Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Samuel Leite Mateus

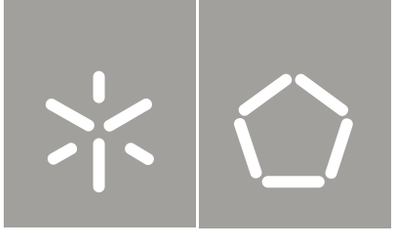
Betão Reforçado por Nanotubos de Carbono

Betão Reforçado por Nanotubos de Carbono

Pedro Samuel Leite Mateus

UMinho | 2013

outubro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Samuel Leite Mateus

Betão Reforçado por Nanotubos de Carbono

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Raul Fangueiro

outubro de 2013

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o culminar de um ciclo que se tornou realidade graças à contribuição de inúmeras pessoas que fazem parte da minha vida. A todas essas pessoas, expresso os meus mais sinceros agradecimentos.

Aos meus pais e irmãos expresso o meu maior agradecimento, por todo o apoio que me têm dado ao longo da vida. Sem eles nada disto seria possível. Se sou o que sou é devido a eles. Obrigado por tudo!

Ao meu orientador Professor Raul Fangueiro pela paciência, dedicação, confiança que me transmitiu ao longo da dissertação. Os seus ensinamentos foram valiosos. À aluna de doutoramento Shama Parveen, pela sua importantíssima e decisiva colaboração.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em especial ao Carlos, por toda a sua colaboração na realização dos ensaios que compõe a dissertação e toda a sua disponibilidade para ajudar.

Um especial agradecimento aos meus amigos de infância e aos meus camaradas Combatentes que me têm acompanhado ao longo da vida, nos bons e maus momentos. Obrigado por poder ser vosso amigo e pela enorme amizade partilhada.

E a todos que, embora não mencionados, ajudaram direta ou indiretamente na minha vida académica que culminou com esta dissertação.

RESUMO

O reforço do betão com fibras tem sofrido grandes avanços ao longo dos últimos anos. Estes avanços tornaram possível a introdução de nanotubos de carbono, permitindo o controlo da fissuração a uma escala nanométrica.

As fibras têm ganho cada vez mais espaço às armaduras convencionais, tendo em vista o reforço do betão, na construção civil, devido às suas excelentes propriedades, mecânicas, físicas e químicas. Entre os vários materiais fibrosos que têm sido testados como reforço do betão, têm emergido os nanotubos de carbono. Estes destacam-se pelo seu elevado módulo de elasticidade, baixa densidade e boa condutividade elétrica, que possibilitam o aumento das propriedades mecânicas da argamassa.

O presente trabalho, numa primeira fase, aborda a utilização das fibras como reforço no betão, identificando as principais fibras utilizadas, assim como as suas principais propriedades, vantagens e desvantagens. De seguida, é executado desenvolvimento experimental onde é estudada a técnica de dispersão dos nanotubos de carbono em água. Posteriormente, procedeu-se à elaboração dos provetes de argamassa, onde a adição dos nanotubos de carbono dissolvidos em água é adicionada de forma manual ao cimento. Por fim, realizam-se ensaios à flexão e compressão em argamassas que contêm nanotubos de carbono, assim como ensaios de porosidade. Tanto a elaboração dos provetes como a realização dos ensaios foram executados com base nas Normas Europeias.

A adequada dispersão dos nanotubos na matriz cimentícia é a chave para a melhoria das propriedades do betão. Com a inclusão dos nanotubos como reforço do betão obtiveram-se resultados satisfatórios, nomeadamente o grande aumento de rigidez que estes proporcionaram à argamassa, sem afetar a trabalhabilidade, assim como a diminuição da massa volúmica das mesmas. As amostras de argamassa que contêm nanotubos do tipo SWNT (*single wall nanotubes*) são as que apresentam melhores resultados.

Palavras-chave: Fibras, betão reforçado com fibras, carbono, nanofibras, betão reforçado com nanofibras, nanotubos de carbono.

ABSTRACT

Fiber-reinforced concrete has undergone major advances over the last years. The technical achievements turned possible the introduction of carbon nanotubes, allowing control of cracking at a nanometric scale.

Fibers have increasingly gain space to conventional armour, in concrete reinforcements, due to their excellent mechanical, chemical and physical properties. Among several fibers already used as concrete reinforced, carbon nanotubes emerged as a promising solution. These stand out for their high modulus of elasticity, low density and good electrical conductivity, allowing the increase of mechanical properties of mortar.

Within this research work, several percentages of carbon nanotubes have been studied when used as reinforcement of cimenticious composites. Moreover, functionalized carbon nanotubes have been also used to check for their influence on the mechanical properties. Several samples of mortar reinforced with carbon nanotubes have been prepared and tested under tensile and compression, according to the existing EN standards.

The inclusion of nanotubes as concrete reinforcement led to satisfatory results, in particular, weight reduction and great increase of rigidity.

Keywords: Fibers, Fiber-reinforced concrete, carbon, nanofibers, reinforced concrete with nanofibers, carbon nanotubes.

ÍNDICE DE TEXTO

AGRADECIMENTOS iii

RESUMO v

ABSTRACT vii

ÍNDICE DE FIGURAS xiii

ÍNDICE DE QUADROS xv

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS xvii

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Enquadramento 1

1.2. Objetivo 2

1.3. Organização 3

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE (DO CONHECIMENTO) 5

2.1. Betão Reforçado com Fibras (BRF) 5

2.2. Tipos de Fibras 8

2.2.1. Fibra de aço 13

2.2.2. Fibra de vidro 15

2.2.3. Fibra de Polipropileno 16

2.2.4. Fibra de Carbono 17

2.3. Nanofibras 18

2.4. Betão Reforçado com Nanofibras 22

2.4.1 Nanotubos de carbono (CNT_S) 23

2.4.1.1. Síntese dos Nanotubos de carbono 26

2.4.1.2. Técnicas de dispersão dos Nanotubos de carbono 29

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS 31

3.1. Materiais 31

3.1.1. Nanotubos de Carbono (CNTs) 31
3.1.2. Ligante 33
3.1.3. Agregados 33
3.1.4. Outros Materiais 34
3.2. Combinação nanotubos/argamassas 34
3.2.1. Dispersão dos CNTs na Água 35
3.3. Preparação dos provetes de argamassa 37
3.3.1. Processamento das amassaduras 38
CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA REFORÇADA COM NANOTUBOS DE CARBONO 40
4.1. Planeamento das experiências 40
4.1.1. Ensaio de espalhamento 40
4.1.2. Ensaio de resistência à flexão 41
4.1.2.1. Módulo de Elasticidade ou de Young 43
4.1.3. Ensaio de resistência à compressão 43
4.1.4. Ensaio de absorção da água por imersão (porosidade) 44
4.2. Resultados obtidos e respetiva análise 45
4.2.1. Ensaio de espalhamento 45
4.2.2. Variação da massa volúmica dos provetes 46
4.2.3. Ensaio de resistência à flexão 49
4.2.3.1. Módulo de Elasticidade ou de Young 52
4.2.4. Ensaio da resistência à compressão 56
4.2.5. Ensaio de absorção da água por imersão (porosidade) 58
4.3. Análise económica 59
CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO 62
5.1. Perspetivas para futuros trabalhos de investigação 65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

ANEXO 1 – Caraterísticas do cimento Portland usado 71

ANEXO 2 – Resultados do Ensaio à Flexão 72

ANEXO 3 – Resultados do Ensaio à Compressão 73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração das tensões de betão sem fibras (esquerda) e Concentração das tensões de betão com fibras (direita) 6

Figura 2 - Aplicações das fibras em obra 7

Figura 3 - Ilustração das aplicações das fibras em vários elementos de betão 7

Figura 4 - Diagrama tensão *vs* extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço 13

Figura 5 - Vários tipos de fibras de aço 14

Figura 6 - Fibra de vidro dispersa (esquerda) e fibra de vidro orientada longa (direita) 15

Figura 7 - Exemplos de fibras de polipropileno 16

Figura 8 – Fibras de carbono dispersas aleatoriamente 18

Figura 9 - Comparação de um fio de cabelo com nanofibras 19

Figura 10 - Fibra a atravessar o cone de Taylor 20

Figura 11 - Representação esquemática do processo de fiação eletrostática 21

Figura 12 – a) Uma folha apenas, nanotubos de camada simples, SWNT; b)Várias folhas concêntricas, nanotubos de camada múltipla, MWNT (o diâmetro final depende do número de camadas) 24

Figura 13 - Imagens de microscópio ótico de SWNT, com boa dispersão (esquerda) e com má dispersão com numerosos SWNTs aglomerados (direita) 25

Figura 14 - Representação esquemática do método de descarga de arco elétrico 27

Figura 15 - Representação esquemática de um reator CVD 28

Figura 16 - Representação esquemática do aparato experimental de ablação/vaporização por laser 29

Figura 17 - Esquema com as técnicas de dispersão dos CNTs em água 30

Figura 18 - Nanotubos do tipo: a) MWNT; b) SWNT; c) MWNT-COOH e d) SWNT-COOH 32

Figura 19 – Saco de areia normalizada utilizado 34

Figura 20 – Agitadora magnética 36

Figura 21 – Balança tipo capela 36

Figura 22 - Equipamento de ultrassons 36

Figura 23 - Imagens microscópicas à escala 100 μm de algumas amostras de CNTs dispersos em água 37

Figura 24 - Moldes utilizados 160 × 40× 40 mm 38

Figura 25 – Mistura manual dos CNTs com o cimento 39

Figura 26 – Misturadora "*flat-beater*" 39

Figura 27 – Câmara de cura 39

Figura 28 – Desmoldagem dos provetes 39

Figura 29 – Mesa de espalhamento (esquerda) e ensaio de espalhamento (direita) 41

Figura 30 – Ensaio à flexão segundo a norma EN 1015-11, de 1999 41

Figura 31 – Execução do ensaio à flexão 42

Figura 32 – Execução do ensaio à compressão 44

Figura 33 – Balança HD 1200, de 1200 gramas, com precisão de 0,01 grama 45

Figura 34 – Gráfico de barra com a resistência à flexão média e respetivo desvio padrão 50

Figura 35 – Relação entre a resistência à flexão e o comprimento de flexão dado pela máquina 51

Figura 36 – Curvas Tensão/Deformação resultantes do ensaio à flexão 53

Figura 37 – Gráfico de barras com o módulo de elasticidade médios e respetivo desvio padrão 55

Figura 38 – Gráfico de barras com a resistência à compressão média e respetivo desvio padrão 57

Figura 39 – Gráfico de barras com o custo da cada argamassa, em euros [€] 60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Compilação das propriedades mecânicas de materiais vulgarmente utilizados no betão 11

Quadro 2 - Comparação dos nanotubos de carbono com os materiais convencionais usados como reforço 24

Quadro 3 - Condições de crescimento 28

Quadro 4 - Propriedades físicas dos nanotubos de carbono 32

Quadro 5 - Distribuição do tamanho das partículas de areia 33

Quadro 6 - Percentagem e quantidades utilizadas de CNTs, Pluronico e fosfato de tributilo . 35

Quadro 7 - Composição da argamassa de referência 38

Quadro 8 - Resultados do ensaio ao espalhamento, em centímetros [cm] 46

Quadro 9 - Diferença de peso médio dos provetes que contêm CNTs em relação ao provete de referência 47

Quadro 10 - Tenções de flexão médias obtidas 49

Quadro 11 - Módulos de elasticidade médios obtidos 54

Quadro 12 - Tensões de compressão médias obtidas 56

Quadro 13 - Percentagem de água absorvida pelos provetes 58

Quadro 14 - Custo total de cada argamassa, em euros [€]..... 59

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

BRF - Betão Reforçado com Fibras;

BRFA - Betão Reforçado com Fibras de Aço;

cm - Centímetro;

CNTs – *Carbon nanotubes* - Nanotubos de carbono;

CNFs – *Carbon* nanofibers - Nanofibras de carbono;

E - Módulo de Elasticidade ou de Young;

EN- *European Norm* – Norma europeia;

FTrib - Fosfato de Tributilo;

g/cm^3 - Grama por centímetro cubico;

GPa - Giga Pascal;

kHz - Quilohertz

km - Quilómetros;

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

m^2/g – Metros quadrados por grama;

mm – Milímetro;

mm^2 – Milímetros quadrados;

MPa - Mega Pascal;

MWNT - *Multi-walled nanotubes* (Nanotubos de parede múltipla);

MWNT-COOH - Nanotubos de parede múltipla funcionalizados com ácido carboxílico;

N – Newton;

N/s – Newton por segundo;

NaDDBS - *Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate* - DodecilBenzeno de Sulfato de Sódio

nm - Nanómetro (10^{-9} metros);

Pa – Pascal;

PAN – Poliacrilonitrilo;

Plu - Pluronico F-127;

SWNT - *Single-wall nanotubes* (Nanotubos de camadas simples);

SWNT-COOH – Nanotubos de parede simples funcionalizados com ácido carboxílico

TPa - Tera pascal;

ZrO_2 - Dióxido de zircónio;

µm - Micrómetro (10^{-6} metros);

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O estudo do betão reforçado com fibras e nanofibras/nanotubos surge da necessidade de encontrar materiais e métodos construtivos adaptados às condicionantes atuais, em que a preservação ambiental e a segurança da construção impõem altos padrões de desempenho, ao mesmo tempo que restrições de diversas índoles, financeiras, tecnológicas e de outra natureza, a par da cada vez maior escassez de recursos naturais, determinam a procura de novos materiais capazes de responder a estes requisitos (Gonzalez, J., (2007)).

A aplicação de fibras como material de reforço já tem milhares de anos. Segundo reza a história, a civilização egípcia utilizava fibras de palha e de crina de cavalo, tendo em vista o reforço dos blocos de argila, utilizados na construção. No século XIX já se utilizavam barras de ferro para reforçar alvenarias, abrindo-se assim o caminho para o desenvolvimento do betão armado (Moreia, A. 2008).

As duas Grandes Guerras, foram as grandes impulsionadoras para o desenvolvimento das fibras. O grande avanço tecnológico a seguir à II Guerra Mundial, está diretamente ligado ao aparecimento das fibras sintéticas. O desenvolvimento recente do betão reforçado com fibras (BRF) teve como base o desenvolvimento de fibras em diferentes períodos da história incluindo (Ferreira, N., (2008)):

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

Estas fibras têm sido apostas fortes na construção civil devido às suas excelentes propriedades mecânicas. A utilização destas fibras como reforço do betão aumenta consideravelmente a ductilidade e a capacidade de absorção de energia dos betões (Barros, J., 1996). Entre os demais materiais estudados atualmente, as fibras de carbono têm merecido uma atenção especial devido às suas caraterísticas particulares, das quais se destacam a sua baixa

densidade associado a uma elevada resistência mecânica, e também devido à sua excelente condutividade térmica, existe a possibilidade de esta poder monitorizar a durabilidade da estrutura (Ferreira, N., (2008)).

Atualmente, diversos grupos de investigação estão focalizados no estudo de fibras à escala nanométrica - as nanofibras. Estas apareceram pela primeira vez nos finais do século XX, devido ao desenvolvimento da nanotecnologia. As nanofibras são já consideradas o material mais importante do seculo XXI.

As nanofibras são fibras produzidas à escala nanométrica. Esta escala não é visível a olho nu, sendo que, por exemplo, uma nanofibra é normalmente 70 vezes inferior a um fio de cabelo. Sendo incrivelmente pequenas, é difícil produzi-las à escala industrial, sendo que atualmente apenas existe um processo com essa capacidade, processo esse que utiliza a técnica de fiação eletrostática.

À medida que a investigação sobre as nanofibras vai avançando, estas vão ganhando terreno na construção civil. Tal como as fibras, as nanofibras também têm excelentes propriedades mecânicas, e têm a vantagem de serem ainda mais pequenas que as fibras convencionais. Aqui, tal como nas fibras, destacam-se as nanofibras de carbono, nomeadamente os nanotubos de carbono (CNTs). Estes podem ser de parede única, nanotubos de camada simples (SWNTs), ou de várias paredes concêntricas, nanotubos de camada múltipla (MWNTs). Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, físicas, químicas e elétricas, os nanotubos têm merecido grande destaque por parte dos investigadores. Atualmente, a sua grande desvantagem ainda é o seu elevado custo.

1.2. Objetivo

O principal objetivo da introdução de nanotubos em matrizes cimentícias deve-se à possibilidade de controlar a fissuração à escala nanométrica, sendo que este controlo ainda não é feito de uma forma eficaz. Atualmente, a utilização das fibras permite controlar a fissuração à escala macro e micro.

Os nanotubos de carbono são atualmente um dos materiais mais importantes que se encontram sob pesquisa, e a sua incorporação na engenharia civil parece ser cada vez mais real.

Seguindo este propósito, este projeto de investigação tem como objetivo o estudo das propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz cimentícia reforçados com nanotubos de carbono. Assim, pretende-se estudar o comportamento de betão/argamassas reforçadas com CNTs à flexão e compressão, e perceber de que forma a percentagem e a funcionalização do reforço influenciam o comportamento do material resultante.

A dispersão adequada dos nanotubos na matriz cimentícia é o desafio mais importante que os investigadores neste domínio enfrentam. Neste sentido, a qualidade da dispersão é igualmente um objeto de estudo neste projeto de investigação pelo que serão estudadas técnicas de dispersão dos CNTs. Como a mistura dos CNTs diretamente no cimento pode conduzir a uma dispersão não homogénea, a dispersão dos CNTs será feita em água (Parveen, S., et al., 2013).

Os CNTs poderão ser, num futuro muito próximo, o material de eleição utilizado como reforço do betão substituindo a armadura convencional em aço, e as próprias fibras.

1.3. Organização

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos, incluindo ainda uma secção com anexos.

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento geral do tema e os objetivos propostos para a elaboração da dissertação.

O Capítulo 2 aborda os conceitos teóricos do tema tendo em conta o estado do conhecimento estabelecido para este domínio, caraterizando-se alguns tipos de fibras e de nanofibras, nomeadamente os nanotubos de carbono e exibindo as propriedades físicas e mecânicas das mesmas.

O Capítulo 3 descreve e carateriza os materiais, equipamentos utilizados no trabalho experimental, assim como todo o processo de dispersão dos CNTs na água e o processo de elaboração dos provetes de argamassa.

No Capítulo 4 é tratada toda a informação necessária para a realização do programa experimental. Neste capítulo efetua-se ainda a análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

Por o último, no Capítulo 5 são apresentadas todas as conclusões retiradas do programa experimental, apresentando-se ainda as perspetivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE (DO CONHECIMENTO)

2.1. Betão Reforçado com Fibras (BRF)

O betão é o material mais utilizado na construção civil, sendo um dos mais versáteis. Este é constituído pelos dois recursos mais consumidos em todo o Mundo (água e cimento, respetivamente), sendo com naturalidade que, ao longo dos anos, tenham surgido novas formas de melhorar o seu desempenho. O betão, tal como se sabe, na sua forma simples tem uma grande resistência à compressão, mas, pelo contrário, a resistência à tração é baixa, apresentando também pouca capacidade de deformação. As investigações ao longo destes anos têm vindo a concentrar esforços com vista a melhorar o desempenho do betão à tração, introduzindo reforços no mesmo, sendo que atualmente o reforço mais utilizado é a armadura convencional em aço.

As fibras, apesar de serem utilizadas para reforço desde os nossos antepassados, como já foi referido anteriormente, só nos últimos anos, devido ao avanço das tecnologias, é que têm ganho grande espaço e importância na construção civil. Estas são cada vez mais correntes na construção civil, devido a apresentarem elevadas propriedades mecânicas (destaque para elevado módulo de elasticidade, E) e baixa massa volúmica. Estas caraterísticas contribuem para o aumento significativo da rigidez do betão. Assim sendo, as fibras tendem, com o passar do tempo, a substituir a armadura em aço, tradicionalmente usada. As fibras são já usadas correntemente, para reforço do betão, sendo integradas na armadura convencional, substituindo-a, parcialmente ou na sua totalidade. Outro argumento que pode influenciar na substituição da armadura convencional pelas fibras, está relacionado com o fato de a produção de uma armadura convencional requerer mão-de-obra cara e especializada, tanto na dobragem como na colocação, sendo que o tempo despendido para a produção da mesma é igualmente moroso. Assim, devido a estes fatores existe uma maior tendência para a utilização das fibras como reforço do betão, em detrimento da armadura convencional.

