

Influência da Adição de Nano-sílica no Desempenho Mecânico de Betões Reforçados com Fibras de Aço

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

Autor

Rafael Perez Martins Pereira

Orientador

Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa

ISEC

Coimbra, Dezembro, 2015

Em memória de Rui de Oliveira Martins

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Hugo Costa pelo seu apoio e incentivo à realização deste trabalho e durante a minha jornada académica.

A todos os membros do Departamento de Engenharia Civil do ISEC, que me prestaram a sua ajuda durante a realização desta dissertação, em especial: ao Eng^o Jorge Lourenço, por todos os conhecimentos transmitidos; ao técnico António Amaral, pela sua colaboração; ao Eng^o Carlos Lemos, pela sua disponibilidade e boa disposição; às colegas Cátia Lourenço e Eliana Soldado; e a todos os colegas com quem partilhei o laboratório.

A todos os meus amigos e colegas de curso, o meu obrigado pelo seu companheirismo e ajuda.

Finalmente, à minha mãe pelo seu amor incondicional, ao meu pai por sempre acreditar, ao meu irmão presente em todos os momentos e aos meus avós... Obrigado por tudo.

Resumo

A vasta gama de soluções existentes actualmente no mercado permite produzir betões com características específicas para utilizações muito diversas, por vezes com resistências muito elevadas, sendo estas habitualmente necessárias em elementos estruturais. A associação da tecnologia dos betões auto-compactáveis, e dos betões de ultra-elevado desempenho, às vantagens do reforço com micro-fibras de aço e à incorporação de nano-sílica na matriz conduz ao desenvolvimento de “microbetão reforçado com fibras de aço com incorporação de nano-sílica” (MRFAIN).

O desenvolvimento da tecnologia dos materiais passa actualmente pelo avanço tecnológico dos nano-materiais no processo produtivo, sendo a nano-sílica o mais estudado como adição à matriz dos betões, visando a melhoria de desempenho mecânico e de durabilidade. Este trabalho foi definido como uma primeira fase exploratória do projeto de investigação “Nanobetão”. No presente estudo, descreve-se e caracteriza-se experimentalmente o comportamento de um betão de elevada resistência e reforçado com fibras de aço. Os principais objectivos desta dissertação consistiram em: (i) estudar a metodologia de composição para os MRFAIN e definir uma mistura de referência; (ii) avaliar a influência de diferentes percentagens de micro-fibras de aço, de nano-sílica e de adições correntes, na composição desse betão e nas diversas propriedades; (iii) caracterizar as propriedades no estado fresco (consistência/fluidez, teor de ar e massa volumica) das misturas estudadas (iii) caracterizar as resistências mecânicas à tracção e à compressão de todas as misturas estudadas, no estado endurecido, e analisar os resultados obtidos e a influência dos parâmetros em análise; (iv) caracterizar as propriedades mecânicas (resistências à tracção por flexão e à compressão, módulo de elasticidade e energia de fractura) de algumas das misturas, seleccionadas em função do desempenho, e analisar os resultados obtidos.

A introdução de fibras na matriz, dos micro-betões estruturais auto-compactáveis, revelou uma forte influência na redução da trabalhabilidade e da fluidez, principalmente, nas misturas com as percentagens mais elevadas de fibras. Por outro lado, concluiu-se que o aumento da percentagem de fibras, nestes betões, contribui para um aumento significativo da maioria das suas propriedades, no estado endurecido, essencialmente da resistência e da ductilidade. Já a introdução de nano-partículas revelou uma influência geral positiva no desempenho mecânico, embora com alguns desvios dessa tendência na resistência à compressão.

Palavras-chave: nano-sílica; matriz de betão; compacidade; micro-fibras de aço, caracterização experimental, propriedades mecânicas.

Abstract

The wide range of currently existing solutions in the construction market allows to produce concrete with specific characteristics for very different applications, sometimes with very high strength, which are usually needed in structural elements. The combination of the technology of self-compacting concrete, and ultra-high performance concrete, with the advantages of the reinforcement with steel micro-fibers and with the nano-silica incorporation in the matrix leads to the development of "micro-concrete reinforced with steel fibers embedding nano-silica "(MRSFEN).

The development of materials technology currently undergoing the technological advances of nano-materials in the production process, being the nano-silica studied as addition to the concrete matrix, in order to improve the mechanical performance and durability. This work was defined as a first exploratory phase of the research project "Nanoconcrete". This study describes and experimentally characterizes the behavior of a high-strength concrete reinforced with steel fibers. The main objectives of this work were: (i) study the composition methodology for MRSFEN and set a reference mixture; (ii) evaluate the effect of different percentages of steel micro-fibers, nano silica and standard additions in the composition of concrete and in its properties; (iii) characterizing the properties in the fresh state (consistency/flowability, air content and density) of the studied mixtures; (iii) characterizing the mechanical strength in tension and in compression of all studied mixtures, in the hardened state, and analyzing the obtained results and the parameters of significant influence on the analysis; (iv) characterizing the mechanical properties (tensile bending strength and compressive strength, elasticity modulus and the fracture energy) of some of the mixtures, selected according to performance and analyze the obtained results.

The introduction of fibers in the matrix of self-compacting structural micro-concrete revealed a strong influence in reducing the workability and flowability, mainly in mixtures with higher percentages of fibers. Moreover, it was found that increasing the percentage of fibers in these concretes contributes to a significant increase of most of its properties in the hardened state, essentially strength and ductility. Regarding the introduction of nano-particles, it has proved a positive influence on the mechanical performance, despite some deviations on the compressive strength.

Keywords: nano-silica; concrete matrix; packing density; steel micro-fibers, experimental characterization, mechanical properties.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
ÍNDICE GERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
SIMBOLOGIA.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos do trabalho.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Considerações gerais.....	5
2.2. Betões Auto-compactáveis Reforçados com fibras.....	5
2.2.1. Fibras de aço: tipos e características.....	7
2.2.2. Resistências mecânicas.....	9
2.2.3. Ductilidade.....	11
2.3. Influência dos nano-materiais no betão.....	11
2.3.1. Tipos de nano-materiais usados no betão.....	12
2.3.2. Aumento da compacidade.....	12
2.3.3. Aumento da resistência mecânica.....	13
2.4. Principais características mecânicas dos BRFA e BAC.....	13
2.4.1. Trabalhabilidade.....	13
2.4.2. Resistência à compressão.....	14
2.4.3. Resistência à tracção.....	15
2.4.4. Módulo de elasticidade.....	17
2.4.5. Energia de fractura.....	18
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	19
3.1. Considerações Gerais.....	19
3.2. Materiais.....	19
3.2.1. Ligantes.....	19
3.2.2. Água de Amassadura.....	20
3.2.3. Adjuvantes.....	20

3.2.4.	Agregados.....	21
3.2.5.	Fibras.....	22
3.2.6.	Nanopartículas.....	22
3.3.	Métodos.....	22
3.3.1.	Métodos de composição.....	22
3.3.2.	Produção e Cura.....	26
3.3.3.	Caracterização experimental.....	28
3.4.	Resultados.....	34
3.4.1.	Estado fresco.....	34
3.4.2.	Estado endurecido.....	34
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	43
4.1.	Considerações gerais.....	43
4.2.	Estado fresco.....	43
4.3.	Estado endurecido.....	44
4.3.1.	Resistência à compressão.....	45
4.3.2.	Resistência à tracção (por flexão).....	49
4.3.3.	Módulo de elasticidade.....	53
4.3.4.	Energia de fractura.....	54
4.4.	Comparação com outros estudos.....	54
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
5.1.	Principais conclusões.....	55
5.2.	Desenvolvimento de trabalhos futuros.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mecanismo de actuação das fibras [34]	6
Figura 2.2 – Curva tensão-extensão em BRF convencional. Tensão de fendilhação e tensão máxima de após fendilhação. [43]	7
Figura 2.3 - Classificação das fibras segundo NP EN 14889 [43]	8
Figura 2.4 - Diferentes tipos de fibras de aço [19]	8
Figura 2.5 – Influência da razão A/C na tensão de rotura [10]	10
Figura 2.6 - Influência da razão A/C na permeabilidade [10]	10
Figura 2.7 - Imagens SEM das nano-partículas de sílica	12
Figura 2.8 - Influência do teor de fibras na curva tensão-deformação [34]	15
Figura 2.9 - Esquema de flexão de um elemento simplesmente apoiado	16
Figura 2.10 – Comparativo de ductilidade entre betão reforçado com fibras de aço (BRFA) e o correspondente betão simples. (BS)	17
Figura 2.11 - Exemplo do trabalho produzido por um betão sem fibras durante o ensaio de energia de fractura [36]	18
Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia fina 0/1mm.	21
Figura 3.2 – Micro-fibras 0,12/10mm da Dramix®	22
Figura 3.3 – Esquema de designações	24
Figura 3.4 - Produção das misturas na fase 1	27
Figura 3.5 – Produção das misturas na fase 2	27
Figura 3.6 – Evolução dos provetes da fase 2	28
Figura 3.7 - Ensaios no estado fresco	29
Figura 3.8 – Provetes da Fase 2	30
Figura 3.9 – Ensaio de compressão	30
Figura 3.10 – Ensaio de Flexão e Energia de Fractura	31
Figura 3.11 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade em compressão	32
Figura 3.12 – Gráfico do ensaio de flexão	33
Figura 3.13 - Ensaio de determinação da energia de fractura	33
Figura 3.14 – Ensaio de compressão em cubos	36
Figura 3.15 – Rotura frágil	38
Figura 3.16 – Rotura dúctil	38
Figura 3.17 – Ensaio de tracção (BC0.82F - 0% de fibras)	39
Figura 3.18 - Ensaio de tracção (BC1.82F - 1% de fibras)	39
Figura 3.19 - Ensaio de tracção (BC2.82F - 2% de fibras)	39
Figura 3.20 – Deslocamento do Betão (Ensaio Energia de Fractura)	41
Figura 3.21 - Evolução da fenda no ensaio da energia de fractura	41
Figura 4.1 – Resultados do espalhamento para misturas do Tipo A e D	43
Figura 4.2 – Resultados do espalhamento para misturas do Tipo BC e DE	44
Figura 4.3 – Variação da resistência à compressão com o aumento da percentagem de fibras (Tipo A e D – cura normal)	45
Figura 4.4 - Evolução de f_{cm} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo A)	46
Figura 4.5 - Evolução de f_{cm} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo D)	46
Figura 4.6 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo BC	47

Figura 4.7 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo DE.....	47
Figura 4.8 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo amostra e aumento da percentagem de fibras (cura especial)	48
Figura 4.9 - Variação da resistência à compressão com a variação da percentagem de nano-partículas e fibras adicionadas (Tipos A e DE com cura especial).....	48
Figura 4.10 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo de cura e do tipo de amostra (sem fibras).....	49
Figura 4.11 - Variação da resistência à tracção com o aumento da percentagem de fibras (Tipo A e D – cura normal)	50
Figura 4.12 - Evolução de f_{cf} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo A).....	50
Figura 4.13 - Evolução de f_{cf} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo D).....	51
Figura 4.14 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo BC.....	51
Figura 4.15 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo DE.....	52
Figura 4.16 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo amostra e aumento da percentagem de fibras (cura especial)	52
Figura 4.17 - Variação da resistência à tracção com a variação da percentagem de nano-partículas e fibras adicionadas (Tipos A e DE com cura especial).....	53
Figura 4.18 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo de cura e do tipo de amostra (sem fibras).....	53
Figura 4.19 – Ensaio de Energia de Fractura	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tipo de ligantes	24
Tabela 3.2 – % de fibras.....	24
Tabela 3.3 – tipo de cura	24
Tabela 3.4 – Composição dos betões para 1m ³ de betão.....	26
Tabela 3.5 – Resistência à compressão (Fase 1)	35
Tabela 3.6 – Resistência à compressão (Fase 2)	36
Tabela 3.7 – Resistência à Tracção (Fase 1)	36
Tabela 3.8 – Resistência à tracção (Fase 2 – ensaio Flexão).....	37
Tabela 3.9 – Resistência à tracção (Fase 2 – ensaio de energia de fractura).....	38
Tabela 3.10 – Módulo de Elasticidade	40
Tabela 3.11 – Módulo de Elasticidade por flexão.....	40
Tabela 3.12 – Energia de Fractura	41

SIMBOLOGIA

Siglas

MRFAIN	Microbetão reforçado com fibras de aço com incorporação de nano-materiais
BRF	Betão reforçado com fibras
BRFA	Betão reforçado com fibras de aço
BAC	Betão Auto-compactável
BACRFA	Betão Auto-compactável reforçado com fibras de aço
EC2	Eurocódigo 2
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RILEM	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages

Gregas

$\Delta\varepsilon$	variação da extensão entre o valor máximo e mínimo
$\Delta\sigma$	variação da tensão entre o valor máximo e mínimo
$\beta(t)$	coeficiente de endurecimento do betão, em função da idade
ε	Extensão
ε_c	extensão do betão
γ	compacidade da pasta ligante
δ_0	deformação na viga
ρ	massa volúmica
σ	compacidade do betão
σ_c	tensão de compressão aplicada no betão
$\sigma-\varepsilon$	relação tensão-extensão (lei constitutiva)

Latinas maiúsculas

A/C	relação ponderal água efectiva/cimento
A/L	relação ponderal água/ligante
E_{cm}	valor médio do módulo de elasticidade do betão
F	força
G_F	energia de fractura
H_R	humidade relativa
I	índice de vazios
R	coeficiente de regressão linear
T	temperatura
V_f	volume de fibras
W_0	trabalho de deformação total

Latinas minúsculas

a	volume absoluto de água
adj	volume absoluto de adjuvante
a_0	altura do entalhe

b	largura da secção da viga
c	volume absoluto de cimento
$f_{c,j}$	previsão da resistência da matriz da pasta ligante à idade j
f_{cm}	valor médio da tensão de rotura à compressão do betão
f_{cf}	valor médio da tensão de rotura à tracção do betão
g	aceleração da gravidade
h	altura do provete/viga
$k_{1,j}$	coeficientes de Feret
mag	volume absoluto da mistura de agregados
m_E	declive da recta
s	volume absoluto de adição
t	idade do betão
v	volume absoluto de ar na pasta ligante

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os betões estruturais de elevado desempenho, têm sido nos últimos anos uma solução importante a nível estrutural, sendo esse mesmo desempenho obtido através da utilização de constituintes mais eficientes, como cimentos de alta resistência, adições pozolânicas, superplastificantes de alta gama e reforço com fibras de aço.

Desde cedo se percebeu que a incorporação de fibras metálicas no betão poderia ser muito vantajosa, devido ao aumento da resistência à tracção e da ductilidade. Esta tecnologia evoluiu bastante desde a década de 1960, devido à investigação e desenvolvimentos contínuos desde então. O betão reforçado com fibras de aço é um material de matriz cimentícia, em que é adicionada, à sua composição, uma percentagem de fibras discretas. As propriedades deste compósito são determinadas pela interação entre as propriedades da matriz e das próprias fibras [4].

O betão auto-compactável (BAC) surgiu da necessidade de criar um betão que reduzisse os custos relacionados com a intervenção humana, na fase de colocação e compactação em obra, preenchendo completamente os moldes, escoando de uma forma natural, apenas pela acção do seu peso e sem compactação adicional, nas zonas densamente armadas e sem ocorrência de fenómenos de floculação das suas partículas e de segregação. O betão auto-compactável (BAC) é caracterizado no estado fresco pela sua fluidez e estabilidade reológica. Assim, com a adição de fibras na matriz do BAC pode tirar-se proveito do seu alto desempenho no estado fresco para conseguir uma dispersão mais uniforme das fibras [4].

A sinergia entre as tecnologias do betão auto-compactável e do betão reforçado com fibras é susceptível, graças à eliminação de vibrações e à redução ou substituição completa da armadura de reforço convencional por fibras, de melhorar a eficiência económica do processo de construção. O BAC reforçado com fibras apresenta, assim, diversos factores que contribuem para a fiabilidade e automatização do controlo de qualidade: maior rapidez de construção; redução e optimização dos recursos de trabalho, custos e consumo de energia [17].

Produzir betões com desempenhos semelhantes ou superiores aos correntes, mas com optimização do custo económico e reduzido impacte ambiental, é de interesse actual [7]. Com a incorporação de nano-partículas pretende-se densificar a matriz ligante reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a compacidade, o que previsivelmente conduz a elevada resistência e a um desempenho melhorado em termos de durabilidade [35, 39]. Devido à sua elevada reatividade, as nano-partículas agem como centros de nucleação, contribuindo para uma melhor hidratação do cimento Portland [7, 35, 40].

O betão é actualmente o material de construção mais consumido no planeta Terra, prevendo-se a continuação desse consumo global a curto e médio prazo. Sendo o cimento Portland o componente do betão que mais impacto ambiental provoca, a sua substituição por nano-materiais, ainda que em pequenas quantidades, já daria um importante contributo na redução das emissões de CO₂ [42]. Uma das razões que condicionam a durabilidade do betão prende-se

com o facto de o cimento Portland conter uma elevada quantidade de hidróxido de cálcio o que o torna muito susceptível ao ataque químico e, por outro lado, como o betão é um material poroso e permeável, permite o ingresso de água, de gases e substâncias agressivas [41]. Estes podem provocar fenómenos de carbonatação e de penetração de cloretos, originando a degradação das armaduras das estruturas de betão e, conseqüentemente, levar a necessidades de conservação e reabilitação ou, em casos mais extremos, à substituição integral. Assim, a durabilidade das estruturas de betão tem um papel importantíssimo no que diz respeito à sua eco-eficiência.

A incorporação de nano-partículas nos BAC poderá contribuir, ainda mais, para o aumento de desempenho destes betões, combinando, por um lado, o aumento da durabilidade e do desempenho mecânico e, por outro, o aumento da estabilidade das misturas, permitindo reduzir as habituais dosagens elevadas de ligante, principalmente de cimento. Deste modo, a incorporação das nano-partículas contribuirá indiscutivelmente para o aumento da sustentabilidade do BAC, atualmente uma das grandes preocupações do sector da construção.

No sentido de conjugar todas as vantagens atrás enunciadas, desenvolveu-se uma solução combinada para a matriz de betão, designado de microbetão reforçado com fibras de aço com incorporação de nano-materiais (MRFAIN) e definiu-se um conjunto de objectivos, no sentido de estudar a composição e de caracterizar as propriedades destes betões.

Todos os trabalhos experimentais, realizados neste estudo, foram executados nos Laboratórios de Materiais de Construção e de Estruturas do DEC-ISEC.

1.2. Objectivos do trabalho

O estudo de betões reforçados com fibras metálicas e com incorporação de nano-materiais, não se encontra ainda muito desenvolvido, mas o adequado desenvolvimento dos MRFAIN, requer um forte conhecimento de caracterização das suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Por tal, definiram-se e apresentam-se os principais objectivos do presente trabalho:

- Estudo da composição de um microbetão de referência, com boas propriedades de fluidez e de trabalhabilidade, e de várias misturas de MRFAIN, com diferentes percentagens de fibras de aço e de nano-materiais;
- Caracterização das propriedades dos microbetões produzidos no estado fresco (fluidez e teor de ar) e no estado endurecido, nomeadamente as resistências à compressão e à tracção, o módulo de elasticidade e a energia de fractura;
- Análise da influência das diferentes percentagens de fibras nas propriedades caracterizadas para os betões produzidos;
- Estudo do efeito da adição de nano-materiais no betão, sem e com fibras;
- Análise da influência das condições de cura nas propriedades dos betões produzidos.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, onde se descrevem as diferentes secções do trabalho.

