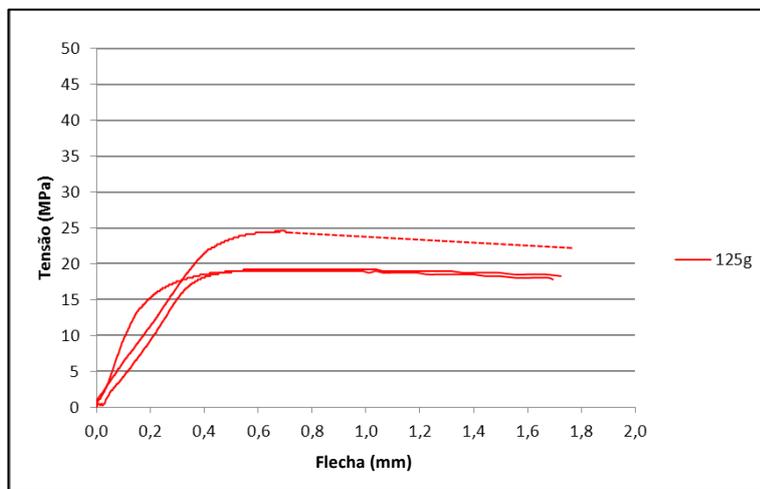


Figura 4.11 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M1F2-125

Compósito Matriz 2 - Fibra 1

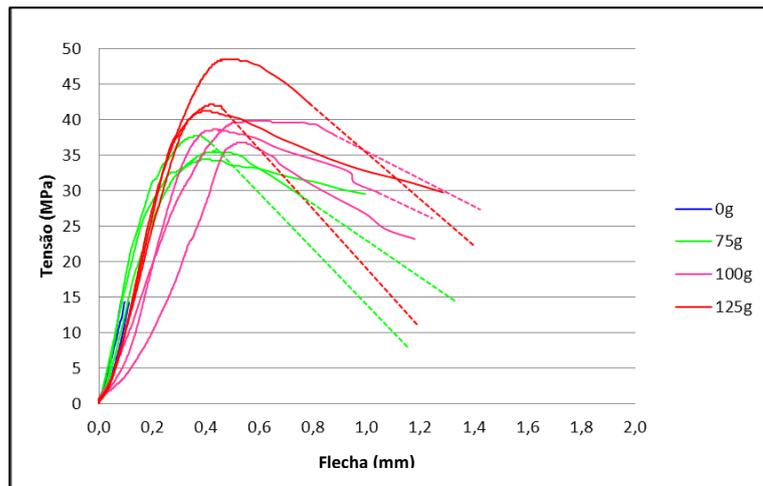


Figura 4.12 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M2F1

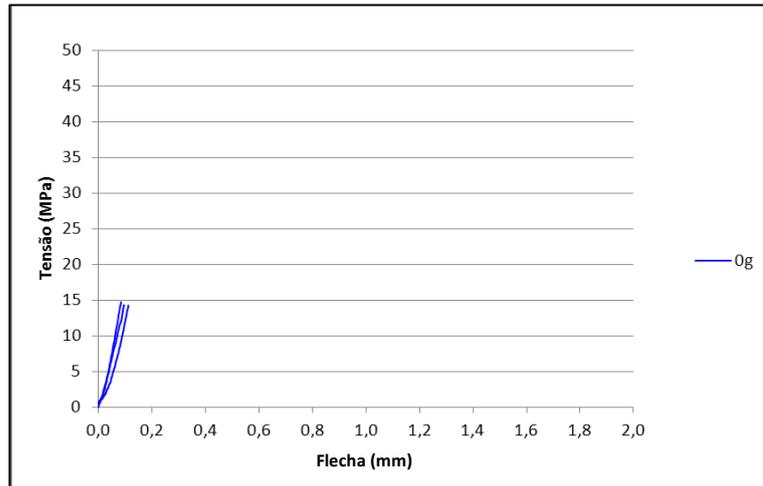


Figura 4.13 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2-0

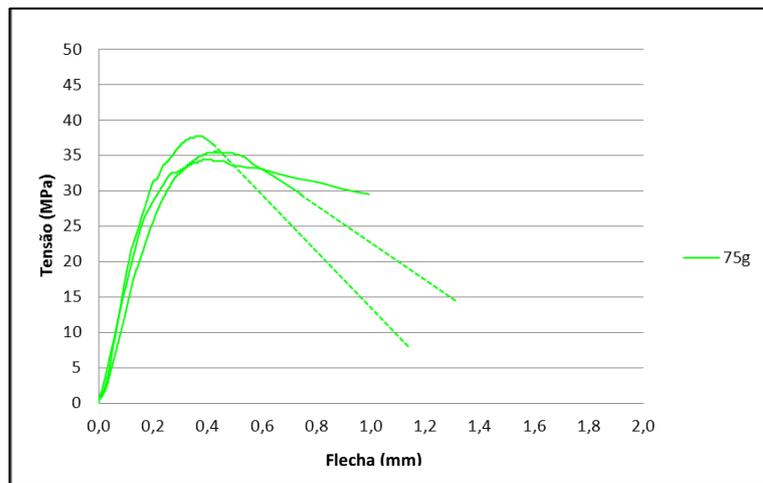


Figura 4.14 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F1-75

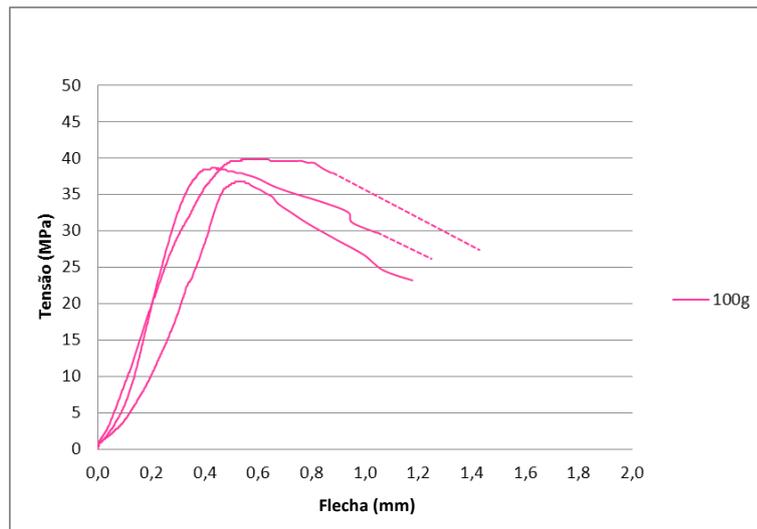


Figura 4.15 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F1-100

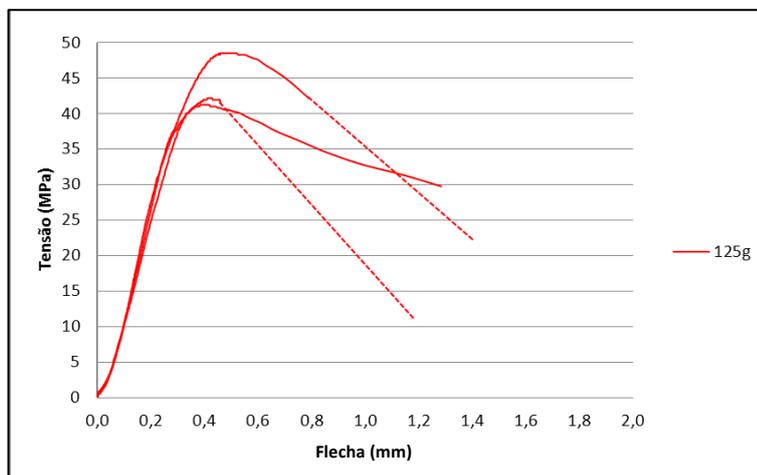


Figura 4.16 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F1-125

Compósito Matriz 2 - Fibra 2

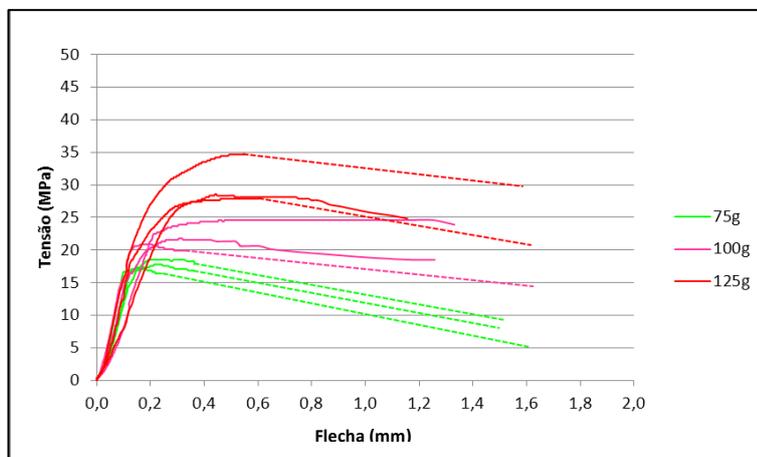


Figura 4.17 – Curvas Tensão – Flecha para todos os provetes do compósito M2F2

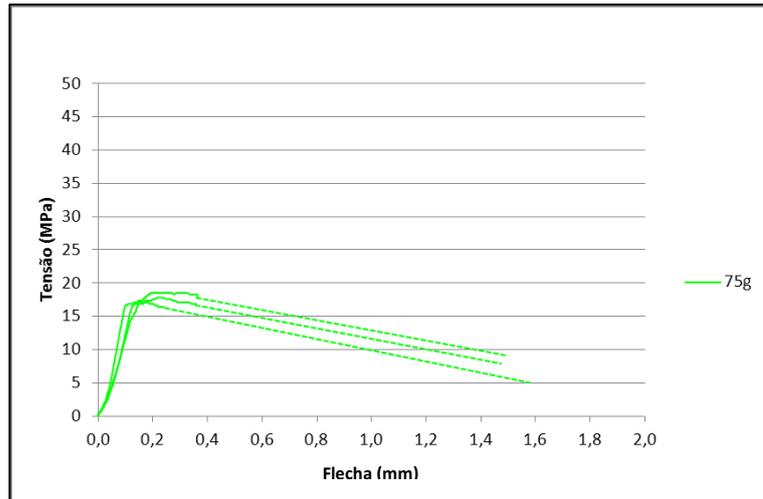


Figura 4.18 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F2-75

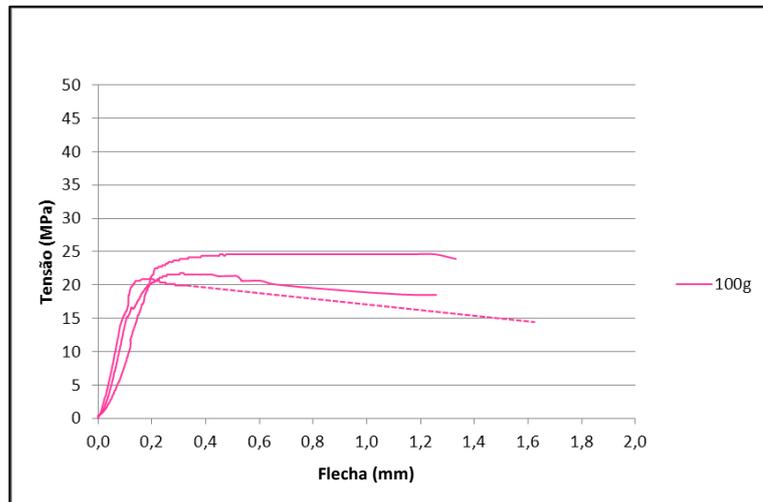


Figura 4.19 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F2-100

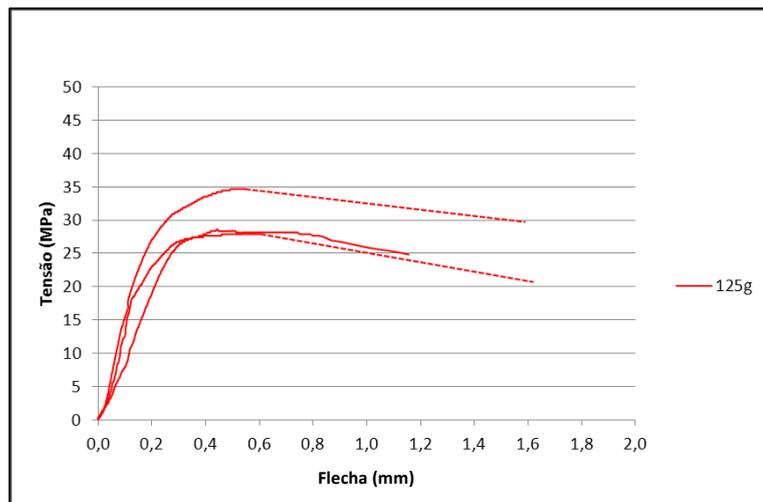


Figura 4.20 – Curvas Tensão – Flecha para os provetes M2F2-125

Pode-se observar que, embora os 3 provetes de cada molde sejam iguais, os valores máximos de resistência à flexão não o são, mas possuem uma boa aproximação na carga máxima. A razão pela qual existem alguns desvios é a colocação aleatória das fibras. Este é um factor que não pode nem deve ser controlado para uma correcta simulação do que ocorrerá na prática. É óbvio que quanto mais fibras estiverem orientadas longitudinalmente ao provete melhor será a sua resistência mas não é isso que está a ser avaliado, mas sim a resistência do provete com a aleatoriedade das fibras, pois só assim se simula uma situação de betonagem real.

Algumas curvas, como se pode observar, são finalizadas com um traço a traço interrompido. Este traçado é uma estimativa do comportamento da curva pois em alguns casos a partir de uma certa deformação o extensómetro deslizava em relação ao provete. Estas situações só ocorreram após a rotura do provete não influenciando assim os resultados.

Analisando os diferentes compósitos é perfeitamente visível que quanto mais fibras forem colocadas maior resistência terá o provete. É extremamente importante que as fibras sejam colocadas aleatoriamente não só para simular uma situação real como também para que existam espaços vazios para o preenchimento da argamassa e obtenção de melhor aderência. Caso contrário, teríamos um provete que iria ter uma quantidade muito maior de fibras, pois estas tinham sido rearranjadas, mas a sua resistência iria ser baixa pela falta de matriz.

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios da tensão de rotura dos provetes de cada molde, ou seja, o valor máximo de tensão que o provete suportou. Este valor nos gráficos que foram apresentados corresponde aos picos das curvas.

Tabela 4.2 – Tensões de rotura médias dos prismas

PRISMAS - Tensões de Rotura Médias (MPa)							
	0g	FIBRA 1			FIBRA 2		
		75g	100g	125g	75g	100g	125g
MATRIZ 1	7,58	20,78	22,19	27,35	14,84	18,36	20,94
MATRIZ 2	14,49	35,86	38,44	43,99	17,81	22,42	30,47

Com estes valores podemos comparar o desempenho de cada uma das fibras perante as duas matrizes, ou então o contrário, pode-se comparar o desempenho de cada matriz perante as diferentes fibras.