As fibras são adicionadas ao betão, a fim de reforçar a mistura, aumentando a resistência à fratura e estabilizando a fissuração (Rosado, K., Guise, C., Rita, R., e Fangueiro, R., 2011). O

betão reforçado com fibras (BRF) é um material compósito. Um material compósito, por definição, é uma mistura de vários materiais onde um garante a ligação - matriz, neste caso o betão, e outro garante a resistência - o reforço, neste caso, a fibra. As fibras normalmente adicionadas, são curtas e aleatoriamente distribuídas no betão para reforçar a mistura, oferecer resistência à iniciação da fendilhação e, principalmente, controlar a propagação da mesma. A magnitude da resistência e de outras propriedades mecânicas fornecidas ao betão são dependentes do tipo de fibra, propriedades da matriz e da interface fibra-matriz, bem como altamente influenciadas pela dispersão de fibras dentro da matriz cimentícia (Rosado, K., Guise, C., Rita, R., e Fangueiro, R., 2011). Por outras palavras, e observando a *Figura 1*, as fibras quando solicitadas têm a capacidade de agir como uma "ponte de transferência" de tensões entre os constituintes que compõe a sua matriz, que atuam transversalmente às fissuras. Assim, obtém-se uma elevada redução da velocidade de propagação das fissuras no betão, que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil (Silva, B. 2005).

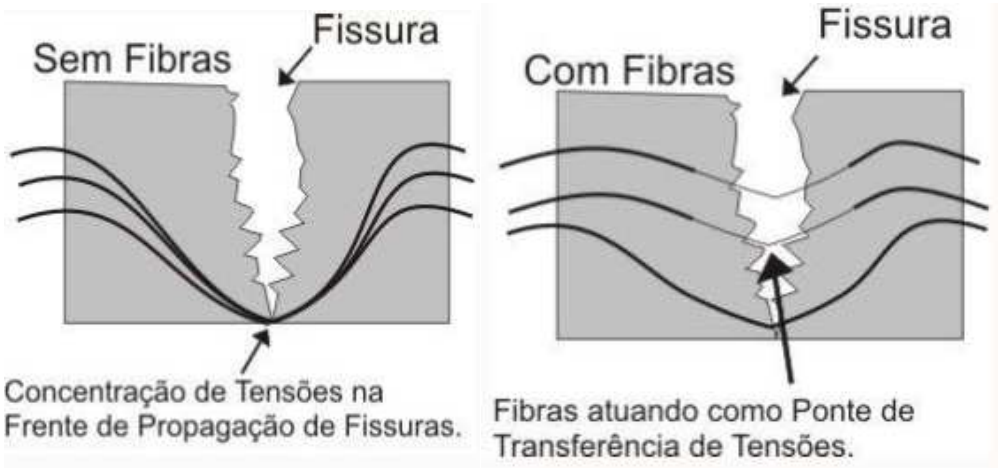


Figura 1 – Concentração das tensões de betão sem fibras (esquerda) e Concentração das tensões de betão com fibras (direita) (Fonte: Martins, A., 2012)

As fibras no reforço interior do betão são adicionadas aletoriamente e dipersas na matriz cimentícia, sendo que para elementos de betão finos, poderão igualmente ser usadas malhas de fibras contínuas. No caso do reforço exterior do betão, as fibras são normalmente utilizadas em forma de tecidos, sendo que estas não fazem parte da matriz cimentícia e geralmente são utilizadas para reparação da estrutura.

O betão reforçado com fibras é já utilizado em várias aplicações, tal como podemos observar na *Figura 2*, quer aplicado sozinho ou em combinação com a armadura convencional;

também têm sido utilizados como materiais de suporte em trabalhos de reparação e reabilitação, tal como se pode observar na *Figura 3* (Naaman, 2007).

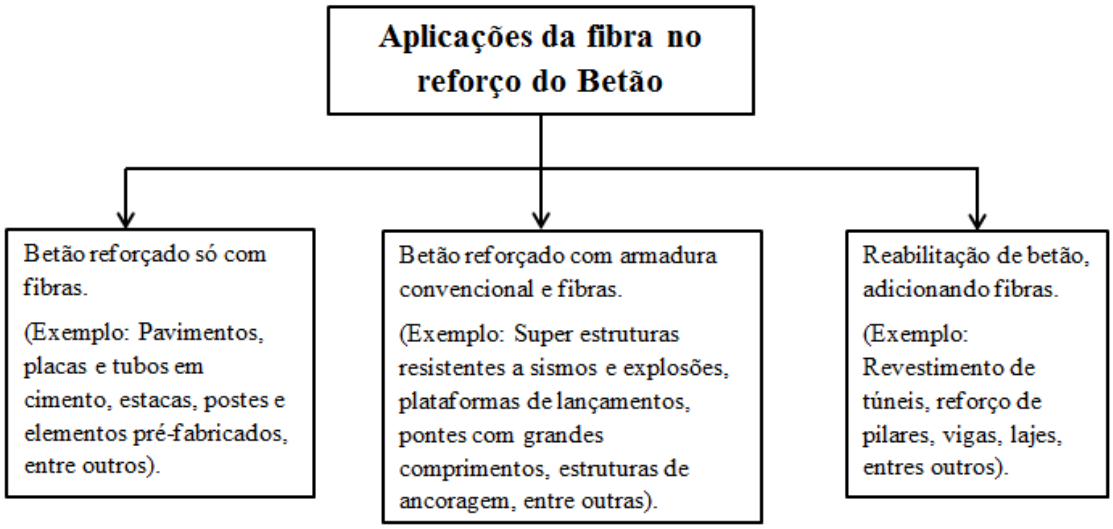


Figura 2 – Aplicações das fibras em obra, (Fonte: Adaptado de Naaman, 2007)

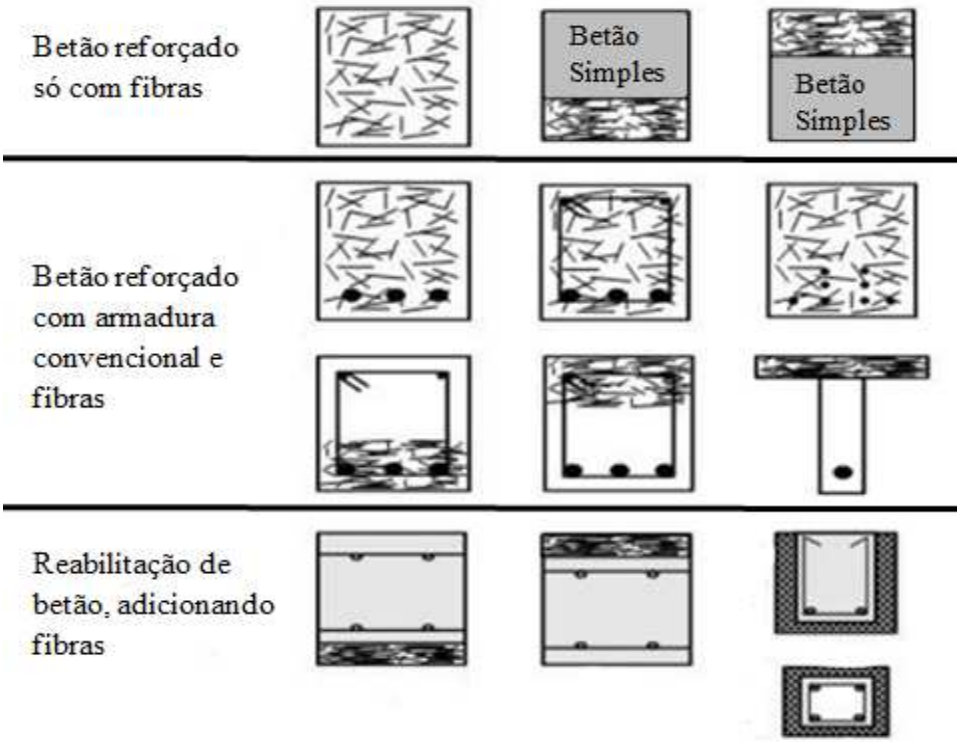


Figura 3 - Ilustração das aplicações das fibras em vários elementos de betão (Fonte: Adaptado de Naaman, 2007)

Como se pode ver na *Figura 2*, as fibras já são aplicadas em vários tipos de obras, sendo que, em alguns casos, estas já substituem, na íntegra, a armadura convencional, sendo já muito frequente o seu uso em pavimentos, por exemplo. Noutros casos, as fibras são utilizadas em conjunto com a armadura convencional, colaborando conjuntamente no reforço da estrutura, já muitos utilizados em estruturas super resistentes e zonas de ancoragem. As fibras podem igualmente ser utilizadas no exterior do elemento de betão para reparação e reabilitação, servindo de reforço a uma estrutura que possa já estar em estado de deterioração avançado, como são os casos de pilares e vigas, por exemplo.

A dispersão das fibras na matriz é um fator muito importante para a eficácia destas, no reforço; se a dispersão for má, o reforço pode não ser eficaz. Tal como mostrado na *Figura 3*, dependendo dos elementos estruturais e se as fibras são utilizadas sozinhas ou em conjunto com as armaduras, existem diferentes tipos de dispersão das fibras.

2.2. Tipos de Fibras

A identificação e produção de fibras têm sido uma aposta para muitos investigadores, sendo que o setor da construção é um dos que mais beneficia com esta aposta. Ao longo dos anos foram desenvolvidas uma grande variedade de fibras, e a tendência é continuar a aumentar.
As fibras podem classificar-se quanto à sua natureza, natural ou sintética, quanto à maneira como se apresentam disseminadas na matriz, dispersas aleatoriamente ou alinhadas em padrão estabelecido e ainda quanto à forma do seu conjunto, isoladas ou em rede de diversas geometrias ou ainda entrelaçadas formando um tecido (Gonzalez, J., 2007). Podem também ser classificadas de acordo com o seu comprimento, sendo descontínuas, quando apresentam um comprimento limitado a alguns centímetros, e contínuas, quando apresentam um comprimento bastante elevado, sendo este apenas limitado por razões técnicas. (www.fibrenamics.com, 2013).

Atualmente existem fibras de muitos tipos, sendo que normalmente estas se agrupam da seguinte forma (www.fibrenamics.com, 2013):

- Fibras Naturais, podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Das fibras de origem animal destacam-se a seda e a lã. As fibras vegetais, como sisal, cânhamo, linho, juta, banana, coco e de eucalipto, são estruturas alongadas, de secção

transversal arredonda, têm a grande vantagem por serem abundantes, terem baixo custo, e têm ainda um ciclo de vida mais ecológico, incluindo uma produção sustentável. No entanto, ainda serão necessários mais estudos relativos às fibras naturais para superar a variabilidade da qualidade dependente do tempo, a alta absorção de humidade e da resistência limitada a temperaturas elevadas (Rosado, K., Guise, C., Rita, R., e Fangueiro, R., 2011). Em relação às fibras minerais destacam-se o amianto e lã mineral. Aqui ganham destaque as fibras de amianto, que foram durante muitos anos usadas, e hoje em dia ainda vão sendo usadas com frequência. Segundo Gonzalez (2007), de todas as fibras naturais, o amianto, é a única fibra que consegue assumir expressão como material até recentemente e universalmente utilizado, como compósito de fibrocimento. Este é caraterizado pelo seu excelente desempenho ao longo do tempo, sendo utilizado preferencialmente em coberturas e canalizações. Contudo, segundo o mesmo autor, no passado recente, a utilização do fibrocimento conheceu várias adversidades, tendo sido restringido ou mesmo proibido o seu uso, por supostamente se tratar de um produto nocivo à saúde, quando inalado, o que pode acontecer pela desagregação do compósito, em consequência do seu envelhecimento, ou quando trabalhos de reparação e de demolição são realizados sem serem tomadas as precauções.

- Fibras Não-naturais, são fibras desenvolvidas pelo Homem com o intuito de melhorar várias propriedades, relativamente às fibras naturais. Estas podem-se dividir em fibras artificiais e fibras sintéticas. Das fibras artificiais, destacam-se a viscose, liocel, acetato e a modal. Nas fibras sintéticas destacam-se, a poliamida, polipropileno, poliéster, poliacrílicas, poliuretanos e as poliolefinas.

- Fibras Inorgânicas, são essencialmente constituídas, por compostos químicos inorgânicos, com base em elementos naturais, que em geral, após receberem um tratamento a elevadas temperaturas, dão origem às fibras. Devido às suas excelentes propriedades, também são denominadas de fibras de alto desempenho. Neste grupo, destacam-se as fibras de carbono, vidro, boro, metálicas, de silicato de alumínio, de carboneto de silício e de lã de rocha, entre outras.

- Fibras Funcionais, são fibras que desempenham uma função específica. Cada fibra está apta para responder a uma dada situação, isto é, qualquer fibra que apresente

uma caraterística inovadora, não habitual ou convencional. Destacam-se as fibras antimicrobianas, termorreguladoras, resistentes a altas temperaturas, gestoras de humidade.

- Nanofibras, são fruto do desenvolvimento da nanotecnologia, sendo atualmente um dos principais focos de atividade de investigação, desenvolvimento e inovação, onde os investimentos têm sido significativos. Estas derivam de polímeros, como o, polietileno (PE), polipropileno (PP), polibenzimidazole (PBI), poliacrilonitrilo (PAN), poliamida (PA), polietilenotereftalato (PET), e poliéster (PS), entre outros, numa escala nanométrica. Sendo esta dimensão obtida por fiação eletrostática.

- Fibras Bicomponentes, são constituídas por dois polímeros com propriedades diferentes e /ou composições químicas diferentes, obtendo-se uma nova fibra, com as propriedades dos dois polímeros. Estas normalmente podem ser, com núcleo, lado a lado ou ilhas-no-mar.

Atualmente, das fibras já utilizadas na construção civil, destacam-se as fibras de aço, de vidro, de carbono e de polipropileno. Estas serão alvo de um maior aprofundamento no tópico a seguir.

Todas estas fibras referidas são distintas umas das outras, tendo cada uma, caraterísticas e propriedades próprias, possuindo mais vantagens em alguns aspetos e desvantagens noutros aspetos.

Segundo Naamã, (2003), a eficácia na aplicação das fibras no betão depende de propriedades físicas/químicas, incluindo:

- Densidade;
- Rugosidade da superfície;
- Estabilidade química;
- Não-reatividade com a matriz de cimento;
- Resistência ao fogo ou a inflamabilidade.

e das suas propriedades mecânicas, incluindo:

- Resistência à tração;
- Módulo de elasticidade;
- Rigidez;
- Ductilidade.

E, por fim, depois de escolhida a fibra a aplicar no betão, tendo em consideração as suas propriedades, deve-se ter em conta as propriedades geométricas da fibra, de modo a que seja alcançada a eficácia da mesma na aplicação do betão, incluído:

- Comprimento,
- Diâmetro ou perímetro;
- Forma;
- Perfil transversal e longitudinal.

Seguindo esta linha, Barros (2000), afirma que os benefícios que as fibras introduzem no betão dependem, fundamentalmente, das propriedades geométricas e materiais das fibras e da qualidade do betão. O tipo de fibras deve ser selecionado em função da qualidade do betão a utilizar.

Como se pode observar no *Quadro 1*, onde se apresenta uma vasta gama de fibras, estas, na generalidade, possuem todas boas propriedades físicas, químicas e mecânicas, que adicionadas adequadamente ao betão podem aumentar consideravelmente o reforço do mesmo.

Analisando o *Quadro 1*, verifica-se que as fibras em relação às armaduras convencionais destacam-se particularmente pela sua baixa densidade e pelo seu diminuído volume, o que faz com que, quando aplicadas no betão, o seu peso próprio não sofra grandes alterações, ao contrário da armadura convencional. Verifica-se, igualmente, que as resistências são consideravelmente elevadas, como comprova a *Figura 4*. Sendo o peso próprio uma das ações que mais sobrecarrega a estrutura, a adição de fibras pode ser uma enorme vantagem para o seu aumento de utilização.

Quadro 1 – Compilação das propriedades mecânicas de materiais vulgarmente utilizados no betão (Adaptado de ACI 554.5R-10, Nawy (1996), Kuraray (2007), Saechtling (1987), Simet al. (2005), Toledo et al. (2000) e Balaguru and Shah (1992)).

Tipo de Fibra	**Diâmetro Equivalente (mm)**	**Densidade Especifica (kg/m^3)**	**Resistência à tração (MPa)**	**Módulo de elasticidade (GPa)**	**Extensão, [%]**
Acrílico	0.02 a 0.35	1100	200 a 400	2	1.1
Amianto	0.0015 a 0.02	3200	600 a 1000	83 a 138	1.0 a 2.0
Algodão	0.2 a 0.6	1500	400 a 700	4.8	3.0 a 10
Vidro	0.005 a 0.15	2500	1000 a 2600	70 a 80	1.5 a 3.5
Grafite	0.008 a 0.009	1900	1000 a 2600	230 a 415	0.5 a 1.0
Aramida	0.010	1450	3500 a 3600	65 a 133	2.1 a 4.0
Nylon	0.02 a 0.4	1100	760 a 820	4.1	16 a 20
Poliéster	0.02 a 0.4	1400	720 a 860	8.3	11 a 13
Polipropileno (PP)	0.02 a 1.0	900 a 950	200 a 760	3.5 a 15	5.0 a 25
Álcool polivinílico (PVA)	0.027 a 0.66	1300	900 a 1600	23 a 40	7 a 8
Carbono (padrão)	------	1400	4000	230 a 240	1.4 a 1.8
Seda	0.02 a 0.38	1500	400 a 600	6.9	10 a 25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025 a 1.0	960	200 a 300	5.0	3.0
Sisal	0.08 a 0.3	760 a 1100	228 a 800	11 a 27	2.1 a 4.2
Coco	0.11 a 0.53	680 a 1020	108 a 250	2.5 a 4.5	14 a 41
Juta	0.1 a 0.2	1030	250 a 350	26 a 32	1.5 a 1.9
Aço	0.15 a 1.0	7840	345 a 3000	200	4 a 10

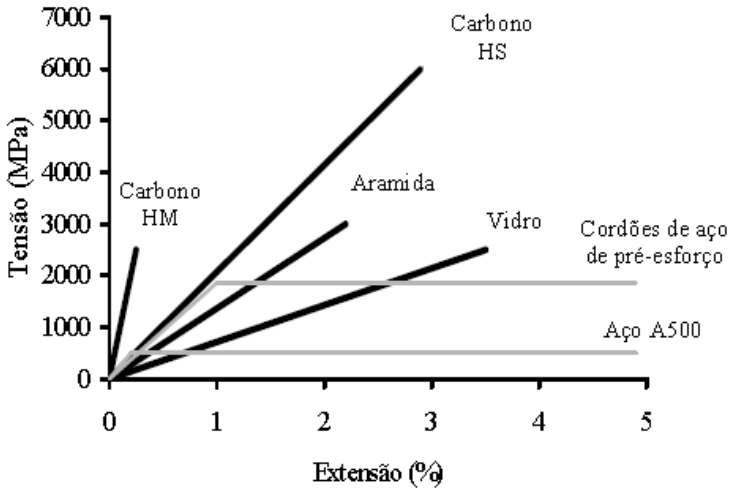


Figura 4 - Diagrama tensão *vs* extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço (Fonte: ACI 440R-96, (1996), Barros, J., (2004))

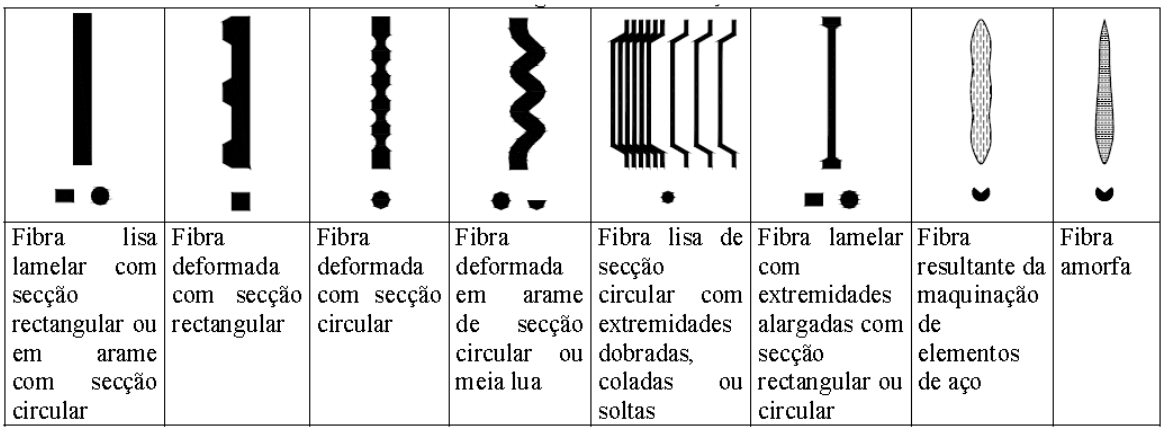
Contudo, as fibras também apresentam algumas desvantagens sendo uma delas comum a todas as fibras. Ora se o volume de fibras adicionado for elevado, ou até mesmo dependendo da geometria das fibras, estas irão dificultar a trabalhabilidade do betão, comprometendo assim eficácia no seu papel de reforço.