No Capítulo 1 apresenta-se o enquadramento do estudo realizado, seguido dos objectivos e o âmbito da dissertação e por fim a descrição da estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 faz-se um resumo bibliográfico da pesquisa efectuada, em relação aos aspectos principais que influenciaram o trabalho: betões reforçados com fibras de aço, betões auto-compactáveis e a influência dos nano-materiais no betão. Os aspectos enunciados dão assim origem ao presente tema, desenvolvimento e caracterização de microbetão estrutural reforçado com fibras de aço com incorporação de nano-partículas (MRFAIN).

No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos aplicados no desenvolvimento do MRFAIN, não só na metodologia de composição, mas também de todos os procedimentos de ensaio realizados, apresentando também o programa experimental realizado no âmbito deste tema, onde se caracterizam as propriedades do MRFAIN no estado fresco e no estado endurecido e se apresentam os resultados obtidos.

No Capítulo 4 analisam-se e discutem-se os resultados obtidos na campanha experimental.

No Capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões obtidas, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações gerais

O uso de microbetão estrutural reforçado com fibras de aço com incorporação de nano-materiais (MRFAIN) não constitui uma prática corrente não só em Portugal, mas também mundialmente. No entanto, vários estudos têm vindo a ser desenvolvidos nessa área, uma vez que da aplicação deste material compósito advêm inúmeras vantagens ao nível da tecnologia do betão. O MRFAIN combina os benefícios da tecnologia do betão reforçado com fibras de aço, com a adição de nano-materiais a um material de matriz cimentícia.

Vários autores referem que a capacidade da absorção de energia destes materiais e a sua resistência ao impacto são das propriedades mais beneficiadas pela adição de fibras. Estes benefícios também podem aplicar-se a outras propriedades, tais como a resistência ao corte e comportamento sob temperaturas elevadas [40].

Com a incorporação de nano-materiais são alteradas as propriedades mecânicas do betão, melhorando-as, além de melhorar também a sua microestrutura e estrutura porosa, podendo ser também utilizadas como material de enchimento. Outros estudos revelam que os nano-materiais podem funcionar como núcleos heterogéneos, para a pasta de cimento, acelerando, ainda mais, a hidratação do cimento, devido à sua elevada reactividade, conduzindo a resistências elevadas para as primeiras idades [3].

2.2. Betões Auto-compactáveis Reforçados com fibras

No decorrer das últimas décadas, vários estudos foram efectuados acerca das propriedades dos betões reforçados com fibras (BRF), tanto no estado fresco como no endurecido. Assim sendo, nos últimos 15 anos a investigação sobre o comportamento estrutural de elementos de BRF ganhou maior importância, mesmo sendo limitado o crescimento contínuo das suas aplicações a nível estrutural, uma vez que existe ainda falta de códigos de construção internacionais para os elementos de BRF [31], existindo apenas alguns códigos com expressões adaptadas para o efeito.

Consequentemente, têm sido desenvolvidos extensivos estudos sobre a propriedade mecânica mais influenciada pelo reforço com fibras: a resistência de tracção pós -fissuração de BRF.

As fibras de aço, quando adicionadas ao betão, constituem um sistema de reforço capaz de proporcionar elevada ductilidade a materiais de matriz cimentícia, a curto e a longo prazo, inibindo e dificultando a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade e à elevada resistência e capacidade de ancoragem à matriz, o que resulta em uma grande capacidade de redistribuição de esforços na zona da fissura e no controlo da fissuração no betão, mesmo em baixas dosagens [8]. Na Figura 2.1 apresenta-se o mecanismo de actuação das fibras numa fissura.

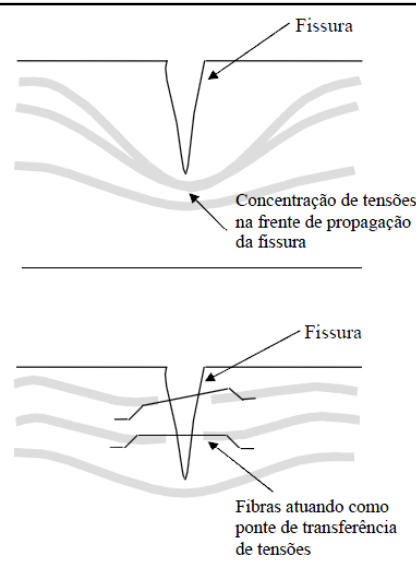


Figura 2.1 – Mecanismo de actuação das fibras [34]

Na última década têm sido desenvolvidos estudos acerca da adição de fibras a betões auto-compactáveis, atribuindo às fibras a função de conferir uma ductilidade elevada ao betão auto-compactável (BAC) depois de endurecido [3]. Esta opção tratou-se de um desafio suplementar, uma vez que para assegurar os requisitos da auto-compactibilidade é necessário ter em conta o efeito das fibras na perturbação do fluxo do BAC no estado fresco e, conseqüentemente, esta tarefa tem de considerar-se na composição das misturas com elevando grau de dificuldade. A conjugação do betão auto-compactável com a adição de fibras a materiais de matriz cimentícia, resulta assim num compósito designado betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA).

O betão, sendo um material frágil, não resiste, significativamente, a esforços de tracção. A incorporação de fibras metálicas vem alterar as propriedades de deformação dos materiais no regime pós-elástico. A amplitude destas modificações pode depender dos vários factores intervenientes, tais como: (i) a resistência da matriz; (ii) o tipo de fibra; (iii) as características de adesão relacionadas com a superfície da fibra; (iv) a dosagem e orientação das fibras; (v) a dimensão máxima do agregado [43]. Na Figura 2.2 apresenta-se o diagrama de tensão-extensão de um betão reforçado com fibras de aço [15].

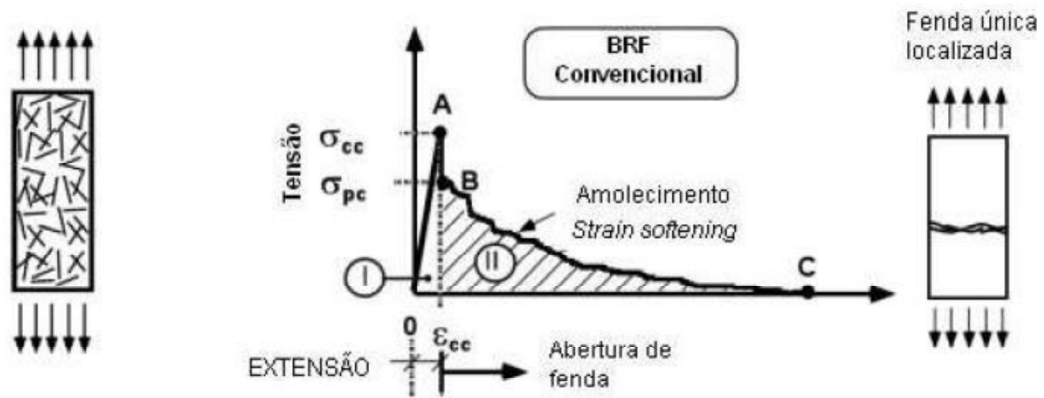


Figura 2.2 – Curva tensão-extensão em BRF convencional. Tensão de fendilhação e tensão máxima de após fendilhação. [43]

No betão reforçado com fibras, a deformação, tanto por fluência como por retracção, diminui com o aumento da percentagem de fibras e, neste caso, a geometria das fibras é irrelevante [2]. As fibras proporcionam mais benefícios à matriz quanto esta é mais susceptível para desenvolver deformações por fluência ou retracção. A contribuição das fibras é, ainda, mais significativa em fases mais avançadas do processo de retracção [13]. Assim sendo, afirmam também Corinaldesi e Moriconi (2003), que a adição de fibras no betão auto-compactável se torna muito eficaz na redução dos efeitos da secagem e da retracção do betão, um dos problemas deste material, rico em ligante e com reduzida fracção de agregados grossos. [9].

Por todas as vantagens já enunciadas, despertou-se o interesse por parte dos centros de I&D e da indústria do ramo, nomeadamente a indústria da pré-fabricação, com o intuito de conceber novos sistemas estruturais com vantagens técnicas e económicas.

2.2.1. Fibras de aço: tipos e características

No mercado existem actualmente diferentes tipos de fibras com diversas finalidades, sendo apenas a utilização destas considerada estrutural, se a junção de fibras contribuir para a capacidade de suporte de carga de um elemento de betão (IPQ, 2008). As fibras são classificadas em vários grupos, dependendo da sua natureza (Figura 2.3) e a norma europeia em vigor que rege a classificação e destino das fibras, é a NP EN 14889.

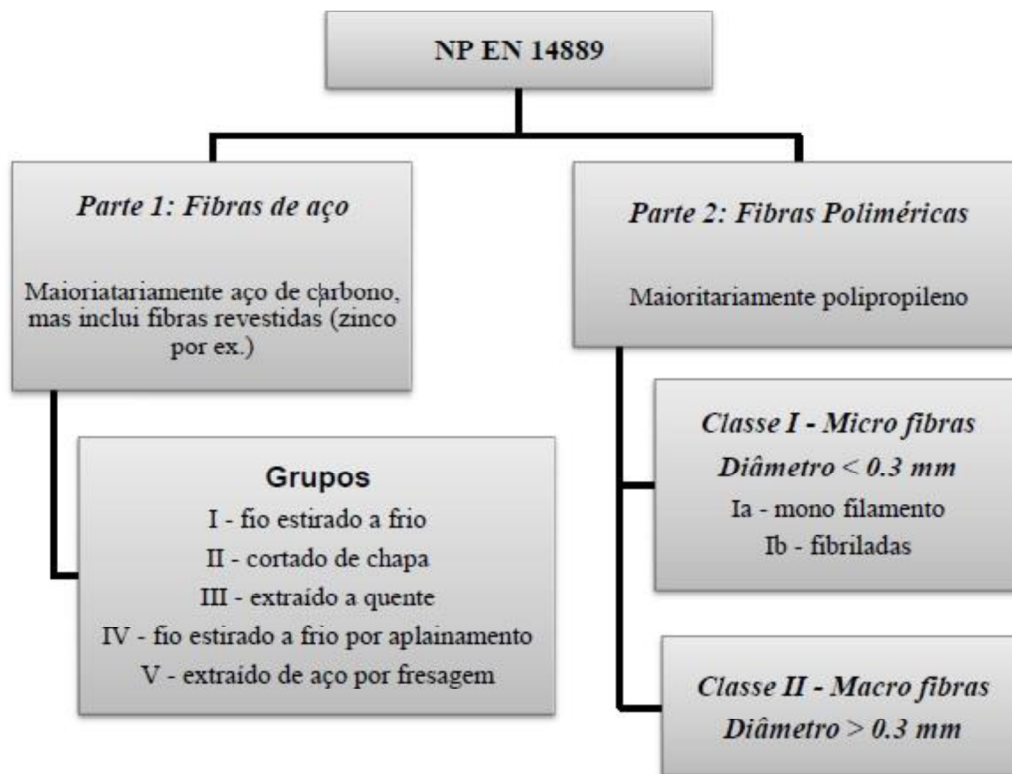


Figura 2.3 - Classificação das fibras segundo NP EN 14889 [43]

As principais propriedades mecânicas das fibras de aço são a resistência e a rigidez, enquanto as principais características geométricas são: a esbelteza; a sua percentagem na mistura; as características da superfície.

É variada a gama de formas e secções para as fibras de aço que existem actualmente, sendo mais vocacionadas para betões de ultra-elevada resistência, as fibras mais curtas e de menor diâmetro. Algumas formas e secções podem ser vistas na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Diferentes tipos de fibras de aço [19]

Existem dois modos de rotura característicos das fibras: rotura por cedência; e rotura por deslizamento, relativamente à matriz envolvente [3]. As fibras de alta resistência e de esbelteza suficientemente elevada, devem ser empregues de modo a aumentar a resistência do compósito, garantindo que a rotura do mesmo, seja pela cedência das fibras. Porém, a esbelteza e percentagem de fibras devem ser limitadas, para que as propriedades do compósito não sejam adversamente afectadas pela diminuição da trabalhabilidade da mistura. Deve ser também considerado que o modo de rotura dos compósitos por cedência das fibras reprime a principal

vantagem do reforço das fibras, que é o significativo incremento da capacidade de absorção de energia do material. Perante estes factos, a esbelteza das fibras não deve ultrapassar o valor de 100 e a percentagem de fibras de aço não deve exceder os 3% [3].

2.2.2. Resistências mecânicas

Na formulação de misturas do tipo MRFAIN interessa também estudar os parâmetros que influenciam a qualidade do betão: a resistência mecânica e a consequente durabilidade. No entanto, para que estas propriedades possam ser atingidas é necessária que o betão possa ser colocado e compactado de forma adequada, surgindo assim uma terceira propriedade fundamental: a trabalhabilidade. Desta forma, o estudo da composição do betão deve ser efectuado tendo por base o objectivo de, para cada situação particular, o betão atingir a resistência, durabilidade e trabalhabilidade adequadas. O comportamento do betão, para além da composição granulométrica dos agregados, depende essencialmente de três factores:

- tipo e dosagem do ligante e das adições pozolânicas;
- dosagem de água e dos adjuvantes;
- colocação, compactação, cura e protecção.

A dosagem do ligante influencia principalmente a trabalhabilidade, tendo também uma influência relevante na resistência e durabilidade do betão. As misturas pobres em ligantes apresentam-se ásperas, pouco trabalháveis e de baixa coesão, com tendência a segregar e têm um acabamento superficial difícil. Quando são muito ricas em ligante apresentam-se excessivamente coesivas e aderentes sendo mais difíceis de colocar e compactar em obra. Quando a utilização de misturas muito ricas em ligante, é por exigências de resistência e durabilidade mesmo necessária, devem ser utilizados adjuvantes para minorar os efeitos negativos já referidos. O tipo de ligante exerce uma influência importante na durabilidade do betão. Sob este aspecto, importa salientar o papel das adições pozolânicas que, ao preencherem os espaços vazios entre as partículas de cimento, conduzem a pastas mais compactas e, portanto, menos permeáveis. Por outro lado, aumentam a resistência do betão ao ataque químico por reduzirem a quantidade de hidróxido de cálcio originado durante a hidratação do cimento [10].

A razão água-cimento (A/C) é o parâmetro que mais influencia as propriedades do betão, sendo que, quanto maior é o seu valor, mais porosa e permeável é a pasta de cimento, tornando o betão menos resistente e mais sensível à acção dos agentes agressivos que originam a deterioração das respectivas estruturas. De notar que a razão água-cimento é definida como a razão entre a dosagem efectiva de água e a dosagem de cimento. A dosagem efectiva de água é a diferença entre a quantidade total de água presente no betão fresco e a quantidade de água absorvida pelos agregados. Significa isto, que para o cálculo da razão A/C não é considerada a parcela de água absorvida pelos agregados dado que a sua influência no comportamento da pasta de cimento é desprezável; a parcela de absorção é geralmente desprezável nas misturas com agregados de densidade normal. Nas figuras 2.5 e 2.6 está ilustrado a influência da razão A/C na resistência à compressão do betão e na permeabilidade de pastas de cimento [10].

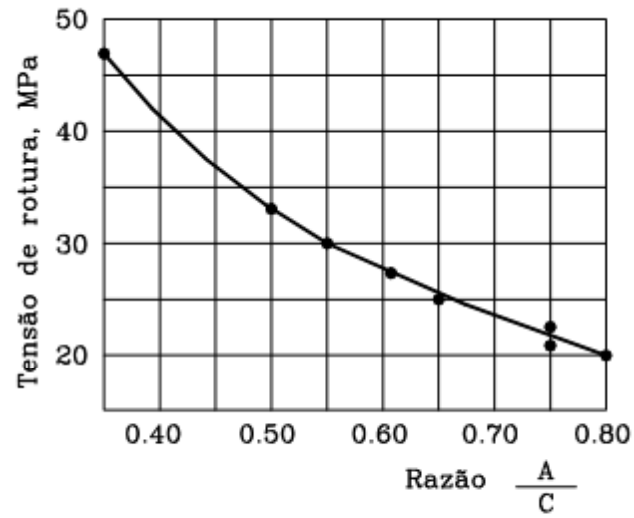


Figura 2.5 – Influência da razão A/C na tensão de rotura [10]

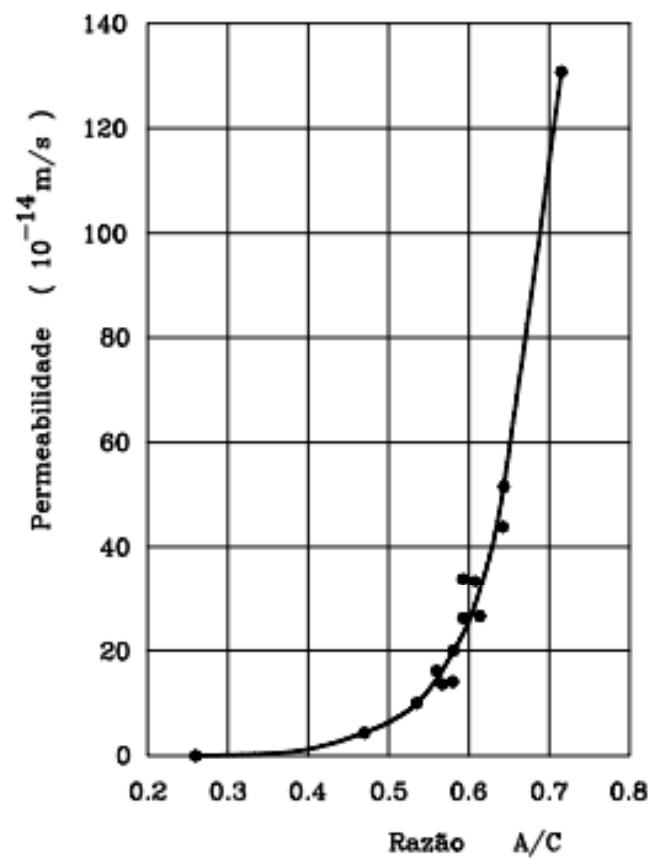


Figura 2.6 - Influência da razão A/C na permeabilidade [10]

Os resultados indicados mostram que o dobro da razão A/C implica uma redução para metade da resistência e que a permeabilidade aumenta exponencialmente a razão A/C a partir de valores da ordem de 0.5. Assume-se então que para se obter betões de boa qualidade é sempre necessário limitar a razão A/C a valores baixos conforme se verifica nas figuras atrás apresentadas.

Já a trabalhabilidade adequada pode ser obtida com a utilização de adjuvantes plastificantes. Refere-se que a norma NP EN 206-1, impõe requisitos relativos à mínima dosagem de ligante e à máxima razão água-ligante que devem ser satisfeitos em função das diferentes classes de exposição ambiental de forma a assegurar uma durabilidade adequada para as estruturas. Uma pasta mais compacta é uma pasta mais resistente à penetração dos diferentes agentes agressores e tem como consequência um betão mais durável.

2.2.3. Ductilidade

O betão reforçado com fibras de aço tem, após fendilhação, uma resistência à tracção maior que um mesmo betão sem a adição de fibras, uma vez que, após a carga de fendilhação do betão, que não é significativamente alterada para percentagens correntes de fibras, estas passam a sustentar a maior parte das tensões libertadas pelo betão. Se as características das fibras impedirem que as mesmas rompam na secção da fenda (onde a tensão na fibra é mais elevada), ocorrerá um deslizamento relativo entre a fibra e o betão envolvente.

Assim sendo, o efeito enunciado, alargado a todas as fibras que atravessam a fenda, proporciona uma elevada dissipação de energia, causando um aumento significativo na ductilidade do material [25]. Este conceito pode ser interpretado pela maior retenção de tensões de tracção do BRF fendilhado.