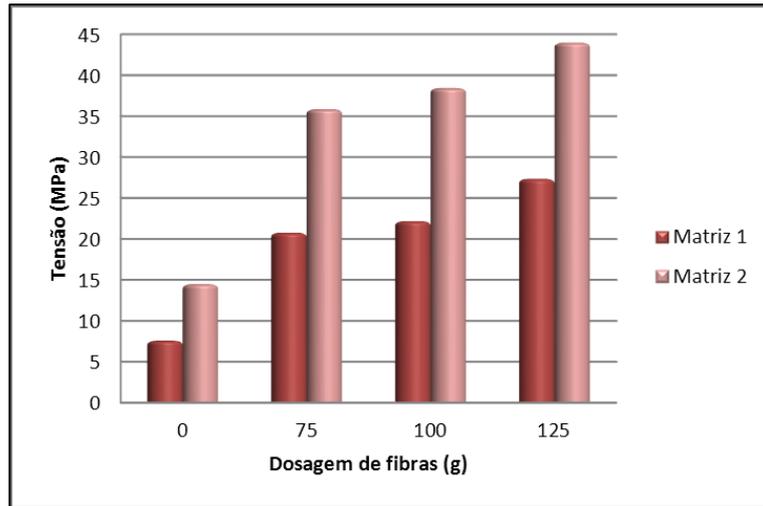


Figura 4.21 – Tensões rotura à flexão da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes

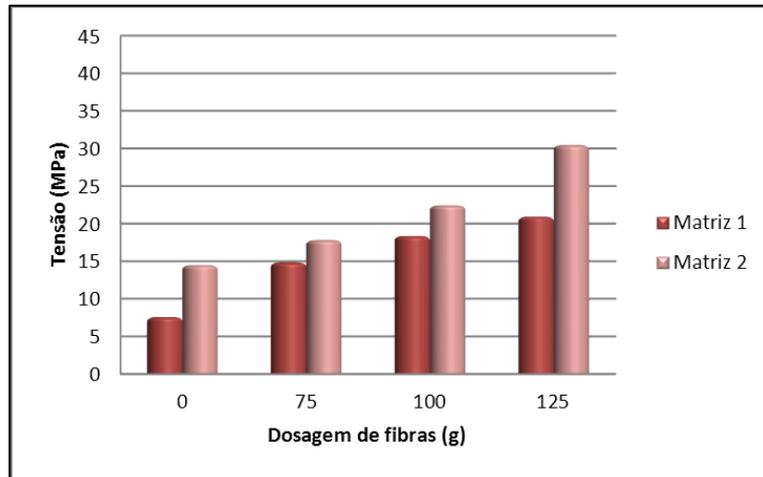


Figura 4.22 – Tensões rotura à flexão da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes

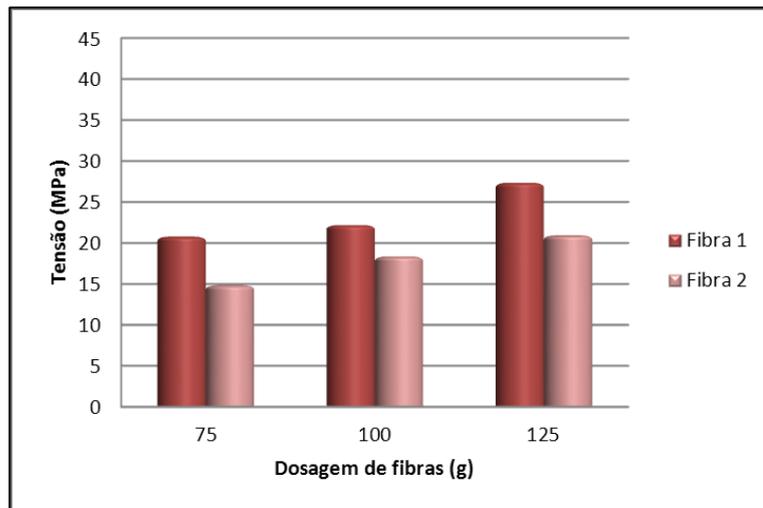


Figura 4.23 – Tensões rotura à flexão da Matriz 1 combinada com ambas as fibras

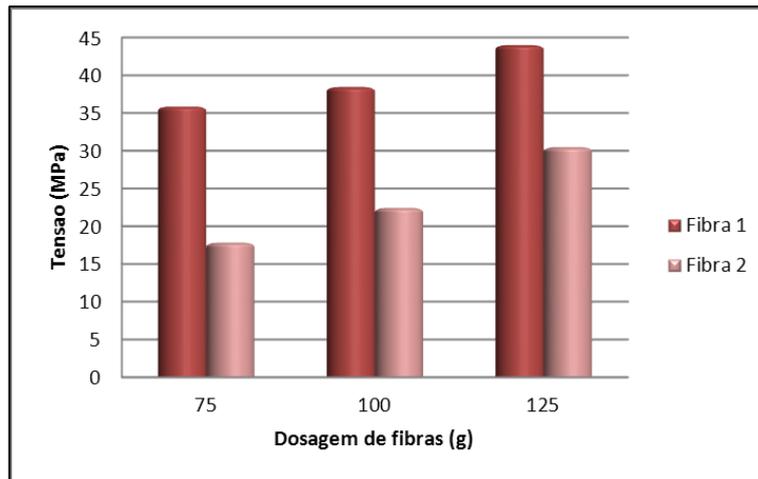


Figura 4.24 – Tensões rotura à flexão da Matriz 2 combinada com ambas as fibras

Começando por analisar as Figuras 4.21 e 4.22, verificamos que a resistência à flexão dos provetes que não possuem fibras onde se utilizou a Matriz 2 é aproximadamente duas vezes superior que a dos provetes com a Matriz 1. Esta diferença era espectável pelas razões que já foram explicadas em 2.2. A situação é semelhante com os provetes que possuem fibras, em que em qualquer das situações, para as mesmas quantidades de fibra, a Matriz 2 apresenta sempre uma resistência muito superior.

Na Figura 4.23 apresentam-se os valores da tensão de rotura da Matriz 1 combinada com ambas as fibras. Neste gráfico pode-se observar que a resistência à flexão dos provetes onde se utilizou a Fibra 1 é aproximadamente 1,3 vezes mais resistente que os provetes em que foram utilizadas fibras do tipo 2 independentemente da quantidade de fibra no provete.

Na Figura 4.24 encontram-se os valores da tensão de rotura dos provetes da Matriz 2 combinada com ambas as fibras. Nesta situação os resultados são semelhantes aos do gráfico anterior, mas neste caso com a Fibra 1 obtemos uma resistência à flexão em média 1,7 vezes superior à resistência à flexão das misturas com a Fibra 2. Com estes resultados conclui-se que para as mesmas condições, matriz e quantidade de fibras, a Fibra 1 tem um comportamento melhor que a Fibra 2. Esta diferença é explicada pelo facto de as primeiras possuírem um factor de forma mais elevado o que implica que estas possuem mais área de superfície de contacto com a matriz por unidade de massa. Se pesarmos a mesma quantidade de cada tipo de fibras observamos que obtemos muito mais Fibras 1 do que Fibras 2. Isso implica que, como o diâmetro das primeiras é menor, iremos obter maior quantidade de perímetro de contacto com a matriz explicando assim maior resistência por parte destas. O facto de os provetes com Fibra 1 possuírem uma resistência cerca de 1,7

vezes superior aos provetes com a Fibra 2, perante a Matriz 2, e de 1,3 vezes superior perante a Matriz 1, é explicado pelo facto de a Matriz 1 ser uma argamassa de baixa resistência quando comparada com a Matriz 2. A Matriz 2, sendo uma argamassa de resistência muito elevada, torna muito mais difícil o arrancamento das fibras fazendo com que estas trabalhem com melhor desempenho. Já a Matriz 1 sendo uma argamassa de baixa resistência não explora por completo as potencialidades das fibras havendo assim um deslizamento das mesmas sem que estas possam atingir a sua tensão máxima.

4.1.2 Deformações à flexão

As flechas médias que os provetes apresentavam no momento da rotura estão na Tabela 4.3. Com estes valores podemos fazer uma análise comparativa através dos gráficos apresentados nas figuras 4.25 e 4.28.

Tabela 4.3 – Flechas no instante da rotura dos prismas

PRISMAS – Flecha no instante da rotura (mm)							
	0g	FIBRA 1			FIBRA 2		
		75g	100g	125g	75g	100g	125g
MATRIZ 1	0,059	0,414	0,453	0,586	0,522	0,761	0,564
MATRIZ 2	0,097	0,377	0,492	0,416	0,190	0,307	0,487

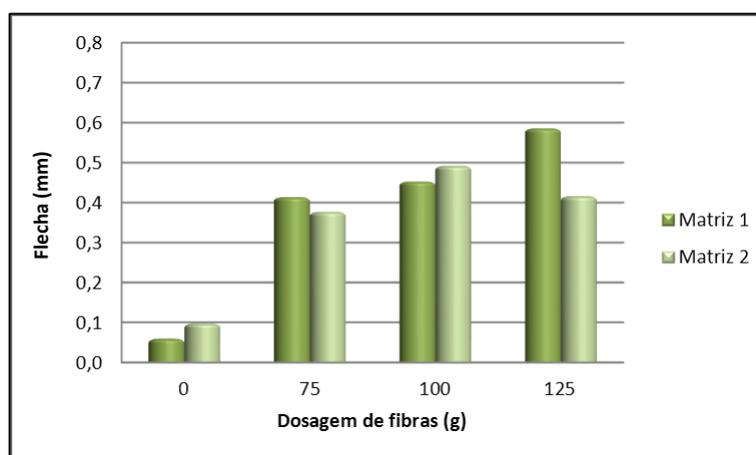


Figura 4.25 – Flecha da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes

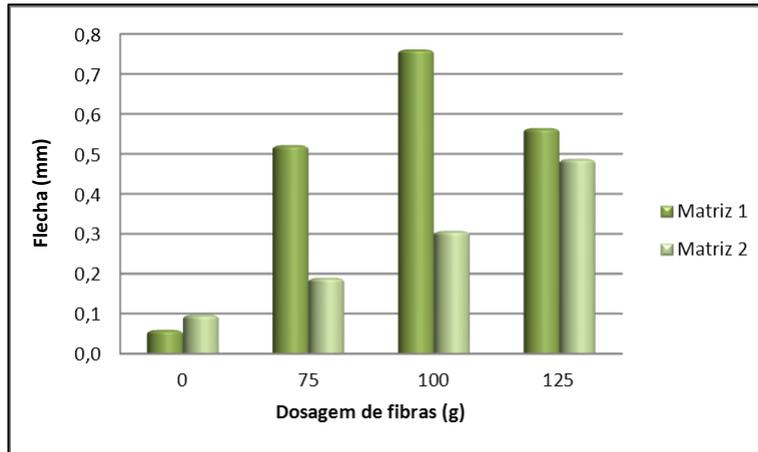


Figura 4.26 – Flecha da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes

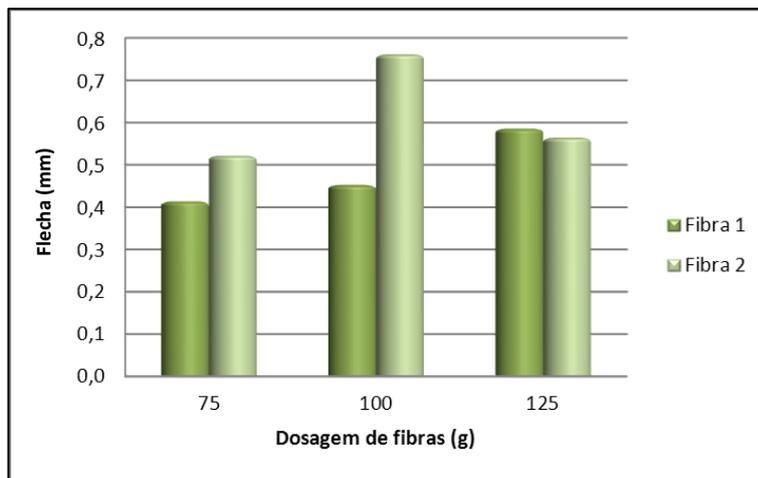


Figura 4.27 – Flecha da Matriz 1 combinada com ambas as fibras

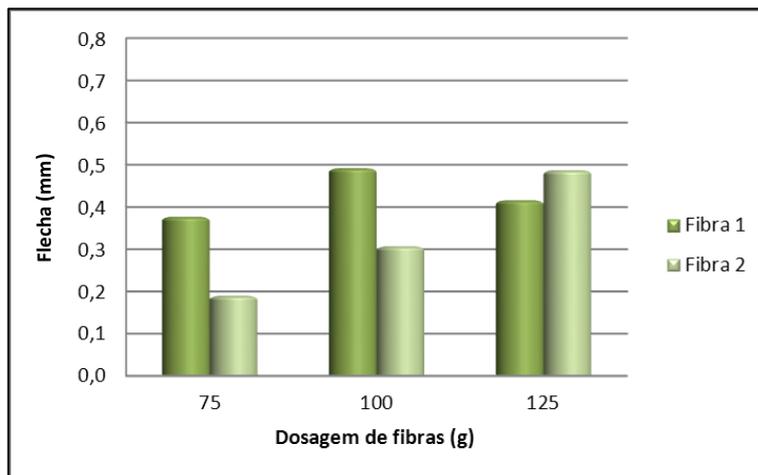


Figura 4.28 – Flecha da Matriz 2 combinada com ambas as fibras

Analisando a Figura 4.25, que diz respeito à Fibra 1, pode-se concluir que a deformação no momento da rotura dos provetes com a Matriz 1 é aproximadamente proporcional à quantidade de fibras colocadas, ou seja, ao aumentarmos a quantidade de fibras dos provetes estamos a aumentar a sua deformação no instante de rotura. Já na presença da Matriz 2, as fibras do Tipo 1 não apresentam o mesmo comportamento dado que os níveis de deformação aumentam até aos 100g de fibras mas ao passar a dosagem para 125g a flecha de rotura diminui. Este acontecimento pode ser explicado pelo facto de este compósito, com alta dosagem de Fibra 1 e uma argamassa muito resistente, ser mais rígido. Os valores de tensão de rotura podem ser elevados sem que haja grande deformação do provete apresentando um comportamento bastante enrijecido.

A Figura 4.26 ilustra perfeitamente as diferenças de deformação entre a Matriz 1 e a Matriz 2 para as fibras do tipo 2. Em qualquer uma das quantidades de fibras é possível observar que a Matriz 1 é muito mais dúctil que a Matriz 2 como é espectável que aconteça, sendo esta uma argamassa mais fraca.

A Figura 4.27 ilustra uma comparação entre ambas as fibras perante a Matriz 1. Nesta situação observa-se que em média a Fibra 2 apresenta valores de flecha de rotura mais elevados que a Fibra 1, o que pode estar relacionado com o deslizamento das fibras, mais provável nas argamassas com a Fibra 2.

A Figura 4.28 ilustra um comportamento contrário perante a Matriz 2. A Fibra 1 apresenta, em média, valores de deformação superiores aos da Fibra 2. Na Matriz 2, com maior resistência, o efeito do deslizamento é menor, sobrepondo-se o efeito dúctil conferido pelas fibras.

4.1.3 Tensões de rotura à compressão

Como já se referiu em 3.2.7 a resistência à compressão de ambas as matrizes foi determinada com os semi-prismas, que não possuíam fibras (Figura 4.29), resultantes do ensaio à flexão.