2.2.1. Fibra de aço

As fibras de aço são atualmente as fibras mais utilizadas no mundo da construção civil, originando o betão reforçado com fibras de aço, BRFA. São usadas com frequência em pavimentos e em estruturas de suporte de túneis (J. Barros, 2000). O BRFA pode substituir completamente o betão armado nas estruturas em que o nível de "*reliability*" exigido seja relativamente baixo, como lajes apoiadas em solo, fundações e paredes. Já em estruturas em que se exige capacidade de carga significativa, o BRFA pode ser usado em combinação com o reforço convencional, isto é, diminuindo a necessidade em utilizar armaduras convencionais ou de pré-esforço (Kanstad, 2004, Ferreira, N., 2008).

As fibras de aço que se encontram disponíveis no mercado, são fabricadas a partir de fio de aço laminado, a partir de chapa de aço cortada ou pelo processo de fusão e extração que produz fibras com uma secção transversal de forma crescente (Cement & Concrete institute, 2010). É possível encontrar no mercado diversos tipos de fibras de aço, com diferentes formas

geométricas e aços de diferente resistência. Na *Figura 5* podem ver-se algumas das fibras de aço mais utilizadas na indústria da construção civil.



Fibra lisa lamelar com secção rectangular ou em arame com secção circular	Fibra deformada com secção rectangular	Fibra deformada com secção circular	Fibra deformada em arame de secção circular ou meia lua	Fibra lisa de secção circular com extremidades dobradas, coladas ou soltas	Fibra lamelar com extremidades alargadas com secção rectangular ou circular	Fibra resultante da maquinação de elementos de aço	Fibra amorfa

Figura 5 – Vários tipos de fibras de aço (Fonte: Barros, J., 2000)

O comprimento das fibras correntes varia entre 30 mm e 60 mm, enquanto o diâmetro enquadra-se no intervalo de 0.15 mm a 1 mm (Barros. J., 2000).

Observando as caraterísticas da fibra de aço no *Quadro 1*, rapidamente se chega à conclusão que a grande vantagem da utilização desta fibra é devido ao seu elevado módulo de elasticidade (200 GPa), tendo também uma elevada resistência à tração. Devido a esta caraterística, segundo Gonzalez (2007), um dos principais benefícios do compósito com fibra de aço está no aumento da ductilidade do material convencional, melhorando também o desempenho da resistência à flexão em cerca de 50% (aquando de incorporação de 1% a 1.5% de fibras relativamente ao volume do compósito). A adição de fibras tem que ser cuidadosa, pois quando a sua percentagem no volume da matriz, for superior a 2% geralmente resulta numa má trabalhabilidade e má distribuição de fibras (Cement & Concrete institute, 2010; Barros. J., 2000).

Contudo, a fibra de aço pode ter uma grande desvantagem devido à sua falta de resistência à corrosão, se as fibras não forem corretamente introduzidas na matriz a corrosão pode levar à degradação do BRFA.

2.2.2. Fibra de vidro

As fibras de vidro são normalmente produzidas a partir de silício, sendo normalmente pouco resistentes a meios alcalinos, sendo tratadas com zirconia (ZrO_2) (Gonzalez, J., 2007). A presença de álcalis danifica a fibra de vidro se esta não for resistente e a presença de zircónia ajuda a proteger a fibra de vidro. A fibra de vidro é também utilizada no reforço do betão, fibras essas que podem ser dispersas (curtas) ou orientadas (longas), como se mostra na *Figura 6*.

Figura 6 – Fibra de vidro dispersa (esquerda) e fibra de vidro orientada longa (direita) (Fonte: Cristiana Pereira, 2012)

As fibras de vidro caraterizam-se por apresentarem uma elevada resistência à tração, contudo o seu módulo de elasticidade é baixo, originando uma elevada ductilidade. Assim, as fibras de vidro não são recomendadas no uso de elementos estruturais. Segundo Gonzalez, 2007, a resistência e a extensão na rotura aumentam conjuntamente com o comprimento e a fração volúmica da fibra. A resistência à flexão pode variar entre 15 e 50 MPa. O mesmo autor recomenda, ainda, que sejam adotados para a resistência valores de projeto conservadores, pois embora as propriedades mecânicas possam ser relativamente altas em idades jovens, a resistência e a rigidez do betão reforçado com fibra de vidro, pode variar a médio e longo prazo. Contudo estas apresentam baixa resistência à fadiga.

As fibras de vidro, apesar de não serem recomendadas para elementos estruturais apresentam variadas aplicações, sendo apropriadas para uso em técnicas de pulverização direta e processos de pré-mistura e têm sido utilizadas como um substituto para a fibra de amianto em folha plana, tubos e numa variedade de produtos pré-fabricados (Cement & Concrete institute, 2010).

2.2.3. Fibra de Polipropileno

A fibra de polipropileno provém de um polímero de hidrocarboneto sintético, sendo produzida através de processos de extrusão por estiragem a quente do material a partir de uma matriz (Cement & Concrete institute, 2010). Esta pode servir como alternativa ao uso da fibra de amianto, apresentando, ao contrário desta, grande ductilidade até a rotura ser atingida (Gonzalez, J., 2007).

Estas fibras são produzidas em monofilamentos contínuos com seção circular, ou em fitas fibriladas de secção transversal retangular, como representado na *Figura 7.*

Figura 7 – Exemplos de fibras de polipropileno (Fonte: http://portuguese.alibaba.com, 2013)

O comprimento desta fibra não deve ser muito elevado, uma vez que esta, devido à sua flexibilidade, tem tendência a embrulhar-se em torno do bordos da pá misturadora o que pode tornar a mistura difícil (Cement & Concrete Institute, 2010).

Segundo o fornecedor Sotexfil, o uso destas fibras aumenta a tenacidade do betão, podendo esta ser enfraquecida se não houver eficácia na ligação entre a fibra e a matriz cimentícia. O mesmo fornecedor refere que esta fibra é quimicamente inerte o que a torna resistente a ataques químicos, sendo que também praticamente incombustíveis o que as torna resistentes ao fogo, conferindo assim maiores dilatações entes de fissurar.

2.2.4. Fibra de Carbono

As fibras de carbono vêm sendo utilizadas há algum tempo noutras indústrias como na aeronáutica, aeroespacial e mecânica. De alguns anos a esta parte, estas fibras têm merecido uma atenção especial por parte dos investigadores na área da construção civil. Esta fibra, devido às suas caraterísticas particulares, das quais se destaca a baixa densidade associada a uma elevada resistência mecânica, são consideradas fibras de eleição.

Nas fibras de carbono não são encontradas imperfeições em relação às outras fibras. Estas não têm nenhum material nocivo para a saúde como as fibras de amianto, não apresentam o problema da oxidação como as fibras de aço, são indiferentes aos ambientes alcalinos o que não acontece com as fibras de vidro. A principal desvantagem a apontar à fibra de carbono em relação às outras é o seu preço que ainda ser demasiado elevado, mas com tendência a diminuir nos próximos anos, a utilização desta fibra tende a aumentar cada vez mais.

Balaguru, (1988) refere que a incorporação de fibras traz como consequência uma menor capacidade de resistência à compressão. Este fenómeno, aparentemente contraditório, deve-se provavelmente ao aumento de porosidade devido à existência de bolhas de ar que acompanha a incorporação da fibra.

A fibra é produzida a partir de um percursor, isto é, um material semi-elaborado, que pode ser um dos três tipos: poliacrilonitrilo; pasta residual da destilação do petróleo, pitch; viscose rayon. As fibras obtidas a partir destes percursores são respetivamente a fibra PAN, sigla de Poliacrilonitrilo, a fibra pitch e a fibra rayon (Gonzalez, 2007).

O comprimento da fibra individual pode variar entre os 3 mm até aos 10-13 mm, com diâmetros da ordem dos 10-18 μm, sendo já denominada de microfibra (Gonzalez, 2007). Na *Figura 8* pode-se observar fibras de carbono. Para uma utilização eficaz das fibras de carbono no betão, estas deverão ser bem dispersas na mistura. A dispersão é melhorada adicionando sílica de fumo (Chung, 2000).

Figura 8 – Fibras de carbono dispersas aleatoriamente (Fonte: Cristiana Pereira, 2012)

As fibras de carbono poderão apresentar outra grande vantagem que está a ser pesquisada vários grupos de investigadores, e deve-se ao fato de as fibras de carbono serem condutoras de eletricidade, o que permite estabelecer uma nova conceção para este compósito que é a de se constituir um sensor do seu próprio estado de fissuração, através da variação da resistividade quando a corrente elétrica percorre um troço pré determinado (Silva, B. 2005). Assim, num futuro próximo, as fibras de carbono poderão ser usadas como reforço estrutural e, ao mesmo tempo monitorizar a durabilidade da estrutura.

2.3. Nanofibras

Nos últimos anos a sociedade assistiu a grandes avanços tecnológicos, o que permitiu o desenvolvimento da nanotecnologia, sendo esta já considerada uma das tecnologias mais importantes deste século, e que, num futuro próximo promete revolucionar os mercados industriais. A nanotecnologia está a mudar a pesquisa básica nos campos da informação, ciência, tecnologia biológica, ciências do ambiente, fontes de energia, ciência dos materiais, engenharia e outros (Nanotechnology Industry, 2011). Esta carateriza-se por produzir materiais, estruturas, dispositivos e sistemas funcionais utilizando da matéria numa escala molecular e nanométrica.

O aparecimento das nanofibras surge como consequência do desenvolvimento da nanotecnologia. As nanofibras, por definição, são fibras com diâmetros inferiores a 100 nanómetros (nm). Para se ter uma ideia, 1 nanómetro equivale à bilionésima parte de um metro e qualquer medida nessa escala é invisível a olho nu. O diâmetro de uma nanofibra é

cerca de 70 vezes menor que um fio de cabelo humano, como se pode observar na *Figura 9*, onde um fio de cabelo serve de escala às nanofibras e, como se pode ver, são muito pequenas.

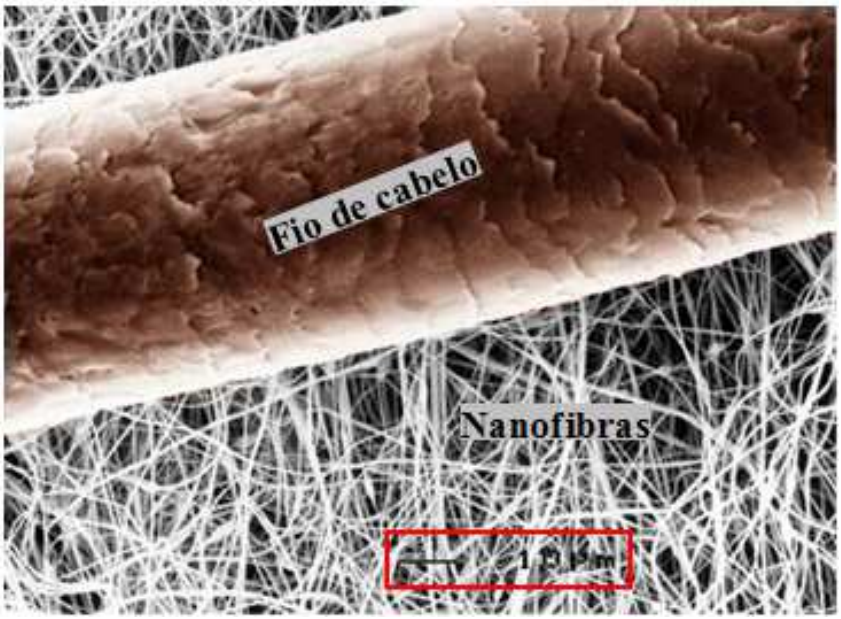


Figura 9 – Comparação de um fio de cabelo com nanofibras (Fonte: adaptada do site www.fibrenamics.com, 2013)

Para uma real perceção do tamanho das nanofibras, uma pequena gota de água que tenha 7 milímetros de comprimento está para o Rio Amazonas (tem cerca de 7000 km de extensão) tal como 1 nanómetro está para 1 metro.

E é devido ao fato das nanofibras serem tão pequenas e apresentarem elevadas propriedades mecânicas, físicas, químicas e magnéticas, que têm ganho destaque nos vários grupos de investigação.

O processo mais simples e usual na produção de nanofibras é por fiação eletrostática (*electrospinning*). Este método é simples e usa força eletrostática e mecânica para produzir fibras de polímeros com diâmetros de escala nanométrica, a partir da ponta de um orifício fino (Kumar, A. 2010).

Segundo o autor Andrady A. L. (2008), um aparelho de *electrospinning* consiste em três componentes básicos.

- Um polímero de peso molecular médio adequado, dissolvido numa concentração suficientemente alta de boa condutividade e tendo a pressão adequada, a tensão superficial, e vapor de solvente.
- Um dispositivo para carregar eletricamente a solução de polímero para se obter um jato estável.
- A abertura entre a ponta capilar e uma superfície de recolha ligado à terra, que é definida uma distância adequada da ponta carregando a solução de polímero.

O processo de produção é relativamente simples: a solução de polímero é forçada a passar através de um capilar (chamado cone de Taylor), formando uma gota pendente na ponta do capilar, tal como se pode observar na *Figura 10*. Em seguida, a alta voltagem é aplicada entre o capilar e um coletor ligado à terra, sendo que a distância entre estes geralmente varia entre 15 cm a 30 cm. Quando a intensidade do campo elétrico vence a tensão superficial da gota, um jato de solução do polímero é iniciada e acelera ao coletor ligado à terra. À medida que o jato se desloca pelo ar, a evaporação do solvente e um não-tecido polimérico é formado sobre coletor de ligação à terra, formando assim as nanofibras (Kumar, A. 2010). Na *Figura 11* pode-se ver a esquematização deste processo.

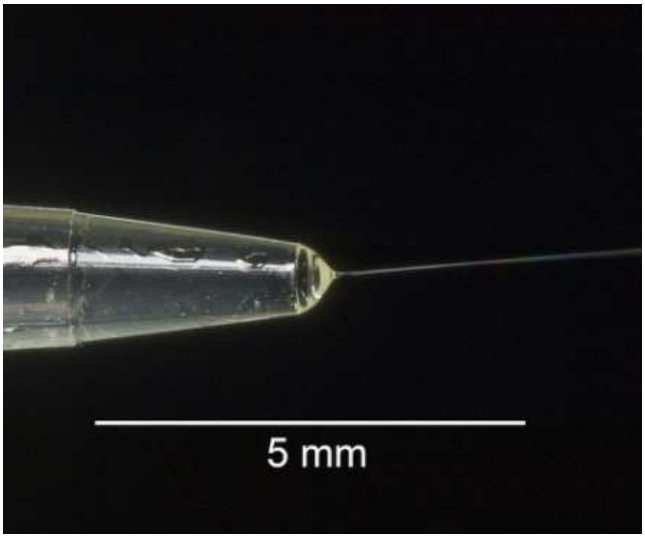


Figura 10 – Fibra a atravessar o cone de Taylor (Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning, 2013)

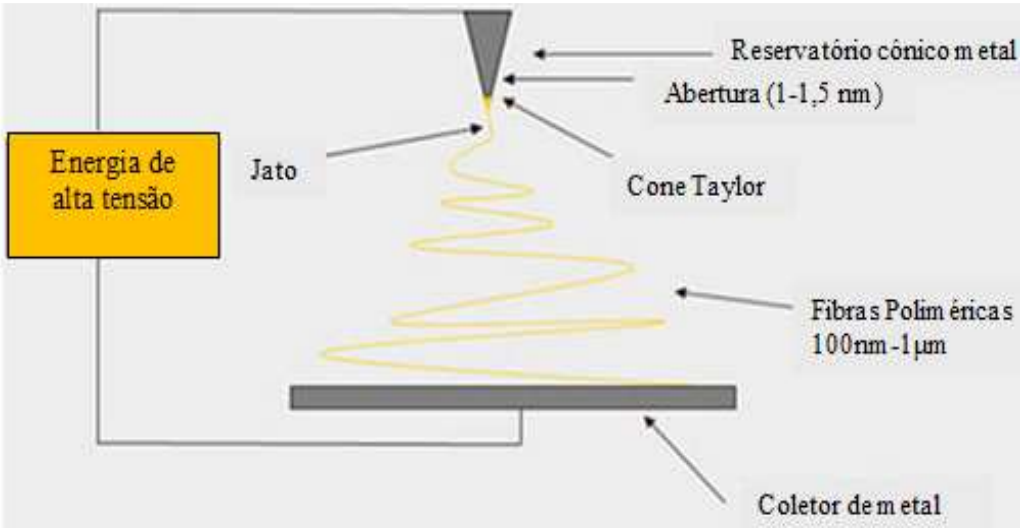


Figura 11 - Representação esquemática do processo de fiação eletrostática (Fonte: www.snsnano.com, 2013)

O processo pode ser realizado à temperatura ambiente, a menos que o calor seja necessário para manter o polímero no estado líquido. As propriedades das fibras finais dependem do tipo de polímero e das condições de operação (Hegde, R. R., Dahiya, A., Kamatha, M. G., 2005). As principais variáveis que determinam a qualidade de nanofibras são o peso molecular médio do polímero, a natureza do solvente, e a magnitude do campo elétrico, utilizado para induzir a fiação eletrostática. (Andrady A. L., 2008).

Atualmente, este é o único processo que pode ser distribuído à escala industrial. As nanofibras são o material do futuro devido às propriedades especiais que as tornam muito atraentes para numerosas aplicações.

Essas propriedades são (Hegde, R. R., Dahiya, A., Kamatha, M. G., 2005; www.Fibrenamics.com, 2013):

- A sua elevada área especifica superficial (área/unidade de massa);
- Alta relação de aspeto (comprimento/diâmetro);
- Potencial biomimético;
- Alta porosidade;
- Tamanho de poro pequeno;
- Densidade baixa.

Estas propriedades possibilitam às nanofibras melhorarem a resistência mecânica, a reatividade, a qualidade elétrica e ótica, a permeabilidade das camadas de vários materiais existentes, e possibilitam ainda o aparecimento de outros novos materiais.

A aplicação das nanofibras traz grandes vantagens a nível estrutural, pois estas podem ser utilizadas para o fabrico de muitos materiais compósitos, onde adicionados à matriz, esta ganha novas propriedades que a estrutura antes não possuía. As nanofibras também são utilizadas como catalisadores de reações químicas. São também usadas na filtração, possibilitando assim a purificação da água e tratamentos de poluentes. As nanofibras proporcionaram o desenvolvimento da medicina, sendo já muito aplicadas nas indústrias farmacêutica, cosmética e odontológica e nas indústrias biomédicas (curativos, membranas cicatrizantes, etc).

Contudo, as nanofibras ainda têm um grande entrave devido ao seu preço demasiado elevado em comparação com as fibras convencionais. Outro aspeto negativo, é que por serem demasiado pequenas levantam muitas preocupações sobre possíveis riscos para a saúde devido à inalação de fibras que possam ocorrer. Apesar destes dois aspetos negativos, devido às suas qualidades excecionais, há um esforço contínuo para encontrar um equilíbrio entre as vantagens e os custos (Hegde, R. R., Dahiya, A., Kamatha, M. G., 2005).