2.3. Influência dos nano-materiais no betão

A nano-tecnologia que envolve o estudo à escala do nanómetro ($1\text{nm}=1\times 10^{-9}\text{m}$) vem permitir o estudo de materiais, ou estruturas de muito pequenas dimensões. No desenvolvimento das tecnologias dos nano-betões, têm-se verificado que a incorporação de nano-partículas altera as propriedades mecânicas do betão, melhorando-as. Melhora também a sua microestrutura e estrutura porosa, podendo ser, também, utilizadas como material de enchimento [39, 40].

A produção de nano-partículas pode ser por elevada energia de moagem ou, então obtida por síntese de processos químicos [41].

Na bibliografia disponível, existem diversos estudos relativos à incorporação de nano-partículas nos diferentes tipos de betão, recaindo a maioria na utilização de nano-SiO₂. Existem também alguns trabalhos sobre a incorporação de nano-Fe₂O₃, nano-Al₂O₃, nano-ZnO e nano-argila.

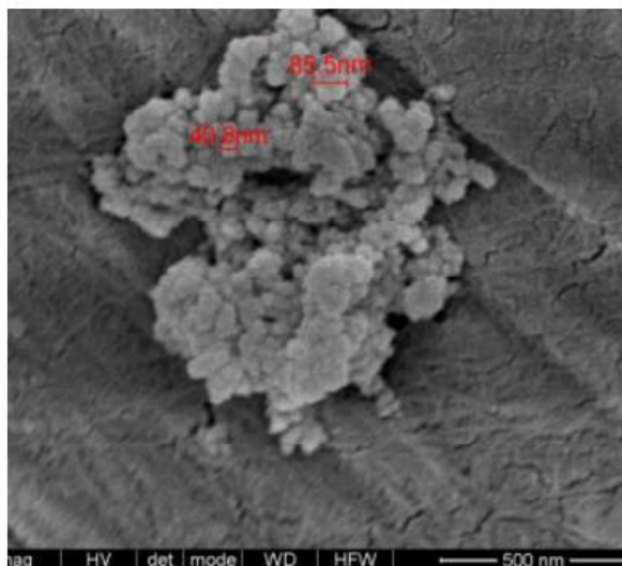


Figura 2.7 - Imagens SEM das nano-partículas de sílica

2.3.1. Tipos de nano-materiais usados no betão

Relativamente à nano-SiO₂, sendo a sílica uma pozolana, já se espera de antemão, pela sua reactividade e pelo efeito pozolânico, uma melhoria das propriedades mecânicas do betão com a incorporação de nano-partículas de óxido de sílica. Dados existentes, de publicações mais antigas, vêm confirmar esta expectativa [33].

Estudos em betões contendo nano-partículas com óxidos de alumínio (nano-Al₂O₃), demonstraram unanimemente existirem diversas vantagens com a incorporação de nano-Al₂O₃, obtendo-se não só ganhos mecânicos mas, principalmente, ganhos na durabilidade. A utilização de nano-partículas, com o objectivo de aumentar a resistência e a durabilidade de compósitos cimentícios é também mencionada no relatório RILEM TC 197-NCM [33].

Não se encontraram estudos feitos, até ao momento, em betões contendo nano-partículas de Óxido de zinco (nano-ZnO). No entanto, existem várias publicações relativas a nano-ZnO₂ e, embora sejam óxidos diferentes, verificou-se que à medida que se procedia ao aumento da percentagem de ZnO₂, por substituição de cimento e mantendo os outros parâmetros (relação A/C e dosagem de superplastificante fixos), a trabalhabilidade era drasticamente afectada [30].

2.3.2. Aumento da compacidade

A incorporação de nano-partículas na matriz ligante, tem o objectivo de densificá-la por preenchimento dos vazios e por reactividade pozolânica, reduzindo assim a porosidade e, por consequência, aumentando a sua compacidade, conduzindo previsivelmente ao aumento da resistência e a um desempenho melhorado em termos de durabilidade [35, 39].

2.3.3. Aumento da resistência mecânica

Alguns autores referem que a incorporação de nano-partículas altera, melhorando, as propriedades mecânicas do betão, além de melhorar também a sua microestrutura e estrutura porosa. Afirmam também que as nano-partículas podem funcionar como núcleos heterogéneos, para a pasta de cimento, acelerando a hidratação do cimento, devido à sua elevada reactividade, conduzindo a resistências elevadas para as primeiras idades. As nano-partículas apresentam uma elevada superfície específica por volume o que lhes confere uma elevada reactividade química, funcionando como centros de nucleares, contribuindo para uma melhor hidratação do cimento Portland [7, 35, 40].

Observa-se nos trabalhos já publicados, relativos à incorporação de nano-partículas nos diferentes tipos de betão, que existe um aumento da resistência mecânica e da durabilidade, através da densificação da microestrutura e da estrutura porosa.

2.4. Principais características mecânicas dos BRFA e BAC

O betão é um material heterogéneo cujas propriedades dependem das propriedades individuais dos seus constituintes bem como da sua compatibilidade. As propriedades dos agregados podem diferir significativamente umas das outras, dependendo sobretudo do material no seu estado natural e do processo de produção. A principal influência das propriedades dos agregados no betão deve-se ao facto de estes corresponderem a grandes percentagens do volume do betão. Podem ser apontadas a trabalhabilidade, resistência, módulo de elasticidade, densidade e durabilidade, como algumas das principais propriedades que são influenciadas [16]. O betão quando produzido para ser utilizado como betão estrutural tem como propriedades decisivas a capacidade resistente e o módulo de elasticidade.

As propriedades mecânicas dos betões reforçados com fibras podem ser afectadas por diversos factores, dos quais incluem-se principalmente: a geometria da amostra; o tempo de cura; os tipos de cimento; a geometria das fibras de aço, factor de forma e volume de fracção.

Os BRFA e BAC apresentam características que tornam a sua utilização particularmente interessante, entre as quais: a melhoria de algumas propriedades mecânicas, principalmente a resistência à tracção e a ductilidade, a maior durabilidade e a possibilidade de utilizações em aplicações invulgares.

2.4.1. Trabalhabilidade

As propriedades do betão no estado fresco estão directamente relacionadas com a quantidade, esbelteza e a geometria das fibras, bem como com a composição do betão. O seu comportamento sob o ponto de vista da trabalhabilidade é, até certas percentagens de fibras, idêntico ao do betão sem fibras. Contudo, na fase de colocação é necessário um cuidado especial, pois as fibras tendem a orientar-se segundo direcções preferenciais que dependem, a

título de exemplo, da proximidade da cofragem e altura de queda do betão. Porém, conclui-se que na presença de fibras em betões de densidade normal, reduz a trabalhabilidade da mistura [32]. Tal facto pode ser colmatado pelo aumento do teor de agregados finos ou pela adição de adjuvantes fluidificantes.

A dosagem mínima de cimento depende, entre outros factores, da razão água-cimento, que influencia a resistência mecânica do betão. Deste modo, a adição de fibras de aço ao betão, expressa em fracções de volume, aumenta a resistência e a ductilidade da mistura, mas diminui a trabalhabilidade. Por conseguinte, as fracções de volume das fibras têm de ser criteriosamente definidas, sendo recomendado um intervalo de 0,5 a 1,5% de volume de fibras [44].

2.4.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão é por excelência o parâmetro de caracterização do betão numa estrutura, assim sendo, é natural que actualmente o ensaio mais realizado no betão é a resistência à compressão. Há várias razões para isso: assume-se que as propriedades mais importantes do betão estão directamente relacionadas com a resistência à compressão; o betão tem geralmente baixa resistência à tracção e é utilizado principalmente em compressão; usualmente, os projectos estruturais têm em conta apenas na maioria dos critérios a resistência à compressão do betão; o teste é relativamente simples de realizar e de baixo custo.

Contudo com a presença de fibras na matriz ligante, o betão torna-se mais dúctil, uma vez que as fibras oferecem uma grande resistência ao aparecimento e principalmente ao aumento das fissuras. Importa referir que, o efeito das fibras depende do tipo utilizado, do tamanho, das propriedades, da fracção de volume adicionada e das propriedades da matriz.

Alguns autores, referem que a adição de fibras é particularmente vantajosa, no benefício das propriedades mecânicas de betões de elevada resistência, carregados em compressão. Concluiu-se assim, que as fibras de aço convencionais, em doses moderadas (inferiores a 1%), não afectam a resistência de pico nos ensaios de compressão, mas aumentam as deformações das fissuras [27]. Na Figura 2.8, apresenta-se a relação tensão-deformação, em função da percentagem de fibras, para um ensaio de compressão uniaxial simples.

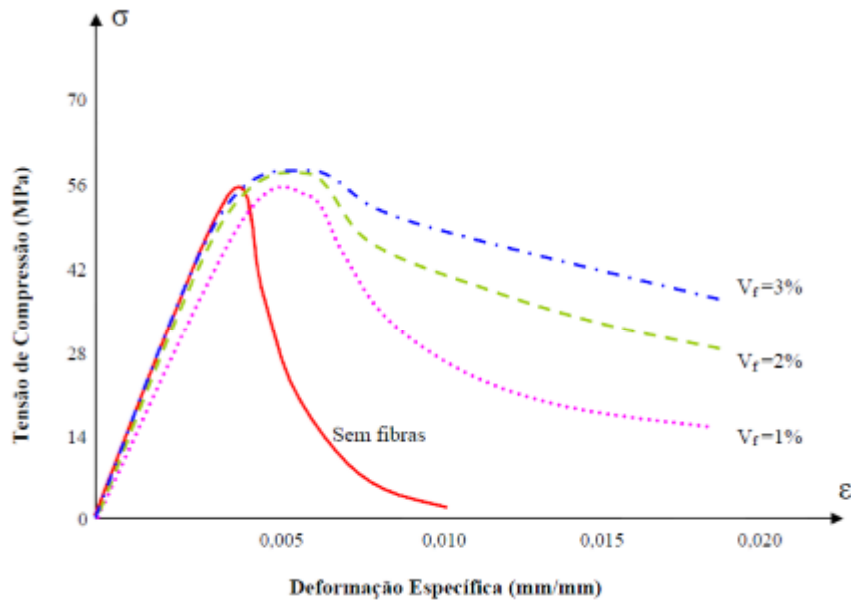


Figura 2.8 - Influência do teor de fibras na curva tensão-deformação [34]

Segundo Barros (1996), a resistência à compressão nos betões reforçados com fibras de aço aumenta ligeiramente com a percentagem e esbelteza das fibras, porém o aumento é mais significativo devido à percentagem do que à esbelteza. Constatou também que são as fibras com extremidades em gancho ou alongadas, as que possuem melhores propriedades de fixação e ancoragem à matriz, e que conduzem a maiores aumentos da resistência à compressão.

O reforço do betão com fibras aumenta a ductilidade, sendo esta dependente das propriedades da matriz, uma vez que a quantidade de fibras necessária para garantir determinada ductilidade será tanto maior quanto mais resistente for a matriz. Nos betões reforçados com elevada percentagem de fibras, a ductilidade e a resistência têm aumentos muito significativos [3].

No Eurocódigo 2 (EC2), é o parâmetro de endurecimento, β , que traduz a evolução da resistência do betão à idade t , em relação à resistência aos 28 dias. O parâmetro, β , pode ser estimado pela equação 2.1:

$$\beta = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2.1)$$

em que, s é um coeficiente que depende do tipo de cimento, da temperatura e das condições de cura.

2.4.3. Resistência à tracção

A resistência à tracção pode ser caracterizada geralmente através de três tipos de ensaios: ensaio de compressão diametral, ensaio de flexão ou ensaio de tracção directa. Os factores que condicionam a resistência à tracção nos betões são principalmente os seguintes: a resistência à

tracção da matriz de argamassa; a resistência à tracção dos agregados; a aderência entre os agregados e a matriz; o desempenho da zona de interface agregados-matriz.

O ensaio de flexão é mais utilizado em materiais frágeis, dado permitir determinar a tensão de pico de rotura, além do comportamento pós-pico, para além de permitir avaliar outras propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade à flexão.

A técnica deste ensaio consiste em apoiar o provete em dois apoios distanciados de um comprimento L , sendo posteriormente aplicada uma força que provoca flexão. Neste tipo de ensaio podem ser colocados extensómetros na zona sujeita à tracção, ou seja, na zona das fibras inferiores do provete, para medir a deformação. A Figura 2.9 ilustra um ensaio de flexão em três pontos, de um provete simplesmente apoiado.

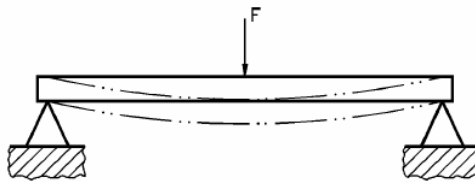


Figura 2.9 - Esquema de flexão de um elemento simplesmente apoiado

Os resultados dos ensaios de flexão são afectados, sobretudo em materiais frágeis, por vários factores, tais como: velocidade de aplicação da força de ensaio; a distância entre apoios; dimensões da secção transversal do provete. Em provetes com a mesma secção e dimensão, quanto menor for a distância entre apoios, mais elevado é o módulo de rotura obtido, e quanto maior a velocidade de aplicação da força, mais elevada é a resistência à flexão.

O reforço de materiais de matriz cimentícia, com fibras de aço, produz uma melhoria significativa na resistência à tracção, o que depende principalmente do volume de fibras utilizado. Nos betões reforçados com fibras, a eficácia do reforço depende substancialmente das propriedades da matriz do betão em estudo [1].

O reforço de materiais de matriz cimentícia, com fibras de aço, produz uma melhoria significativa na resistência à tracção, o que depende principalmente do volume de fibras utilizado, sendo que para percentagens de volume de fibras inferiores a 2%, a resistência à tracção não sofre um aumento significativo. Contudo, esta conclusão depende muito das características das fibras e da matriz do betão. [34]

Na Figura 2.10 apresenta-se a relação tensão-deformação, comparativamente para um betão com e sem adição de fibras, para um ensaio de tracção directa, salientando o aumento de ductilidade.

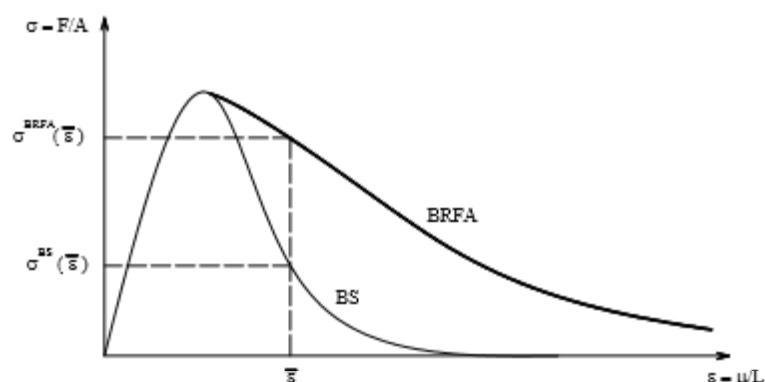


Figura 2.10 – Comparativo de ductilidade entre betão reforçado com fibras de aço (BRFA) e o correspondente betão simples. (BS)

2.4.4. Módulo de elasticidade

Thomaz Young (1802) afirma que existe um crescimento linear das deformações no betão sob carregamento, e que, cessada a solitação, a deformação desaparece; não havendo deformações permanentes o material é considerado elástico.

Aparece assim a indefinição entre qual a terminologia a utilizar, Módulo de Elasticidade ou de Deformação; uma vez que a partir de um determinado ponto o gráfico não é linear e cessada a solitação, parte da deformação permanece. Pode também afirmar-se que a deformação elástica do betão depende fundamentalmente da sua composição, não apenas dos agregados mas também dos parâmetros da matriz ligante.

Para Mehta e Monteiro (2008), as características elásticas de qualquer material são uma medida de sua rigidez. Os autores afirmam que, apesar de o betão não apresentar um comportamento linear, é necessário uma estimativa do módulo de elasticidade (relação entre tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional adoptado), para que se possa, além de conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, também calcular as tensões de projecto sob carga. O módulo de elasticidade do betão é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projecto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do betão, para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais [29]. De um modo geral, o módulo de elasticidade dos betões é afectado por diversos factores, tais como: dimensões e rigidez dos agregados utilizados na composição da mistura; a porosidade do betão; a aderência agregado-pasta; e a resistência à compressão da matriz do betão. Barros (1995) concluiu que a adição de fibras em materiais de matriz cimentícia não altera significativamente o módulo de elasticidade; até porque, este depende da resistência à compressão, a qual não sofre grandes variações com a adição de fibras.

O ensaio de flexão pode ser realizado em materiais frágeis como estruturas de betão, sendo submetidos a situações onde o principal esforço é o de flexão. Nos materiais frágeis, as flechas medidas são muito pequenas e, conseqüentemente, para determinar a tensão de flexão, utiliza-se a carga que provoca a fratura do provete. O ensaio de flexão foi adoptado com o objetivo de

ser utilizado em materiais frágeis para determinar a tensão e flecha de rotura, e para além de permitir avaliar propriedades mecânicas como a resistência à tracção, permite também determinar o módulo de elasticidade em flexão.

2.4.5. Energia de fractura

O conceito de energia de fractura advém da necessidade de avaliar a capacidade de absorção de energia de um material. Existem diferentes métodos para estimar a energia de fractura, por caracterização experimentalmente, com ensaios de tracção uniaxial ou com ensaios de flexão. A forma mais comum de medir a energia de fractura nos betões é segundo o método proposto pela RILEM TC 50-FMC [36].

A principal propriedade beneficiada pela adição de fibras a um material compósito, é a capacidade de absorção de energia. Tal prende-se com o facto de, nos betões reforçados com fibras, a energia necessária para vencer os mecanismos de reforço das fibras, que acontecem após a fendilhação da matriz, ser bastante elevada, face à energia dissipada na fractura da matriz [3].

Bencardino et al. [6] propuseram dois métodos para calcular a energia de fractura. O primeiro através do proposto pela RILEM TC 50-FMC, em que o trabalho total necessário para partir o provete de ensaio em dois é calculado a partir de uma estimativa da área total, dentro da curva força-deslocamento, definida como trabalho de fractura. A energia de fractura é calculada, neste caso, dividindo o trabalho de fractura pela área do provete. O segundo critério consiste em calcular o trabalho de fractura, como sendo a área sob as curvas tensão-deslocamento, assumindo uma distribuição linear de tensões durante a fractura. No presente trabalho foi adoptado o primeiro método de cálculo. A Figura 2.11 apresenta um diagrama típico de carga-deslocamento para um betão sem fibras, proposto pela RILEM.

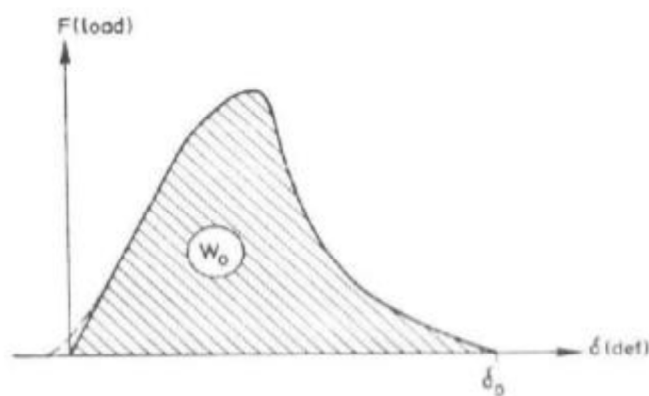


Figura 2.11 - Exemplo do trabalho produzido por um betão sem fibras durante o ensaio de energia de fractura [36].

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Considerações Gerais

Tal como se referiu no capítulo anterior, os benefícios da incorporação de nanopartículas e das fibras de aço em materiais compósitos são evidentes, entre os quais destaca-se a elevada capacidade de absorção de energia, ganhos significativos de resistência à tracção e aumento da ductilidade, aumento da resistência à compressão e aumento da compacidade. No entanto, a escolha da percentagem de adição de fibras a incluir na mistura deve ser criteriosa e deve estar de acordo com as propriedades mecânicas das fibras e da matriz. No presente capítulo encontra-se a descrição e caracterização dos materiais constituintes dos MRFAIN, assim como a metodologia de composição dos mesmos. Descrevem-se igualmente os métodos de preparação, cura e ensaio dos provetes.