Figura 4.29 – Forma do provete após o ensaio de compressão

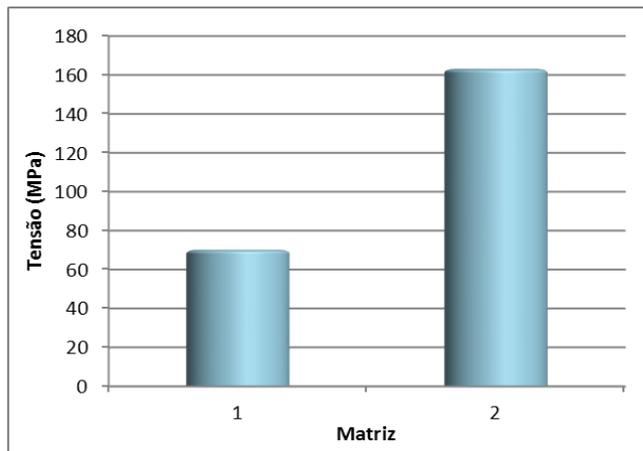


Figura 4.30 – Valores médios da resistência à compressão das Matrizes 1 e 2

Tal como acontece à flexão, a Matriz 1 possui uma resistência muito mais baixa à compressão do que a Matriz 2 (Figura 4.30). Aqui evidencia-se perfeitamente variação do cimento de 32,5R para o cimento 52,5R. Poderia pensar-se que os valores obtidos são muito elevados face à resistência dos cimentos aos 28 dias, mas dado que se utilizaram fortes redutores de água e foram colocados a 40°C as argamassas adquiriram resistências muito elevadas. O facto de os cimentos serem de designação R também contribui para um grande aumento da tensão à compressão nos primeiros dias, para além do efeito acelerador de temperatura.

4.2 Vigas 100x100x700

4.2.1 Tensões de rotura à flexão

O comportamento das vigas foi semelhante ao dos prismas. As fissurações ocorrem no sentido diagonal direccionando-se ao rolete superior (Figura 4.31). Os provetes receberam uma carga até às primeiras fissuras e os valores de flecha foram registados manualmente para intervalos de força de 1kN.

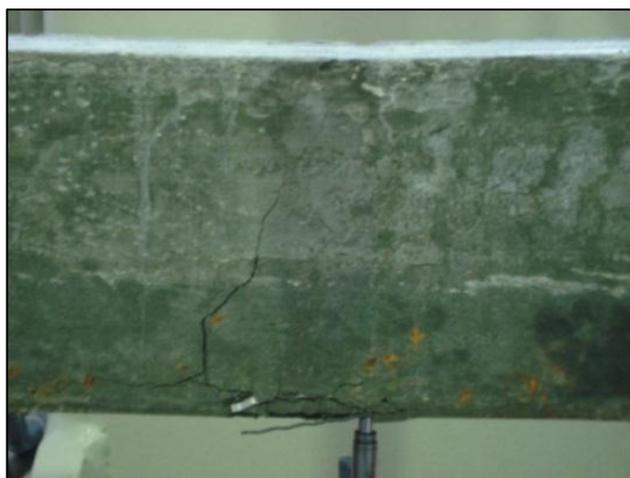


Figura 4.31 – Fissuras iniciais do provete

Os valores de carga de rotura e flecha na rotura estão apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Vigas produzidas com a Matriz 1

Matriz	MATRIZ 1						
Fibra	FIBRA 1				FIBRA 2		
Espalhamento	342mm:339mm	312mm:308mm	328mm:315mm	360mm:358mm	320mm:315mm	322mm:319mm	334mm:332mm
Data da Amassadura	17-05-2011	18-05-2011	18-05-2011	11-07-2011	24-05-2011	24-05-2011	25-05-2011
Hora	17:00	17:00	15:00	14:00	16:00	17:00	15:00
Data de Ensaio	24-05-2011	25-05-2011	25-05-2011	18-07-2011	31-05-2011	31-05-2011	31-05-2011
Identificação do Molde	M1F1-2700	M1F1-2200	M1F1-1700	M1-0	M1F2-2700	M1F2-2200	M1F2-1700
Quantidade de Fibras	2700g	2200g	1700g	0g	2700g	2200g	1700g
Peso do Provete	16,948 Kg	16,878 Kg	16,210 Kg	15,170 Kg	17,134 Kg	16,732 Kg	16,313 Kg
Carga de Rotura (kN)	12,00	11,30	10,80	5,00	10,40	10,00	8,40
Flecha (mm)	2,512	2,988	2,181	0,297	2,652	1,822	1,109

Tabela 4.5 – Vigas produzidas com a Matriz 2

Matriz	MATRIZ 2						
Fibra	FIBRA 1				FIBRA 2		
Espalhamento	320mm:318mm	365mm:365mm	345mm:349mm	355mm:351mm	370mm:368mm	364mm:360mm	366mm:364mm
Data da Amassadura	03-05-2011	10-05-2011	10-05-2011	11-07-2011	11-05-2011	11-05-2011	17-05-2011
Hora	16:00	15:00	17:00	16:00	15:00	17:00	16:30
Data de Ensaio	10-05-2011	17-05-2011	17-05-2011	18-07-2011	18-05-2011	18-05-2011	24-05-2011
Identificação do Molde	M2F1-2700	M2F1-2200	M2F1-1700	M2-0	M2F2-2700	M2F2-2200	M2F2-1700
Quantidade de Fibras	2700g	2200g	1700g	0g	2700g	1700g	1200g
Peso do Provete	17,916 Kg	18,003 Kg	17,434 Kg	15,522 Kg	18,346 Kg	17,541 Kg	17,462 Kg
Carga de Rotura (kN)	20,00	18,90	18,00	9,50	18,00	16,00	12,00
Flecha (mm)	2,640	2,394	2,000	0,373	2,379	1,866	0,848

A rotura das vigas ocorreu no momento em que a superfície das fibras perdeu a aderência à matriz. A viga rompeu por deslizamento das fibras e não por rotura das mesmas.

A tensão aplicada foi calculada pela expressão (4.1) e elaboraram-se os gráficos tensão-flecha. Novamente utilizou-se a mesma escala para todos os compósitos, Figuras 4.32 a 4.37.

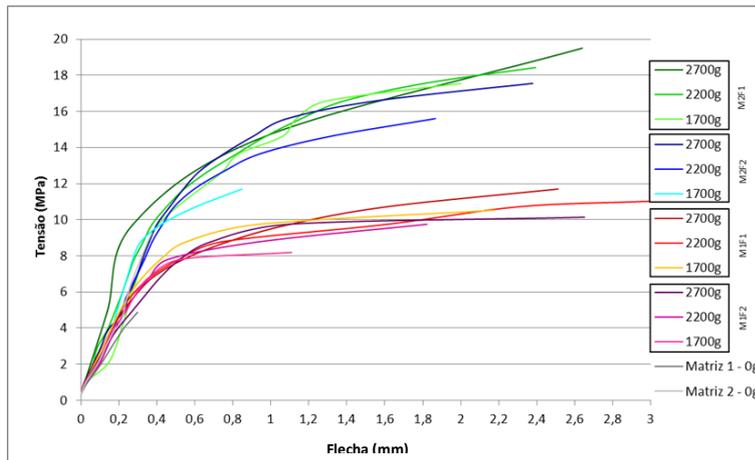


Figura 4.32 – Curvas Tensão – Flecha para todas as vigas produzidas

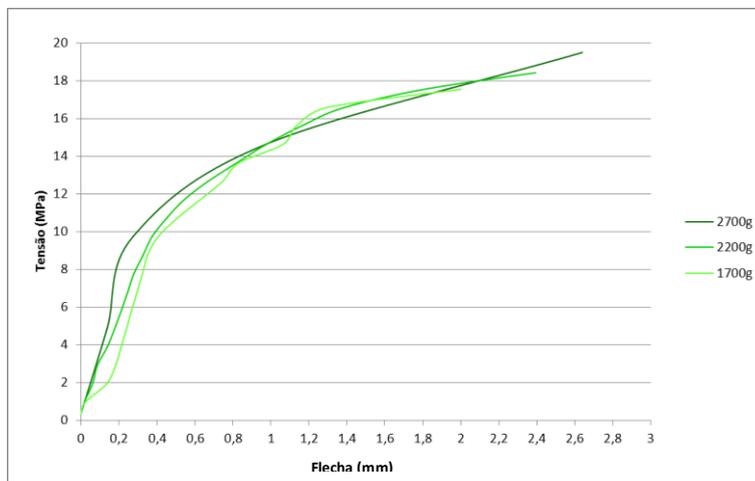


Figura 4.33 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M2F1

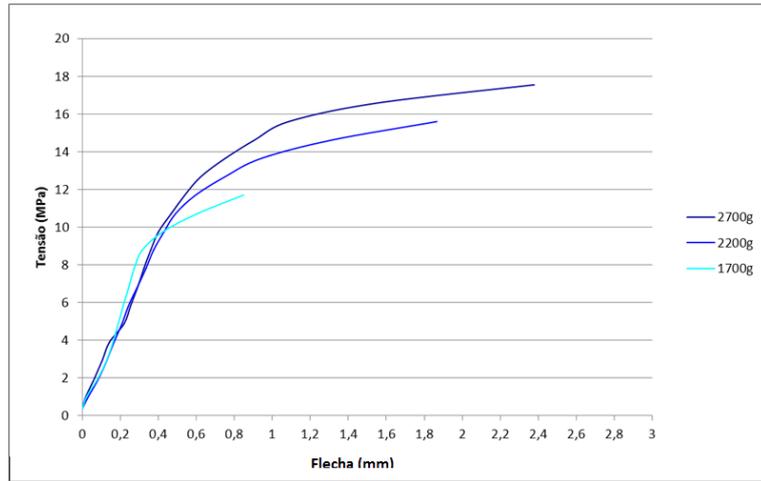


Figura 4.34 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M2F2

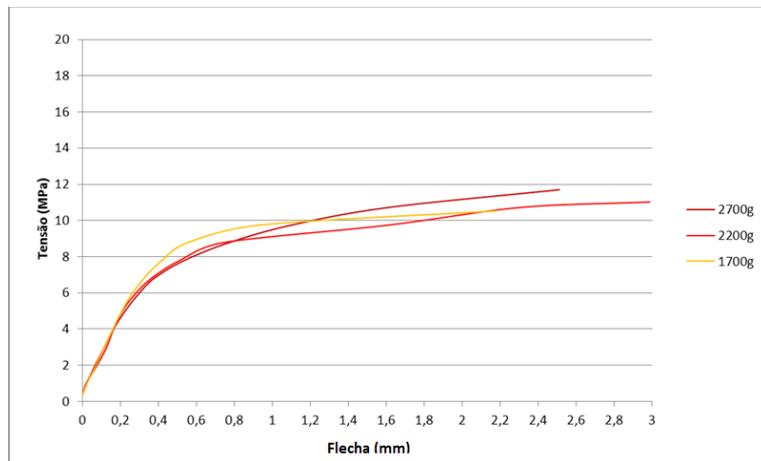


Figura 4.35 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M1F1

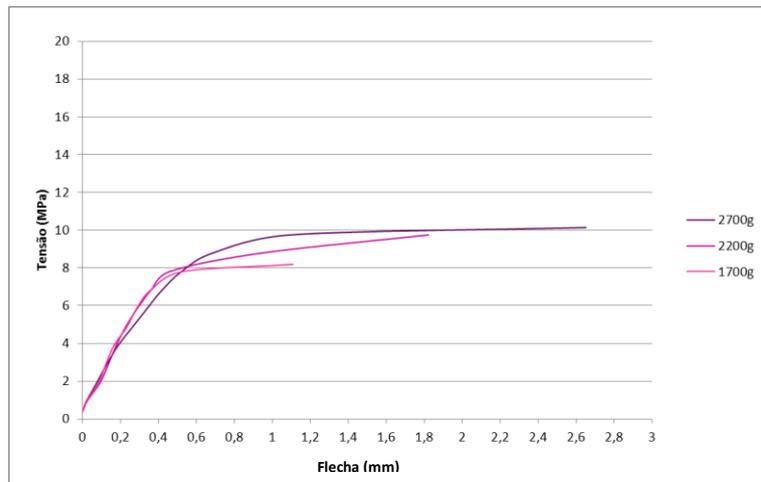


Figura 4.36 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas do compósito M1F2

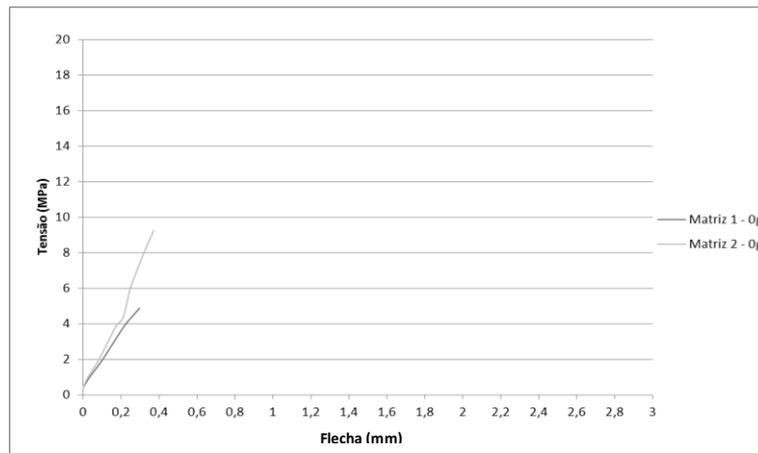


Figura 4.37 – Curvas Tensão – Flecha para as vigas compostas pelas matrizes 1 e 2

Analisando as curvas tensão – Flecha conseguem-se tirar algumas ilações que não eram possíveis com os prismas pois as dimensões destes eram demasiado pequenas relativamente ao tamanho das fibras. No caso dos prismas, como o molde era muito pequeno, a aleatoriedade da colocação das fibras podia estar condicionada. O molde possuía 40mm de largura e as fibras possuíam um comprimento de 50mm. Assim, é natural que a maioria das fibras se disponha longitudinalmente ao molde. Com as vigas, esta situação já não acontece. Como as vigas já possuem uma dimensão muito maior a aleatoriedade das fibras é melhor preservada e isto está evidenciado nos resultados dos ensaios. Vê-se perfeitamente que todos os compósitos onde se utilizou a Matriz 2 são notoriamente mais resistentes que os compósitos em que foi utilizada a Matriz 1. Se observarmos os gráficos conseguimos concluir que quanto mais fibras o provete possuir, maior a sua resistência, como já tínhamos concluído com os prismas. Uma situação muito interessante que se consegue observar perfeitamente é a variação da deformação de rotura com a dosagem das fibras. À excepção do compósito M1F1, em todos os outros compósitos verifica-se que quanto mais se aumenta a dosagem de fibras maior é a deformação suportada pelo provete até se dar a rotura.

A Tabela 4.6 que se segue apresenta os valores de tensão de rotura das vigas. Com estes valores podemos fazer uma análise comparativa com os diferentes compósitos realizados (Figuras 4.38 a 4.41).