2.4. Betão Reforçado com Nanofibras

O betão reforçado com nanofibras promete elevar o reforço para outro nível. Com o desenvolvimento das nanofibras e a integração destas no reforço do betão, abre-se um novo campo para o reforço do betão, permitindo assim o controlo da fissuração à escala nanométrica (Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., Shah, S. P. 2010). Atualmente, este controlo ainda é muito pouco eficaz, mas com a introdução de nanofibras, este poderá ser feito de uma forma eficaz.

A introdução de nanofibras no reforço do betão pode levar a um aumento significativo das propriedades mecânicas e da durabilidade do betão, em relação ao betão convencional, abrindo assim as portas para novas aplicações na engenharia civil (Sanchez, F., Zhang, L., Ince, C., 2009).

Pesquisas feitas pelo grupo de investigação liderado pelo professor Shah, S., (Shah, S., 2011) mostram que a resistência à flexão e a rigidez da matriz cimentícia podem ser significativamente aumentadas com a adição de baixas concentrações de nanofibras.

Uma das maiores dificuldades na utilização das nanofibras como reforço, tem sido a dificuldade em dispersá-las pela matriz cimentícia. **(**Rana, S., Parveen, S., Fangueiro, R., 2012).

Atualmente, estão a ser desenvolvidas vários tipos de nanofibras, destacando-se entre elas as:

- Nanofibras de carbono (CNF_S), nomeadamente os nanotubos de carbono (CNT_S);
- Nano sílica;
- Dióxido de Titânio ($Ti0_2$).

Tal como nas fibras, aqui destacam-se as nanofibras de carbono e nomeadamente os nanotubos de carbono devido às suas excelentes caraterísticas mecânicas, térmicas e elétricas.

2.4.1 Nanotubos de carbono (CNT_S)

Os nanotubos de carbono (CNT_S) são considerados um dos nano materiais mais benéficos para a utilização em nano-reforço. Desde a sua descoberta, em 1991 pelo físico japonês Sumio Iijima, os nanotubos de carbono têm atraído muita atenção, e vários fundos são gastos na sua pesquisa, devido à capacidade resistente da sua estrutura cilíndrica, a qual é construída por um arranjo hexagonal de átomos de carbono, como esquematiza a *Figura 12* (Nanotechnology Industry, 2011). Estes podem ser de vários milímetros de comprimento e podem ter uma "camada" ou parede (nanotubos com paredes simples - $SWNT_S$) ou mais do que uma “camada” ou parede (nanotubos de paredes múltiplas – $MWNT_S$).

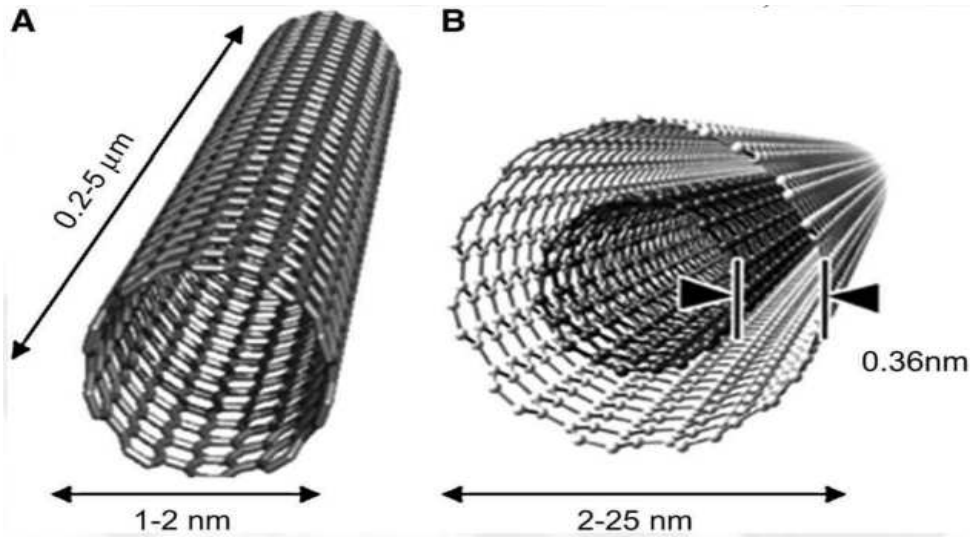


Figura 12 – a) Uma folha apenas, nanotubos de camada simples, SWNT; b)Várias folhas concêntricas, nanotubos de camada múltipla, MWNT (o diâmetro final depende do número de camadas) (Fonte: Pereira, C., 2012)

O nanotubo de carbono é até 100 vezes mais resistente que o aço, sendo, no entanto, cerca de 6 vezes mais leve. O seu módulo de elasticidade e resistência à tração são muito elevados, apontando para valores na ordem de 1 TPa (Tera Pascal) e 200 GPa, respetivamente. A sua densidade é cerca de 1,33 g/cm^3. No *Quadro 2* é possível ver as propriedades dos nanotubos comparadas com as dos materiais usados correntemente como reforço. Devido a estas caraterísticas mecânicas elevadas, os nanotubos de carbono têm sido utilizados em compósitos diversos, para reforçar a matriz cimentícia. (Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Torkittikul, P., 2010).

Quadro 2 – Comparação dos nanotubos de carbono com os materiais convencionais usados como reforço (Fonte: Paiva, M., 2006)

	Resistência à tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm^3)
Nanotubos de Camada simples	20 - 100	500 - 1500	~1
Nanotubos de Camada múltipla	10 - 60	200 - 1000	2,16
Aço	0,400	200	7,86
Alumino	0,11	70	2,71

Observando as comparações apresentadas no *Quadro 2*, pode concluir-se que a adição de nanotubos no betão, permite aumentar consideravelmente as suas propriedades mecânicas devido às caraterísticas dos nanotubos. Por outro lado, a baixa densidade apresentada pelos nanotubos comparativamente com o aço e o alumínio, o peso próprio da matriz cimentícia não deverá sofrer alterações.

Além destas caraterísticas, os nanotubos são excelentes condutores de eletricidade, sendo que num futuro próximo, os nanotubos podem fazer a sua auto monitorização devido à relação entre a resistência à deformação sob uma carga de compressão. A resistência elétrica dos nanotubos, é alterada quando submetida a uma força que deforma o betão, tornando-se piezorresistivo. Assim, a avaliação de danos e de auto monitorização da saúde do betão de estruturas pode ser mais fácil de levar a cabo, pois o betão irá funcionar como um sensor, o que resulta em custos muito mais baixos de manutenção da infraestrutura e de reparação.

Atualmente, o grande desafio em relação aos nanotubos está associado à incorporação de nanotubos de carbono na matriz cimentícia com boa dispersão. Na *Figura 13* pode-se observar uma comparação entre uma boa dispersão e uma má dispersão. A pobre dispersão dos nanotubos de carbono leva à formação de locais de defeitos em várias zonas do nano compósito e limita a eficiência dos nanotubos de carbono na matriz cimentícia (Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Torkittikul, P., 2010). Sendo que, atualmente, o maior obstáculo à sua utilização está relacionado com o seu elevado preço.

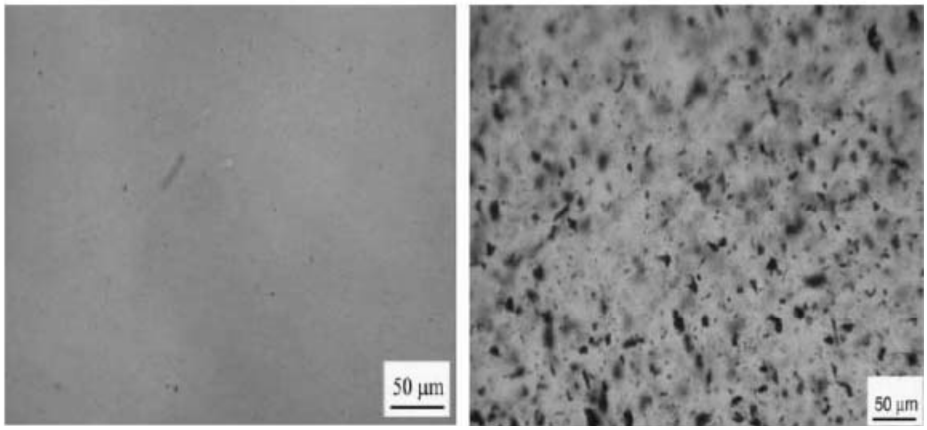


Figura 13 - Imagens de microscópio ótico de SWNT, com boa dispersão (esquerda) e com má dispersão com numerosos SWNTs aglomerados (direita) (Fonte: Kashiwagi et al. 2005, Brito, J., Paramés, J., 2010)

2.4.1.1. Síntese dos Nanotubos de carbono

Ao longo dos anos vários investigadores estudaram métodos de produção de nanotubos de carbono. Atualmente, existem três métodos mais utilizados na produção de nanotubos: descarga de arco elétrico, deposição química da fase de vapor (também denominado de CVD – *Chemical Vapor Deposition*) e, por último, a ablação/vaporização a laser. Os métodos de descarga de arco elétrico e vaporização a laser são muito semelhantes, usando a sublimação de grafite a altas temperaturas para obter carbono na forma gasosa (Ferreira, O., 2003), diferindo apenas na qualidade de pureza nos nanotubos obtidos (Szabó, A., et al., 2010). Já o método CVD usa a decomposição de gases que contenham carbono, como hidrocarbonetos (Ferreira, O., 2003). A descarga de arco elétrico e o CVD tenderão a ser os métodos a ser mais utilizados pois podem ser utilizados para produção em larga escala (Szabó, A., et al., 2010). Seguidamente, é apresentado, de uma forma sintética, o processo de produção de cada um dos métodos.

- Descarga de arco elétrico, este método, *Figura 14*, consiste na ligação de duas barras de grafite localizadas no interior de uma câmara selada a uma fonte de energia e colocá-las a poucos milímetros de distância e de seguida ligar o interruptor, ao atingir os 100 amperes o carbono vaporiza e fica na forma de plasma quente (Paiva, M., 2006). A temperatura na região do plasma é extremamente alta (3000 - 4000ºC) (Ferreira, O., 2003). Os CNTs sintetizados por este método geralmente são resistentes e têm poucos defeitos, mas precisam de ser purificados pois, estes são misturados com outras formas de carbono, como a fuligem de borracha (Ferreira, O., 2003).

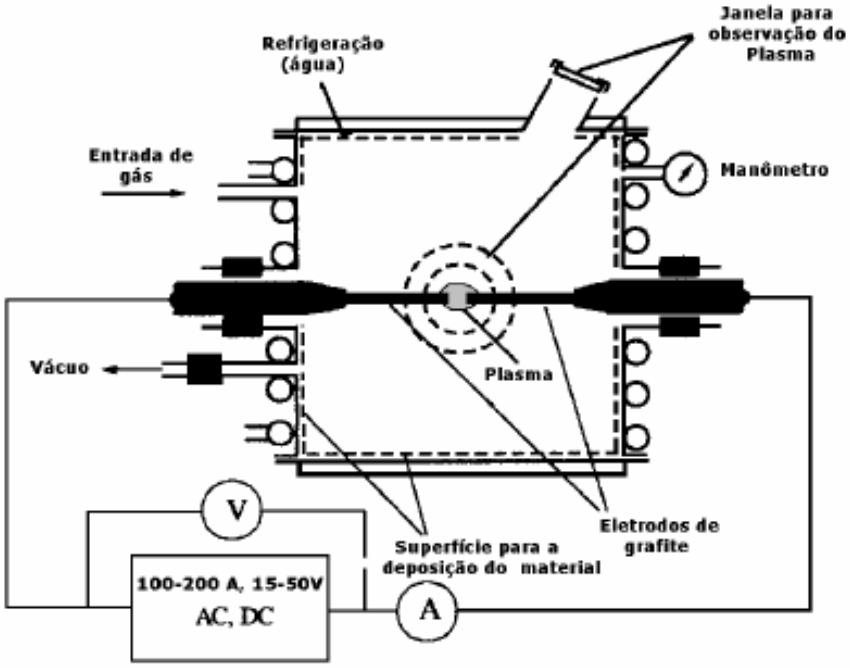


Figura 14 – Representação esquemática do método de descarga de arco elétrico (Fonte: Jounet, C., Bernier, P., 1998; Ferreira, O., 2003)

- Deposição química da fase de vapor (CVD), este método, *Figura 15*, envolve a reação de decomposição de um gás precursor, geralmente hidrocarbonetos (metano, acetileno, xileno, benzeno, hexano, etc), na presença de um catalisador metálico (ferro, níquel, cobalto) (Silva, R., 2010). Dentro de um forno à temperatura de 500 a 1000 °C, adiciona-se lentamente o gás e à medida que se decompõe liberta os átomos de carbono que se recombinam na forma de nanotubos (Paiva, M., 2006). Atualmente, é considerado como o único processo economicamente viável para a produção em larga escala CNTs (Szabó, A., et al., 2010). As condições de produção atualmente mais utilizadas encontram-se no *Quadro 3*.

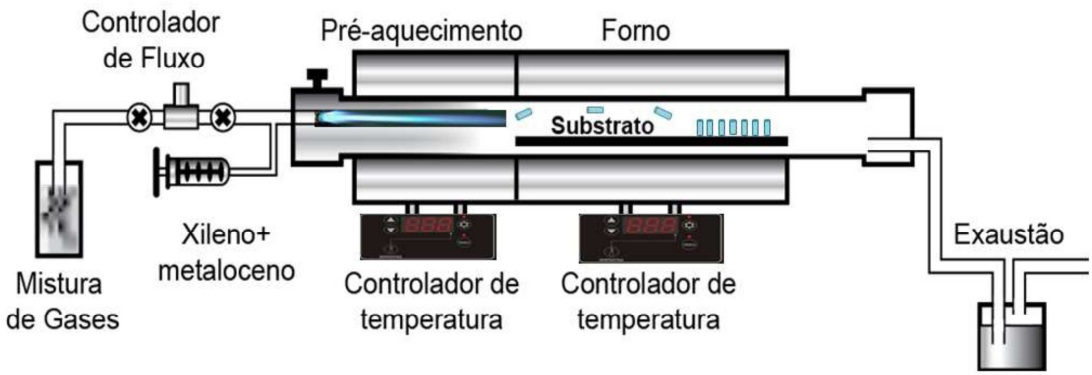


Figura 15 – Representação esquemática de um reator CVD (Fonte: Andrew, R., et al 1999; Ferreira, O., 2003)

Quadro 3 – Condições de crescimento (Fonte: Dresselhaus, M., Dresselhaus, G., 2002; Silva, R., 2010)

	MWNTs	**SWNTs**
Gás percursor	Etileno ou Acetileno	Metano
Intervalo de temperatura	550 – 750 °C	850 – 1000 °C
Catalisador	Fe, Co ou Ni	Fe ou Co

- Ablação/vaporização a laser, este método, *Figura 16*, consiste em bombardear a grafite com impulsos laser de elevada intensidade, na presença de um gás inerte, originando carbono gasoso que de seguida formará os nanotubos (Paiva, M., 2006). Este processo é realizado num ambiente com temperatura e pressão controladas, sendo a temperatura em torno dos 1200 °C. Os nanotubos produzidos por este método são os que têm uma pureza mais elevada (até cerca de 90% de pureza) e a sua estrutura é grafitado, melhor do que os nanotubos produzidos pelo método de descarga de arco elétrico, mas tem a desvantagem de só ser produzido em pequena escala (Szabó, A., et al., 2010).

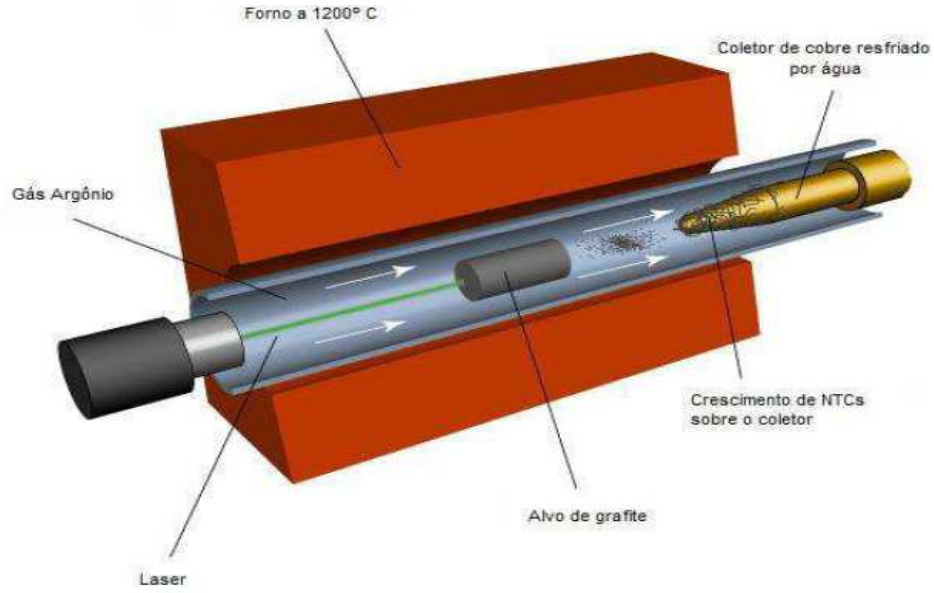


Figura 16 – Representação esquemática do aparato experimental de ablação/vaporização por laser (Fonte: Yakobson, B.I., Smalley, R.E., 1997; Ferreira, O., 2003)

Comparando os diferentes processos existem algumas diferenças entre eles. O método de CVD possibilita um maior controlo de parâmetros de síntese, como o material do catalisador, o gás, a temperatura, o tempo de síntese e o fluxo do gás, sendo o mais viável para produção a larga escala. No método de descarga de arco elétrico consegue-se produzir quantidades moderadas, mas é o que origina menor pureza. O método de ablação/vaporização por laser produz nanotubos com maior pureza, mas é o que produz em menor escala (Silva, R., 2010).

2.4.1.2. Técnicas de dispersão dos Nanotubos de carbono

Como já foi referido a dispersão dos CNTs pela matriz cimentícia constitui o grande desafio na sua utilização como reforço. Atualmente, a dispersão ainda não é totalmente eficaz, fazendo com que as excelentes caraterísticas mecânicas dos CNTs não sejam aproveitadas convenientemente no reforço da matriz cimentícia. Assim, várias pesquisas e experiências estão sendo feitas de modo a encontrar a melhor solução.

A mistura dos CNTs diretamente no cimento pode conduzir a uma dispersão não homogénea, deste modo a dispersão dos CNTs é feita na água (Parveen, S., et al., 2013). Vários métodos de dispersão de CNTs em água têm vindo a ser estudados, variando entre métodos químicos, físicos e a combinação destes dois métodos. Em cada método utilizado existem diferentes técnicas, *Figura 17*, sendo que, tanto no método químico, como no método físico, algumas

técnicas provocam alguns efeitos indesejados. O uso do método químico na dispersão dos CNTs em água pode afetar a hidratação do cimento; já no método físico as técnicas usadas tendem a ser processos longos, o que pode afetar as propriedades dos CNTs. Assim, a melhor solução passa pela combinação destes dois métodos, de modo a atenuar estes inconvenientes e a dispersar de forma mais eficaz.