Neste estudo pretende-se obter a caracterização mecânica de uma composição da matriz de betão de elevada resistência que se julgou adequada para betões auto-compactáveis e para a qual foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de resistência à compressão; ensaio de resistência à tracção (em flexão). Foi efectuada uma caracterização mais completa, de provetes com a mistura de referência já estudada, realizando para além dos ensaios já referidos, os seguintes: determinação da energia de fractura; ensaio de módulo de elasticidade.

Com este conjunto de ensaios é possível fazer uma caracterização do comportamento deste tipo de betão, sendo que os ensaios nesta fase do estudo foram realizados para 28 dias de idade do betão. De referir, que os ensaios complementares foram realizados nas misturas cujos resultados obtidos foram aqueles que apresentaram menores desvios e valores mais coerentes com os desempenhos pretendidos.

3.2. Materiais

Para o estudo das misturas considerou-se a matriz de betão, constituída pela respetiva matriz de argamassa (ligantes, água e adjuvantes) e por areia fina, adicionando-se as nano-partículas e as fibras às misturas de referência previamente caracterizadas.

3.2.1. Ligantes

Devido à importância que o cimento desempenha no betão, a sua escolha deve estar de acordo com o desempenho, de resistência, pretendido. O cimento escolhido para este trabalho foi o CEM I 52,5 R da Secil, com massa volúmica de $3,12 \text{ kg/dm}^3$. A escolha desta classe de cimento permite obter betões com resistências mais elevadas, comparativamente aos cimentos mais correntes.

As adições têm como objectivo melhorar as características e desempenho do betão especificado. Nesse sentido, neste trabalho utilizaram-se sílicas de fumo Sikacrete® HD (massa volúmica de 2,2 kg/dm³), filer calcário da Comital (massa volúmica de 2,7 kg/dm³), cinzas volantes do tipo F (massa volúmica de 2,3 kg/dm³) e farinha de sílica da Sibelco (massa volúmica de 2,6 kg/dm³). A escolha das sílicas de fumo e cinzas volantes teve por base o aumento de desempenho pretendido para o betão, uma vez que estas adições pozolânicas proporcionam um aumento de resistência mecânica, bem como uma melhor durabilidade, desde que se proceda a uma cura adequada. Já a utilização do filer calcário e da farinha de sílica, deveu-se ao objectivo de considerar o aumento do volume de pó ligante, sem aumentar a dosagem de cimento pretendida, tendo estes a função de filer, por preenchimento dos vazios, e o segundo apresenta efeito de reatividade na matriz cimentícia

3.2.2. Água de Amassadura

A hidratação dos ligantes, é a principal função da água de amassadura. Deste modo, deve ser controlada de maneira a que não afete as características das argamassas e betões. A água de amassadura, utilizada no fabrico das misturas, tem a função de garantir a trabalhabilidade no estado fresco, de modo a facilitar a colocação em obra e também a já referida hidratação das partículas do material ligante, dando lugar à presa e endurecimento do betão.

Não deve conter impurezas prejudiciais às propriedades das misturas, tais como matérias orgânicas, alcalis e sulfatos ou qualquer outro poluente, de tal forma a que possam afectar a presa, o endurecimento e a durabilidade do betão.

A água, juntamente com os adjuvantes redutores de água, tem uma grande influência em parâmetros como a trabalhabilidade e, conseqüentemente, a resistência mecânica, mas o seu excesso pode causar exsudação e a conseqüente segregação dos constituintes granulares.

A água utilizada nas amassaduras teve origem na rede pública de abastecimento de Coimbra, assumindo-se como potável, garante assim as características adequadas para ser utilizada como água de amassadura no fabrico de betões, de acordo com NP EN 206-1.

3.2.3. Adjuvantes

O adjuvante é um material adicionado durante a amassadura do betão em quantidades que não excedam em geral 5%, em massa, da dosagem de cimento do betão, para modificar determinada propriedade do mesmo no estado fresco ou endurecido [18]. Nos microbetões de elevado desempenho, os adjuvantes mais usuais são os superplastificantes, que têm como objectivo obter betões de melhor trabalhabilidade e com grandes resistências, reduzindo a relação A/C e mantendo uma consistência fluida. Segundo Costa (2007), os superplastificantes garantem o aumento da plasticidade e redução de água na pasta, sendo também, por vezes, agentes de coesão ou incrementadores de viscosidade, que garantem a homogeneidade e evitam a segregação. O adjuvante utilizado foi o Glenium sky 526 da BASF, que é um aditivo

superplastificante de terceira geração, com elevado poder redutor de água, à base de éter-policarboxilatos e apresenta a massa volúmica de $1,06 \text{ kg/dm}^3$.

A dosagem definida para cada mistura foi ajustada de modo a balizar a trabalhabilidade e o teor de ar nos valores definidos para cada série.

3.2.4. Agregados

Os agregados de densidade normal habituais na produção de betões são normalmente de origem granítica ou calcária. A sua classificação depende da granulometria do material e divide-se em agregados finos no caso das areias e grossos para as britas. Apesar da influência da granulometria da areia nas propriedades das argamassas e betões, particularmente na compactidade e trabalhabilidade, optou-se por utilizar apenas uma areia fina, uma vez que para a produção de microbetões, e consequentemente de MRFAIN, os agregados de densidade normal utilizados são geralmente os finos; A matriz estudada pode constituir a fração ligante resistente e qualquer mistura auto-compactável; além disso, são os agregados finos que influenciam maioritariamente a trabalhabilidade e a necessidade de água e adjuvantes, a compactidade e o teor de ar, podendo extrapolar-se então o comportamento para betões com agregados grossos de matriz equivalente [11].

No presente trabalho utilizou-se então apenas um tipo de agregado de densidade normal, areia fina 0/1 mm da Argilis-Guia (massa volúmica de $2,63 \text{ Kg/dm}^3$), Figura 3.1, uma areia siliciosa com granulometria regular, que permite obter a trabalhabilidade adequada para as diferentes misturas.

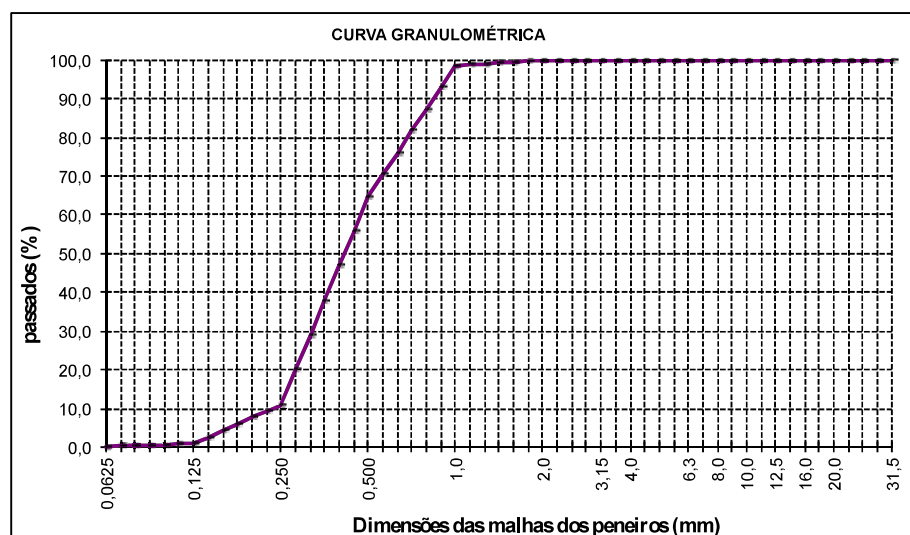


Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia fina 0/1mm.

3.2.5.Fibras

Foram introduzidas nas misturas micro-fibras de aço da marca Dramix® com alto teor de carbono e designação comercial 0,12/10, representando as dimensões nominais, respectivamente, o diâmetro e o comprimento da fibra, em mm.



Figura 3.2 – Micro-fibras 0,12/10mm da Dramix®.

As fibras supracitadas, foram escolhidas com o intuito de estudar a influência das mesmas na trabalhabilidade das misturas e resistências dos provetes, bem como estudar o pretendido efeito das nano-sílicas na aderência entre fibras e matriz.

3.2.6.Nanopartículas

Nesta investigação, pretendeu-se estudar inicialmente as melhorias provocadas pela incorporação de vários nano-materiais no desempenho dos betões. Contudo, face ao rápido desenvolvimento do Projecto Nano-betão, em que esse estudo foi efectuado de forma mais abrangente em termos de desempenho mecânico e de durabilidade, no presente trabalho, abordou-se a influência apenas da adição de nano-SiO₂. A nano-sílica (SiO₂) usada foi produzida por síntese pela Smart Inovation, à base de óxidos e com pureza mínima de 99,5%. A sua massa volúmica (kg/dm³), obtida na caracterização experimental, foi de 2,22.

3.3. Métodos

3.3.1.Métodos de composição

A metodologia utilizada na composição dos MRFAIN teve por base global a filosofia do método de composição proposto por Lourenço et al. (2004). No entanto, uma vez que se trabalhou apenas com a matriz ligante que contém a areia fina, não se aplica a parte de ajuste

granulométrico das curvas de referência. Assim, o estudo de composição teve por base, a parte da definição e respetivos parâmetros da fração ligante, bem como a expressão dos volumes absolutos, de modo a controlar o volume unitário da mistura. Refere-se ainda que, considerando uma fração de agregados grossos de cerca de 300 lt/m^3 , as proporções da matriz de microbetão serão multiplicadas por 0,7 para obter as equivalentes num betão com a mesma matriz e com agregados grossos. O estudo teve assim por base como dosagem de ligante (cimento e adições) para betões auto-compactáveis [12, 13], um valor que varia entre 550 a 600 kg/m^3 .

Com base no referido anteriormente, foram estudadas e produzidas em laboratório misturas de microbetão, auto-compactável, com dosagem de cimento de 800 kg/m^3 , tendo sido adoptada uma relação A/L (água/ligante) de 0,3; e teores de ar alvo de 2,5% a 3% na matriz de argamassa. Em cada série foram produzidas cinco misturas de referência, uma com cimento (Ci) e as restantes com cimento e adições: mistura A, apenas com Ci; mistura C, com Ci e adição de 7% de Sílica de Fumo (SF); mistura D, com Ci e adição de 20% de Cinzas Volantes (CV); mistura BC com Ci e adições de 7% de SF e 20% de Fíler (F); mistura DE com Ci e adições de 7% de Farinha de sílica (FS) e 20% de CV. Conforme mencionado, a dosagem de superplastificante ajustou-se de forma a manter aproximadamente constante, em cada série, a trabalhabilidade, medida pela fluidez obtida no ensaio de espalhamento, e o teor de ar, sendo o ajuste final da mistura efetuado na dosagem de areia.

Foram posteriormente consideradas as misturas A e D para adição de fibras, por representarem a mistura apenas com cimento e a mistura com adição que revelou melhor desempenho em ensaios preliminares. Nas misturas A e D foram então adicionadas microfibras de aço, em percentagem volumétrica de 0,5% (5,82), 1% (1,82), 2% (2,82) e 3% (3,82), por forma a analisar o comportamento e desempenho das misturas. Com base nos resultados obtidos em ensaios preliminares, optou-se por estudar apenas com 1% e 2% de fibras.

Em seguida, desenvolveu-se o estudo das misturas com adição das nano-partículas mencionadas (nano-sílica), referenciada como mistura S, sendo a adição por substituição do cimento, em dosagens de 1% e 2%, igualmente sem e com as microfibras de aço.

Neste procedimento experimental, foram também estudados dois tipos de cura, a cura normal (N), e a cura especial (T), sendo que, os provetes com a designação “final” (F), foram também sujeitos ao mesmo tipo de cura especial, devendo-se essa mesma designação ao facto de se terem realizado diferentes provetes para a referida fase do procedimento experimental.

A designação simplificada para as misturas teve como base a dosagem de cimento (8) e uma determinada relação A/C (2), obtendo-se portanto a legenda base (,82). As restantes designações simplificadas de cada mistura refletem a variação dos parâmetros atrás referidos, e encontram-se representadas e resumidas na Figura 3.4 e nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.



Figura 3.3 – Esquema de designações

Tabela 3.1 – Tipo de ligantes

Ligantes		
Tipos		Legenda
Cimento		A
Cimento	Fíler	B
Cimento	Sílica de Fumo	C
Cimento	Cinzas Volantes	D
Cimento	Farinha de Sílica	E
Cimento	Nano-Partículas	S

Tabela 3.2 – % de fibras

Fibras	
%	Legenda
0,5	5
1,0	1
2,0	2
3,0	3

Tabela 3.3 – tipo de cura

Cura	
Tipo	Legenda
Normal	N
Especial	T
Final	F

3.3.1.1. Previsão da compactidade

Define-se compactidade do betão, σ , como o quociente entre o volume dos constituintes sólidos do betão (agregados e ligantes) e o seu volume unitário, $1 m^3$. O valor complementar para a unidade é o índice de vazios, I , que representa a relação entre o volume de parte líquida (água, ar e adjuvantes) e o volume unitário do betão. A compactidade do betão depende principalmente, da consistência, do tipo e dosagem do adjuvante e da dimensão máxima e forma dos agregados [11].

A previsão da compactidade dos MRFAIN foi efectuada com base na expressão do índice de vazios, I , de Faury. A elevada compactidade está associada à reduzida relação ponderal água/ligante, A/L , definida com o valor de 0,30.

3.3.1.2. Quantificação da pasta ligante

A quantificação da pasta ligante deve ser definida de modo a satisfazer as especificações pretendidas. Esta é feita através das dosagens dos ligantes e adjuvantes e das estimativas da compactidade e do volume de ar. A escolha do conjunto dos ligantes deve ser adequada ao resultado pretendido para o microbetão.

É assim possível conhecer as dosagens e os parâmetros da pasta ligante, mais especificamente as relações ponderais da água com o ligante e a compacidade da pasta ligante, γ , e inclusive a dosagem volumétrica do conjunto de agregados.

3.3.1.3. Quantificação dos agregados

A quantificação dos agregados é feita após o conhecimento do volume absoluto da pasta ligante. O volume absoluto da mistura dos agregados é determinado, com base na equação dos volumes absolutos:

$$c + s + a + adj + v + mag = 1m^3 \quad (3.1)$$

Em que o volume absoluto de agregados, mag , corresponde à determinação da soma dos agregados a utilizar, de acordo com a equação 3.2.

$$mag = \sum_{i=1}^n ag_i = 1 - (c + s + a + adj + v) \quad (3.2)$$

O volume absoluto, mag , diz respeito, neste caso, apenas ao único agregado utilizado, a areia fina.

3.3.1.4. Previsão da resistência mecânica

A previsão da resistência mecânica da matriz dos MRFAIN, foi determinada através da expressão de Feret, em função da idade, considerando uma correção da resistência da matriz da pasta ligante. O cálculo da previsão da resistência mecânica, consiste na estimativa da resistência da pasta ligante, $f_{c,j}$, através da expressão de Feret (Equação 3.3), em que K , é o coeficiente de Feret à idade j , sendo este dependente do tipo de cimento e do tipo de dosagem das adições e γ é a compacidade da pasta ligante.

$$f_{c,j} = K_{1,j} \times \gamma^2 \quad (3.3)$$

3.3.1.5. Composição da mistura

A escolha das misturas caracterizadas, durante a fase 1, baseou-se no estudo de um MRFAIN de referência, com 800 kg/m^3 de cimento, sem adição de fibras e/ou nano-partículas, com uma densidade prevista de 2.273 Kg/m^3 , atribuindo-lhe a designação de A0,82.

Posto isto, fez-se variar diferentes parâmetros: tipos de adições; dosagens volumétricas de fibras e dosagens volumétricas de nano-partículas. Obteve-se deste modo as designações conforme as variações introduzidas.

Apresentam-se na Tabela 3.4 as composições da mistura de referência e de cada uma das misturas realizadas na fase final. A tabela de composição é constituída pelas quantidades ponderais dos vários constituintes, sendo as dosagens de areia e adjuvante, ajustadas com a introdução de fibras na mistura.

Tabela 3.4 – Composição dos betões para 1m³ de betão

Constituinte	Designação	A0,82	BC0,82	BC1,82	BC2,82
		Massa (kg)			
Cimento	CEM I 52,5R	800	800	800	800
Adição 1	Sílica de fumo	0	56	56	56
Adição 2	Fíler calcário	0	160	160	160
Adjuvante	Glenium sky 526	8	13	14	14
Água		240	240	240	240
Areia Fina	0/1 da Guia	1226	991	963	934
Fibras	Dramix 0,12/10	0	0	79	157

Na referida segunda fase do estudo – fase final, foram realizados diferentes tipos de provetes, com diferentes dosagens de fibras e dois tipos de adições que se julgavam ser as que melhor maximizam o desempenho, para as propriedades mecânicas do betão em estudo.

3.3.2. Produção e Cura

3.3.2.1. Produção das misturas

Os provetes produzidos têm como objectivo avaliar as propriedades do betão no estado endurecido e foram realizados de acordo com as normas NP EN 12390, seguindo todas as recomendações a nível de dimensões e respectivas tolerâncias.

Para a execução das amassaduras dos MRFAIN de referência foram previamente pesados todos os constituintes, com recurso a uma balança digital com precisão de um decigrama. Após a pesagem, os constituintes foram introduzidos numa misturadora de eixo vertical, com capacidade para 2 *lt* (Fase 1) e capacidade para 100 *lt* (Fase 2), conforme se pode observar na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Produção das misturas na fase 1

Nos betões com fibras, estas foram inseridas em último e verificou-se que se dispersaram facilmente durante a mistura até à dosagem de 2% em volume.

Após as amassaduras, realizaram-se ensaios de caracterização do betão no estado fresco, conforme já referido, e encheram-se os moldes dos ensaios de caracterização no estado endurecido. Os moldes utilizados para produzir os diferentes provetes relativos à Fase 1, têm as seguintes dimensões: provetes prismáticos, de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, para os ensaios de compressão e tracção.

Para a execução das amassaduras dos MRFAIN da Fase 2, foram previamente pesados todos os constituintes, com recurso a uma balança digital com precisão de um grama. Após a pesagem, os constituintes foram introduzidos numa misturadora de eixo vertical, com capacidade para 100l, conforme demonstrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Produção das misturas na fase 2

Nos betões com fibras, estas foram inseridas por fim, já com a matriz homogénea e fluida, e verificou-se que se dispersaram facilmente durante a mistura.

Após as amassaduras, realizaram-se ensaios de caracterização do microbetão no estado fresco e encheram-se os moldes dos ensaios de caracterização no estado endurecido (Figura 3.6). Os moldes utilizados para produzir os diferentes provetes têm as seguintes dimensões:

- 3 provetes cúbicos, de 100 mm de aresta, para o ensaio de resistência à compressão;
- 2 provete prismático, de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$, para o ensaio de flexão;
- 1 provete prismático, de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$, para o ensaio de módulo de elasticidade;
- 1 provete prismático de $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$, com entalhe em “negativo” a meio vão e em 1/3 da altura, para ensaio da energia de fractura.



Figura 3.6 – Evolução dos provetes da fase 2

3.3.2.2. Condições de cura

Foram estudados dois tipos de cura: cura normal, designada por código N, e cura especial com temperatura e humidade, designada por código T.

Os provetes relativos às misturas da Fase 1, foram alvo dos dois tipos de cura e os provetes das misturas relativos à Fase 2 – Fase Final, apenas foram sujeitos a cura especial, por se prever ser o processo que maximizaria as propriedades do betão.