Tabela 4.6 – Tensões de rotura das vigas

VIGAS - Tensão de Rotura (MPa)							
	0g	FIBRA 1			FIBRA 2		
		1700g	2200g	2700g	1700g	2200g	2700g
MATRIZ 1	4,88	10,53	11,02	11,70	8,19	9,75	10,14
MATRIZ 2	9,26	17,55	18,43	19,50	11,70	15,60	17,55

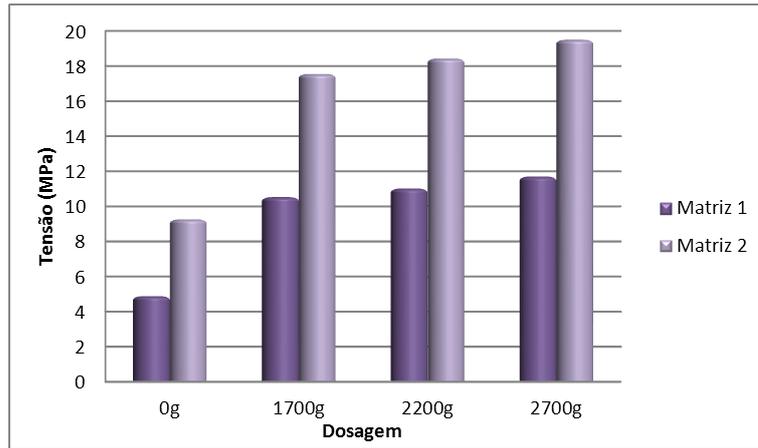


Figura 4.38 – Tensões de rotura à flexão da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes

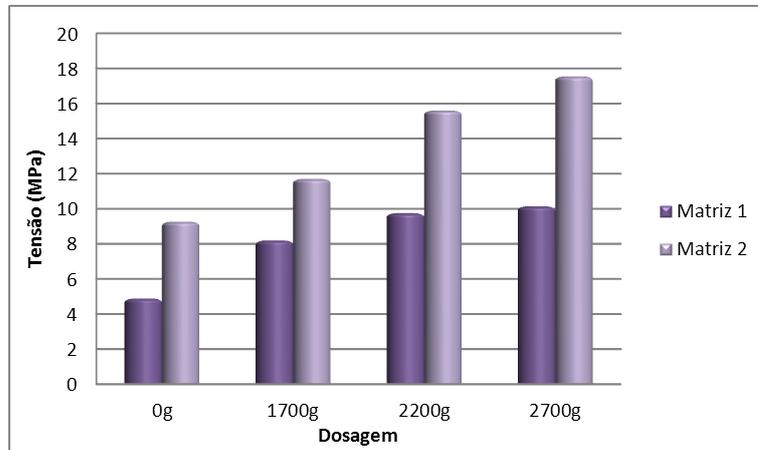


Figura 4.39 – Tensões de rotura à flexão da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes

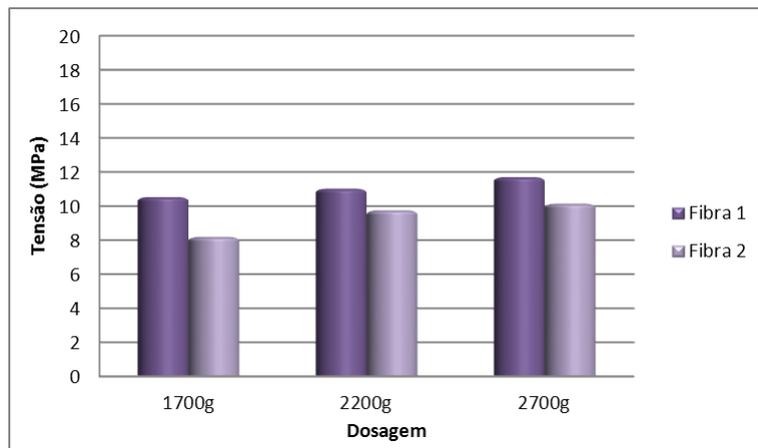


Figura 4.40 – Tensões de rotura à flexão da Matriz 1 combinada com ambas as fibras

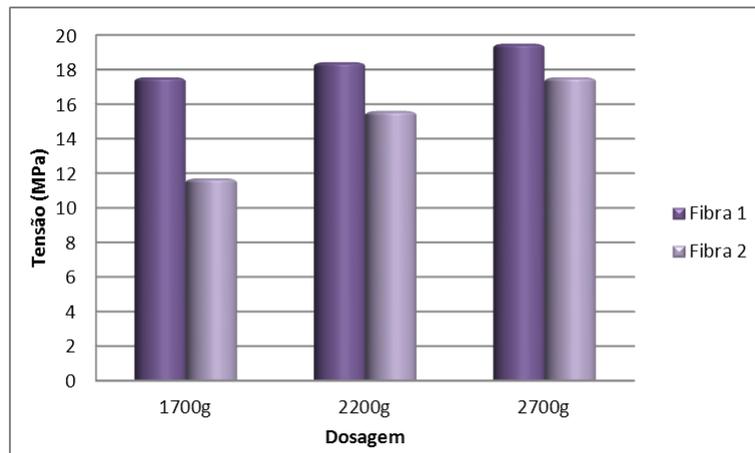


Figura 4.41 – Tensões de rotura à flexão da Matriz 2 combinada com ambas as fibras

Os gráficos apresentados das tensões de rotura à flexão são basicamente semelhantes aos apresentados no caso dos prismas. A Figura 4.38 e a Figura 4.39 ilustram que, independentemente do tipo de fibra utilizado, a Matriz 2 apresenta sempre melhores resultados em termos de resistência à flexão. Mostra-nos também que com o aumento da dosagem aumentamos assim a resistência do provete. Um pormenor interessante de se observar é que no caso da Fibra 1 ao aumentarmos a dosagem de fibras de 1700g para 2200g e depois para 2700g o aumento da resistência à flexão não é tão significativo como nas Fibras do tipo 2 que se nota um grande aumento da resistência com o aumento da dosagem. Este fenómeno estará relacionado com o seguinte: como as Fibras 1 são menos densas devido aos diferentes factores de forma, ao colocarmos 1700g destas fibras ultrapassamos a altura da linha neutra da viga o que implica que muitas das fibras irão trabalhar à compressão. Se em 1700g já se ultrapassa a linha neutra ao aumentarmos a dosagem das fibras só estamos a aumentar a armadura de compressão não tendo grande influência no ensaio. Com as Fibras 2 esta situação já não acontece. Como estas são mais densas concentram-se muito no fundo do molde e só ao colocarmos a dosagem máxima de fibras é que estamos a ultrapassar a linha neutra. Assim estão garantidas que todas as fibras estão a trabalhar em tracção. A Figura 4.40 e a Figura 4.41 mostram que as Fibras 1 mesmo a trabalharem em parte à compressão conseguem melhores valores de resistência ficando provado que, à flexão estas são melhor opção que as Fibras 2.

Através da expressão 1.6 podemos analisar os resultados em função do número de fibras.

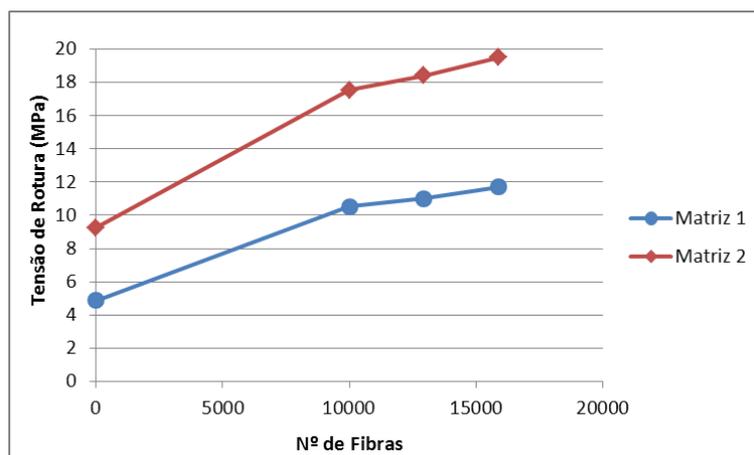


Figura 4.42 – Tensões de rotura à flexão em função do número de fibras – Fibra 1

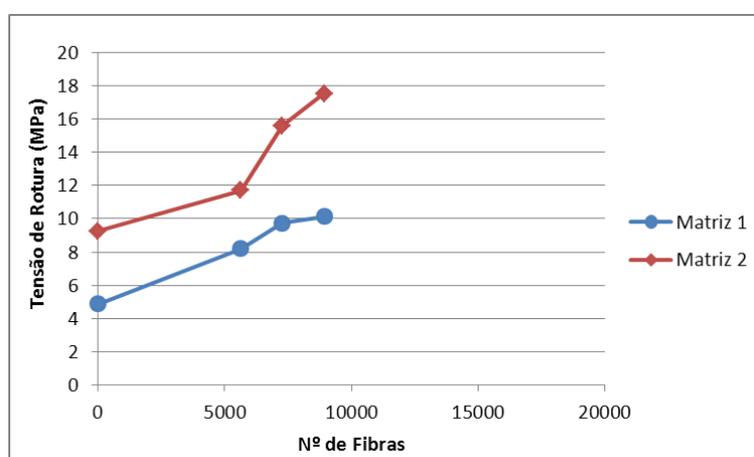


Figura 4.43 – Tensões de rotura à flexão em função do número de fibras – Fibra 2

Analisando as Figuras 4.42 e 4.43 pode-se verificar que, para a mesma massa de fibras, a Fibra 1 fornece uma maior quantidade de fibras ao compósito, devido ao seu factor de forma mais elevado. Esta diferença em número de fibras poderá ser responsável pelo aumento da resistência dos provetes em que se utilizou Fibra 1, devido ao facto de esta proporcionar maior área de aderência à matriz.

Comparando os valores das tensões de rotura das vigas com os prismas observa-se na Figura 4.44 que os resultados são semelhantes diferenciando-se principalmente na escala de tensão. Os prismas atingem tensões maiores essencialmente devido à temperatura à qual sofreram no seu processo de endurecimento. Todos os comportamentos apresentados pelos prismas na mudança de matriz ou fibra reflectem-se também nas vigas (Figura 4.44), evidenciando a consistência do trabalho experimental realizado.

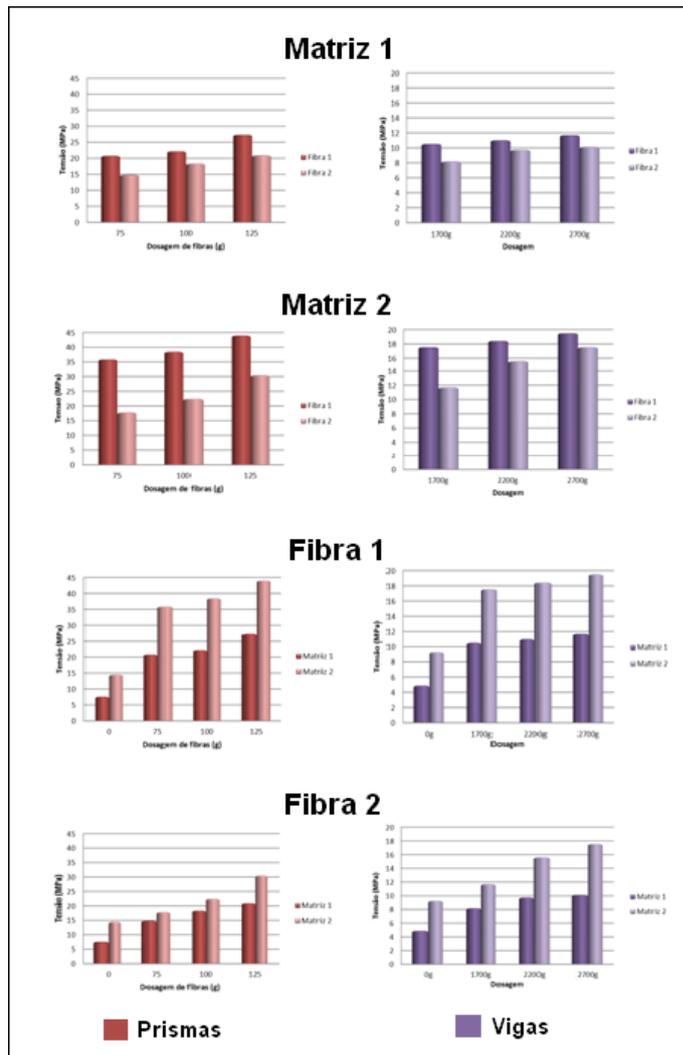


Figura 4.44 – Tensões de rotura dos primas VS tensões de rotura das vigas

4.2.2 Deformações à flexão

As flechas no momento de rotura das vigas encontram-se na Tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Flechas no instante da rotura das vigas

VIGAS - Flecha (mm)							
	0g	FIBRA 1			FIBRA 2		
		2700g	2200g	1700g	2700g	2200g	1700g
MATRIZ 1	0,297	2,512	2,988	2,181	2,652	1,822	1,109
MATRIZ 2	0,373	2,640	2,394	2,000	2,379	1,866	0,848

Agrupando os valores podemos elaborar os gráficos para comparar os resultados das deformações (Figuras 4.45 a 4.48).