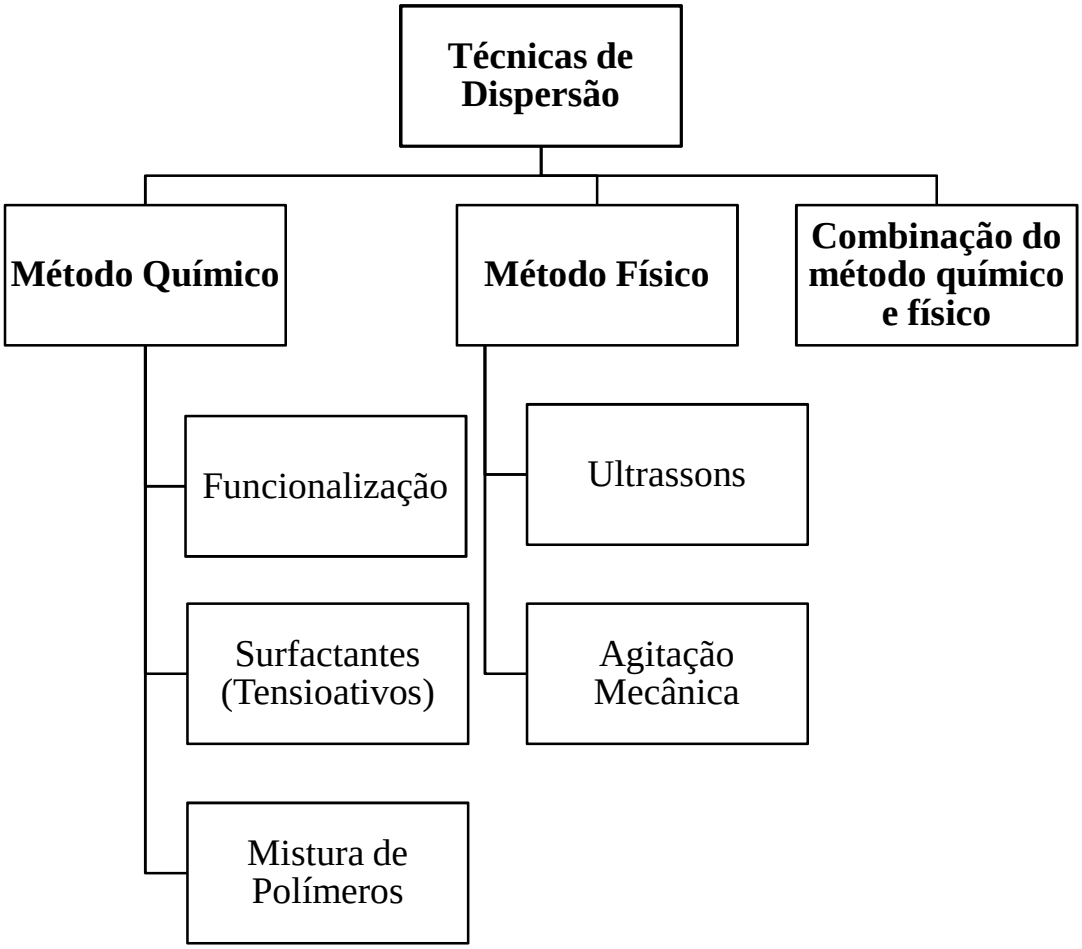


Figura 17 – Esquema com as técnicas de dispersão dos CNTs em água (Fonte: Adaptado de Parveen, S., et al., 2013)

A combinação dos dois métodos foi a técnica utilizada no presente trabalho. Da parte dos métodos químicos utilizou-se a adição de surfactantes, que são agentes químicos que têm a capacidade de alterar as propriedades superficiais e interfaciais de um líquido, sendo de seguida combinada com a técnica, de ultrassons do método físico. Esta é a melhor maneira de se conseguir uma dispersão adequada, pois os agentes tensioativos utilizados não dispersam completamente o CNTs na água, portanto, usando a mistura de ultrassons, possibilitará uma melhor dispersão (Hoheneder, J., 2012).

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Todas as matérias-primas utilizadas para produzir as argamassas de cimento neste trabalho foram fornecidas pelo *Fibrous Materials Research Group* e pelo Laboratório de Materiais de Construção de Engenharia Civil da Universidade do Minho. A preparação das argamassas de cimento foi feita no Laboratório de Materiais de Construção de Engenharia Civil da Universidade do Minho, assim como os respetivos ensaios mecânicos sobre os materiais produzidos.

3.1.1. Nanotubos de Carbono (CNTs)

Os nanotubos utilizados no presente trabalho foram produzidos pela empresa *Nanostructured & Amorphous Materials, Inc*, dos Estados Unidos da América, e foram disponibilizados pelo *Fibrous Materials Research Group*. Foram utilizados quatro tipos de nanotubos:

- Nanotubos de paredes simples, denominados de SWNTs (*single wall carbon nanotubes*);
- Nanotubos de paredes múltiplas, denominados de MWNTs (*multiple wall carbon nanotubes*);
- Nanotubos de paredes simples funcionalizados com ácido carboxílico, dando origem aos SWNT-COOH;
- Nanotubos de paredes múltiplas funcionalizados com ácido carboxílico, dando origem aos MWNT-COOH.

As propriedades físicas dos CNTs foram retiradas da informação técnica disponibilizada pela empresa produtora e podem ser observadas no *Quadro 4*, assim como as suas imagens microscópicas, *Figura 18.* A empresa forneceu os nanotubos de carbono já devidamente purificados e oxidados. As quantidades adicionadas à argamassa foram de 0,1% e 0,08% da massa volúmica de cimento utilizada.

Quadro 4 – Propriedades físicas dos nanotubos de carbono (Fonte: http://www.nanoamor.com, 2013)

Tipo de CNT	[%] Pureza	Diâmetro externo [nm]	Diâmetro interno [nm]	Comprimento [µm]	Área superficial especifica [m^2/g]	[%] COOH	Cor	Preço por 5 gramas [€]
MWNTs	> 95	< 8	2 - 5	10 - 30	350 - 420	-----	Preto	52,51
SWNTs	> 95 (CNTs) > 90 (SWNTs)	1 - 2	-----	5 - 30	300 - 380	-----	Preto	79,51
MWNT-COOH	> 95	< 8	2 - 5	10 - 30	350 - 420	3,67 - 4,05	Preto	63,76
SWNT-COOH	> 95 (CNTs) > 90 (SWNTs)	1 - 2	-----	5 - 30	300 - 380	2,59 - 2,87	Preto	361,56

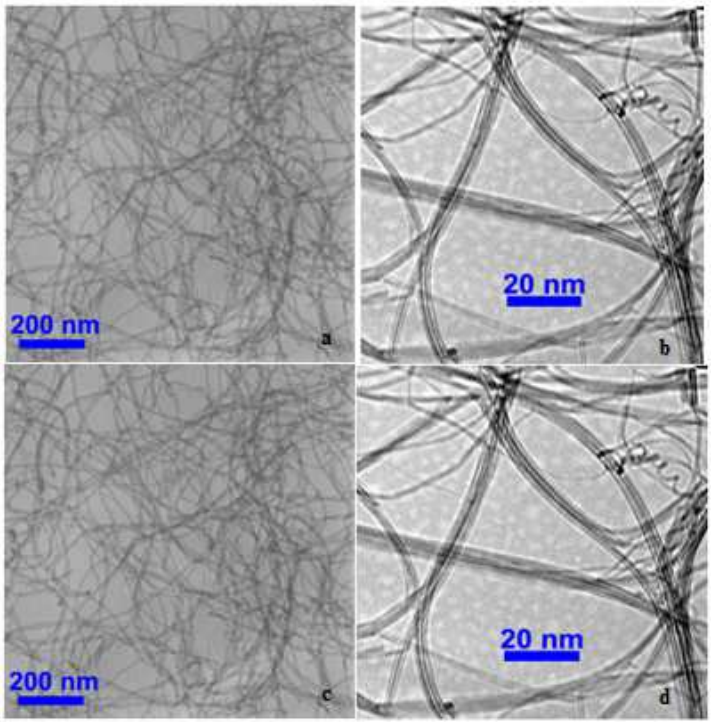


Figura 18 – Nanotubos do tipo: a) MWNT; b) SWNT; c) MWNT-COOH e d) SWNT-COOH (Fonte: http://www.nanoamor.com, 2013)

3.1.2. Ligante

O ligante principal utilizado foi o Cimento Portland do tipo CEM I 42,5R fabricado pela SECIL. Segundo o catálogo da SECIL, é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e no fabrico de betões de elevada a muito elevada resistência. Uma das principais caraterísticas deste cimento é ter resistência inicial rápida. As caraterísticas deste material encontram-se no *Anexo 1*.

3.1.3. Agregados

O agregado utilizado, foi a areia fina normalizada segundo o Comité Europeu de Normalização (CEN). Esta areia foi utilizada segundo as indicações da norma EN 196-1:1995, onde a areia deverá ser natural, siliciosa, composta preferencialmente por partículas arredondadas e com teor em sílica de, pelo menos, 98%. No *Quadro 5* é possível ver o tamanho da areia utilizada. Foi utilizada nas amassaduras dos provetes que serão ensaios à flexão e à compressão. A areia utilizada foi produzida pela empresa Tecnilab Portugal é denominada de areia calibrada C361/S1 1350g. Esta vem empacotada em sacos de 1350 gramas, *Figura 19*, e pronta a ser utilizada.

Para o ensaio de porosidade foi utilizada areia fina seca em estufa (aproximadamente 110 °C), tendo sido fornecida pelo Laboratório de Materiais de Construção de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Quadro 5 – Distribuição do tamanho das partículas de areia (Fonte: EN 196-1:1995, 1995)

Aberturas dos peneiros com malha quadrada [mm]	**Resíduos acumulados [%]**
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	99 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 1

Figura 19 – Saco de areia normalizada utilizado

3.1.4. Outros Materiais

Foram também utlizados na conceção das argamassas materiais químicos dispersantes como o Pluronico F-127, antiespumantes como o fosfato de tributilo e o dodecilbenzeno de sulfato de sódio, denominado de NaDDBS, ambos fornecidos pelo Laboratório de Química da Universidade do Minho.

3.2. Combinação nanotubos/argamassas

A abordagem mais comum para alcançar a melhor combinação dos nanotubos/argamassas é dispersar os nanotubos de uma forma adequada em água. Posteriormente, utiliza-se essa solução aquosa na confeção da argamassa.

Como já foi referido no ponto 2.4.1.2., existem técnicas diferentes para dispersar os CNTs e CNFs em água. Essas técnicas variam desde métodos químicos a métodos físicos, assim como a combinação destes dois métodos. Para a realização do presente trabalho a técnica utilizada foi a combinação dos dois métodos. Esta é a melhor opção, pois a combinação destes vem anular algumas desvantagens que possam ocorrer quando só é utilizado um dos métodos. Esta combinação de métodos, de uma forma sucinta, consiste numa combinação de químicos dispersantes, agitação magnética e ultrassons.

Este processo experimental foi realizado no Laboratório de Química e no Laboratório de Polímeros da Universidade do Minho, com a colaboração da Dra. Shama Parveen.

3.2.1. Dispersão dos CNTs na Água

O processo de dispersão dos CNTs na água iniciou-se pela adição do químico dispersante, o Pluronico F-127, que tem a missão de facilitar a dispersão dos CNTs na água. De seguida adiciona-se o antiespumante, fosfato de tributilo, que tem como objetivo impedir a formação de espuma no processo de dispersão. As quantidades a utilizar vão variando de amostra para amostra, sendo possível observar as quantidades usadas em cada amostra no *Quadro 6*. Seguidamente o pluronico é dispersado numa agitadora magnética durante 15 minutos, *Figura 20.* Enquanto a agitadora magnética atua, procedeu-se à pesagem dos CNTs numa balança de capela, como se pode observar na *Figura 21*. Esperados 15 minutos, adicionaram-se os CNTs à solução água/pluronico e levou-se novamente a solução à agitadora magnética, desta vez, durante 5 minutos. As quantidades de CNTs também variaram de amostra para amostra, como se observa no *Quadro 6.* Por fim, o processo foi finalizado, com a ida da solução preparada à máquina de ultrassons com frequência de 45 kHz durante 1 hora, de modo a completar a homogeneização da solução (equipamento pode ser observado na *Figura 22*).

Quadro 6 – Percentagem e quantidades utilizadas de CNTs, Pluronico e fosfato de tributilo

Amostra	**Tipo CNTs**	**[%] CNTs**	**CNTs [g]**	**[%] Pluronico**	**Pluronico [g]**	**[%] Fosfato Tributilo**	**Fosfato Tributilo [ml]**
1	-----	-----	-----	5	11,25	1,67	3,75
2	MWNT	0,1	0,450	5	11,25	1,67	3,75
3	MWNT	0,1	0,450	5	11,25	2,5	5,63
4	MWNT	0,1	0,450	3	6,75	1,5	3,38
5	MWNT	0,08	0,360	3	6,75	1,5	3,38
6	SWNT	0,1	0,450	5	11,25	2,5	5,63
7	SWNT	0,1	0,450	3	6,75	1,5	3,38
8	SWNT	0,08	0,360	3	6,75	1,5	3,38
9	MWNT-COOH	0,1	0,450	5	11,25	2,5	5,63
10	MWNT-COOH	0,1	0,450	3	6,75	1,5	3,38
11	MWNT-COOH	0,08	0,360	3	6,75	1,5	3,38
12	SWNT-COOH	0,1	0,450	5	11,25	2,5	5,63
13	SWNT-COOH	0,1	0,450	3	6,75	1,5	3,38
14	SWCNT-COOH	0,08	0,360	3	6,75	1,5	3,38

As percentagens de CNTs utilizadas, que se encontram no *Quadro 6,* são calculadas em relação à quantidade de cimento utilizado que foi de 450 gramas por cada amassadura. Enquanto, que as percentagens de pluronico e fosfato de tributilo utilizadas são calculados em relação à quantidade de água utilizada que foi de 225 mililitros.

Figura 20 – Agitadora magnética

Figura 21 – Balança tipo capela

Figura 22 – Equipamento de ultrassons

O resultado deste processo, são os CNTs dispersos pela água, como comprovam as imagens microscópicas da *Figura 23*, onde é possível observar os nanotubos de carbonos dispersos na solução aquosa. Através da *Figura 23* é possível observar que nos CNTs do tipo MWNT,

encontram-se mais dispersos e com menos quantidades aglomeradas. Já nos CNTs do tipo SWNT é possível observar uma dispersão com algumas quantidades de SWNT aglomeradas e um pouco menos dispersos.

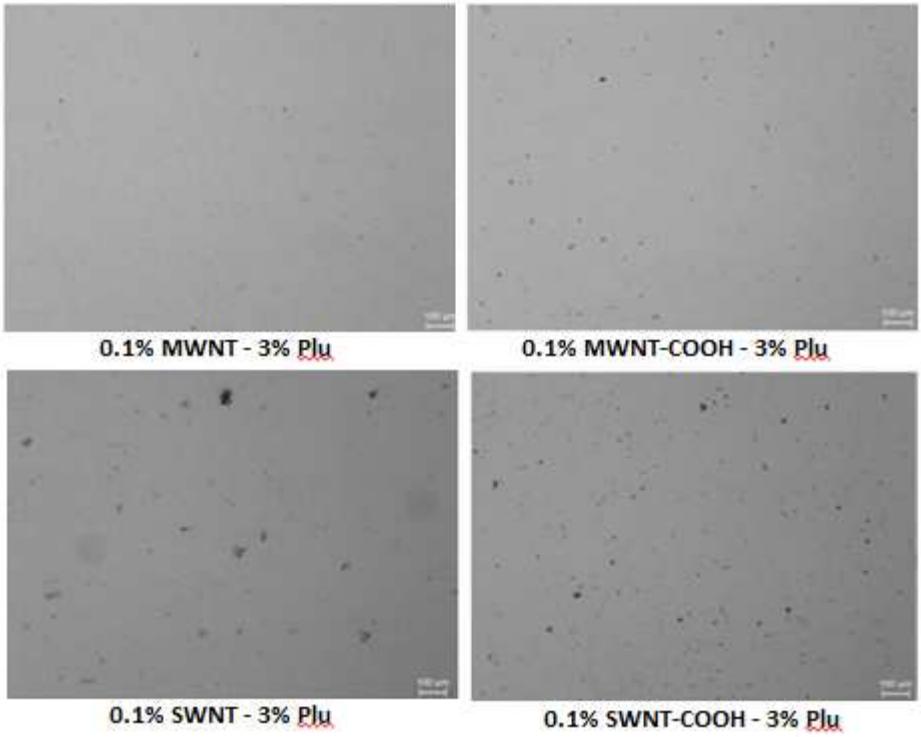


Figura 23- Imagens microscópicas à escala 100 μm de algumas amostras de CNTs dispersos em água

3.3. Preparação dos provetes de argamassa

A metodologia adotada para a preparação dos provetes foi seguida segundo a norma EN 196-1:1995. Os provetes adotados, são prismáticos com medidas de 160 x 40 x 40 mm^3. Estes provetes serão concebidos em moldes metálicos, que permitem moldar 3 provetes simultaneamente de cada amostra, (*Figura 24*). Foram elaborados 15 moldes, 1 molde de referência (argamassa no seu estado normal), e os restantes 14 com as respetivas quantidades descritas no *Quadro 6*, para a realização dos ensaios de resistência flexão e compressão. Para o ensaio de porosidade, foram elaborados 3 moldes, 1 molde de referência, outro com 3% de pluronico e 1,5% de fosfato de tributilo e outro com dodecilbenzeno de sulfato de sódio, denominado de NaDDBS. O NaDDBS é atualmente o dispersante mais utilizado na união dos CNTs com a argamassa. O traço escolhido para as amassaduras foi 1:3:0,5, que corresponde ao cimento, areia e água, respetivamente. Segundo o traço escolhido e a quantidade de areia

normalizada, obtivemos as quantidades de materiais a utilizar que se podem observar no *Quadro 7*.

Quadro 7 – Composição da argamassa de referência

Cimento [g]	**Areia [g]**	**Água [ml]**
450	1350	225

Figura 24 – Moldes utilizados 160 × 40× 40 mm

3.3.1. Processamento das amassaduras

A amassadura dos moldes inicia-se com a pesagem das quantidades necessárias numa balança eletrónica 40 kg, com precisão de 1g. Seguidamente, mistura-se, manualmente, o cimento e a solução aquosa com os CNTs, *Figura 25*. De seguida, introduz-se a mistura na misturadora de argamassas, também designada por "*flat beater*" (misturadora de eixo vertical), *Figura 26*, que mistura a areia ao cimento e solução com os CNTs automaticamente, produzindo a argamassa. Depois de produzida a argamassa, executa-se o ensaio de espalhamento e registam-se os valores obtidos.

Tendo a argamassa pronta prossegue-se com o enchimento dos moldes. Primeiro, enche-se o molde até cerca de 50% da sua capacidade e leva-se o molde à máquina de compactação onde são aplicadas 60 pancadas; em seguida enche-se os restantes 50% do molde e torna-se a levar o molde à máquina de compactação onde se aplica novamente 60 pancadas, e, por fim, nivela-se a superfície do molde. Os moldes são colocados na câmara de cura, com humidade e temperatura controladas, *Figura 27*, durante as próximas 24 horas de cura.

Ao fim das 24 horas é efetuada a desmoldagem dos provetes, *Figura 28*, sendo de seguida catalogados e colocados num recipiente submersos em água durante 28 dias, data que está prevista para a realização dos ensaios.

Figura 25 – Mistura manual dos CNTs com o cimento

Figura 26 – Misturadora "*flat beater*"

Figura 27 – Câmara de cura

Figura 28 – Desmoldagem dos provetes

CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA REFORÇADA COM NANOTUBOS DE CARBONO

4.1. Planeamento das experiências

De modo a avaliar o comportamento mecânico das argamassas reforçadas com nanotubos, foram planeadas uma série de ensaios. Durante o estado fresco da argamassa, foi executado o ensaio de espalhamento de modo a avaliar a trabalhabilidade da argamassa. Os ensaios realizados para o estado endurecido da argamassa, incluíram ensaios de resistência à flexão e compressão e ensaios de porosidade (absorção da água por imersão). Estes ensaios foram realizados ao fim de 28 dias de cura, e permitem obter as caraterísticas mecânicas das argamassas reforçadas com nanotubos.

4.1.1. Ensaio de espalhamento

Este ensaio foi realizado durante a confeção dos provetes, mais precisamente após a amassadura. O ensaio foi realizado segundo a metodologia da EN 1015-3, de março de 2004, tendo como objetivo medir a consistência e a trabalhabilidade da argamassa.

Antes de se começar o ensaio deve-se lubrificar o disco, as superfícies internas e o bordo do molde tronco cónico levemente com óleo mineral sem resina de muito baixa viscosidade. Em seguida, começa-se com o enchimento do molde tronco cónico, que se encontra no centro do disco de espalhamento, até 50% da sua capacidade. Esta camada é compactada com o auxílio do pilão, aplicando 10 pancadas na argamassa. Enche-se os restantes 50% da sua capacidade e com o pilão torna-se a aplicar 10 pancadas. Nivela-se a superfície do molde e extrai-se o molde com cuidado. Por fim executam-se 15 pancadas no disco da mesa, *Figura 29*, à média de 1 segundo por pancada. O espalhamento obtido, *Figura 29*, será a média resultante da medição do espalhamento em duas direções.