Os provetes sujeitos a cura normal, foram desmoldados 24 horas após a betonagem, sendo posteriormente identificados e colocados imersos num tanque de água, a uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, onde se dispunha de uma resistência com termóstato, para controlar a temperatura.

Os provetes sujeitos a cura especial, foram colocados, após a desmoldagem às 48 horas, dentro de uma câmara termo-higrométrica, regulada para uma temperatura $T = 60 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$ e uma humidade relativa $HR = 95 \%$.

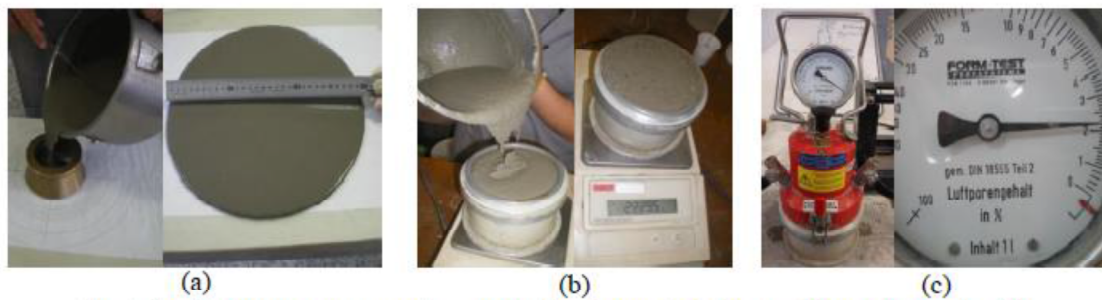
3.3.3. Caracterização experimental

3.3.3.1. Trabalhabilidade, teor de ar e massa volúmica

A caracterização no estado fresco efectuou-se pelos ensaios de espalhamento, de determinação da massa volúmica e do teor de ar. O espalhamento das misturas auto-compactáveis ocorre pela acção da gravidade, medindo-se o seu diâmetro final (Figura 3.7.a) para obter o parâmetro de fluidez. A massa volúmica das argamassas e dos betões pode ser determinada recorrendo à

pesagem do volume de mistura que enche o recipiente inferior do aerómetro, com 1,0 *lt* de capacidade, após libertação do ar, sem compactação (Figura 3.7.b). O resultado da pesagem corresponde à massa volúmica aparente no estado fresco, em kg/dm^3 .

Por forma a acertar a composição das misturas, é importante que se determine o teor de ar, que está sujeito a variações significativas, em função dos constituintes e dos parâmetros da pasta ligante. A variação do teor de ar da pasta ligante provoca alterações relevantes nas propriedades mecânicas e na durabilidade [28]. Além da relação A/L e da consistência, o valor alvo do teor de ar foi mantido constante em cada série, com ligeiros desvios. Para cada mistura, o teor de ar foi caracterizado experimentalmente, utilizando o aerómetro, o qual indica o teor de ar em percentagem (Figura 3.7.c).



Caraterização das argamassas auto-compactáveis no estado fresco: (a) espalhamento; (b) massa volúmica; (c) teor de ar.

Figura 3.7 - Ensaios no estado fresco

Para além da caracterização no estado fresco, as misturas foram também caracterizadas experimentalmente no estado endurecido. Os provetes foram produzidos com o objectivo de avaliar as propriedades do betão no estado endurecido e realizados de acordo com as normas NP EN 12390, seguindo todas as recomendações a nível de dimensões e respectivas tolerâncias. Os respectivos ensaios seguiram igualmente as recomendações das normas NP EN 12390 e do RILEM.

Numa primeira fase (Fase 1), produziram-se provetes prismáticos com $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$ que posteriormente foram ensaiados aos 28 dias à compressão e à tracção. Após uma análise preliminar dos resultados obtidos, foram realizadas misturas optimizadas (Fase 2), tendo os provetes resultantes (Figura 3.8) as dimensões já referidas.



Figura 3.8 – Provetes da Fase 2.

Com este conjunto de ensaios é possível fazer uma caracterização do comportamento deste tipo de betão, tendo os ensaios nesta fase do estudo sido realizados para 28 dias de idade do betão.

3.3.3.2. Resistência à compressão

Nas misturas da Fase 1, os provetes utilizados para este ensaio foram as metades resultantes do ensaio de flexão, tendo sido ensaiados 3 provetes aos 7 dias e 6 provetes aos 28 dias, por mistura. O ensaio realiza-se igualmente na prensa, com recurso ao dispositivo com pratos de compressão de $40 \times 40 \text{ mm}^2$, o qual permite aplicar a compressão em cada provete até à rotura. A partir da média da força de rotura dos provetes, calcula-se a correspondente resistência à compressão, f_{cm} .

Nos provetes da Fase 2, o ensaio de compressão realizou-se numa prensa hidráulica de 3000 kN (Figura 3.9), com uma velocidade de aplicação de carga constante e igual a 6 kN/s .

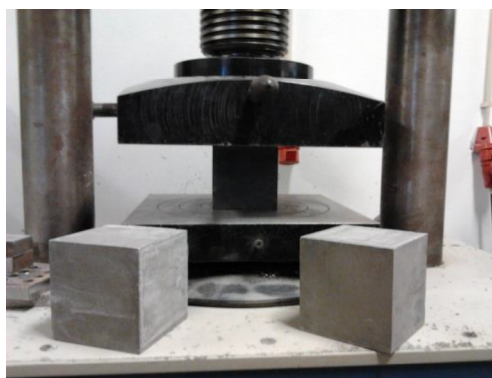


Figura 3.9 – Ensaio de compressão

O valor médio da resistência à compressão, f_{cm} , foi obtido a partir da média aritmética do número de provetes. O resultado obtido é o quociente entre a força máxima à rotura e a área da secção transversal do provete.

3.3.3.3. Resistência à tracção por flexão

O ensaio de flexão nos provetes prismáticos das misturas da Fase 1 foi efectuado em prensa universal, utilizando um dispositivo de ensaio em 3 pontos, até se atingir a rotura. Os resultados da resistência à flexão, f_{cf} , foram obtidos através da média de três provetes ensaiados aos 28 dias.

Para os provetes das misturas da Fase 2, a resistência à tracção por flexão, f_{cf} , foi obtida através de ensaios de rotura em flexão e caracterizada de acordo com a norma NP EN 12390-5 [24]. Os ensaios foram realizados aos 28 dias e a resistência foi determinada tanto para o provete do ensaio à flexão (secção transversal de $100 \times 100 \text{ mm}^2$), como no provete do ensaio de energia de fractura (secção transversal de $100 \times 66,7 \text{ mm}^2$). O ensaio de flexão consiste em aplicar uma carga concentrada a meio vão e ao longo da menor dimensão do provete, que se encontra apoiado nos dois terços centrais do vão (Figura 3.10).

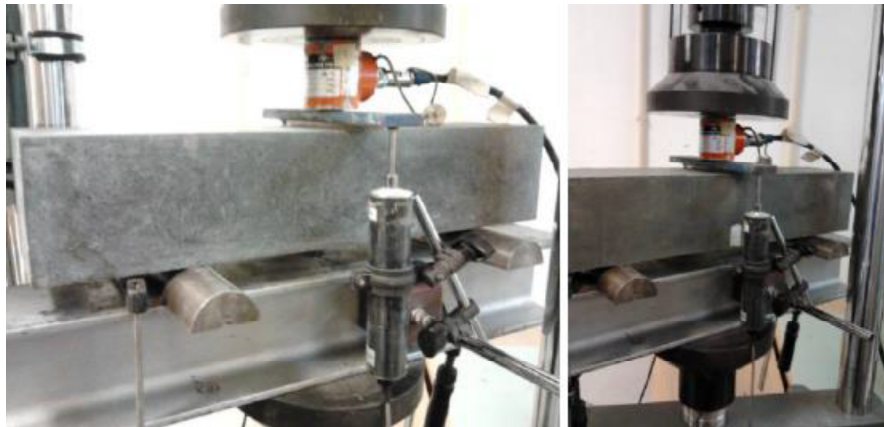


Figura 3.10 – Ensaio de Flexão e Energia de Fractura

Os ensaios foram realizados com controlo de deformação através de dois LVDT's (Linear Voltage Differential Transducer), com campos lineares de leitura de 50 mm, colocados no dispositivo do ensaio, utilizando-se, para tal um equipamento servo-controlado.

A tensão de rotura, f_{cf} , de cada provete i é dada pela equação (3.4):

$$f_{cf} = (3 \times F \times I) / (2 \times d_1 \times d_2^2) \quad (3.4)$$

em que:

- f_{cf} - tensão de rotura à tracção por flexão, dos provetes ensaiados, em MPa;
- F - Carga máxima, em N;
- I - Distância entre os roletes inferiores de apoio, em mm;
- d_1 e d_2 - Dimensões laterais do provete, em mm.

3.3.3.4. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade estático foi determinado de acordo com a especificação do LNEC E-397, para provetes prismáticos de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$. Os ensaios foram realizados na idade de 28 dias, do provete. O ensaio baseia-se na aplicação de carga cíclica no provete, entre os limites inferior e superior, de modo a medir a deformação que o provete atinge em cada ciclo de carga e descarga. A velocidade de carga e de descarga dos provetes foi de $0,5 \text{ MPa/s}$.

As leituras de deformação realizaram-se com recurso a um alongâmetro, com $1 \mu\text{m}$ de precisão, entre os dois pontos de leitura, com *dme*'s devidamente colados em cada uma de duas faces opostas, do provete (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade em compressão

O módulo de elasticidade é determinado pelo quociente entre a variação de tensão e a variação da extensão, medidas no último ciclo (Equação 3.5):

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) \quad (3.5)$$

onde:

- σ_{\max} e σ_{\min} correspondem respectivamente, às tensões máxima e mínima aplicadas;
- ε_{\max} e ε_{\min} são as correspondentes extensões máxima e mínima registadas.

O módulo de elasticidade pode ser também determinado à flexão, e para tal recorre-se aos resultados obtidos durante o ensaio à flexão. Durante o ensaio é possível determinar o deslocamento em função da força aplicada, resultando um gráfico do tipo representado na Figura 3.12. No gráfico ajusta-se uma recta à zona com o declive linear e é em função desse declive que se determina o módulo de elasticidade à flexão.

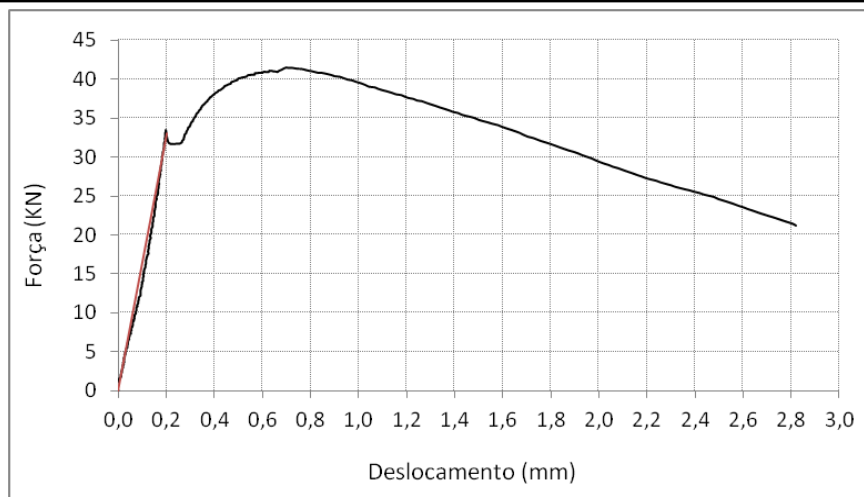


Figura 3.12 – Gráfico do ensaio de flexão

3.3.3.5. Energia de fractura

O ensaio de energia de fractura foi realizado de acordo com a recomendação da RILEM, em provetes prismáticos de $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$, aos 28 dias de idade. Este é um ensaio de tracção por flexão e consiste na aplicação de uma carga pontual a meio vão, medindo os deslocamentos nesse ponto. Os provetes foram colocados sobre roletes que permitiam a rotação dos pontos de apoio da viga. A energia de fractura é obtida com base no trabalho, W_0 , realizado pela viga durante o carregamento. Como se pretende que a rotura ocorra a meio vão, foi realizado um entalhe ($100 \times 20 \times 33 \text{ mm}^3$) em cada provete, conforme a recomendação referida. O ensaio foi realizado com controlo da deformação, sendo a medida de controlo correspondente à flecha máxima sofrida pela viga a meio vão (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Ensaio de determinação da energia de fractura

A energia de fractura foi calculada com base na equação (3.6):

$$G = (w_0 + m \times g \times \delta_0) / b \cdot (h - a_0) \quad (3.6)$$

em que:

-
- W_0 - trabalho de deformação total, em N/m;
 - m - massa da viga, em Kg;
 - g - aceleração da gravidade, em m/s^2 ;
 - δ_0 - deformação na viga na rotura, em m;
 - b - largura da secção da viga, em m;
 - h - altura da secção da viga, em m;
 - a_0 - altura do entalhe, em m.

O método de cálculo para determinar a energia de fractura aplicou-se de acordo com a metodologia proposta por Bencardino et al. (2010).

3.4. Resultados

3.4.1. Estado fresco

Obtiveram-se diâmetros entre os 20 cm e os 25 cm, para as misturas com dosagens até 2% de fibras metálicas, conforme se esperava. Relativamente ao teor de ar, foram obtidos os resultados expectáveis, com ligeiros desvios, uma vez que se ajustou o superplastificante de modo a minimizar estes desvios. A massa volúmica obtida foi a inicialmente esperada, com resultados bastante aproximados. Os resultados apresentam-se no Cap. 4.

3.4.2. Estado endurecido

No estado endurecido, conforme referido, foram caracterizadas as propriedades mecânicas: resistências à compressão e tracção, módulo de elasticidade e energia de fractura.

3.4.2.1. Resistência à compressão

Nas misturas da Fase 1, os provetes utilizados para este ensaio foram as metades resultantes do ensaio de flexão. A partir da média da força de rotura dos provetes, obteve-se a correspondente resistência à compressão, f_{cm} aos 28 dias (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Resistência à compressão (Fase 1)

A0.82N	82,5	MPa
A5.82N	97,3	MPa
A1.82N	107,3	MPa
A2.82N	120,4	MPa
A3.82N	139,4	MPa
A0.82T	83,5	MPa
A1.82T	115,5	MPa
A2.82T	134,6	MPa
C0.82N	89,1	MPa
C0.82T	89,4	MPa
C1.82T	117,7	MPa
C2.82T	136,8	MPa
D0.82N	88,1	MPa
D5.82N	104,2	MPa
D1.82N	114,2	MPa
D2.82N	116,6	MPa
D3.82N	140,7	MPa
D0.82T	84,6	MPa
D1.82T	144,8	MPa
D2.82T	159,0	MPa
DE0.82N	92,3	MPa
DE1.82N	110,9	MPa
DE2.82N	130,5	MPa
DE0.82T	91,9	MPa
DE1.82T	141,5	MPa
DE2.82T	155,1	MPa
BC0.82N	87,2	MPa
BC1.82N	104,6	MPa
BC2.82N	138,5	MPa
BC0.82T	88,3	MPa
BC1.82T	115,7	MPa
BC2.82T	146,2	MPa
AS1_0.82T	88,9	MPa
AS1_1.82T	99,5	MPa
AS2_0.82T	90,3	MPa
AS2_1.82T	107,9	MPa
DES1_0.82T	104,1	MPa
DES1_1.82T	142,4	MPa
DES2_0.82T	101,7	MPa
DES2_1.82T	122,0	MPa

Para as misturas da Fase 2, após a realização do ensaio nos três provetes, obteve-se os seguintes resultados para a resistência à compressão, f_{cm} aos 28 dias (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 – Resistência à compressão (Fase 2)

BC0.82F	107,3	MPa
BC1.82F	118,2	MPa
BC2.82F	122,5	MPa

Verificou-se um aumento da resistência à compressão, em todas as misturas, com o aumento da dosagem de fibras, sendo esse aumento bem notório na maioria das situações. Nos provetes de ensaio a presença das fibras altera o tipo de rotura, prolongando o ensaio, com reduzido acréscimo de carga, mas com uma rotura que não gera o destacamento das faces laterais de betão não confinado. As fibras existentes ao longo das linhas de fractura evitam o destacamento do betão lateral e evidenciam um padrão de rotura diferente do betão sem fibras, conforme se observa na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Ensaio de compressão em cubos

A introdução de nano-partículas com e sem adição de fibras revelou-se apenas proveitosa nas misturas apenas com cimento, produzindo inclusivamente um efeito desfavorável nas misturas com adições de Cinzas volantes e Farinha de sílica.

3.4.2.2. Resistência à tracção

Conforme referido, o ensaio de flexão nos provetes prismáticos das misturas da Fase 1 ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) foi efectuado em prensa universal, utilizando um dispositivo de ensaio em 3 pontos, até se atingir a rotura. Os resultados da resistência à flexão, f_{cf} aos 28 dias, obtidos para as misturas da Fase 1, encontram-se na Tabela 3.7.

Para as misturas da Fase 2, a determinação da resistência à tracção por flexão foi realizada em dois ensaios diferentes, ensaio de flexão e ensaio de energia de fractura. Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 3.8 e 3.9.

Tabela 3.7 – Resistência à Tracção (Fase 1)

A0,82N	14,1	MPa
A5,82N	12,5	MPa
A1,82N	16,1	MPa
A2,82N	29,3	MPa

A3,82N	36,0	MPa
A0,82T	14,0	MPa
A1,82T	21,0	MPa
A2,82T	27,8	MPa
C0,82N	7,8	MPa
C0,82T	14,2	MPa
C1,82T	25,6	MPa
C2,82T	37,9	MPa
D0,82N	9,5	MPa
D5,82N	12,3	MPa
D1,82N	29,7	MPa
D2,82N	26,5	MPa
D3,82N	34,0	MPa
D0,82T	14,4	MPa
D1,82T	28,7	MPa
D2,82T	37,0	MPa
DE0,82N	7,2	MPa
DE1,82N	24,2	MPa
DE2,82N	33,7	MPa
DE0,82T	15,9	MPa
DE1,82T	20,8	MPa
DE2,82T	36,1	MPa
BC0,82N	9,7	MPa
BC1,82N	17,1	MPa
BC2,82N	30,1	MPa
BC0,82T	14,3	MPa
BC1,82T	22,5	MPa
BC2,82T	32,9	MPa
AS1_0.82T	14,1	MPa
AS1_1.82T	22,7	MPa
AS2_0.82T	14,8	MPa
AS2_1.82T	26,1	MPa
DES1_0.82T	10,0	MPa
DES1_1.82T	22,8	MPa
DES2_0.82T	11,8	MPa
DES2_1.82T	26,0	MPa

Tabela 3.8 – Resistência à tracção (Fase 2 – ensaio Flexão)

BC0.82F	9,5	MPa
BC1.82F	14,2	MPa
BC2.82F	25,4	MPa

Tabela 3.9 – Resistência à tracção (Fase 2 – ensaio de energia de fractura)

BC0.82F	9,6	MPa
BC1.82F	18,9	MPa
BC2.82F	18,7	MPa

Os betões sem fibras apresentam roturas frágeis (Figura 3.15), enquanto os betões com fibras apresentam uma rotura dúctil (Figura 3.16), reduzindo pouco a capacidade resistente com o aumento de deformação.



Figura 3.15 – Rotura frágil



Figura 3.16 – Rotura dúctil

Com o aumento da percentagem de fibras, o betão torna-se muito mais resistente à flexão. Após atingir a carga máxima, os betões com fibras tendem a entrar numa zona dúctil, em que a eficiência de resistência e de amarração das fibras é essencial para garantir essa ductilidade (Figuras 3.17, 3.18 e 3.19).