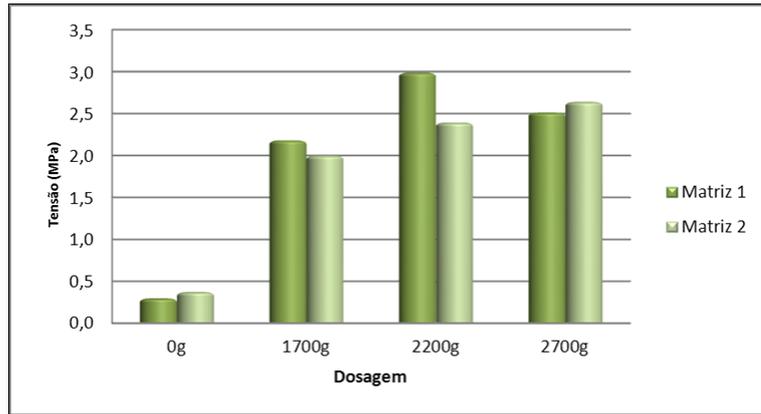


Figura 4.45 – Deformação das vigas com Fibra 1 combinada com ambas as matrizes

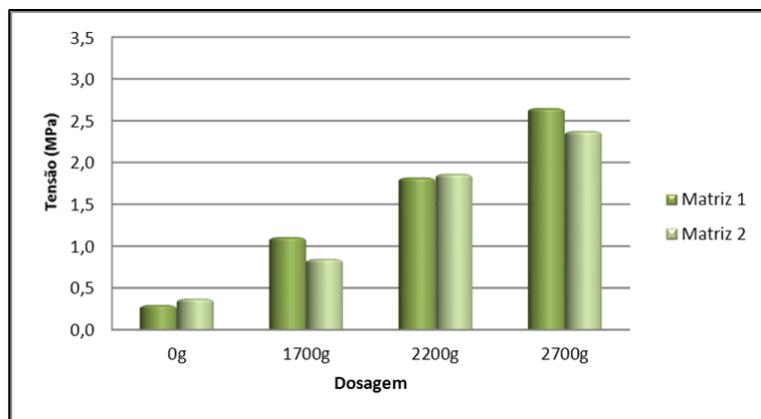


Figura 4.46 – Deformação das vigas com Fibra 2 combinada com ambas as matrizes

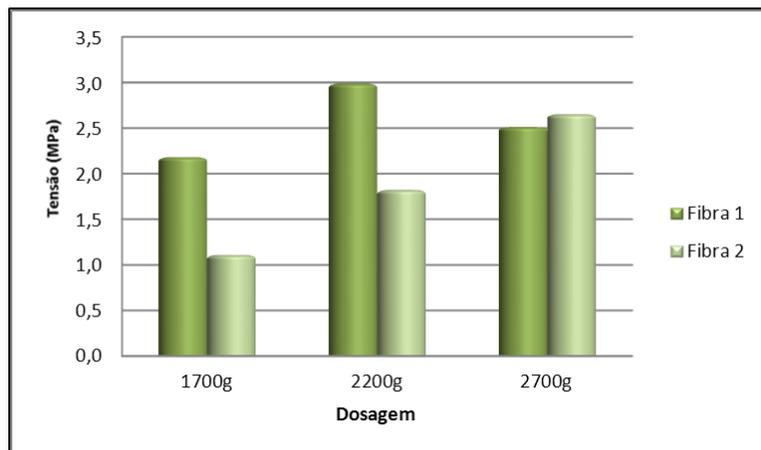


Figura 4.47 – Deformação das vigas com Matriz 1 combinada com ambas as fibras

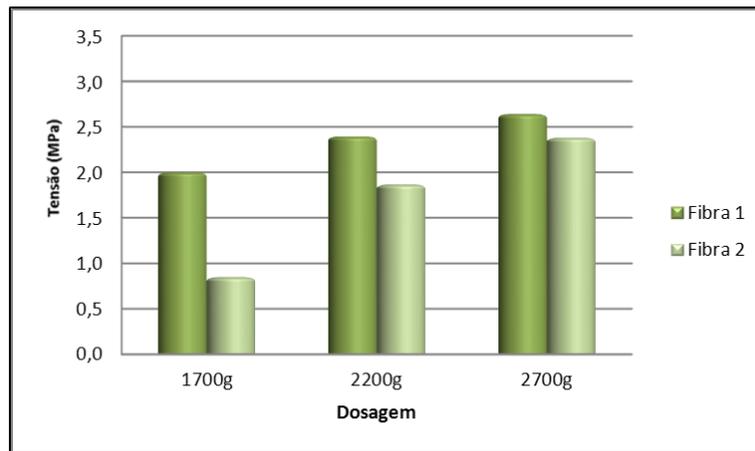


Figura 4.48 – Deformação das vigas com Matriz 2 combinada com ambas as fibras

Analisando a Figura 4.45 e a Figura 4.46 pode-se observar que o aumento da dosagem de fibras implica em geral também um aumento da flecha de rotura dos provetes. Observa-se, também, que utilizando o mesmo tipo de fibra e variando a matriz, os valores de deformação não variam significativamente. Para certas dosagens a Matriz 1 apresenta maiores deformações e para outras dosagens é a Matriz 2 que apresenta maior deformação.

Analisando a Figura 4.47 e a Figura 4.48 conclui-se facilmente que a utilização de fibras diferentes influencia claramente os valores da flecha de rotura. A Fibra 1 apresenta valores superiores de flecha independentemente de ser utilizada a Matriz 1 ou a Matriz 2.

Esta situação pode ser explicada pelo facto de as Fibras 1 possuírem um factor de forma maior e ancoragens nas extremidades. Estas fibras ao possuírem um factor de forma maior tornam o compósito mais dúctil, permitindo que a viga atinja maiores valores de deformação. As ancoragens nas extremidades das fibras impossibilitam a ocorrência dum deslizamento precoce, assim a viga poderá usufruir da resistência à tração da própria fibra.

4.2.3 Tensões residuais

Avaliada a tensão de rotura dos provetes tornou-se a efectuar o ensaio de flexão sobre os mesmos com excepção dos que não possuíam fibras, pois estes após o primeiro ensaio ficaram divididos em duas metades. Neste segundo carregamento é avaliada a tensão que os provetes conseguem suportar mesmo após sofrer a rotura (Figura 4.49). A esta tensão chamamos de tensão residual, estando os gráficos tensão – flecha apresentados nas Figuras 4.50 a 4.54.



Figura 4.49 – Viga fracturada após o segundo carregamento

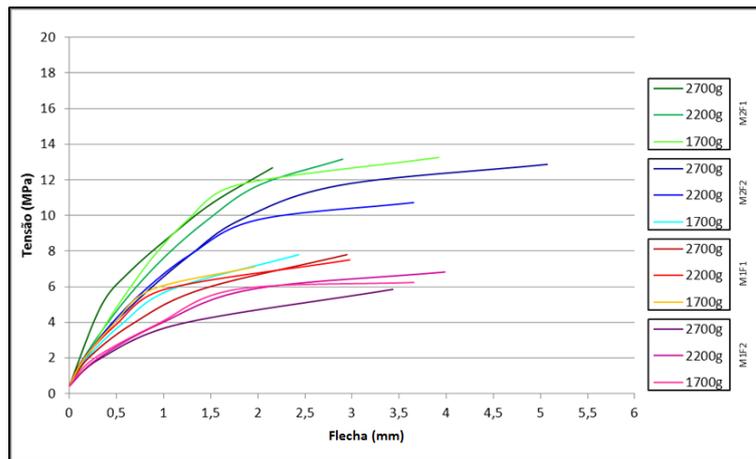


Figura 4.50 – Curvas Tensão Residual – Flecha para todas as vigas

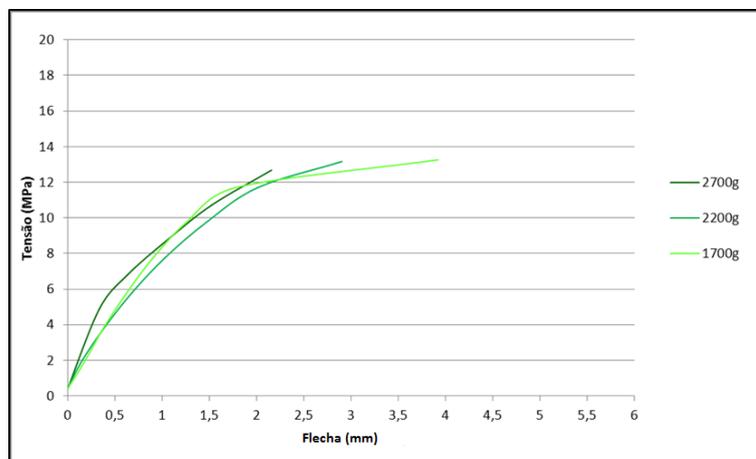


Figura 4.51 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do composto M2F1

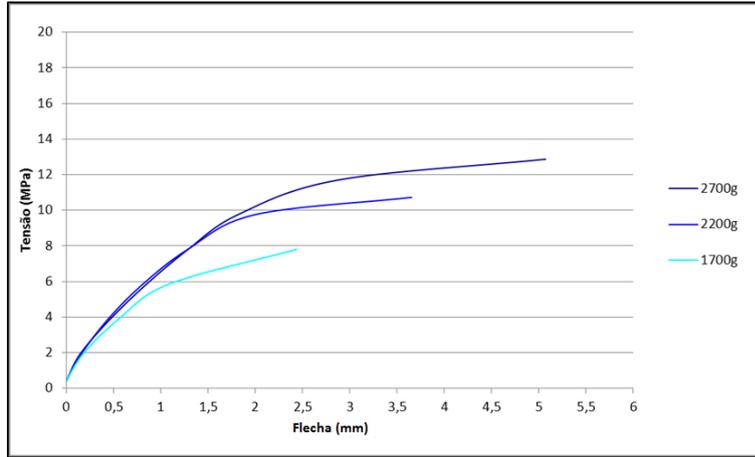


Figura 4.52 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do compósito M2F2

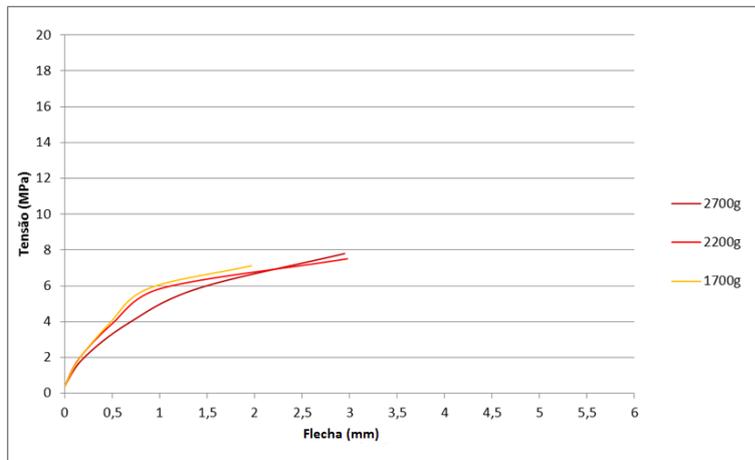


Figura 4.53 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do compósito M1F1

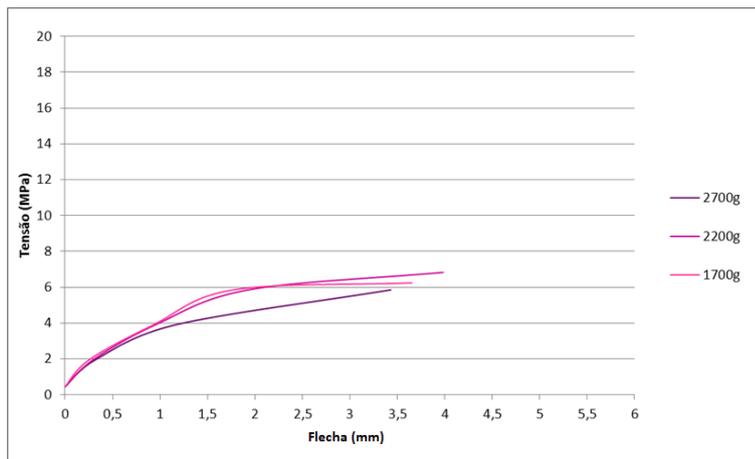


Figura 4.54 – Curvas Tensão Residual – Flecha para as vigas do compósito M1F2

Os valores máximos de tensão residual são apresentados na Tabela 4.8 e nas Figuras 4.55 a 4.58.

Tabela 4.8 – Tensões residuais máximas das vigas

VIGAS - Tensão Residual (MPa)						
	FIBRA 1			FIBRA 2		
	1700g	2200g	2700g	1700g	2200g	2700g
MATRIZ 1	7,12	7,51	7,80	6,24	6,83	5,85
MATRIZ 2	13,26	13,16	12,68	7,80	10,73	12,87

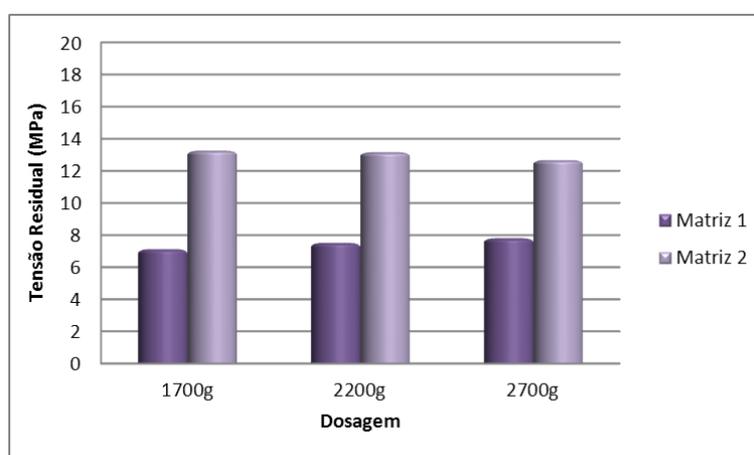


Figura 4.55 – Tensões de rotura residuais da Fibra 1 combinada com ambas as matrizes

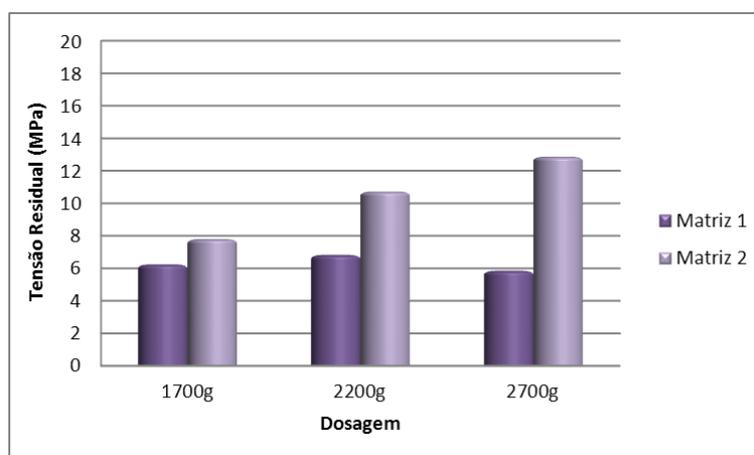


Figura 4.56 – Tensões de rotura residuais da Fibra 2 combinada com ambas as matrizes

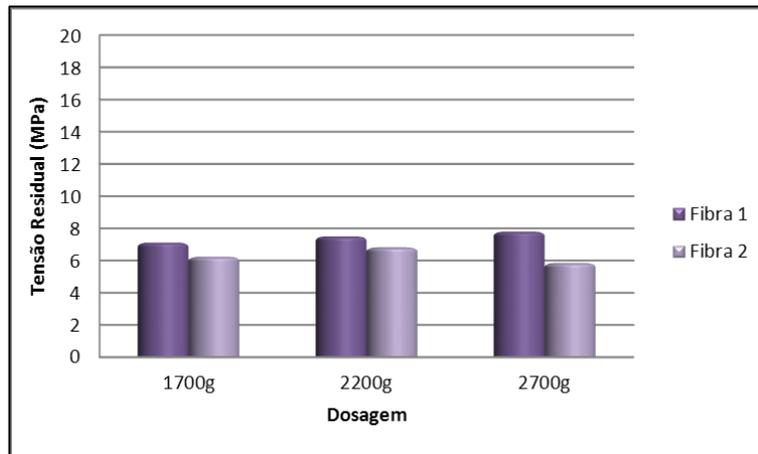


Figura 4.57 – Tensões de rotura residuais da Matriz 1 combinada com ambas as fibras

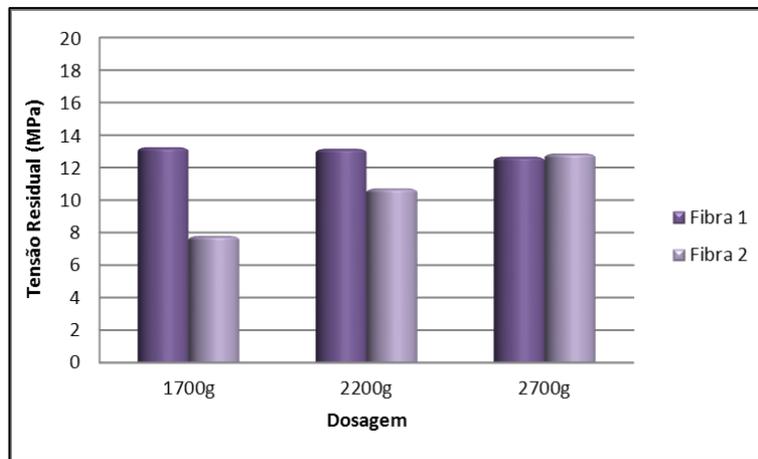


Figura 4.58 – Tensões de rotura residuais da Matriz 2 combinada com ambas as fibras

As tensões residuais reflectem o cenário observado com as tensões de rotura mas, evidentemente, em valores mais baixos visto que os provetes já não possuem a mesma resistência. A Fibra 1 continua a ter melhores desempenhos que a Fibra 2 para ambas as matrizes e a Matriz 2 continua a apresentar melhores valores na presença de ambas as fibras.