Figura 29 – Mesa de espalhamento (esquerda) e ensaio de espalhamento (direita)

4.1.2. Ensaio de resistência à flexão

Este ensaio foi realizado segundo a metodologia descrita na norma EN 1015-11, de 1999. Tem como objetivo determinar a resistência à flexão do provete. Na *Figura 30*, é possível ver o princípio descrito na norma relativa a este ensaio.

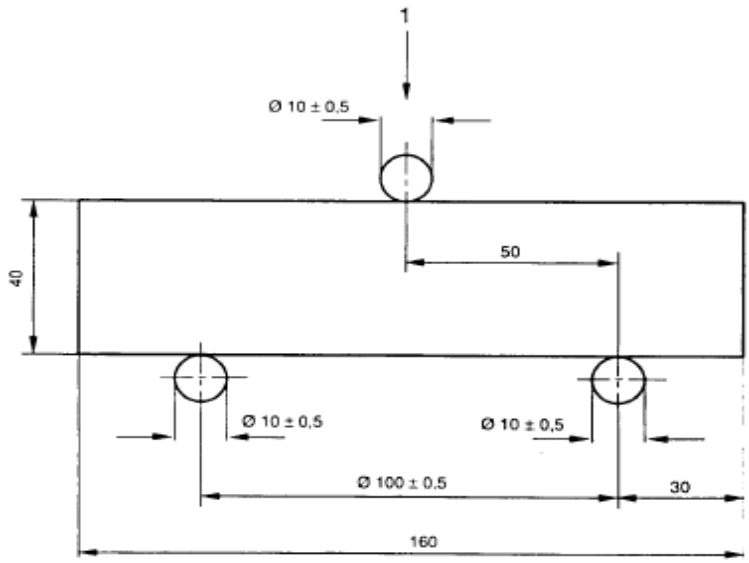


Figura 30 – Ensaio à flexão segundo a norma EN 1015-11, de 1999

Antes de iniciar o ensaio, os provetes foram pesados numa balança com precisão de 0,01 grama de modo a que seja possível retirar algumas conclusões com base na sua massa volúmica e nos resultados obtidos. A *Figura 30*, indica-nos que o provete deve ficar centrado e com o seu eixo longitudinal apoiado perpendicularmente nos roletes inferiores que se encontram espaçados de 100 mm um do outro. De seguida é colocado um rolete superior a

meio do provete, onde será aplicada uma força crescente de forma gradual até à rotura. A velocidade adotada para o ensaio, foi a velocidade máxima segundo a norma de 50 N/s. Na *Figura 31* podem ser observadas imagens do ensaio real.

Figura 31 – Execução do ensaio à flexão

Durante a colocação do provete na máquina é necessário que a superfície livre da moldagem não fique apoiada nos roletes, pois se o provete não estiver bem apoiado, podem ocorrer irregularidades durante o ensaio, levando a máquina a fornecer dados inconclusivos.

No fim do ensaio regista-se o total de carga aplicada que levou à rotura do provete e calcula-se a resistência à flexão segundo a equação que se encontra na norma, dada pela seguinte equação:

$$f = 1{,}5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Onde,

f – resistência à flexão, em [MPa];

F – carga máxima aplicada ao provete, em [N];

l – distancia entre os roletes de apoio, em [mm];

b – largura do provete, em [mm];

d – espessura do provete, em [mm].

Através deste ensaio é possível calcular o módulo de elasticidade.

4.1.2.1. Módulo de Elasticidade ou de Young

Através do módulo de elasticidade é possível avaliar a rigidez das argamassas. O módulo de elasticidade foi calculado com base na curva obtida no ensaio. Converte-se a força que a máquina exerce sobre o provete e o deslocamento que ocorre no mesmo, para uma tensão e uma deformação, respetivamente, obtendo-se assim a curva tensão/deformação. Tendo esta curva, o módulo de elasticidade é retirado através de uma reta tangente ou secante. Outro modo de calcular o módulo de elasticidade, é em função da flecha, considerando a tensão no regime elástico-linear é através da fórmula (Bastos, P., et al., 2010):

$$E = \frac{P \times L^3}{4 \times \delta \times b \times h^3} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Onde,
E – módulo de elasticidade ou de Young, em [MPa];
P – carga aplicada no meio do corpo-de prova, em [N];
L – distância entre os apoios;
b – maior lado da secção transversal do corpo-de-prova, em [mm];
h – espessura do corpo-de-prova, em [mm];
δ – deslocamento no meio do corpo-de-prova, em [mm].

4.1.3. Ensaio de resistência à compressão

Este ensaio, tal como o anterior, foi realizado segundo a metodologia da norma EN 1015-11, de 1999. Tem como objetivo determinar a resistência à compressão do provete. Devido a termos utilizados provetes prismáticos, os provetes utilizados no ensaio à compressão foram as duas metades originadas pelo ensaio à flexão.

A realização do ensaio foi simples, bastando para tal colocar metade do provete na prensa de ensaios "*Elle*", entre os pratos inferior e superior, e aplicar uma força crescente de forma gradual até à rotura do provete, *Figura 32*. A velocidade adotada para o ensaio foi inicialmente de 250 N/s, sendo depois reajustada para a velocidade máxima permitida pela norma de 500 N/s. Tal como no ensaio à flexão, aqui também é necessário que a superfície livre da moldagem não fique apoiada nos pratos.

Figura 32 – Execução do ensaio à compressão

No fim do ensaio regista-se o total de carga aplicada que levou à rotura do provete e calcula-se a resistência à compressão segundo a especificação da norma.

Segundo a norma, a resistência à compressão é a carga máxima aplicada ao provete a dividir pela sua área transversal, assim a sua equação é:

$$fc = \frac{F}{Ac} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Onde,

fc – resistência à compressão, em [MPa];

F – carga máxima aplicada ao provete, em [N];

Ac – área da secção transversal do provete, em [mm^2].

4.1.4. Ensaio de absorção da água por imersão (porosidade)

Este ensaio foi realizado segundo a metodologia da especificação do LNEC E 395-1993, maio de 1993. Esta especificação destina-se ao ensaio de betões, por isso, teve-se em atenção as alterações necessárias para se poder executar o ensaio em provetes de argamassa.

Neste ensaio foram utilizados 3 provetes prismáticos, sendo eles um com argamassa de referência, outro contendo 3% de pluronico e 1,5% de fosfato de tributilo e, outro contendo NaDDBS. Este ensaio servirá para comparar o dispersante utilizado, pluronico e fosfato de

tributilo com o NaDDBS, pois o NaDDBS é atualmente o dispersante mais utilizado na união dos CNTs com a argamassa.

Sumariamente, este ensaio consiste em três pesagens, estas pesagens foram feitas numa balança HD 1200, de 1200 gramas, com precisão de 0,01 grama. Ao fim de 28 dias submersos em água, os provetes foram retirados e pesados, obtendo-se o seu peso no estado saturado. Teve-se o cuidado de limpar com um pano húmido a superfície dos provetes, para retirar a água em excesso. De seguida, os provetes foram imersos e pesados de baixo de água obtendo a sua massa hidrostática. Por fim, obteve-se o peso dos provetes secos, colocando-os numa estufa a 105 ± 5 °C, até se obter uma massa constante, isto é, a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24 horas deve ser inferior a 0,1%. Segundo a norma a absorção de água por imersão é dada pela equação seguinte:

$$A_{cv} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde,

m_1 – massa do provete seco, em [g]

m_2 – massa hidrostática do provete depois de saturado no vácuo, em [g];

m_3 – massa do provete saturado no vácuo, em [g].

4.2. Resultados obtidos e respetiva análise

Neste item são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos nos ensaios realizados. A argamassa de referência será alvo de comparação com as argamassas que contêm nanotubos de carbono e os resultados serão devidamente analisados se modo a perceber se a introdução de nanotubos de carbono provocou a melhoria das caraterísticas mecânicas da argamassa.

4.2.1. Ensaio de espalhamento

Este ensaio teve como objetivo avaliar a trabalhabilidade da argamassa constituída por CNTs. Sendo as dimensões dos nanotubos de carbono à escala nano, é de prever que a

trabalhabilidade não seja muito afetada em comparação com a argamassa de referência. Os resultados obtidos encontram-se apresentados no *Quadro 8*.

Quadro 8 – Resultados do ensaio ao espalhamento, em centímetros [cm]

Tipo e % de CNTs	[%] Pluronico	]%] Fosfato Tributilo	Espalhamento [cm]
Argamassa Referência	---	---	18,80
Não contém	5	1,67	18,25
0,1% MWNT	5	1,67	18,40
0,1% MWNT	5	2,5	18,50
0,1% MWNT	3	1,5	18,35
0,08% MWNT	3	1,5	18,75
0,1% SWNT	5	2,5	17,55
0,1% SWNT	3	1,5	17,80
0,08% SWNT	3	1,5	17,65
0,1% MWNT-COOH	5	2,5	18,15
0,1% MWNT-COOH	3	1,5	19,05
0,08% MWNT-COOH	3	1,5	18,55
0,1% SWNT-COOH	5	2,5	17,35
0,1% SWNT-COOH	3	1,5	18,95
0,08% SWNT-COOH	3	1,5	19,20

Tal como era de esperar a adição de nanotubos de carbono à argamassa praticamente não se fez notar no ensaio de espalhamento, ou seja, a trabalhabilidade não é afetada pela adição de nanotubos de carbono à argamassa. Como se pode observar no *Quadro 8* os resultados são todos muito próximos do resultado da argamassa de referência, sendo que em alguns casos até se consegue atingir espalhamentos superiores. Os CNTs do tipo SWNT são os que apresentam espalhamentos ligeiramente inferiores, proporcionando uma consistência ligeiramente superior, no entanto, a sua trabalhabilidade não é afetada.

Estes resultados demonstram que ao nível da trabalhabilidade é preferível usar nanotubos de carbono em detrimento das fibras de carbono, pois, segundo as experiências de Gonzalez, J., (2007), a trabalhabilidade é afetada pela adição de fibras de carbono, sendo necessária a utilização de um adjuvante de modo a atenuar a trabalhabilidade.

4.2.2. Variação da massa volúmica dos provetes

Ao fim de 28 dias de cura, os provetes encontram-se prontos para a execução dos ensaios. Antes da execução dos ensaios, os provetes foram pesados numa balança HD 1200, de 1200

gramas, com precisão de 0,01 grama. No *Quadro 9* e na *Figura 34* estão registados os pesos dos provetes e respetivas variações.

Quadro 9 – Diferença do peso médio dos provetes que contém CNTs em relação ao provete de referência

Tipo e % de CNTs	[%] Pluronico	[%] Fosfato Tributilo	Peso Médio dos Provetes [g]	[%] Diferença de peso
Argamassa Referência	---	---	598,3	---
Não contém	5	1,67	565,0	5,6
0,1% MWNT	5	1,67	538,7	10
0,1% MWNT	5	2,5	565,3	5,5
0,1% MWNT	3	1,5	570,7	4,6
0,08% MWNT	3	1,5	579,0	3,2
0,1% SWNT	5	2,5	582,0	2,7
0,1% SWNT	3	1,5	576,7	3,6
0,08% SWNT	3	1,5	583,0	2,6
0,1% MWNT-COOH	5	2,5	569,7	4,8
0,1% MWNT-COOH	3	1,5	573,0	4,2
0,08% MWNT-COOH	3	1,5	571,3	4,5
0,1% SWNT-COOH	5	2,5	572,0	4,4
0,1% SWNT-COOH	3	1,5	566,3	5,3
0,08% SWNT-COOH	3	1,5	565,0	5,6

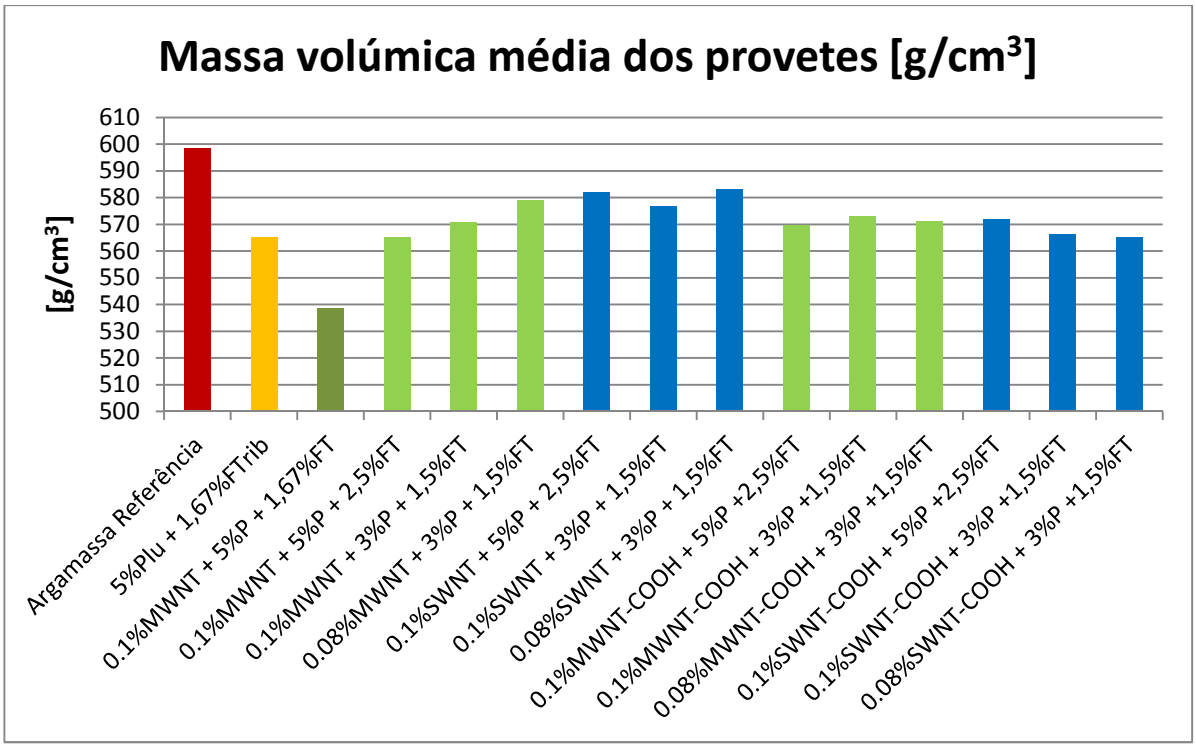


Figura 33 – Gráfico de barras com os pesos médios dos provetes

É possível observar na *Figura 33*, que a introdução de CNTs na argamassa provocou uma redução da massa volúmica em todos os provetes comparativamente com os provetes de referência. A redução da massa nos provetes varia entre 2,6% e os 10%. Os CNTs do tipo SWNT são onde se verifica uma menor redução de massa comparativamente com as outras argamassas, tendo todos os provetes uma massa a rondar os 580 gramas. O grupo dos CNTs funcionalizados com COOH a oscilação de peso não é significativa, a massa destes provetes encontram-se todos próximos dos 570 gramas. Já no grupo dos MWNT é onde se verifica maior oscilação de pesos, dando-se destaque para os provetes de MWNT que contém 1,67% de fosfato de tributilo, são os que obtém menor massa. Nestes provetes é de prever que se obtenham resultados bem diferentes dos outros provetes.

Como a densidade dos CNTs é muito baixa, era de prever que o peso dos provetes não sofre-se grandes alterações. O que se observou, foi precisamente o contrário, onde a introdução de CNTs na argamassa proporcionou a diminuição do peso próprio da matriz cimentícia. Esta diminuição do peso poderá estar relacionada com o desenvolvimento de outros materiais durante o processo de amassadura. Esta diminuição do peso próprio da matriz cimentícia pode revelar-se benéfica, pois permitirá que as estruturas não sejam obrigadas a suportarem cargas elevadas relativas ao seu peso próprio.

4.2.3. Ensaio de resistência à flexão

Neste ensaio foram testados três provetes de cada argamassa com o objetivo de avaliar as caraterísticas mecânicas, nomeadamente a resistência à flexão dos provetes constituídos por CNTs. Todos os ensaios foram realizados 28 dias após a amassadura. Sendo este ensaio monitorizado, também foi possível comparar a resistência à flexão com a flecha, assim como calcular o módulo de elasticidade. Os resultados relativos aos ensaios de flexão estão apresentados no *Quadro 10* e na *Figura 35.*

Quadro 10 – Tenções de flexão médias obtidas

Tipo e % de CNTs	[%] Pluronico	[%] F.Tributilo	Resistência Flexão [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	[%] Coeficiente Variação
Argamassa Referência	---	---	8,242	0,498	6,04
Não contém	5	1,67	6,956	0,061	0,88
0,1% MWNT	5	1,67	5,213	0,128	2,45
0,1% MWNT	5	2,5	6,350	0,437	6,89
0,1% MWNT	3	1,5	5,995	0,000	0,00
0,08% MWNT	3	1,5	7,372	0,253	3,43
0,1% SWNT	5	2,5	7,588	0,266	3,50
0,1% SWNT	3	1,5	7,632	0,322	4,22
0,08% SWNT	3	1,5	7,550	0,255	3,38
0,1% MWNT-COOH	5	2,5	7,085	0,189	2,67
0,1% MWNT-COOH	3	1,5	7,095	0,332	4,68
0,08% MWNT-COOH	3	1,5	6,714	0,213	3,17
0,1% SWNT-COOH	5	2,5	7,092	0,182	2,56
0,1% SWNT-COOH	3	1,5	6,686	0,225	3,36
0,08% SWNT-COOH	3	1,5	6,418	0,202	3,15

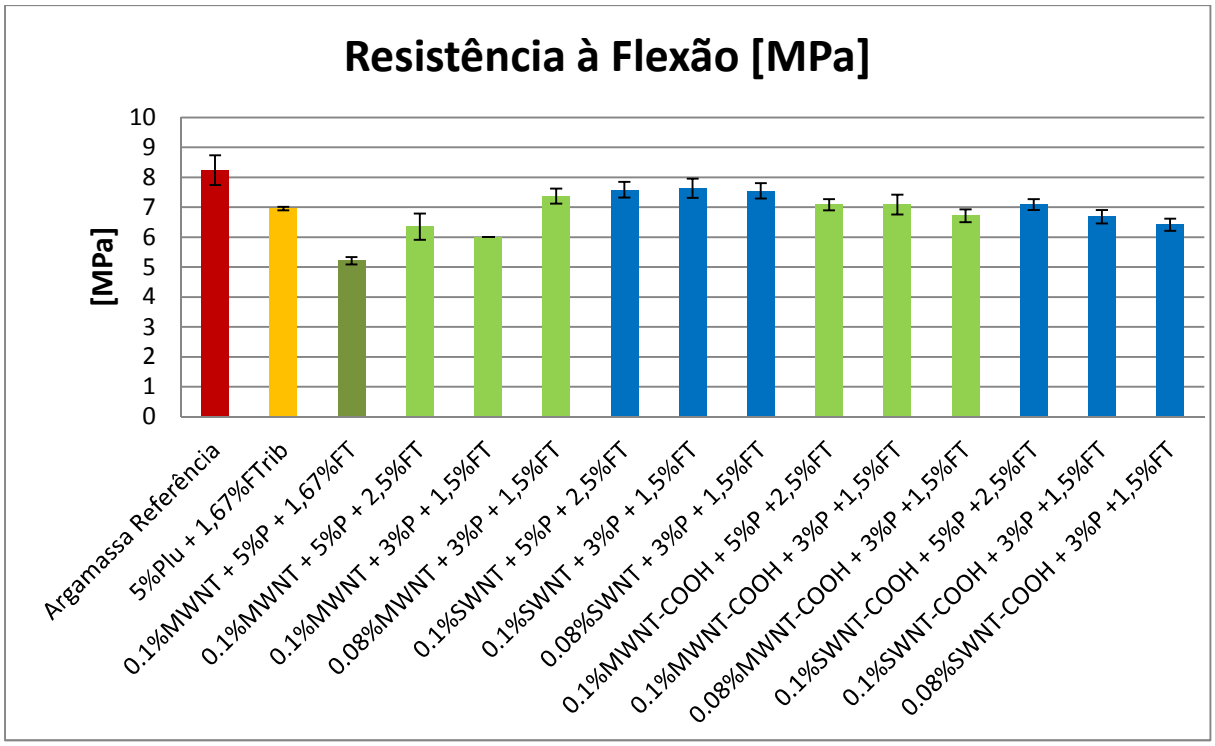


Figura 34 - Gráfico de barra com a resistência à flexão média e respetivo desvio padrão

Observando o *Quadro 10* e a *Figura 34*, é possível tirar algumas conclusões. Todos os resultados das composições de nanotubos utilizadas são inferiores à argamassa de referência. Contudo, é possível observar que os nanotubos do tipo SWNT apresentam valores muito semelhantes à argamassa de referência, sendo a amostra com 0,1% de SWNT, 3% de pluronico e 1,5% de fosfato de tributilo a que tem uma resistência mais semelhante. Comparando as amostras entre si, é possível ver que as amostras que contêm SWNT apresentam melhores resultados que as amostras de MWNT. Os resultados obtidos para as amostras de MWNT são os que apresentam maior variabilidade. A amostra de 0,1% de MWNT, 3% de pluronico e 1,5% de fosfato de tributilo não é totalmente conclusiva, pois só foi utilizado um provete para análise, devido à ocorrência de problemas com os outros dois provetes durante o ensaio à flexão. A funcionalização dos CNTs com ácido carboxílico (COOH) deu origem a resistências de flexão muito semelhantes, no entanto, foram inferiores às melhores resistências de flexão das argamassas com CNTs normais.