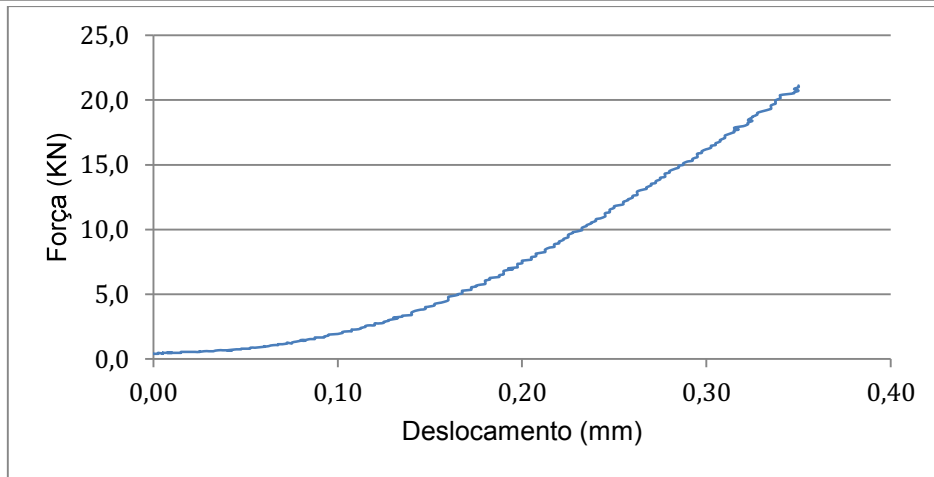


Figura 3.17 – Ensaio de tracção (BC0.82F - 0% de fibras)

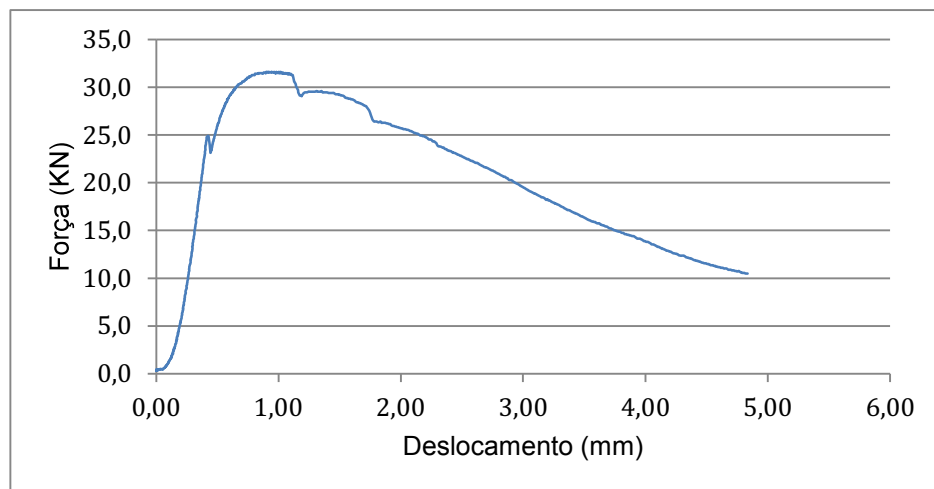


Figura 3.18 - Ensaio de tracção (BC1.82F - 1% de fibras)

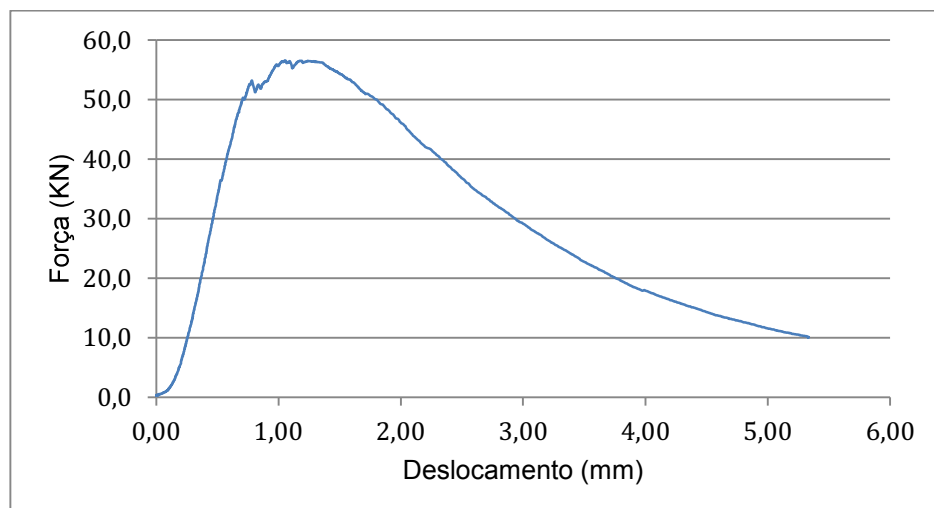


Figura 3.19 - Ensaio de tracção (BC2.82F - 2% de fibras)

A introdução de nano-partículas, durante a fase 1, com e sem adição de fibras, mais uma vez, revelou-se apenas proveitosa nas misturas apenas com cimento, produzindo inclusivamente um efeito desfavorável nas misturas com adições de cinzas volantes e farinha de sílica.

3.4.2.3. Determinação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade obtido em compressão para as misturas relativas à Fase 2, está representado na tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Módulo de Elasticidade

BC0.82F	39,7	GPa
BC1.82F	40,4	GPa
BC2.82F	42,7	GPa

Tendo sido efectuado o ensaio nas misturas BC, verifica-se o aumento do módulo de elasticidade com o aumento da percentagem de fibras, conforme esperado. O módulo de elasticidade em flexão obtido para as misturas relativas à Fase 2, pelo ajustamento da recta está representado na Tabela 3.11, apresentando valores diferentes comparativamente aos anteriores, sendo menor no betão sem fibras e maiores nos betões com fibras.

Tabela 3.11 – Módulo de Elasticidade por flexão

BC0.82F	34.6	GPa
BC1.82F	45.2	GPa
BC2.82F	45.3	GPa

3.4.2.4. Determinação da energia de fractura

A energia de fractura para betões reforçados com fibras foi calculada com referência a um valor de deslocamento específico, uma vez que este ensaio é comum para betões sem fibras, com rotura frágil. Considerou-se um deslocamento máximo de 9 mm, de modo semelhante ao utilizado por Bencardino *et al.* [6], para definir o trabalho de deformação total, W_0 . O cálculo da energia de fractura, G_F , foi efectuado de acordo com o descrito na secção 3.3.3.5. Os resultados obtidos para a energia de fractura apresentam-se na Tabela 3.12 e estão de acordo com a equação (3.6).

Tabela 3.12 – Energia de Fractura

BC0.82F	0.577	N/mm
BC1.82F	13.071	N/mm
BC2.82F	12.213	N/mm

Verificou-se que quanto maior a capacidade de absorção de energia do material, maior é a deformação correspondente ao pico de carga e, conseqüentemente, maior é o desenvolvimento do ramo até atingir a carga máxima, conforme se pode observar na Figura 3.20. Estes resultados demonstram também a influência que a dispersão das fibras no betão podem ter, uma vez que para uma percentagem inferior de fibras, se obteve maior Energia de Fractura, indiciando a existência de uma maior concentração de fibras junto à secção do entalhe (Figura 3.21), onde as fibras são mais eficientes, levando assim ao resultado obtido diferente do espectável. Um efeito semelhante foi verificado na resistência à flexão.

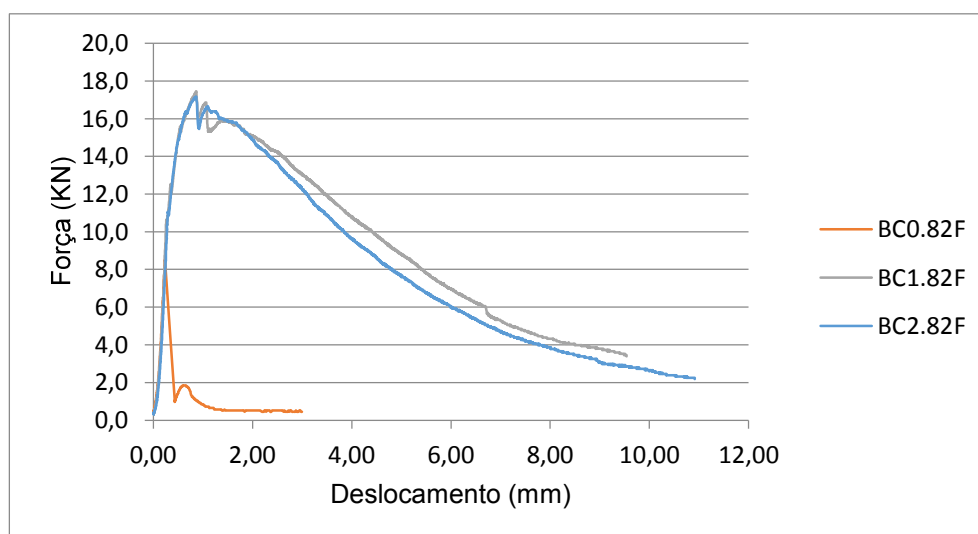


Figura 3.20 – Deslocamento do Betão (Ensaio Energia de Fractura)



Figura 3.21 - Evolução da fenda no ensaio da energia de fractura

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Considerações gerais

A análise dos resultados experimentais consistiu, essencialmente, em: (i) avaliar a influência das fibras e das nano-partículas no betão; (ii) estudar correlações entre as propriedades e os parâmetros estudados nos MRFAIN; (iii) comparar resultados experimentais com os códigos.

4.2. Estado fresco

Para avaliar a fluidez recorreu-se ao ensaio de espalhamento (flow test), onde o diâmetro de espalhamento representa um parâmetro da fluidez das misturas. A Fig. 4.1 mostra os resultados comparativos entre a mistura de referência e a mistura com apenas uma adição. Verifica-se que, à medida que a dosagem de fibras aumenta, o diâmetro de espalhamento apenas tem uma diminuição acentuada para uma dosagem de 3% de fibras metálicas. No mesmo sentido, observa-se na Figura 4.2 que, para as misturas com dois tipos de adição, o espalhamento não tem uma variação notória, uma vez que se aumentou ligeiramente a dosagem de superplastificante, por forma a manter o teor de ar e o espalhamento, com as diferentes percentagens de fibras. Foi assim notória a necessidade de introduzir uma maior quantidade de adjuvante, comparativamente à mistura de referência, de modo a manter o teor de ar pretendido bem como a trabalhabilidade.

Verifica-se notoriamente uma perda de trabalhabilidade, para dosagens de 3% de fibras, tendo essa mesma introdução de fibras um efeito na fluidez, muito devido à influência das mesmas no processo de amassadura.

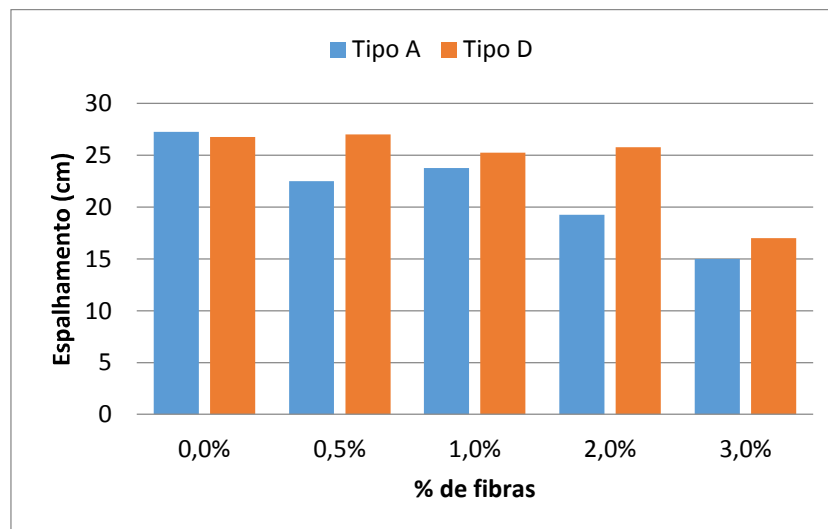


Figura 4.1 – Resultados do espalhamento para misturas do Tipo A e D

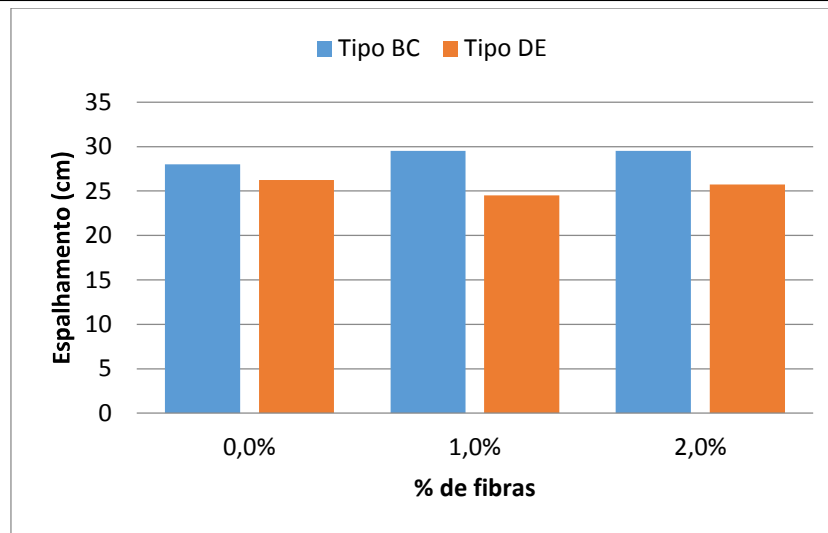


Figura 4.2 – Resultados do espalhamento para misturas do Tipo BC e DE

4.3. Estado endurecido

No estado endurecido foram caracterizadas propriedades mecânicas: resistências à compressão e tracção, módulo de elasticidade e energia de fractura.

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios dos MRFAIN, Constatou-se que a adição de fibras, e o aumento da sua dosagem, resultam no aumento das resistências à compressão e à principalmente à tracção. A adição de fibras resulta igualmente num aumento do módulo de elasticidade; em relação ao efeito das fibras na energia de fractura, embora as fibras provoquem um notório aumento da mesma, não é conclusivo este estudo a relação direta com a dosagem de fibras.

Os provetes de ensaio com presença de fibras tiveram uma alteração no tipo de fractura/rotura, uma vez que atingida a carga máxima, verificou-se uma maior deformação e sem destacamento total de betão, comparativamente ao betão sem fibras. Com o aumento da percentagem de fibras, o modo de rotura foi cada vez mais dúctil e desenvolveu-se uma superfície de corte acompanhada por uma deformação.

As diferenças mais notórias ocorreram nos betões com elevada percentagem de fibras, que tanto tiveram aumentos significativos das suas propriedades no estado endurecido, como perdas de fluidez nas propriedades no estado fresco. As adições e o tipo de cura apresentaram, conforme esperado, algumas melhorias das propriedades do betão, porém a pequena dimensão da amostragem, não permite que se quantifique com exactidão essa influência.

4.3.1. Resistência à compressão

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios dos MRFAIN, constatou-se que a adição de fibras e o aumento da sua dosagem, resultam num aumento significativo, da resistência à compressão. Nos provetes de ensaio, a presença das fibras alterou o tipo de fractura/rotura, com aumento da ductilidade, uma vez que atingida a carga máxima, verificou-se uma maior deformação e sem destacamento total de betão, comparativamente ao betão sem fibras. O aumento da resistência foi mais notório para os betões com 3% de fibras (elevada percentagem). Nas figuras seguintes apresentam-se a evolução da resistência à compressão, f_{cm} , em função do tipo de cura e das diferentes percentagens de fibras e nano-partículas utilizadas nos betões em estudo.

Na Figuras 4.3, verifica-se uma boa relação entre a resistência e a percentagem de fibras, sendo que a resistência à compressão aumenta, para as misturas estudadas cerca de 18 MPa para uma unidade percentual da dosagem volumétrica de fibras, comprovando-se assim a boa correlação demonstrada nas Figuras 4.4 e 4.5.

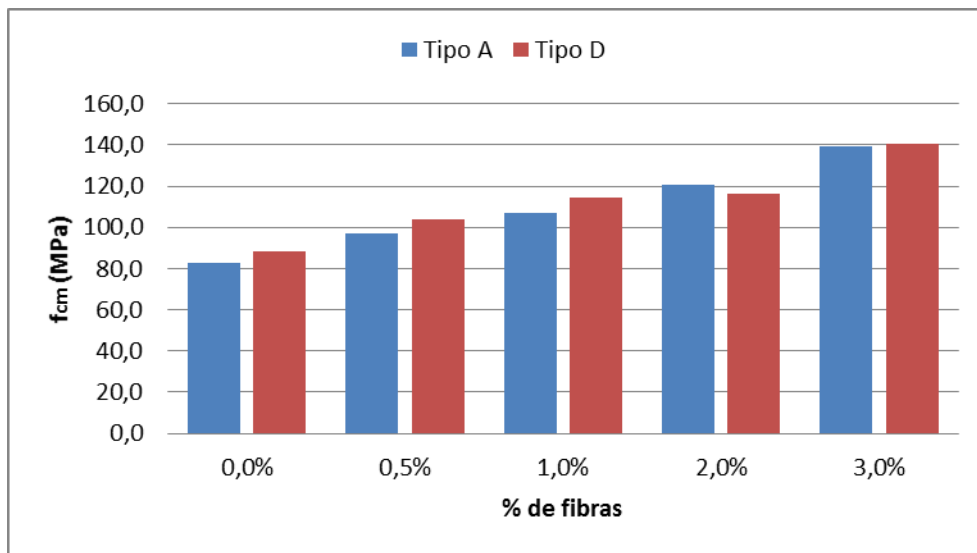
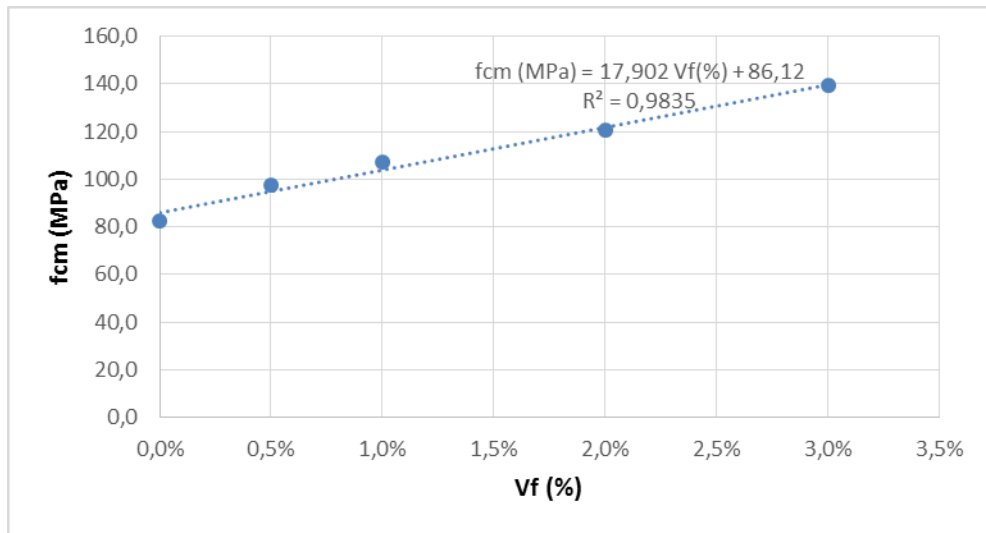
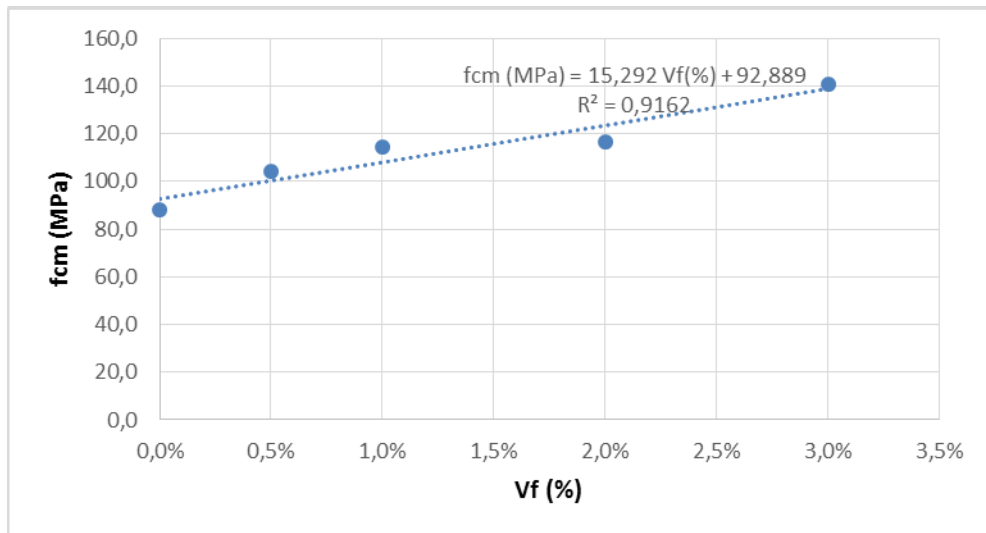


Figura 4.3 – Variação da resistência à compressão com o aumento da percentagem de fibras (Tipo A e D – cura normal)

Figura 4.4 - Evolução de f_{cm} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo A)Figura 4.5 - Evolução de f_{cm} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo D)

Nas Figuras 4.6 e 4.7 verifica-se para além da influência do aumento da dosagem de fibras na resistência à compressão, um ligeiro aumento da resistência à compressão com a adopção da cura especial, ao invés da cura normal, para o mesmo tipo de pasta ligante.