Comparando os valores de tensão residual com os valores de tensão de rotura obtemos os gráficos apresentados nas Figuras 4.59 a 4.62.

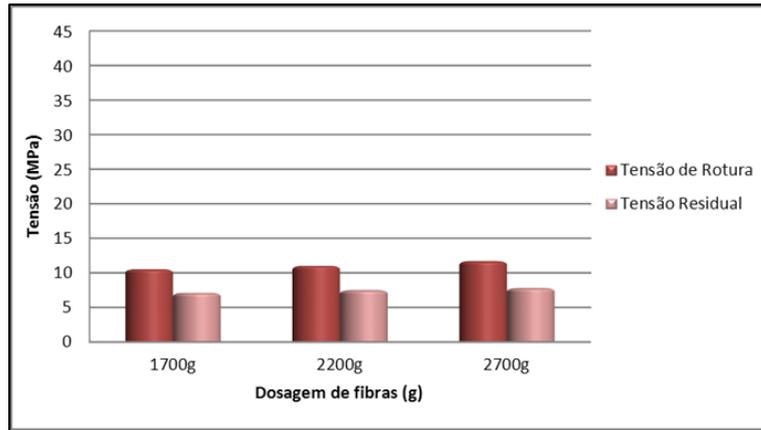


Figura 4.59 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M1F1

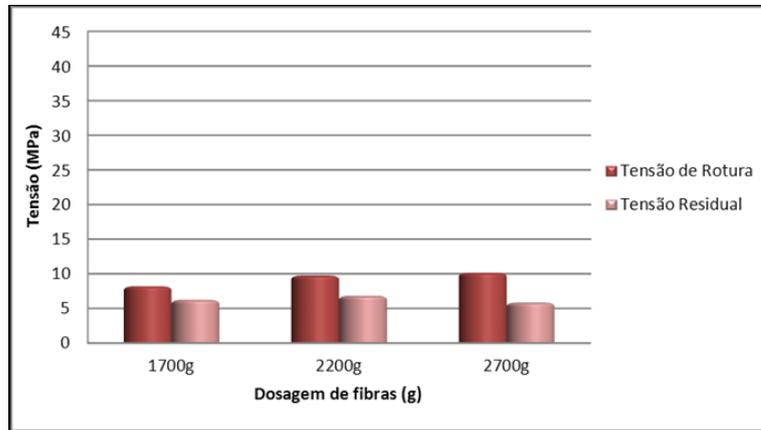


Figura 4.60 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M1F2

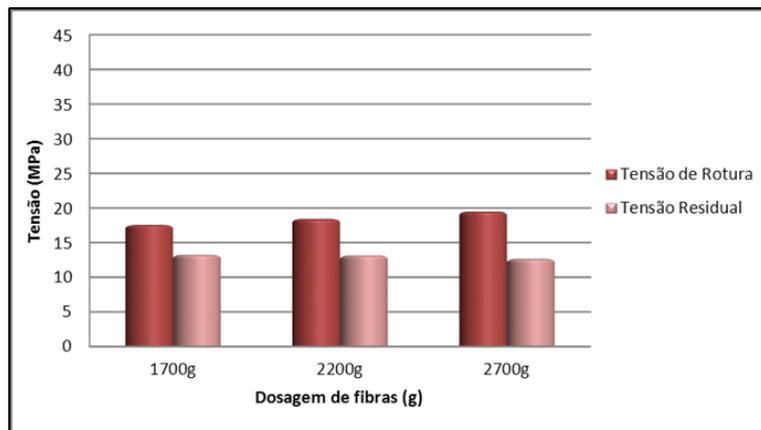


Figura 4.61 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M2F1

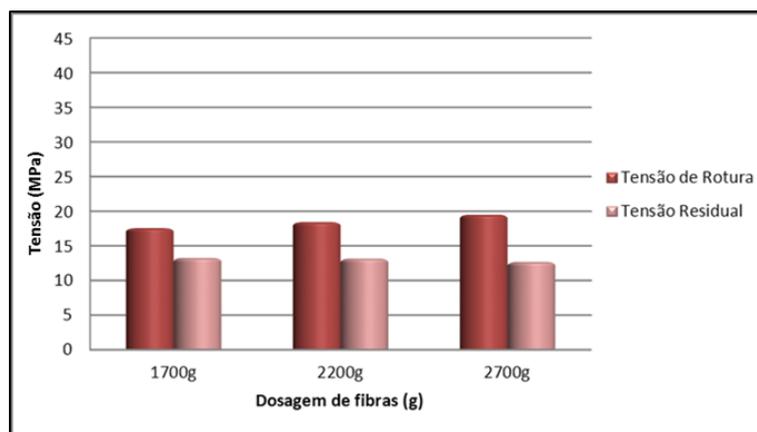


Figura 4.62 – Comparação entre a tensão de rotura e a tensão residual para o compósito M2F2

Analisando qualquer um dos compósitos e comparando as tensões residuais com as tensões de rotura conclui-se que todas as tensões residuais são obviamente mais baixas que as de rotura mas ainda conseguem atingir valores elevados. Em média os valores de tensão residual atingem cerca de dois terços do valor da tensão de rotura. Estes dois terços são devidos única e exclusivamente à acção das fibras metálicas pois o betão nesta fase apenas está à compressão e serve de elo de ligação entre as fibras visto este já ter entrado em rotura na zona traccionada.

4.2.4 Deformações residuais

Na tabela 4.9 apresentam-se as flechas residuais, correspondentes à última leitura efectuada antes da rotura no segundo carregamento.

Tabela 4.9 – Flechas residuais das vigas

VIGAS - Flecha Residual (mm)						
	FIBRA 1			FIBRA 2		
	1700g	2200g	2700g	1700g	2200g	2700g
MATRIZ 1	1,963	2,975	2,944	3,654	3,984	3,431
MATRIZ 2	3,919	2,899	2,154	2,433	3,652	5,071

Os valores apresentados nesta tabela estão ilustrados nas figuras 4.63 a 4.66.

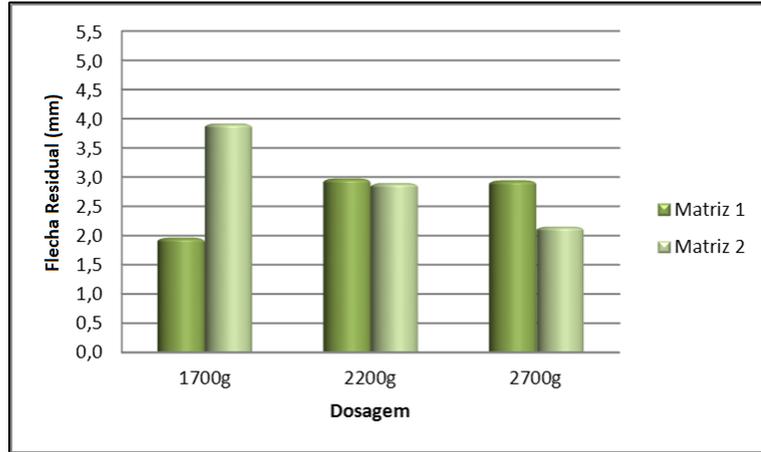


Figura 4.63 – Flecha residual das vigas com Fibra 1 combinadas com ambas as matrizes

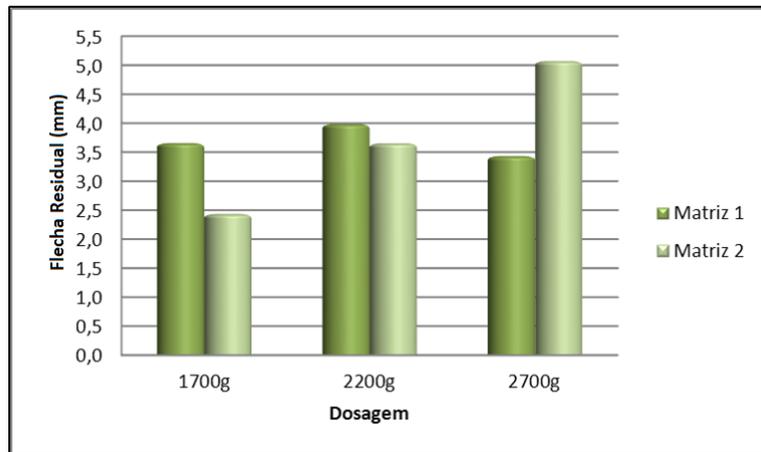


Figura 4.64 – Flecha residual das vigas com Fibra 2 combinadas com ambas as matrizes

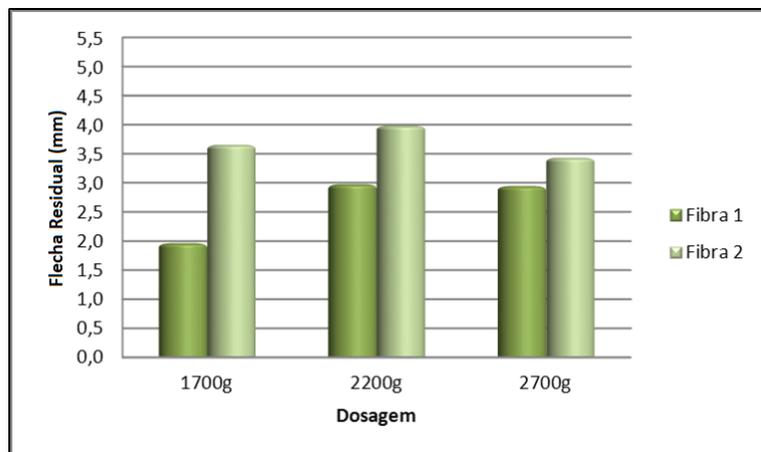


Figura 4.65 – Flecha residual das vigas com Matriz 1 combinadas com ambas as fibras

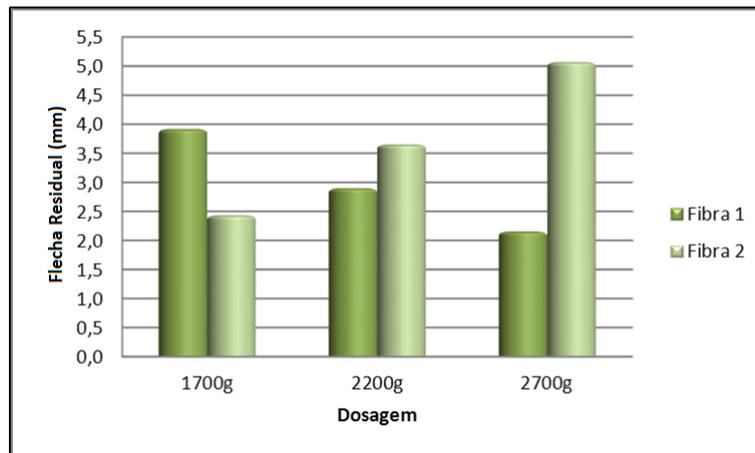


Figura 4.66 – Flecha residual das vigas com Matriz 2 combinadas com ambas as fibras

As flechas residuais não seguem um padrão em concreto. Apenas nas Figuras 4.65 e 4.66 conclui-se que as vigas onde foi utilizada a Fibra 2 possuem maiores flechas. Salienta-se que estas flechas estão dependentes da rotura anterior, pelo que serve essencialmente para observar a amplitude do deslocamento da rotura final.

4.2.5 Tensões de rotura à compressão

A tensão de rotura à compressão foi determinada com as metades das vigas que não possuem fibras (Figura 4.67). Neste caso, continua-se a verificar uma maior resistência da Matriz 2 mas se compararmos com os valores das matrizes utilizadas para os primas, estas são mais fracas devido ao seu processo de endurecimento ser a 20°C ao contrário das primeiras que foram a 40°C. O diâmetro dos provetes também é favorável aos próprios prismas (“size effect”).

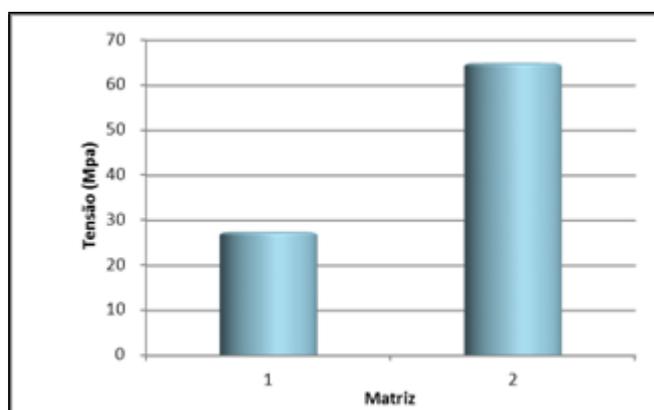


Figura 4.67 – Valores médios da resistência à compressão das Matrizes 1 e 2 das vigas

4.3 Cilindros de secção variável 120×160

4.3.1 Tensões de rotura à tracção directa

Os ensaios aos provetes cilíndricos de secção variável tiveram como objectivo a determinação da resistência à tracção directa dos compósitos Matriz-Fibra. O provete foi traccionado em ambas as extremidades até que se desse a sua rotura pela parte central, pois esta é a zona com menor secção. A base de medida, ou seja, o comprimento abrangido pelos extensómetros foi de 135mm (Figura 4.68).



Figura 4.68 – Exemplo de um provete após o ensaio de tracção

A tabela 4.10 apresenta os dados e os resultados obtidos para estes ensaios.

Tabela 4.10 – Cilindros produzidos e respectivas cargas de rotura e deformações

Matriz	Matriz 1		Matriz 2	
Fibra	Fibra 1	Fibra 2	Fibra 1	Fibra 2
Espalhamento	356mm:354mm	348mm:347mm	352mm:349mm	350mm:347mm
Data da Amassadura	18-07-2011	18-07-2011	18-07-2011	18-07-2011
Hora	14:00	14:00	16:00	16:00
Data de Ensaio	27-07-2011	27-07-2011	27-07-2011	27-07-2011
Identificação do Molde	M1F1	M1F2	M2F1	M2F2
Quantidade de Fibras	1500g	1500g	1500g	1500g
Peso do Provede	9449g	9492g	9465g	9472g
Carga de Rotura (kN)	21,4	14,5	36	27
Extensão de rotura	170×10^{-6}	185×10^{-6}	170×10^{-6}	178×10^{-6}

A rotura dos provetes, tal como nas vigas, deveu-se ao deslizamento das fibras e não por rotura destas. Para se determinar o valor da tensão de rotura basta dividir o valor da carga de rotura pela secção transversal do provete.