Na argamassa de MWNT que contêm 1,67% de fosfato de tributilo, já era de esperar um resultado diferente, pois como já foi referido o peso deste provete é muito inferior aos outros. Neste caso foi obtida uma resistência à flexão bem inferior às restantes argamassas. Podemos então pensar que a utilização de uma baixa quantidade de fosfato de tributilo em relação à

quantidade de pluronico utilizada na dispersão dos CNTs, diminui a resistência à flexão, tal como se pode ver na *Figura 34*. Observam-se duas argamassas iguais onde só muda a quantidade de fosfato de tributilo utilizado. De referir que a argamassa que contém somente pluronico e fosfato de tributilo apresenta melhor resistência à flexão que as duas argamassas referidas anteriormente, isto poderá dever-se ao fato de ocorrer alguma reação durante a amassadura.

De referir que apesar da argamassa de referência ser a que apresenta os melhores resultados, é o que apresenta maior coeficiente de variação, já as amostras com CNTs apresentam coeficientes de variação baixos.

Como este ensaio foi monitorizado ao longo da sua execução, foi possível retirar outros dados importantes para avaliar a resistência à flexão dos provetes com CNTs. Com a monitorização do ensaio é possível retirar a flecha de cada provete. Assim, com base na resistência à flexão, elaborou-se um gráfico que relaciona a resistência à flexão com a flecha de cada provete, *Figura 35*.

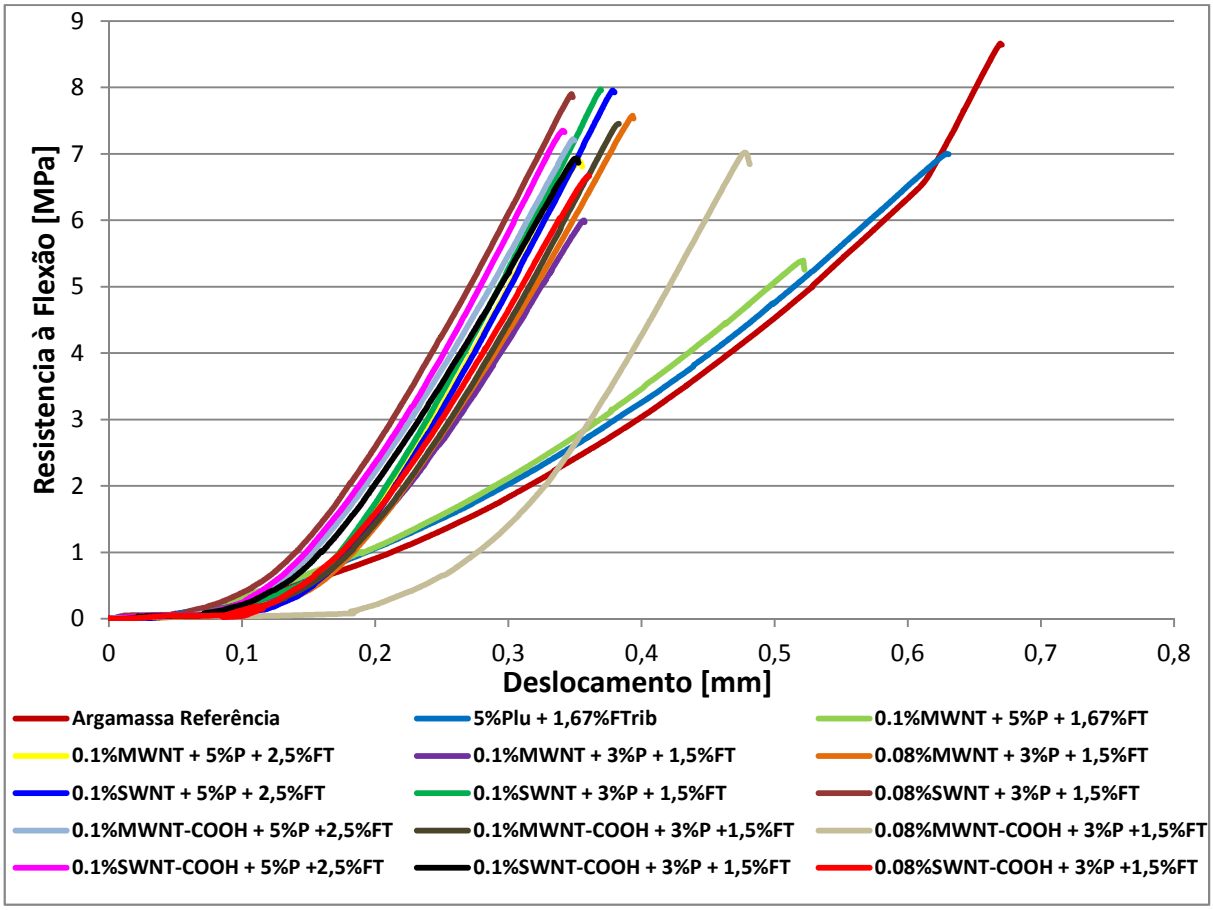


Figura 35 – Relação entre a resistência à flexão e o comprimento de flexão dado pela máquina

Examinando o gráfico podemos afirmar que as argamassas que contém CNTs, apesar de terem resistência à flexão ligeiramente inferior, a adição de CNTs veio melhorar significativamente a rigidez das argamassas, em sentido contrário, a ductilidade diminuiu. A argamassa de referência é a que obtém maior flecha, seguido da argamassa que contém 5% de pluronico e 1,67% de fosfato de tributilo, o que sugere que a adição de CNTs tem influência direta no aumento da rigidez da argamassa de cimento. As flechas são semelhantes em quase todas as argamassas com CNTs utilizadas, sendo praticamente metade do comprimento de flexão da argamassa de referência, o que leva a querer que a rigidez das argamassas com CNTs aumenta quase o dobro comparada com a argamassa de referência.

Com base nestes resultados podemos afirmar que a adição de CNTs à argamassa influencia significativamente o módulo de elasticidade ou de Young.

4.2.3.1. Módulo de Elasticidade ou de Young

Tendo em conta os resultados do ensaio de resistência à flexão, é possível retirar algumas inferências referentes ao módulo de elasticidade. Analisando o gráfico da *Figura 36* do ensaio à flexão pode-se afirmar que a adição de CNTs à argamassa provoca um aumento significativo da rigidez. Esse aumento de rigidez corresponde, por seu lado, ao aumento do módulo de elasticidade ou de Young, ou seja, quanto maior for o módulo de elasticidade, maior será a rigidez.

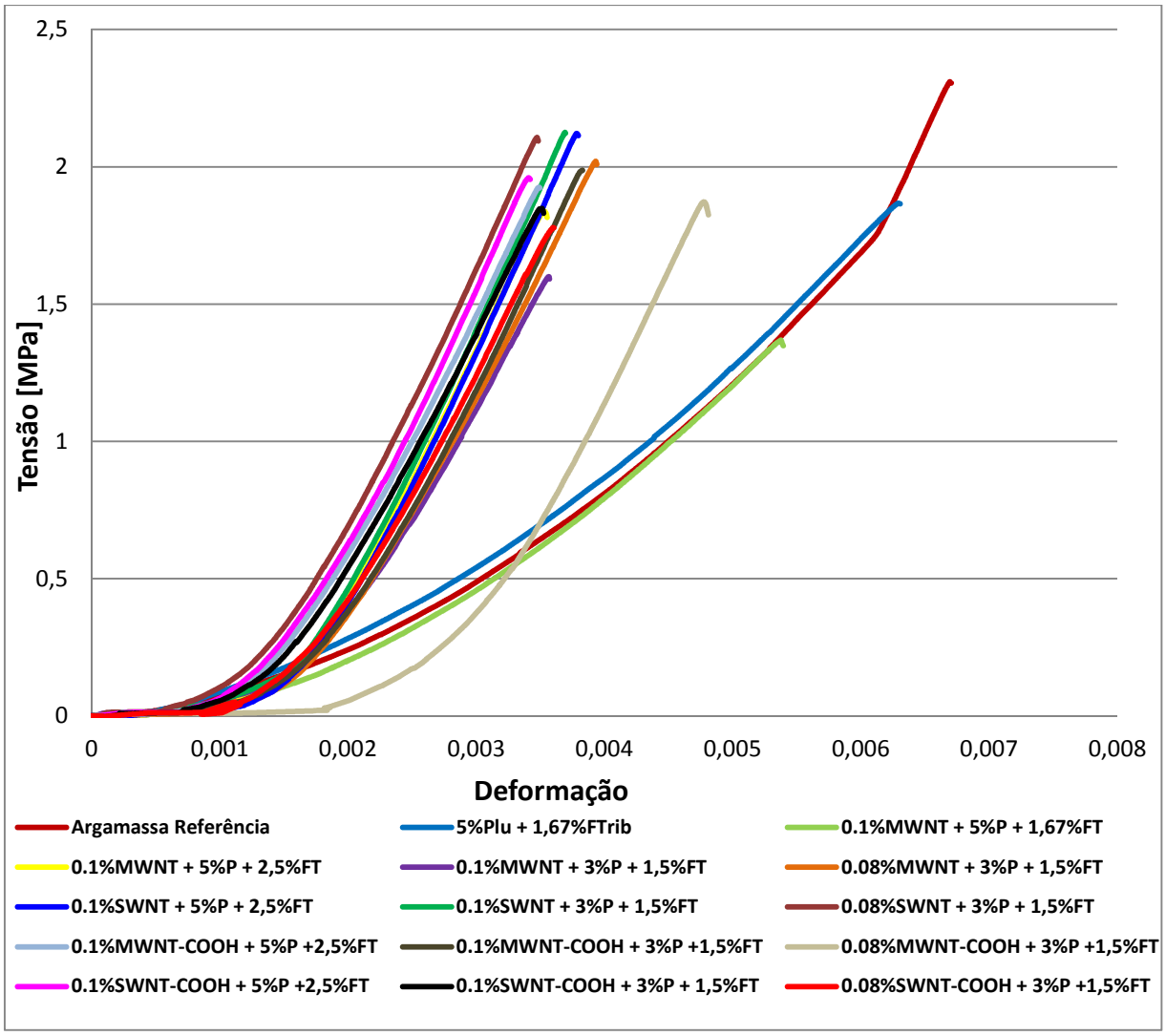


Figura 36 - Curvas Tensão/Deformação resultantes do ensaio à flexão

Como podemos ver no gráfico da *Figura 36*, a argamassa de referência é a que apresenta maior tensão. No entanto, este apresenta uma elevada deformação o que nos leva a acreditar que o seu módulo de elasticidade será baixo, tal como a amostra que contém 5% de pluronico e 1,67% de fosfato de tributilo, que também apresenta elevada deformabilidade. O mesmo já não se pode dizer das argamassas que contêm CNTs, que apesar de terem tensões máximas ligeiramente inferiores às da argamassa de referência, apresentam deformações muito inferiores, sendo que, na maioria dos casos, essa deformação é quase metade da deformação da argamassa de referência.

O módulo de elasticidade foi calculado a partir da *equação 2* (Bastos, P., et al., 2010), em função da flecha, considerando a tensão no regime elástico-linear. Esses módulos encontram-se representados no *Quadro 11* e na *Figura 37*.

Quadro 11 – Módulos de elasticidade médios obtidos

Tipo e % de CNTs	[%] Pluronico	[%] F.Tributilo	Módulo de Elasticidade [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	[%] Coeficiente Variação
Argamassa Referência	---	---	447,00	69,03	15,44
Não contém	5	1,67	401,40	58,74	14,63
0,1% MWNT	5	1,67	415,21	13,92	3,35
0,1% MWNT	5	2,5	706,47	91,37	12,93
0,1% MWNT	3	1,5	699,73	0,00	0,00
0,08% MWNT	3	1,5	837,75	60,28	7,20
0,1% SWNT	5	2,5	873,93	36,03	4,12
0,1% SWNT	3	1,5	820,14	59,89	7,30
0,08% SWNT	3	1,5	930,93	70,41	7,56
0,1% MWNT-COOH	5	2,5	828,83	29,74	3,59
0,1% MWNT-COOH	3	1,5	732,89	70,43	9,61
0,08% MWNT-COOH	3	1,5	648,23	29,27	3,59
0,1% SWNT-COOH	5	2,5	850,08	47,07	5,54
0,1% SWNT-COOH	3	1,5	783,17	35,01	4,47
0,08% SWNT-COOH	3	1,5	777,89	63,96	8,22

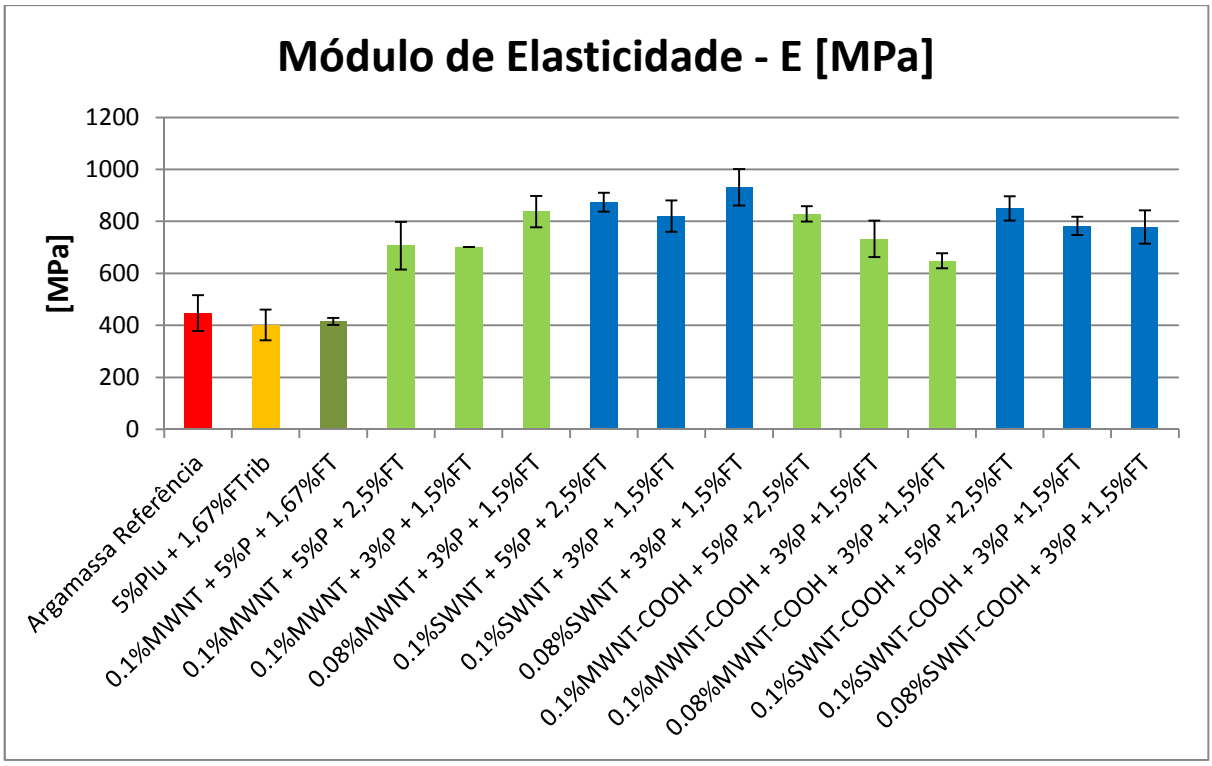


Figura 37 - Gráfico de barras com o módulo de elasticidade médios e respetivo desvio padrão

Os resultados do *Quadro 11* e do gráfico da *Figura 37* vêm confirmar o que já se tinha constatado, que o módulo de elasticidade das argamassas que contém CNTs aumentou significativamente, sendo que, em alguns casos, chega a aumentar para perto do dobro comparativamente com a argamassa de referência.

Na *Figura 37* pode-se observar que a argamassa de referência e a argamassa que contém 5% de pluronico e 1,67% de fosfato de tributilo, são as que apresentam menores módulos de elasticidade. As argamassas que contém CNTs do tipo SWNT são as que têm o módulo de elasticidade mais elevado comparadas com as argamassas que contém MWNT. A argamassa que contém 0,08% de SWNT, 3% de pluronico e 1,5% de fosfato de tributilo é a que apresenta o módulo de elasticidade mais elevado. A funcionalização dos CNTs com ácido carboxílico (COOH) originou uma diminuição do módulo de elasticidade na argamassa que contém 0,08% de MWNT, 3% de pluronico e 1,5% de fosfato de tributilo, em relação aos CNTs normais. As argamassas que contêm SWNT apresentam valores mais semelhantes enquanto as argamassas de MWNT são mais oscilantes. Na argamassa de MWNT que contém 1,67% de fosfato de tributilo, para além de apresentar uma resistência à flexão baixa também apresenta um baixo módulo de elasticidade, por isso, podemos concluir que as quantidades utilizadas na dispersão dos CNTs não são benéficas à argamassa.

Por fim, é de salientar que o coeficiente de variação do módulo de elasticidade das argamassas testadas apresenta valores um pouco elevados em algumas argamassas. No entanto, este fato era expetável, pois a utilização deste método estático e destrutivo para o cálculo do módulo de elasticidade, por norma, apresenta coeficientes de variação elevados. O mais indicado para a determinação do módulo de elasticidade era a utilização de um método dinâmico não destrutivo.

4.2.4. Ensaio da resistência à compressão

Este ensaio é muito importante, pois a resistência à compressão é a caraterística mais importante do betão/argamassas, já que a sua função é essencialmente resistir a tensões de compressão. Foram testados seis meios provetes oriundos do ensaio à flexão. Tal como o ensaio à flexão, este ensaio também avalia as caraterísticas mecânicas dos provetes constituídos por CNTs. Estes ensaios foram também realizados 28 dias depois da amassadura. No *Quadro 12* e na *Figura 38* estão reunidos todos os resultados do ensaio à compressão.