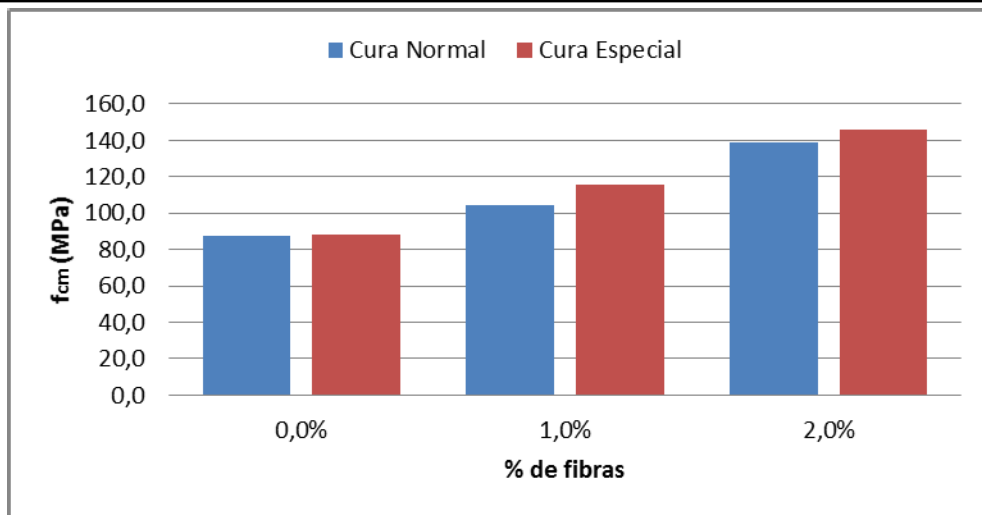


Figura 4.6 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo BC

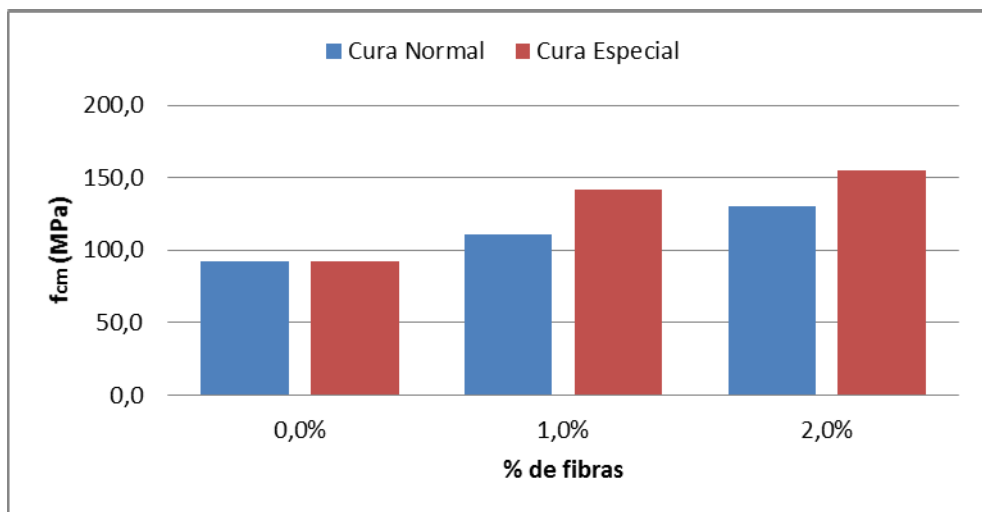


Figura 4.7 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo DE

Na Fig. 4.8, verifica-se a mesma tendência já observada do aumento da resistência à compressão com o aumento da dosagem volumétrica de fibras. Pode igualmente observar-se a influência de alguns tipos de adição, que melhoram ligeiramente a resistência à compressão, nomeadamente o tipo C, com adição de cinzas volantes.

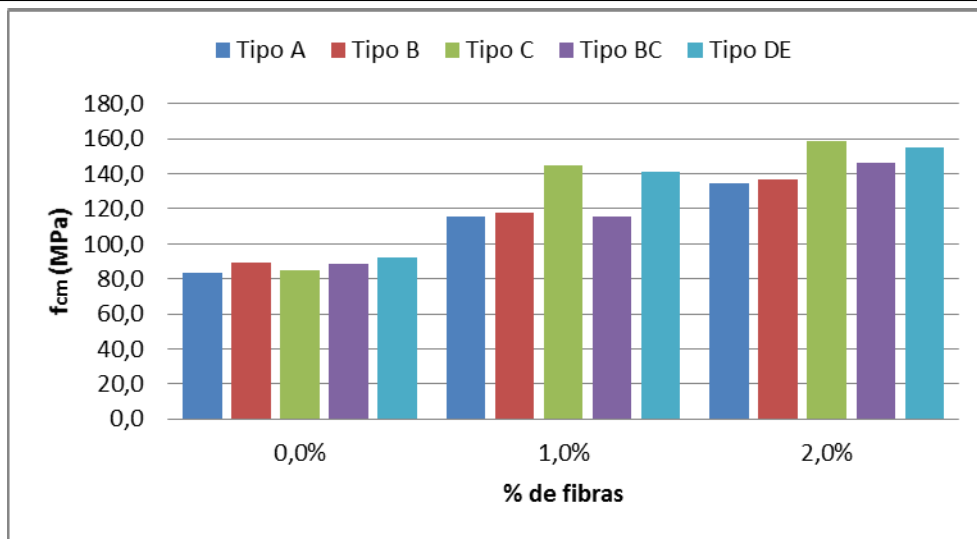


Figura 4.8 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo amostra e aumento da percentagem de fibras (cura especial)

Na Fig. 4.9, observa-se a influência das nano-partículas na resistência à compressão, que ao contrário do expectável, apenas têm um efeito positivo para as misturas sem adições, sendo até desfavoráveis nas misturas com adição de cinzas volantes e farinha de sílica, muito provavelmente, por poder existir menor compatibilidade química entre estas duas adições e as nano-partículas.

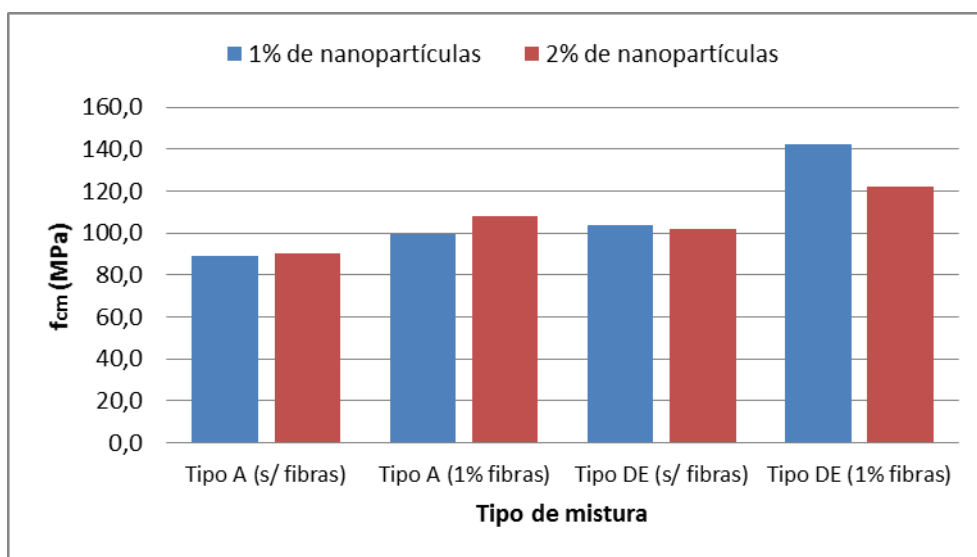


Figura 4.9 - Variação da resistência à compressão com a variação da percentagem de nano-partículas e fibras adicionadas (Tipos A e DE com cura especial)

Na Figura 4.10 apresentam-se resultados tendenciais relativamente à influência da cura especial nas misturas estudadas. Apesar de expectável o aumento da resistência à compressão com a adopção da cura especial, o que foi notório para a generalidade das misturas, na mistura DE e principalmente na D verificou-se perda de resistência com a cura especial.

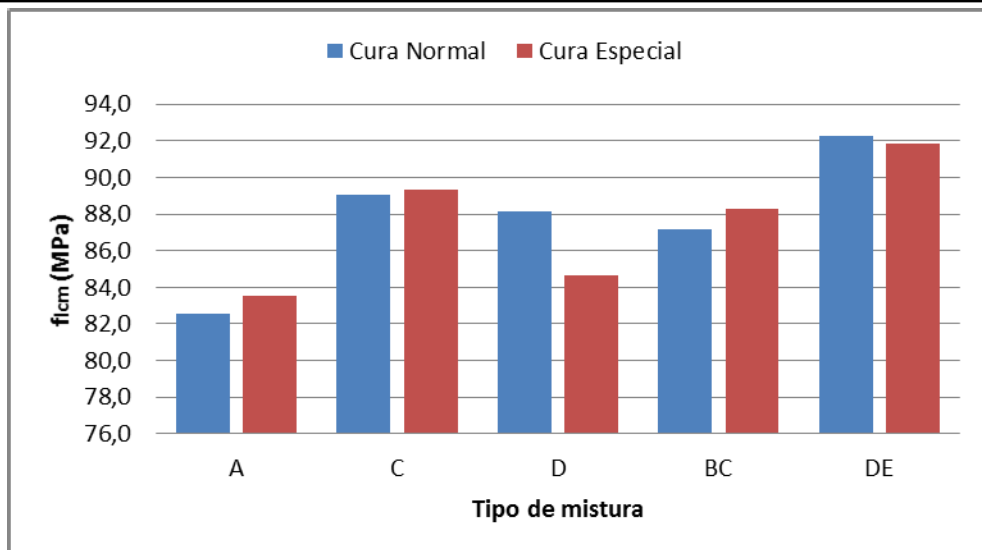


Figura 4.10 - Variação da resistência à compressão com a variação do tipo de cura e do tipo de amostra (sem fibras)

4.3.2. Resistência à tracção (por flexão)

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios dos MRFAIN, constatou-se que a adição de fibras, e o aumento da sua dosagem, resultam no aumento da resistência à tracção. Nos provetes de ensaio, a presença das fibras alterou o tipo de fractura/rotura, uma vez que atingida a carga máxima, verificou-se uma maior deformação e sem destacamento total de betão, comparativamente ao betão sem fibras. Nas figuras seguintes apresentam-se a evolução da resistência à tracção, f_{cf} , em função do tipo de cura e das diferentes percentagens de fibras e nano-partículas utilizadas nos betões em estudo.

Na Figura 4.11 verifica-se uma boa correlação entre a resistência e a percentagem de fibras, sendo que a resistência à tracção aumenta, tendencialmente, para as misturas estudadas cerca de 8 MPa para uma unidade percentual da dosagem volumétrica de fibras.

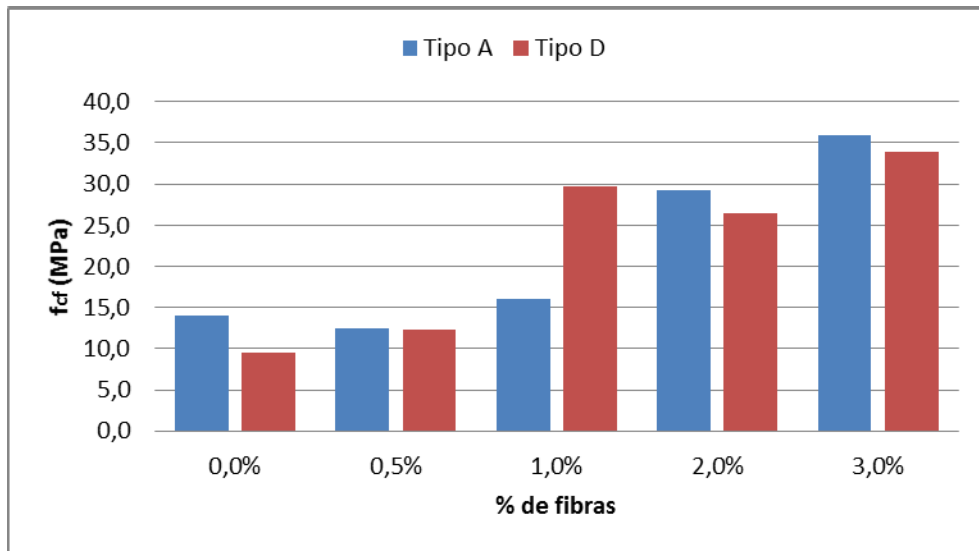


Figura 4.11 - Variação da resistência à tracção com o aumento da percentagem de fibras (Tipo A e D – cura normal)

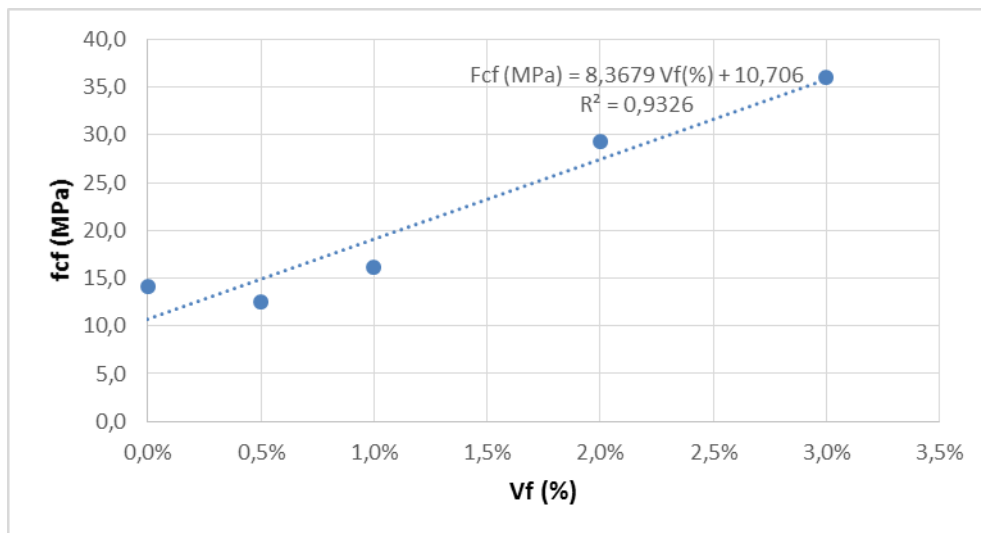


Figura 4.12 - Evolução de f_{cf} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo A)

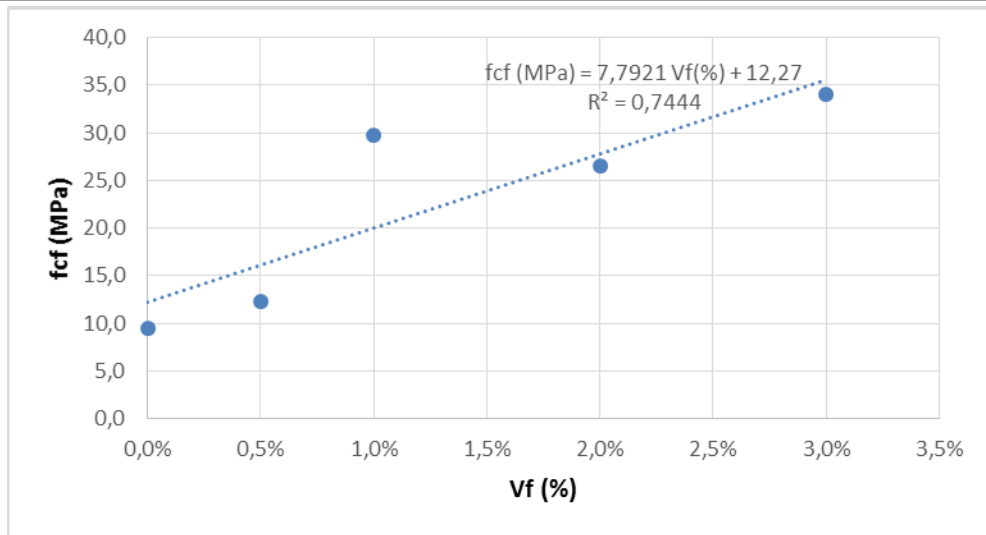


Figura 4.13 - Evolução de f_{cf} com a percentagem de fibras, V_f . (Misturas tipo D)

Nas Figuras 4.14 e 4.15 verifica-se para além da influência do aumento da dosagem de fibras na resistência à tracção, um aumento da resistência à tracção com a adopção da cura especial, ao invés da cura normal, para o mesmo tipo de pasta ligante. A excepção foi uma mistura, onde terá existido algum tipo de desvio responsável pelo resultado obtido não espectacular.