Apresentam-se os resultados dos ensaios na Figura 4.69.

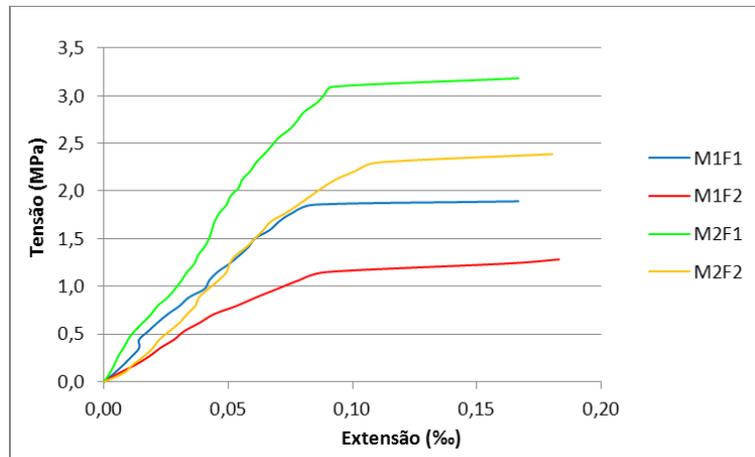


Figura 4.69 – Curvas Tensão – Extensão para todos os provetes cilíndricos

O comportamento relativo dos compósitos nos ensaios de tracção directa é bastante semelhante ao observado nos ensaios de flexão. As Fibras 1 continuam a proporcionar uma melhor resistência aos provetes em relação as Fibras 2. A Matriz 2 combinada com a Fibra 1 continua a ser o compósito com melhores níveis de resistência. Relativamente às extensões verifica-se que os provetes onde foi utilizada a Fibra 2 apresentam extensões ligeiramente maiores que os provetes onde se utilizou a Fibra 1. Nota-se, no entanto, que os valores da tensão de rotura são muito inferiores aos obtidos nas vigas. Isto deve-se não só ao tipo de ensaio mas também à orientação das fibras, que alinham preferencialmente no sentido transversal do provete.

4.3.2 Módulos de elasticidade

O módulo de elasticidade calcula-se dividindo a tensão aplicada ao provete pela extensão causada por essa tensão. Os valores dos módulos de elasticidade dos provetes são os mais variados, em função da matriz, da fibra e do troço de curva tensão – deformação que se estiver a analisar (Figuras 4.70 a 4.73).

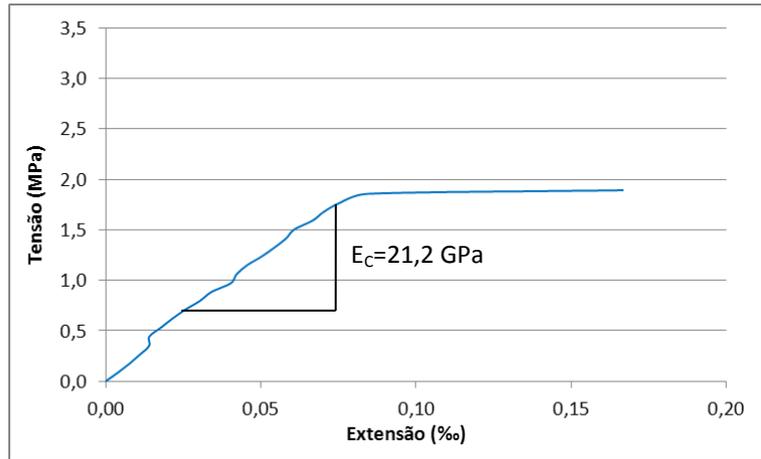


Figura 4.70 – Módulo de elasticidade do provete M1F1

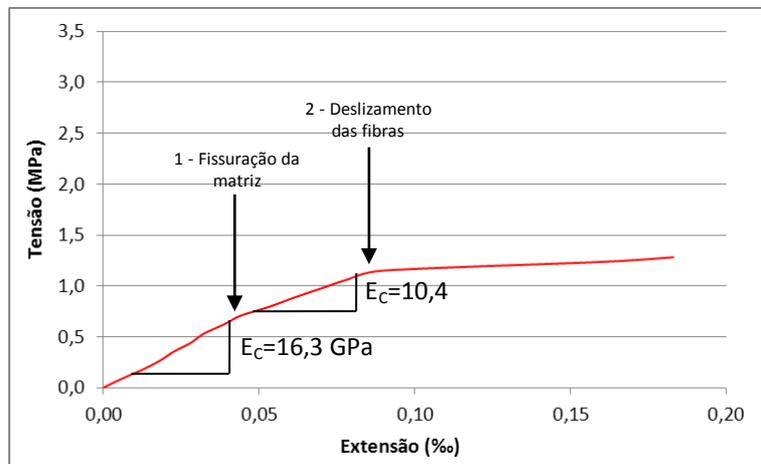


Figura 4.71 – Módulos de elasticidade do provete M1F2

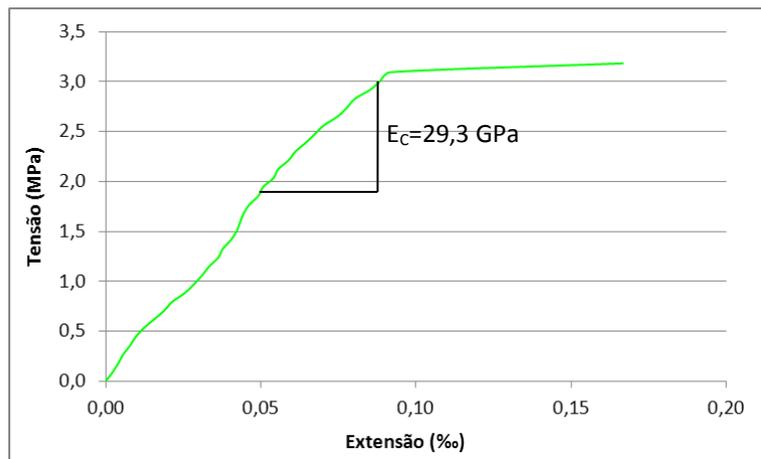


Figura 4.72 – Módulo de elasticidade do provete M2F1

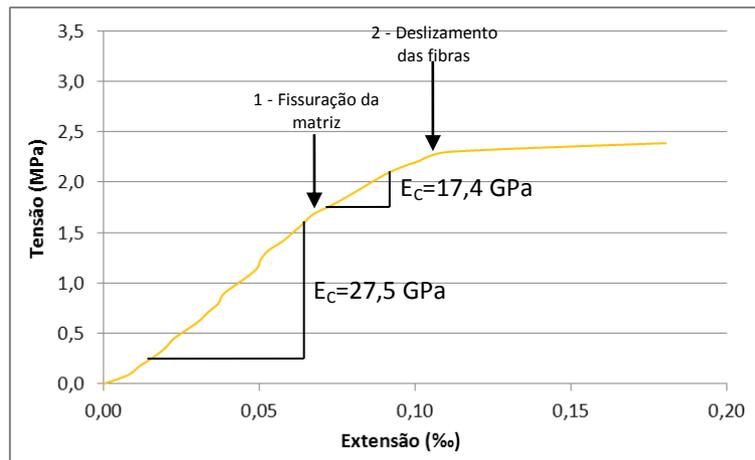


Figura 4.73 – Módulos de elasticidade do provete M2F2

Os módulos de elasticidade foram determinados pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.4)$$

Em que $\Delta\sigma$ é a variação da tensão aplicada e $\Delta\varepsilon$ é a variação da extensão do provete nos pontos em que $\Delta\sigma$ foi obtida.

Em bom rigor, na fase elastoplástica já não se trata de módulo de elasticidade, mas por simplificação continuará a ter essa designação.

Nos provetes que contêm a Fibra 2 é possível identificar perfeitamente a fase de rotura da matriz e a fase de deslizamento das fibras que denominaremos de Fase 1 e Fase 2, respectivamente. Observando as figuras 4.71 e 4.73 podemos concluir que desde o ponto zero até o final da Fase 1 os provetes encontram-se em fase elástica, pois se descarregarmos o provete este iria voltar ao seu estado inicial porque ainda não houve qualquer tipo de fissuração. Na Fase 2 podemos afirmar que os provetes encontram-se em fase elastoplástica, ou seja, se for efectuado um descarregamento o provete irá voltar a retrair mas já não volta ao estado inicial. A matriz já fracturou mas as fibras continuam a ser traccionadas permitindo ao provete suportar valores de carga superiores. A partir da Fase 2 o provete encontra-se já em fase plástica, as fibras já entraram em deslizamento e se for efectuado um descarregamento o provete permanecerá no estado em que se encontra não ocorrendo nenhum tipo de contracção.

Os compósitos com maiores resistências são os que apresentam módulos de elasticidade mais elevados. Pode-se observar também que na fase elástica dos provetes obtêm-se módulos de elasticidade mais elevados que na fase elastoplástica. À medida que os provetes vão perdendo a resistência, o módulo de elasticidade baixa o seu valor.

CAPÍTULO 5

Considerações finais e desenvolvimentos futuros

5. Considerações finais e desenvolvimentos futuros

Com as poderosas misturas químicas de redução e retenção de água que existem hoje em dia é possível a criação de misturas à base de cimento muito fluidas e altamente resistentes. Estas misturas coligadas com fibras metálicas permitem-nos criar estruturas resistentes de forma rápida e com menos mão-de-obra.

Com os prismas ensaiados foi possível observar que após alguns dias de endurecimento dos provetes os compósitos apresentavam um grau de resistência bastante elevado. Os resultados nos prismas apresentaram alguma dispersão, resultante do facto de os provetes serem de dimensões demasiado pequenas para o tamanho das fibras o que pode ter condicionado a colocação das mesmas no molde e aumentado a dispersão dos valores. Criaram-se então vigas de maiores dimensões. Nestas, os resultados foram mais consistentes tanto a nível de resistência como a nível de deformações mas com tendências em tudo semelhante aos dos prismas. Verificou-se que o compósito mais resistente seria aquele em que se combinava a Matriz 2 com a Fibra 1. Esta elevada resistência provém tanto do tipo de matriz como do tipo de fibra. A Matriz 2 provou ser mais resistente tanto em flexão como em compressão quando comparada com a Matriz 1. A Fibra 1 sobre as mesmas condições que a Fibra 2 apresenta melhores resultados de resistência à flexão e também proporciona ao provete uma elevada ductilidade. Este elevado desempenho deverá essencialmente provir do seu elevado factor de forma. A utilização de fibras metálicas num provete aumenta significativamente a resistência do provete. Observa-se nos ensaios que, aumentando a quantidade existente de fibras metálicas, a resistência do provete também aumenta. Porém, por vezes este aumento não é significativo, ou seja, em alguns casos o aumento da dosagem de fibras pode não ser vantajoso, pois a resistência não irá aumentar significativamente, indicando que para este nível de fibras estamos na Fase 3 do compósito tipo indicado na Figura 1.10. Nestes casos ao aumentarmos a quantidade de fibras de aço, podemos estar apenas a aumentar a armadura de compressão.

Se se quiser aumentar a ductilidade do provete, ou seja, o grau de deformação que o provete suporta até o momento da sua rotura, pode-se aumentar a dosagem de fibras e teremos o efeito desejado. Ao aumentarmos a ductilidade aumenta-se também a tenacidade do provete, ou seja, a energia que este consegue absorver.

No que diz respeito à tracção directa é fácil concluir que a Fibra 1 apresenta melhores resultados que a Fibra 2. A Matriz 1, por ser a mais resistente, confere melhor comportamento à combinação destes dois elementos – Matriz 1 e Fibra 1.

Nas curvas Tensão – Extensão é possível distinguir a tensão de rotura do provete e a tensão que provoca o deslizamento das fibras, o que nos leva a concluir que as fibras suportam tensões superiores à que conduziu à rotura do provete.

Os valores de resistência à tracção para os compósitos mais resistentes, particularmente no caso dos prismas 4x4x16, são bastante elevados podendo ser comparáveis aos valores de resistência à compressão de betões correntes.

Avaliando os resultados em função do número de fibras pode-se considerar que a Fibra 1 é mais eficiente devido ao seu factor de forma mais elevado, implicando que por unidade de massa obtivéssemos mais fibras. Um maior número de fibras por unidade de massa aumenta a área de aderência à matriz, tornando assim o compósito mais resistente comprovando assim a eficiência da fibra.

Com este trabalho foi possível criar elementos estruturais em betão, sem as limitações correntes às quantidades de aço aplicadas. Ficou demonstrado que, colocando previamente as fibras metálicas, poderemos atingir quantidades de fibra muito superiores às misturadas em centrais de betão e criar estruturas de elevada resistência reduzindo gastos de tempo e mão-de-obra e atingindo, assim, os objectivos traçados no início do trabalho.

Como desenvolvimentos futuros, e para consolidação dos conhecimentos, sugere-se uma utilização de diferentes provetes pois nesta dissertação só foram utilizados três tipos. Poderão ser utilizadas matrizes diferentes, visto que só foram utilizadas duas, bem como outros tipos de fibras. Nos ensaios que foram efectuados não foi possível atingir a tensão de cedência das próprias fibras. Poderá ser desenvolvida uma argamassa mais resistente e que proporcione uma melhor aderência às fibras de modo a que teste efectivamente a tensão de cedência das fibras explorando assim suas capacidades de resistência. Seria também relevante um estudo económico da utilização das fibras metálicas comparativamente com a mesma quantidade de aço mas em armadura ordinária, desde preço de materiais a preços de mão-de-obra para apurar se efectivamente este método é mais rentável economicamente. Sugere-se também aposta na optimização da aderência das fibras para que a rotura ocorra por rotura das fibras e não por deslizamento.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia

- 1 Dumêt, T. – *“Estruturas de Concreto Armado I”*, Universidade Federal da Bahia, 2008
- 2 Appleton, J. – *“Construções em Betão – Nota histórica sobre a sua evolução”*, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2005
- 3 Sangster, G; Collinson, J.; Helbig, A.; Knox, A.; Parkin, D. – *“Taxonomic recommenddations for British birds: second report”*, British Ornithologists Union, 2004
- 4 Vieira, M., G. – *“Betões de elevado desempenho com agregados leves : durabilidade e microestrutura”*, IST, 2000
- 5 Figueiredo, A. – *“Concreto com Fibras de Aço”*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000
- 6 Sarzalejo, A.; Rossi, B.; Perri, G.; Winterberg, R.; Aristeguieta, R. – *“Fibras como Elemento Estrutural para Refoço de Concreto”*, Maccaferri, 2008
- 7 EN 10218-1 – *“Steel wire and wire products”*, 1994
- 8 UNI 11037 – *“Fibre d'acciaio da impiegare nel confezionamento di conglomerato cementizio rinforzato”*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2003
- 9 Brandt, A.; Li V.; Marshall I. – *“Brittle Matrix Composites 7”*, Institute of Fundamental Technological Research, Warsaw - Woodhead Publishing, 2003
- 10 Gurav, A.; Praksh, K; – *“The Stengths of SIFCON”*, Construction World, 2010
- 11 Naaman, A; Reinhardt, H.; Fritz C. – *“Reinforced Concrete Beams with a SIFCON Matrix”*, ACI, 1989
- 12 Marrs, D. – *“The development of Sifcon for Use in Structural Applications”*, 1998
- 13 NP EN 196-1 – *“Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas”*, Instituto Português da Qualidade, 2005
- 14 Neves, R. – *“Betões Reforçados com Fibras de Aço”*, IST, 2000