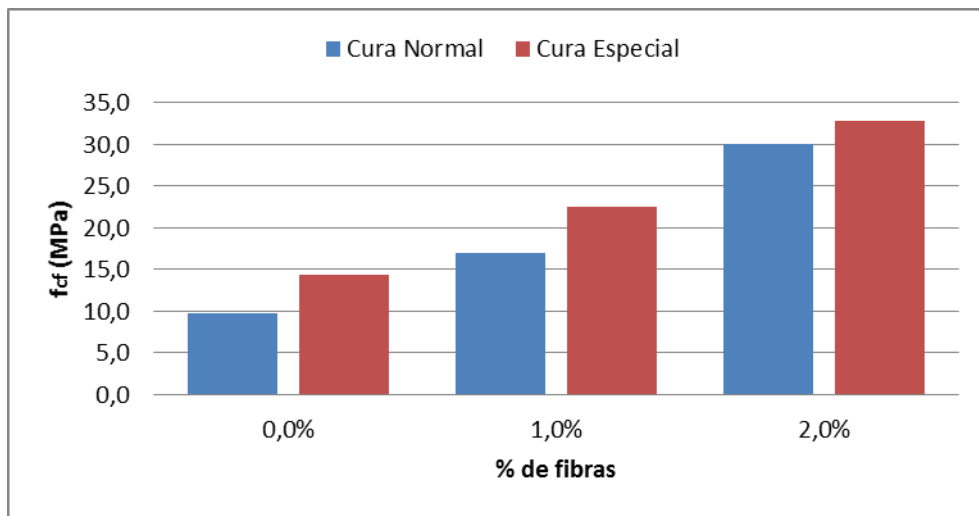


Figura 4.14 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo BC

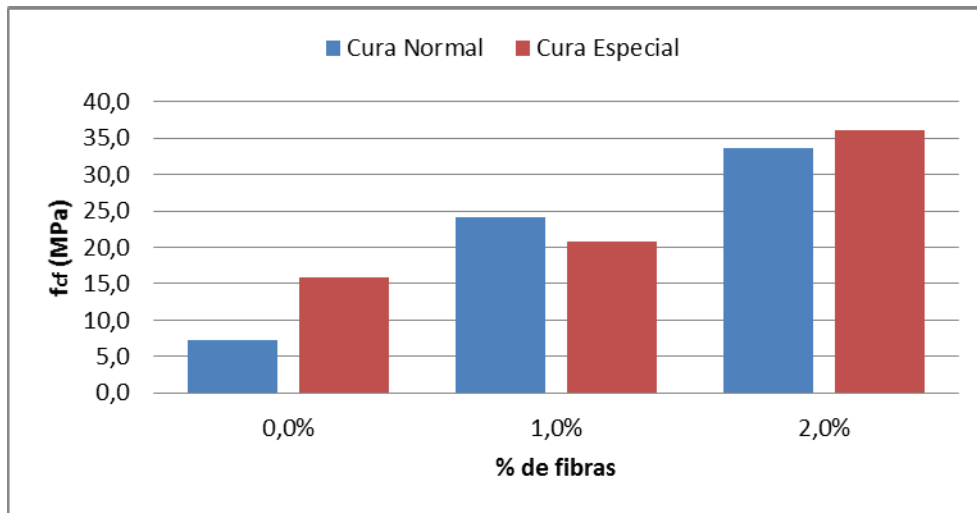


Figura 4.15 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo de cura e com o aumento da percentagem de fibras para uma amostra do tipo DE

Na Figura 4.16 verifica-se a mesma tendência já observada do aumento da resistência à tracção com o aumento da dosagem volumétrica de fibras. Pode igualmente observar-se a influência de alguns tipos de adição (misturas B e C com adições de sílica de fumo e de cinzas volantes), que melhoram ligeiramente a resistência à tracção, porém de uma forma pouco conclusiva, para a amostra em estudo.

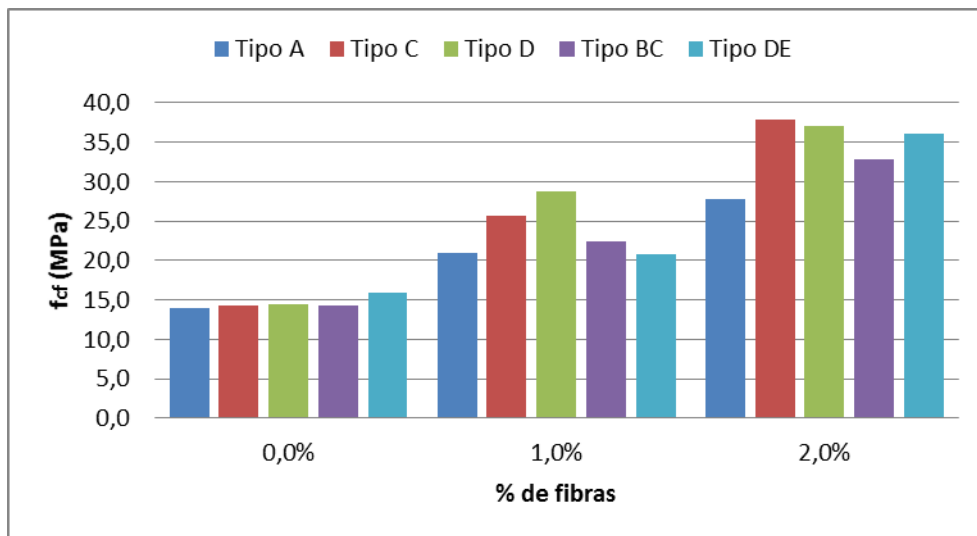


Figura 4.16 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo amostra e aumento da percentagem de fibras (cura especial)

Na Figura 4.17, observa-se a influência das nano-partículas na resistência à tracção, que ao contrário do ocorrido para o estudo da resistência à compressão, apresentam agora para ambos os casos um efeito positivo, com o respectivo aumento da resistência à tracção.

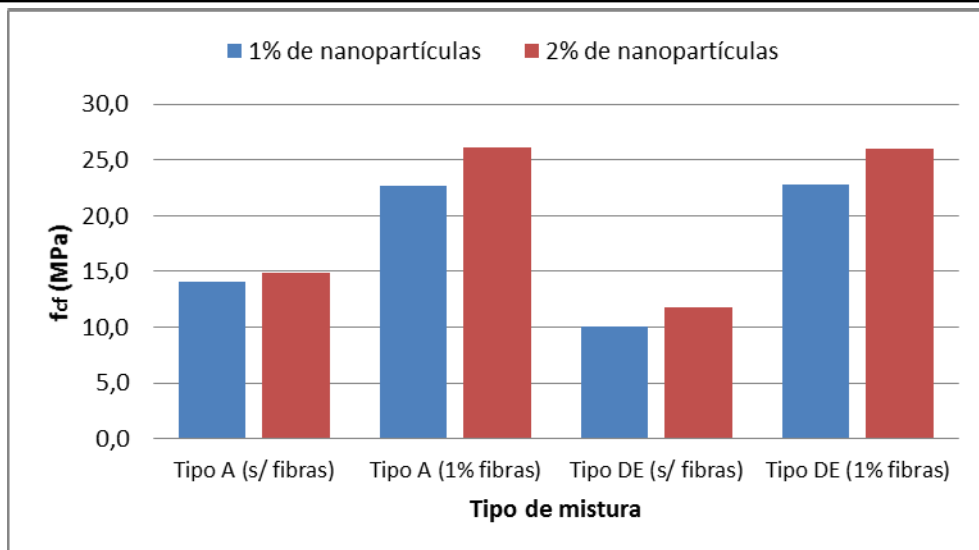


Figura 4.17 - Variação da resistência à tracção com a variação da percentagem de nanopartículas e fibras adicionadas (Tipos A e DE com cura especial)

Na Figura 4.18, verifica-se um aumento notório da resistência à tracção com a aplicação da cura especial nas misturas estudadas. Mais uma vez, se verifica que as adições utilizadas nas misturas em questão não apresentam resultados conclusivos, tendo nestas amostras inclusive, um resultado desfavorável com cura normal.

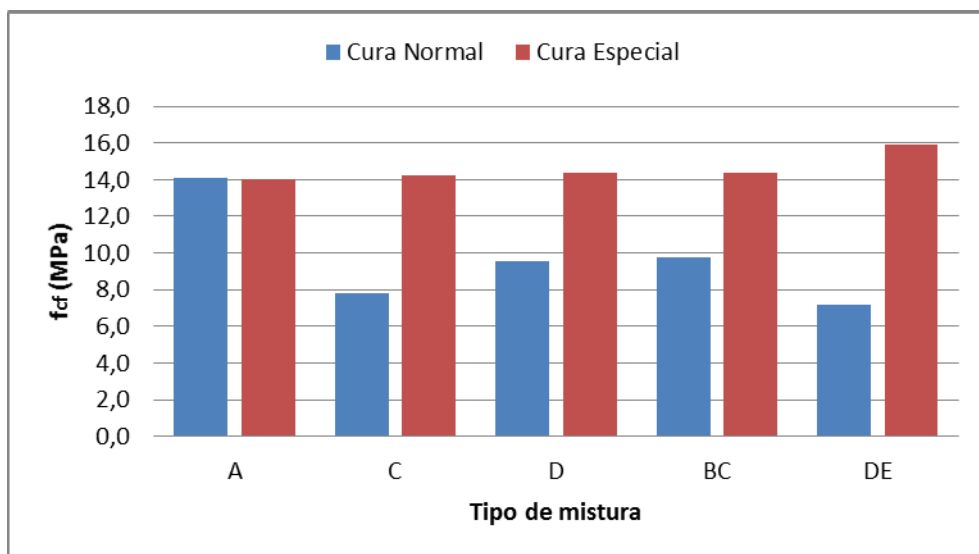


Figura 4.18 - Variação da resistência à tracção com a variação do tipo de cura e do tipo de amostra (sem fibras)

4.3.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, E , foi em ambos os casos afectado pela adição de fibras no betão, demonstrando uma ligeira influência das fibras metálicas nos provetes e na sua rigidez, pela capacidade de confinamento da matriz.

4.3.4. Energia de fractura

A capacidade de absorção de energia aumenta com a percentagem de fibras. Nos betões com fibras, registou-se um acréscimo significativo da energia de fractura, face ao betão sem fibras. Tal, prende-se com o facto de os betões reforçados com fibras necessitarem de mais energia para vencer os mecanismos de reforço e amarração das fibras. Apresenta-se na Figura 4.19 o gráfico do ensaio na mistura BC0.82, onde fica demonstrada claramente a influência das fibras metálicas na energia de fractura.

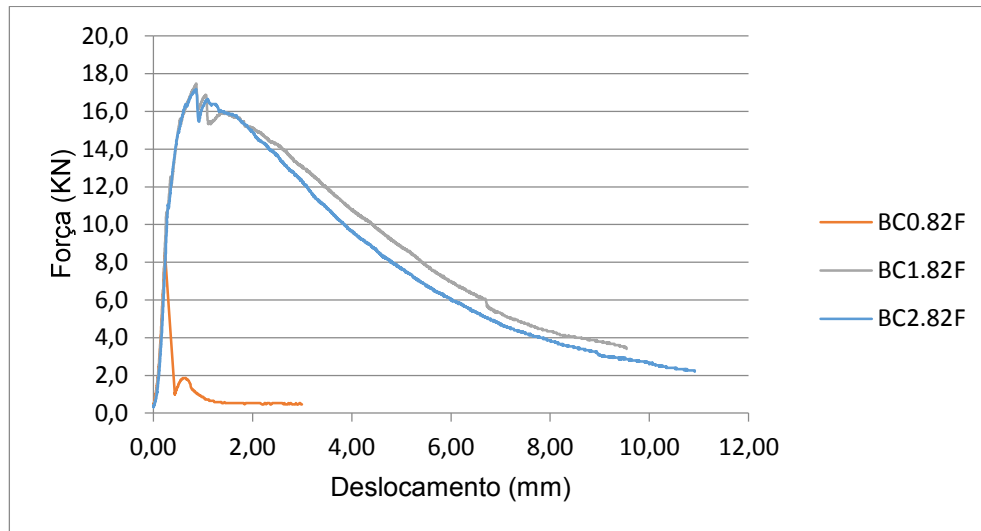


Figura 4.19 – Ensaio de Energia de Fractura

4.4. Comparação com outros estudos

Da análise dos resultados experimentais, relativos à caracterização das propriedades dos MRFAIN, foi possível observar a vantagem da incorporação de fibras de aço em betões, tanto a nível de resistência como de ductilidade; porém, ao contrário de alguns estudos já publicados, a influência das nano-partículas, não se revelou tão notória e alguns aspectos tão conclusiva. Estes resultados evidenciam a tendência já conhecida, da dificuldade de generalização dos ensaios com nano-partículas, dadas as suas propriedades muito específicas e variação da própria reactividade na matriz ligante, pelas diferenças de matéria prima e do processo produtivo de síntese.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Principais conclusões

Da análise dos resultados obtidos no estudo experimental realizado, é possível concluir:

1. A trabalhabilidade das misturas diminuiu com o aumento da dosagem de fibras, podendo esse efeito ser reduzido, com o aumento de superplastificante, até dosagens de 2% de fibras metálicas.
2. O aumento da dosagem de fibras resultou, conforme esperado, num aumento significativo da resistência mecânica das misturas de referência. O ganho chegou a atingir os 18 MPa por ponto percentual de fibras adicionadas à mistura.
3. As misturas com adições comuns (cinzas volantes, filler calcário, farinha de sílica e sílica de fumo) apresentaram, aos 28 dias, resistências pouco superiores do que a mistura apenas com cimento, não sendo por isso possível obter qualquer tipo de conclusão ou correlação.
4. Com a introdução de nano-partículas de SiO_2 na argamassa, obtiveram-se os melhores resultados de resistência à tração, mas resultados desfavoráveis no que respeita à resistência à compressão,
5. O tipo de cura especial revelou-se favorável ao aumento da resistência à tração, mas mais uma vez desfavorável no que respeita à resistência à compressão.

5.2. Desenvolvimento de trabalhos futuros

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, relacionados com o tema em estudo, e com base nos resultados e conclusões obtidas, sugerem-se os seguintes.

- Desenvolvimento e caracterização de MRFAIN reforçados com diferentes tipos de fibras de aço (matéria prima, e parâmetros geométricos) e nano-materiais, bem como com diferentes densidades e resistências mecânicas, no sentido de validar e melhorar as correlações e conclusões obtidas;
- Estudar aprofundadamente os vários parâmetros de ductilidade, associados aos MRFAIN, uma vez que estas soluções apresentam elevado desempenho e competitividade em inúmeras aplicações estruturais;
- Simulação numérica da resistência das fibras nos MRFAIN, nomeadamente os mecanismos de escorregamento entre a matriz e as fibras, em função dos vários parâmetros que condicionam esta interface;

- Estudar profundamente a adição de nano-materiais que aumentem claramente as resistências do MRFAIN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Balendran, R. V., Zhou, F. P., Nadeem, A., & Leung, A. T. (2002). *Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete*. Building and Environment 37, 1361 – 1367.
- [2] Barros, J. A. (1995). *Comportamento do betão reforçado com fibras. Análise experimental e simulação numérica*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [3] Barros, J. A. (1996). *Estado-da-arte dos betões reforçados com Fibras*. Engenharia Civil - UM, 3, 29-47.
- [4] Barros, J.A.O., Pereira, E.N.B., Santos, S.P.F., & Lourenço, L.A.P. (2006). *Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras - do laboratório à aplicação real*. Construnor 2006.
- [5] Barros, J.A.O., & Sena Cruz, J. (2001) *Fracture energy of steel fibre reinforced concrete*. Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 8, No. 1.
- [6] Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., & Swamy, R. N. (2010). *Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties*. Composites: Part B, 17-24.
- [7] Bhuvaneshwari, B., Sasmal, S., & Iyer, N. (2011). *Nanoscience to Nanotechnology for Civil Engineering – Proof of Concepts. Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment and Biomedicine*, WSEAS Press, p. 230-235.
- [8] Chodounsky, M. A. (2010). *Fibras metálicas para reforço de betão*. Obtido de Constructalia: www.constructalia.com
- [9] Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2003). *Durable fiber reinforced self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, 34, 249-254.
- [10] Costa, A., & Appleton, J. (2002). *Estruturas de Betão I*. Instituto Superior Técnico.
- [11] Costa, H. (2007). *Composição e caracterização mecânica de betões estruturais de agregados leves*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- [12] Costa, H., (2012). *Betões estruturais de agregados leves*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- [13] Costa, H., Júlio, E., & Lourenço, J. (2010). *Formulação e caracterização de betões estruturais de agregados leves auto-compactáveis*. 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável.
- [14] Cunha, V. M., Barros, J. A., & Sena Cruz, J. M. (2006). *Modelação analítica da influência da idade de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço no seu comportamento à compressão*. LNEC.
- [15] Esteves, D. (2012). *Desenvolvimento e caracterização de BEALACRFA*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

- [16] EuroLightCon: LWAC Material Properties-State-of-the-Art, Rel.BE96-3942/R2, Abril/99.
- [17] Ferrara, L., Park, Y., & Shah, S. P. (2007). *A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, 37, 957–971.
- [18] Ferreira, R. M. (2000). *Avaliação dos Ensaios de Durabilidade do Betão*. Guimarães: Universidade do Minho. Escola de Engenharia.
- [19] Holschemacher, K., Mueller, T., & Ribakov, Y. (2010). *Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete*. Materials and Design, nº 31, 2604-2615.
- [20] Instituto Português da Qualidade. (2005). *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. NP EN 206-1. Norma Portuguesa. Portugal.
- [21] Instituto Português da Qualidade. (2003). *Ensaios do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*. NP EN12390-1. Norma Portuguesa. Portugal.
- [22] Instituto Português da Qualidade. (2009). *Ensaios do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*. NP EN12390-2. Norma Portuguesa. Portugal.
- [23] Instituto Português da Qualidade. (2009). *Ensaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes*. NP EN 12390-3. Norma Portuguesa. Portugal.
- [24] Instituto Português da Qualidade. (2009). *Ensaios do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes*. NP EN 12390-5. Norma Portuguesa. Portugal.
- [25] Instituto Português da Qualidade. (2008). *Fibras para betão. Parte 1: Fibras de aço. Definições, especificações e conformidade*. NP EN 14889-1. Norma Portuguesa. Portugal.
- [26] Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1993). *Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão*. LNEC E397. Portugal.
- [27] Löfgren, I. (2005). *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Göteborg: Chalmers University of Technology
- [28] Lourenço, J., Júlio, E. Maranha, P. (2004). *Betões de agregados leves de argila expandida*, APEB.
- [29] Mehta, P. K., Monteiro, & P. J. M. (2008). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais Propriedades e Materiais*. IBRACON 2008.
- [30] Nazari, A. & S. Riahi, (2011). *Physical and mechanical behavior of high strength self compacting concrete containing ZnO2 nanoparticles*. Int. J. Mat. Res., 102: 560-571.
- [31] Oliveira, F. L. (2010). *Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria de la Construcció.

- [32] Olivito, R. S., & Zuccarello, F. A. (2010). *An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete*. Composites: Part B 41, 246-255.
- [33] Oltulu, M., & Sahin, R. (2011). *Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume*. Materials Science and Engineering A, 528, p. 7012-7019.
- [34] Peres, M. V. (2008). *Aparatos de Baixo Custo para Ensaio Biaxiais em Concretos Reforçados com Fibras de Aço*. Universidade Federal Do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia.
- [35] Rashad, A. M. (2013). *Effects of ZnO₂, Cu₂O₃, CuO, CaCO₃, SF, FA, cement and geothermal silica waste nanoparticles on properties of cementitious materials - A short guide for Civil Engineer*. Construction and Building Materials, p. 1120-1133.
- [36] RILEM TC50-FMC. *Determination of the fracture energy of mortar and concrete*.
- [37] RILEM TC 162-TDF. *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Final Recommendation*. Materials and Structures, Vol.35, pp. 579-582, November 2002b.
- [38] RILEM TC 197-NCM, W. Zhu, P. J. M. Bartos, A. Porro
- [39] Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). *Nanotechnology in concrete – a review*. Construction and Building Materials, 24, p. 2060-2071.
- [40] Sobolev, K., Gutiérrez, M. (2005). *How Nanotechnology Can Change the Concrete World: part 2*. American Ceramic Society Bulletin, Vol. 84, No. 11, p. 16-19.
- [41] Torgal, F. P. (2012). *Utilização de nanopartículas no desenvolvimento de betões de elevado desempenho*. Maquinaria, Perspectiva Global, p. 56-62.
- [42] Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). *Eco-efficient Construction and Building Materials*. Universidade do Minho.
- [43] Ulrix, E., & Ferreira, N. (2011). *State Of The Art – Betões com fibras em aplicações subterrâneas*. 1as Jornadas de Materiais na Construção.
- [44] Xu, B., & Shi, H. (2009). *Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete*. Construction and Building Materials 23, 3468-3474.