ANEXOS

Anexos

Anexo 1 – Ficha Técnica das Fibra HE75/50



Technical Data Sheet

Hooked-End Steel Fibres

HE 75/50

Dimensions

▶ Wire diameter d	0,75 mm	± 0,04 mm
▶ Fibre length L	50,0 mm	+ 2/-3 mm
▶ Hook length l and l'	1 - 4 mm	
▶ Hook depth h and h'	1,80 mm	+1/-0 mm
▶ Bending angle α and α'	45°	min.30°
▶ Aspect ratio L/d	67	
▶ Camber of the fibre		max. 5% of L'
▶ Torsion angle of the fibre	< 30°	
▶ Number of fibres per kg	5700	
▶ Total fibre length per 10 kg	2885 m	

Packaging

- ▶ Recyclable cardboard boxes
- ▶ Net weight / Box 25 kg
- ▶ Boxes / Palette 48
- ▶ Weight / Palette 1200 kg
- ▶ The fibres are oriented in one direction
- ▶ Palettes are wrapped or welded in a plastic folio
- ▶ Available also in Big Bags of 500 kg

Miscellaneous

The described fibre is in accordance with the following standards:

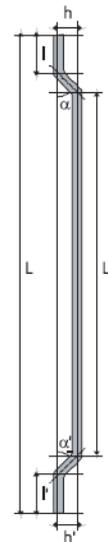
- ▶ EN 14889-1 type 1, cold-drawn wire
- ▶ ASTM A820/A820M-04 type I, cold-drawn wire

Data given in this leaflet are liable to change and are given without obligation. Edition: May 2008

ArcelorMittal WireSolutions

Material characteristics

- ▶ Tensile strength of drawn wire 1100 N/mm²
- ▶ Rod wire C4D or C7D according to EN 10016-2



Anexo 2 – Ficha Técnica da Fibra XR1050

NOVOCON® XR1050

PRODUCT DATA SHEET



NOVOCON® XR1050 STEEL FIBRE

Novocon® XR1050, steel fibres are designed specifically for the reinforcement of concrete, mortars and other cementitious mixes. Novocon® XR1050 is the leading general purpose low carbon, cold drawn wire fibre continuously deformed to provide optimum performance within the concrete mix. Novocon® XR1050 steel fibres are ASTM compliant and specifically designed to meet or exceed the performance and economical of our customers.

FEATURES & BENEFITS

- Provides uniform multi-directional concrete reinforcement
- Increases crack resistance, ductility, energy absorption or toughness of concrete
- Improves impact resistance, fatigue endurance and shear strength of concrete
- High tensile strength fibre bridging joints and cracks to provide tighter aggregate interlock resulting in increased load carrying capacity
- Provides increased ultimate load bearing capacity which allows possible reduction of concrete section
- Requires less labour to incorporate into concrete than conventional reinforcement
- Offers economical concrete reinforcement solutions with greater project scheduling accuracy
- Ideally suited for hand or vibratory screeds, laser screeds and all conventional finishing equipment

PRIMARY APPLICATIONS

<ul style="list-style-type: none"> • Ground supported slabs • Suspended ground slabs • Jointless floors • External roads & pavements 	<ul style="list-style-type: none"> • Precast • Overlays • Walls • Blast-resistant concrete
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

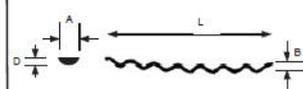
COMPLIANCE

- Conforms to ASTM A820/A820M-04, Type V cold drawn wire
- Testing conforms with ASTM C 1116, ASTM C1018 and JCI SF4

PHYSICAL PROPERTIES

Fibre Length	50mm
Fibre Diameter	1.0mm
Aspect Ratio	50
Tensile Strength	1000N/mm ²
Deformation	Continuously deformed
Appearance	Bright and clean wire

GEOMETRY
NOVOCON XR1050 FIBRES:



D = 0.50mm to 0.80mm
L = 50.00mm
A = 2.30mm to 2.7mm
B = 2.00mm to 2.50mm



HE1-50.pdf - Adobe Reader

Anexo 3 – Provetes Prismáticos: Argamassa 1

Argamassa 1			
NOVOCON XR 1050		HE75/50	
Identificação do Molde	PC1-0-1,2,3	Identificação do Molde	PC2-0-1,2,3
Data da Amassadura	19-04-2010	Data da Amassadura	26-04-2011
Hora	16:00	Hora	15:00
Argamassa	Argamassa 1	Argamassa	Argamassa 1
Quantidade de Fibras	0g	Quantidade de Fibras	0g
Espalhamento	350mm:343mm	Espalhamento	345mm:343mm
Data Prevista para o ensaio	26-04-2011	Data Prevista para o ensaio	03-05-2011
Compressão	74,06	Compressão	69,16
	75,09		68,60
	71,76		66,17
	74,79		69,15
	72,33		65,42
	73,26		63,48
Identificação do Molde	PC1-75-1,2,3	Identificação do Molde	PC2-75-1,2,3
Data da Amassadura	19-04-2010	Data da Amassadura	26-04-2011
Hora	16:00	Hora	15:00
Argamassa	Argamassa 1	Argamassa	Argamassa 1
Quantidade de Fibras	75g NOVOCON XR 1050	Quantidade de Fibras	75g HE75/50
Espalhamento	350mm:343mm	Espalhamento	345mm:343mm
Data Prevista para o ensaio	26-04-2011	Data Prevista para o ensaio	03-05-2011
Identificação do Molde	PC1-100-1,2,3	Identificação do Molde	PC2-100-1,2,3
Data da Amassadura	19-04-2010	Data da Amassadura	26-04-2011
Hora	16:00	Hora	15:00
Argamassa	Argamassa 1	Argamassa	Argamassa 1
Quantidade de Fibras	100g NOVOCON XR 1050	Quantidade de Fibras	100g HE75/50
Espalhamento	350mm:343mm	Espalhamento	345mm:343mm
Data Prevista para o ensaio	26-04-2011	Data Prevista para o ensaio	03-05-2011
Identificação do Molde	PC1-125-1,2,3	Identificação do Molde	PC2-125-1,2,3
Data da Amassadura	19-04-2010	Data da Amassadura	26-04-2011
Hora	16:00	Hora	15:00
Argamassa	Argamassa 1	Argamassa	Argamassa 1
Quantidade de Fibras	125g NOVOCON XR 1050	Quantidade de Fibras	125g HE75/50
Espalhamento	350mm:343mm	Espalhamento	345mm:343mm
Data Prevista para o ensaio	26-04-2011	Data Prevista para o ensaio	03-05-2011

Anexo 4 – Provetes Prismáticos: Argamassa 2

Argamassa 2			
NOVOCON XR 1050		HE75/50	
Identificação do Molde	PC3-0-1,2	Identificação do Molde	PC4-0-1,2
Data da Amassadura	27-04-2011	Data da Amassadura	24-03-2011
Hora	16:00	Hora	17:00
Argamassa	Argamassa 2	Argamassa	Argamassa 2
Quantidade de Fibras	0g	Quantidade de Fibras	0g
Espalhamento	314mm:308mm	Espalhamento	354mm:351mm
Data Prevista para o ensaio	04-05-2011	Data Prevista para o ensaio	31-03-2011
Compressão	155,60	Compressão	178,69
	164,40		182,33
	154,30		153,24
	148,50		156,07
	164,70		
	165,30		
Identificação do Molde	PC3-75-1,2,3	Identificação do Molde	PC4-75-1,2,3
Data da Amassadura	27-04-2011	Data da Amassadura	24-03-2011
Hora	27-04-2011	Hora	17:00
Argamassa	Argamassa 2	Argamassa	Argamassa 2
Quantidade de Fibras	75g NOVOCON XR 1050	Quantidade de Fibras	75g HE75/50
Espalhamento	314mm:308mm	Espalhamento	354mm:351mm
Data Prevista para o ensaio	04-05-2011	Data Prevista para o ensaio	31-03-2011
Identificação do Molde	PC3-100-1,2,3	Identificação do Molde	PC4-100-1,2,3
Data da Amassadura	27-04-2011	Data da Amassadura	24-03-2011
Hora	27-04-2011	Hora	17:00
Argamassa	Argamassa 2	Argamassa	Argamassa 2
Quantidade de Fibras	100g NOVOCON XR 1050	Quantidade de Fibras	100g HE75/50
Espalhamento	314mm:308mm	Espalhamento	354mm:351mm
Data Prevista para o ensaio	04-05-2011	Data Prevista para o ensaio	31-03-2011
Identificação do Molde	PC3-125-1,2,3	Identificação do Molde	PC4-125-1,2,3
Data da Amassadura	27-04-2011	Data da Amassadura	24-03-2011
Hora	27-04-2011	Hora	17:00
Argamassa	Argamassa 2	Argamassa	Argamassa 2
Quantidade de Fibras	125g NOVOCON XR 1050	Quantidade de Fibras	125g HE75/50
Espalhamento	314mm:308mm	Espalhamento	354mm:351mm
Data Prevista para o ensaio	04-05-2011	Data Prevista para o ensaio	31-03-2011

Anexo 5 – Vigas Produzidas: Argamassa 1

Argamassa 1	
HE75/50	NOVOCON XR 1050
Identificação do Provete Viga 7	Identificação do Molde Viga 10
Data da Amassadura 17-05-2011	Data da Amassadura 24-05-2011
Hora 17:00	Hora 16:00
Argamassa Argamassa 1	Argamassa Argamassa 1
Quantidade de Fibras 2700g	Quantidade de Fibras 2700g
Espalhamento 342mm:339mm	Espalhamento 320mm:315mm
Data Prevista para o ensaio 24-05-2011	Data Prevista para o ensaio 31-05-2011
Identificação do Provete Viga 8	Identificação do Molde Viga 11
Data da Amassadura 18-05-2011	Data da Amassadura 24-05-2011
Hora 17:00	Hora 17:00
Argamassa Argamassa 1	Argamassa Argamassa 1
Quantidade de Fibras 2200g	Quantidade de Fibras 2200g
Espalhamento 312mm:308mm	Espalhamento 322mm:319mm
Data Prevista para o ensaio 25-05-2011	Data Prevista para o ensaio 31-05-2011
Identificação do Provete Viga 9	Identificação do Molde Viga 11
Data da Amassadura 18-05-2011	Data da Amassadura 25-05-2011
Hora 15:00	Hora 15:00
Argamassa Argamassa 1	Argamassa Argamassa 1
Quantidade de Fibras 1700g	Quantidade de Fibras 1700g
Espalhamento 328mm:315mm	Espalhamento 334mm:332mm
Data Prevista para o ensaio 25-05-2011	Data Prevista para o ensaio 31-05-2011
Identificação do Provete Viga 13	
Data da Amassadura 11-07-2011	
Hora 14:00	
Argamassa Argamassa 1	
Quantidade de Fibras 0g	
Espalhamento 360mm:358mm	
Data Prevista para o ensaio 18-07-2011	
Compressão 27,5 MPa	

Anexo 6 – Vigas Produzidas: Argamassa 2

Argamassa 2	
HE75/50	NOVOCON XR 1050
Identificação do Provete Viga 1	Identificação do Molde Viga 4
Data da Amassadura 03-05-2011	Data da Amassadura 11-05-2011
Hora 16:00	Hora 15:00
Argamassa Argamassa 2	Argamassa Argamassa 2
Quantidade de Fibras 2700g	Quantidade de Fibras 2700g
Espalhamento 320mm:318mm	Espalhamento 370mm:368mm
Data Prevista para o ensaio 10-05-2011	Data Prevista para o ensaio 18-05-2011
Identificação do Provete Viga 2	Identificação do Molde Viga 5
Data da Amassadura 10-05-2011	Data da Amassadura 11-05-2011
Hora 15:00	Hora 17:00
Argamassa Argamassa 2	Argamassa Argamassa 2
Quantidade de Fibras 2200g	Quantidade de Fibras 2200g
Espalhamento 365mm:365mm	Espalhamento 364mm:360mm
Data Prevista para o ensaio 17-05-2011	Data Prevista para o ensaio 18-05-2011
Identificação do Provete Viga 3	Identificação do Molde Viga 6
Data da Amassadura 10-05-2011	Data da Amassadura 17-05-2011
Hora 17:00	Hora 16:30
Argamassa Argamassa 2	Argamassa Argamassa 2
Quantidade de Fibras 1700g	Quantidade de Fibras 1700g
Espalhamento 345mm:349mm	Espalhamento 366mm:364mm
Data Prevista para o ensaio 17-05-2011	Data Prevista para o ensaio 24-05-2011
Identificação do Provete Viga 14	
Data da Amassadura 11-07-2011	
Hora 16:00	
Argamassa Argamassa 2	
Quantidade de Fibras 0g	
Espalhamento 355mm:351mm	
Data Prevista para o ensaio 18-07-2011	
Compressão 65 MPa	

Anexo 7 – Cilindros Produzidos

Argamassa 1			
HE75/50		NOVOCON XR 1050	
Identificação do Provete	A1F1	Identificação do Molde	A1F2
Data da Amassadura	18-07-2011	Data da Amassadura	18-07-2011
Hora	14:00	Hora	14:00
Argamassa	Argamassa 1	Argamassa	Argamassa 1
Quantidade de Fibras	1500g	Quantidade de Fibras	1500g
Espalhamento	356mm:354mm	Espalhamento	348mm:347mm
Data Prevista para o ensaio	27-07-2011	Data Prevista para o ensaio	27-07-2011

Argamassa 2			
HE75/50		NOVOCON XR 1050	
Identificação do Provete	A2F1	Identificação do Molde	A2F2
Data da Amassadura	18-07-2011	Data da Amassadura	18-07-2011
Hora	16:00	Hora	16:00
Argamassa	Argamassa 2	Argamassa	Argamassa 2
Quantidade de Fibras	1500g	Quantidade de Fibras	1500g
Espalhamento	352mm:349mm	Espalhamento	350mm:347mm
Data Prevista para o ensaio	27-07-2011	Data Prevista para o ensaio	27-07-2011

Anexo 8 – Listagem de Pesos Saturados: Prismas

Agamassa 1	Fibra 1	0g	558,25
			544,49
			551,65
		75g	600,42
			593,28
			593,65
		100g	613,57
			610,44
			624,6
		125g	635,53
			633,63
			645,39
	Fibra 2	0g	563,56
			555,92
			544,69
		75g	613,20
			611,32
			612,36
		100g	621,26
			624,12
			627,50
		125g	640,96
			642,92
			643,30

Agamassa 2	Fibra 1	0g	582,12
			585,17
			587,64
		75g	644,98
			641,76
			651,79
		100g	663,87
			669,91
			661,98
		125g	671,20
			677,67
			673,03
	Fibra 2	0g	589,15
			584,77
			587,67
		75g	651,05
			650,78
			641,06
		100g	659,19
			653,94
			652,78
		125g	669,97
			678,36
			674,30