Quadro 12 – Tensões de compressão médias obtidas

Tipo e % de CNTs	[%] Pluronico	[%] F.Tributilo	Resistência Compressão [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	[%] Coeficiente Variação
Argamassa Referência	---	---	45,233	1,33	2,93
Não contém	5	1,67	33,155	1,53	4,61
0,1% MWNT	5	1,67	20,095	0,91	4,55
0,1% MWNT	5	2,5	29,644	2,34	7,90
0,1% MWNT	3	1,5	32,911	1,32	4,02
0,08% MWNT	3	1,5	34,921	1,66	4,75
0,1% SWNT	5	2,5	39,743	1,71	4,30
0,1% SWNT	3	1,5	41,951	1,76	4,19
0,08% SWNT	3	1,5	41,008	1,17	2,85
0,1% MWNT-COOH	5	2,5	31,580	1,13	3,57
0,1% MWNT-COOH	3	1,5	35,472	0,80	2,24
0,08% MWNT-COOH	3	1,5	34,514	1,91	5,54
0,1% SWNT-COOH	5	2,5	36,182	1,97	5,44
0,1% SWNT-COOH	3	1,5	31,902	1,71	5,36
0,08% SWNT-COOH	3	1,5	30,804	2,41	7,83

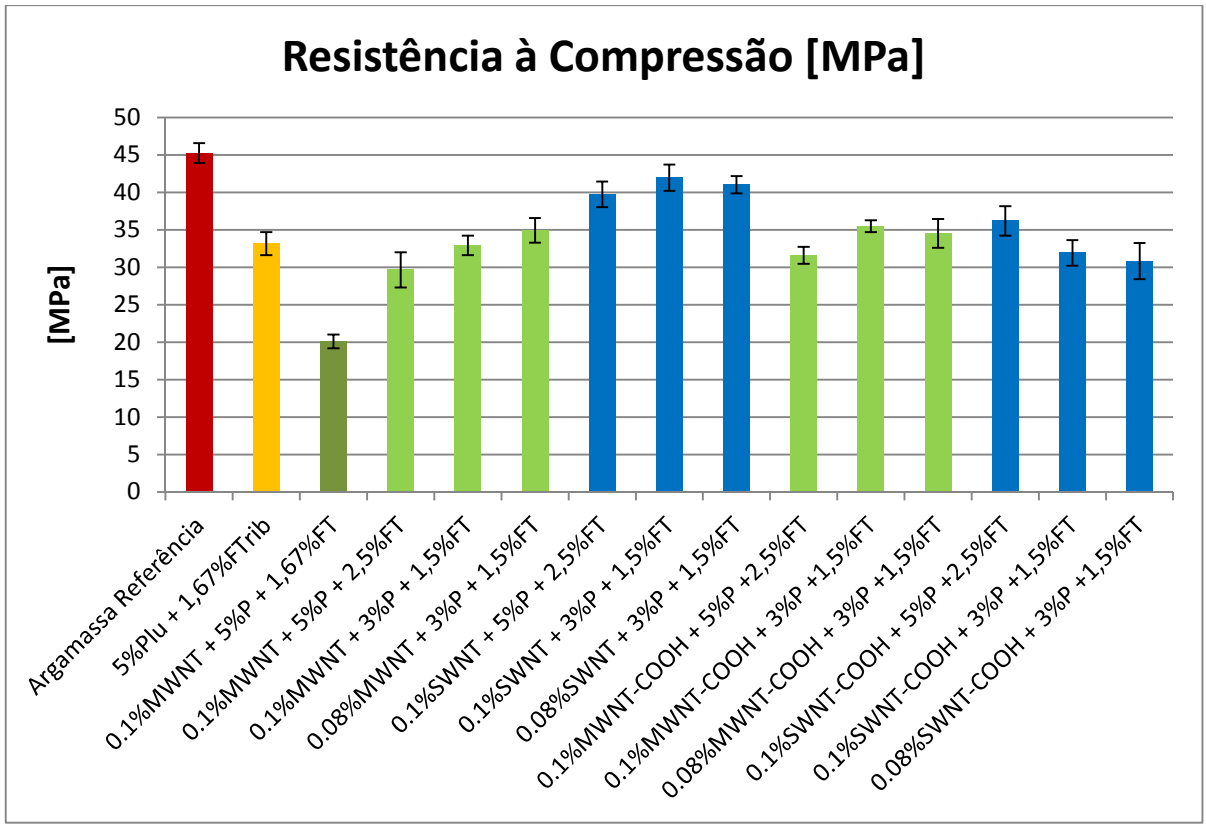


Figura 38 – Gráfico de barras com a resistência à compressão média e respetivo desvio padrão

Observando a *Quadro 12* e o gráfico da *Figura 38*, é possível tirar várias ilações. Tal como na resistência à flexão, todas as composições de nanotubos utilizadas apresentam valores inferiores à argamassa de referência. No entanto, os nanotubos do tipo SWNT apresentam valores muito próximos da argamassa de referência, nomeadamente a amostra com 0,1% de SWNT, 3% de pluronico e 1,5% de fosfato de tributilo tem uma resistência muito semelhante à argamassa de referência. Relativamente aos tipos de CNTs usados, verifica-se que as amostras que contém SWNT têm resistências superiores às amostras que contêm MWNT. As amostras de MWNT são as que apresentam maior variabilidade dos resultados. Conclui-se também que a funcionalização dos CNTs com ácido carboxílico (COOH) deu origem a resistências de compressão inferiores comparadas com os CNTs normais.

Neste ensaio a argamassa de MWNT que contém 1,67% de fosfato de tributilo, também obteve um resultado bem inferior às restantes argamassas. Este ensaio deu continuidade ao ensaio de flexão, em que a utilização de uma baixa quantidade de fosfato de tributilo em relação à quantidade de pluronico utilizada na dispersão dos CNTs, diminui muito a resistência à compressão, tal como se pode observar na *Figura 39*, duas amostra iguais onde

apenas se varia a quantidade de fosfato de tributilo utilizada. De referir que a argamassa que contém somente pluronico e fosfato de tributilo apresenta melhor resistência à compressão que as duas argamassas referidas anteriormente, isto poderá dever-se ao fato de ocorrer alguma reação durante a amassadura. Os valores obtidos nos ensaios são coerentes, como comprova o baixo coeficiente padrão obtido em cada argamassa.

4.2.5. Ensaio de absorção da água por imersão (porosidade)

Através deste ensaio é possível retirar algumas conclusões relativas à porosidade das argamassas analisadas. Efetuando algumas pesagens é possível tirar a percentagem de água absorvida pelo provete, e é através dessa percentagem que se retiram as ilações relativas à porosidade. Os resultados obtidos são apresentados no *Quadro 13*.

Quadro 13 – Percentagem de água absorvida pelos provetes

Amostra	Massa do provete saturado no vácuo [g]	Massa hidrostática do provete depois de saturado no vácuo [g]	Massa do provete seco [g]	[%] Absorção de água por imersão
Argamassa Referência	563,1	305,5	519	17,12
3% Pluronico + 1,5% Fosfato Tributilo	564,5	305,2	524	15,62
NaDDBS	504,0	244,0	452	20,00

Através do *Quadro 13* podemos comparar a porosidade de duas amostras químicas que se utilizam para dispersar os CNTs em água. Em relação à argamassa de referência é possível observar que a adição de pluronico e fosfato de tributilo à argamassa, provoca uma diminuição de água por absorção, que se reflete numa menor porosidade, ou seja, esta adição provocou uma diminuição no tamanho dos poros. Já a argamassas que contém NaDDBS provoca o efeito contrário, ou seja, provoca o aumento do tamanho dos poros, aumentando assim a porosidade.

Sendo atualmente o dodecilbenzeno de sulfato de sódio, NaDDBS, o produto mais utilizado na dispersão dos CNTs, verifica-se que a escolha do pluronico e do fosfato de tributilo como

dispersante será a mais acertada, pois estes proporcionam uma argamassa com menor porosidade. Tendo a argamassa pouca porosidade, isto significa que o seu interior terá poucos poros e que os agregados da argamassa estão mais concentrados, o que irá originar a uma melhoria das suas caraterísticas mecânicas.

Neste ensaio destaca-se que a adição de pluronico e fosfato de tributilo provocam uma diminuição da porosidade na matriz cimentícia e que a utilização destes é mais benéfica que o produto atualmente mais utilizado na dispersão dos CNTS, o NaDDBS.

4.3. Análise económica

Os elevados custos dos nanotubos de carbono ainda são o grande obstáculo da sua utilização na construção civil. Isto deve-se ao fato da produção dos CNTs em larga escala ainda ser limitada, porém com o avanço da tecnologia esta realidade está a mudar e a tendência dos preços é diminuir. Assim, este tópico tem como objetivo comparar a diferença de custos entre a argamassa de referência e as argamassas que contêm CNTs. Esta análise económica refere-se às argamassas que foram sujeitas aos ensaios de flexão e compressão.

No *Quadro 14* e na *Figura 39* que se segue, é possível observar os custos dos materiais utilizados na produção das argamassas assim como o custo total de cada argamassa.

Quadro 14 – Custo total de cada argamassa, em euros [€]

Tipo e % de CNTs	Custo CNTs	Custo Pluronico	Custo F. Tributilo	Custo Cimento	Custo Areia	Custo Água	Custo Total
Argamassa Referência	---	---	---	0,0439	6,19	0,00011	6,23€
Não contém	---	2,61	1,61	0,0439	6,19	0,00011	10,45€
0,1% MWNT	4,73	2,61	1,61	0,0439	6,19	0,00011	15,18€
0,1% MWNT	4,73	2,61	2,42	0,0439	6,19	0,00011	15,99€
0,1% MWNT	4,73	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	13,98€
0,08% MWNT	3,78	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	13,03€
0,1% SWNT	7,16	2,61	2,42	0,0439	6,19	0,00011	18,42€
0,1% SWNT	7,16	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	16,41€
0,08% SWNT	5,72	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	14,97€
0,1% MWNT-COOH	5,74	2,61	2,42	0,0439	6,19	0,00011	17,00€
0,1% MWNT-COOH	5,74	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	14,99€

0,08%MWNT-COOH	4,59	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	13,84€
0,1%SWNT-COOH	32,54	2,61	2,42	0,0439	6,19	0,00011	43,80€
0,1%SWNT-COOH	32,54	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	41,79€
0,08%SWNT-COOH	26,03	1,57	1,45	0,0439	6,19	0,00011	35,28€

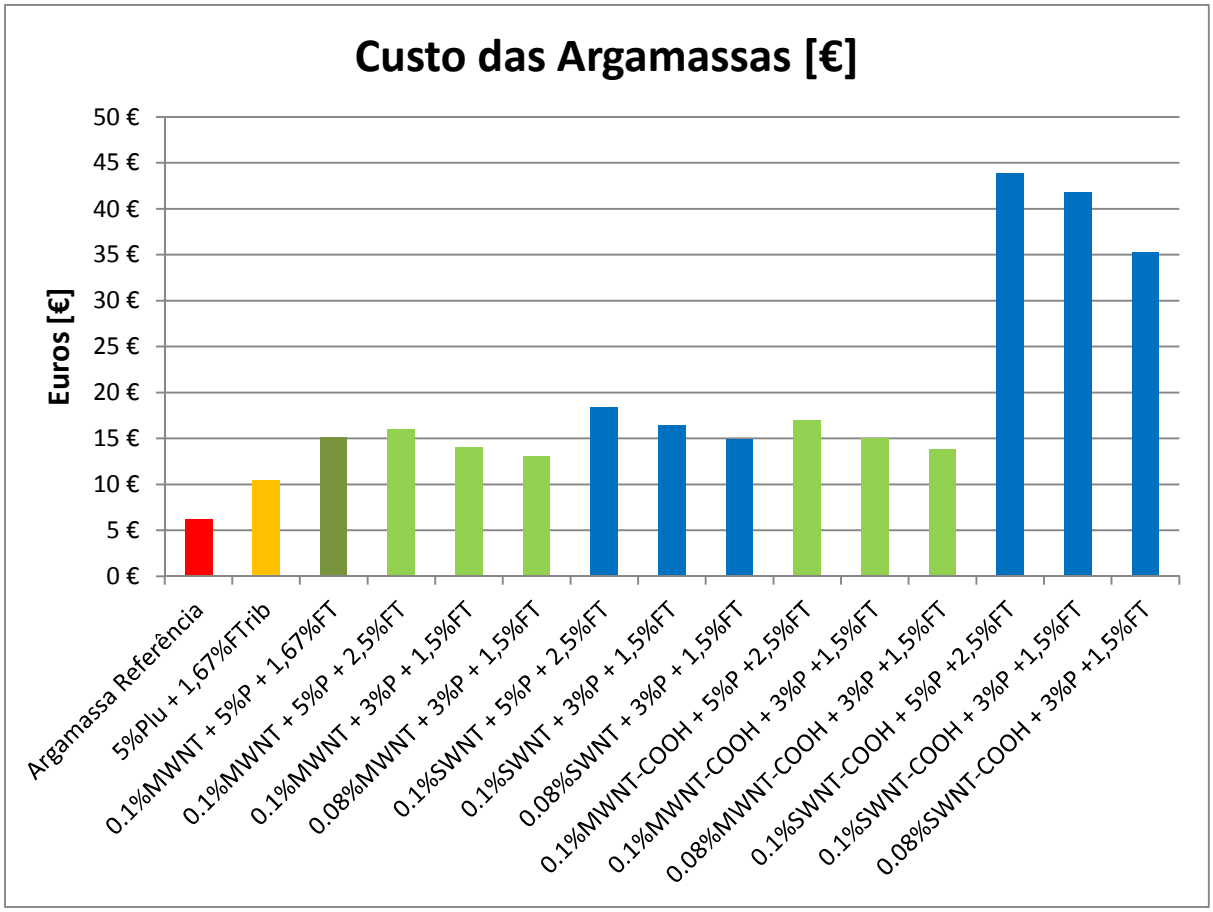


Figura 39 - Gráfico de barras com o custo da cada argamassa, em euros [€]

No *Quadro 14* e na *Figura 39* observa-se que a argamassa de referência é a que tem um custo menor, o que já era de prever visto que na preparação desta argamassa só se utilizaram os materiais convencionais. As argamassas que contêm CNTs possuem um custo maior devido ao elevado custo dos CNTs.

Analisando o custo das argamassas com os resultados obtidos é possível obter algumas conclusões. As argamassas com CNTs do tipo SWNT-COOH são as que possuem o custo de produção mais elevado, são cerca de sete vezes mais caras que a argamassa de referência, ora

como os resultados obtidos destas argamassas nem foram os melhores, o uso desta solução parece estar fora de questão devido ao seu desempenho não ser suficiente bom para o elevado custo que apresenta. Pelo contrário, as argamassas com MWNT são as que apresentam menor custo comparadas com as restantes argamassas com CNTs, porém os seus resultados também são pouco satisfatórios, mas aqui destaca-se a argamassa que contém 0,08% de MNWT que de entre este tipo de CNTs é a que apresenta menor custo e a que obtém melhores resultados.

As argamassas que contêm CNTs do tipo SWNT são as que apresentam melhor relação custo versus desempenho. Estas argamassas apesar de custarem o dobro da argamassa de referência apresentam resultados à flexão e compressão semelhantes, e ainda apresentam elevado desempenho relativamente à rigidez, pelo que esta solução é a mais vantajosa comparada com as restantes argamassas. Esta solução é a que se destaca das restantes, portanto é a que deverá ganhar maior destaque nos futuros projetos de investigação. De realçar que as argamassas com CNTs do tipo MWNT-COOH têm custos próximos das argamassas de SWNT, no entanto, estas são as que apresentam pior desempenho.

Como estes resultados comprovam, o alto custo dos nanotubos de carbono ainda torna inviável a sua utilização generalizada na construção civil. Mas como a nanotecnologia tem crescido a grande ritmo, em breve a produção de CNTs em larga escala começa a ser uma realidade, o que proporcionará uma descida dos preços, tornando assim viável a utilização dos CNTs na construção civil. A introdução dos CNTs na construção civil só trará vantagens, pois os CNTs têm excelentes propriedades físicas, mecânicas e elétricas que têm que ser aproveitadas como melhoria no reforço do betão.

Este é um tema ainda novo na construção civil, por isso, ainda necessita de mais pesquisas. Futuras pesquisas poderão desenvolver melhor o tema e serão benéficas à utilização dos nanotubos como reforço do betão, pois os nanotubos de carbono têm excelentes propriedades físicas, mecânicas e elétricas que têm que serem aproveitadas como melhoria no reforço do betão.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO

A procura de formas de melhorar o betão é um tema que vem sendo bastante estudado devido à importância que este tem na construção civil. Este projeto de investigação seguiu esse propósito e teve como objetivo o estudo das propriedades físicas e mecânicas da matriz cimentícia reforçada com nanotubos de carbono. A realização deste projeto de investigação permitiu obter um conjunto de resultados, que são apresentados resumidamente de seguida.

- De uma forma sumária, este projeto de investigação permitiu concluir que a adição de nanotubos de carbono proporcionou a diminuição do peso dos provetes e aumentou consideravelmente a rigidez da matriz cimentícia, sem afetar a trabalhabilidade da argamassa. Pelo contrário, os nanotubos de carbono têm a desvantagem de ainda serem demasiado caros.

- A chave para a melhoria das propriedades mecânicas passa pela adequada dispersão dos nanotubos de carbono na matriz cimentícia. A mistura dos CNTs diretamente no cimento pode conduzir a uma dispersão não homogénea. Deste modo, a dispersão dos CNTs foi feita na água (Parveen, S., et al., 2013). Os CNTs foram dispersos em água através da combinação de químicos dispersantes, agitação magnética e ultrassons. Pelas imagens microscópicas os CNTs do tipo SWNT parecem apresentar uma dispersão mais consistente.

- A adição de CNTs praticamente não afetou a trabalhabilidade, uma vez que os valores de espalhamento são todos muito semelhantes, sendo que em alguns casos até são ligeiramente superiores à argamassa de referência.

- Registou-se uma diminuição do peso em todas as argamassas que contêm CNTs. O fato de os CNTs possuírem baixa densidade e de estes poderem ter reagido durante o processo de amassadura poderá explicar este acontecimento. Apesar desta diminuição de peso, os provetes apresentam praticamente os mesmos resultados à flexão e compressão e ainda melhora substancialmente da rigidez. Isto poderá ser uma mais-valia, pois permitirá que as estruturas não sejam obrigadas a suportarem cargas

elevadas relativas ao seu peso próprio e ao mesmo tempo mantêm um elevado desempenho.

- Relativamente aos ensaios mecânicos, as argamassas com SWNT foram as que apresentaram melhores resultados, tanto no ensaio à flexão como no ensaio à compressão, obtendo valores muito semelhantes à argamassa de referência. Os nanotubos de SWNT funcionalizados obtiveram resultados inferiores comparados com os SWNT normais, pelo que podem-se excluir para trabalhos futuros devido ao seu elevado custo. Já nos MWNT funcionalizados os resultados foram ligeiramente superiores e como a sua diferença de custo não é considerável, podem-se considerar para trabalhos futuros. A quantidade de fosfato de tributilo utilizada tem influência direta nos resultados obtidos, pois duas argamassas iguais mas com diferente quantidade de fosfato de tributilo obtiveram resultados distintos.

- Os resultados do ensaio à flexão das argamassas com CNTs são próximos dos resultados da argamassa de referência. No entanto, é possível verificar que a adição de CNTs proporcionou uma melhoria significativa na rigidez das argamassas. Para tensões semelhantes, as argamassas com CNTs conseguiram atingir aproximadamente metade da deformação que a argamassa de referência atingiu, possibilitando assim um maior módulo de elasticidade ou de Young nas argamassas com CNTs comparativamente com a argamassa de referência. O módulo de elasticidades das argamassas com CNTs aumentou bastante comparado com a argamassa de referência, sendo que em alguns casos aumentou perto do dobro.

- Os teores de CNTs utilizados para a produção das argamassas foram baixos, 0,08% e 0,1% em relação à quantidade de cimento, o que pode ter minimizado o efeito do reforço promovido pelos nanotubos. O aumento destas quantidades será capaz de aumentar o reforço bem como de superar o prejuízo causado pela introdução de heterogeneidade na matriz cimentícia. Sugere-se que novos estudos sejam realizados com diferentes quantidades, tendo em vista o desejado aumento significativo do reforço.

- As argamassas com CNTs resultam numa menor porosidade comparadas com a argamassa de referência. Foi também comparado a porosidade do dispersante de CNTs

mais utilizado na atualidade o dodecilbenzeno de sulfato de sódio, NaDDBS, este revelou um aumento da porosidade comparado com a argamassa de referência. Este ensaio não foi totalmente esclarecedor, pois as amostras utlizadas para os ensaios de flexão e compressão sugerem que houve um aumento de porosidade. Mas o que é relevante de realçar neste ensaio é o fato do dispersante utilizado no trabalho originar uma porosidade inferior ao dispersante usualmente utilizado.

- Para finalizar, deve referir-se que o elevado custo dos nanotubos de carbono ainda torna inviável a sua utilização de forma generalizada na construção civil. Porém, a produção de CNTs em larga escala começa a ser uma realidade o que proporcionará uma descida dos preços e ao ritmo que a nanotecnologia está a crescer esta realidade está cada vez mais próxima. Os CNTs podem ser comparados com a fibra ótica, que há uns anos atrás parecia uma miragem devido ao seu elevado custo e hoje em dia está ao alcance de qualquer um, o mesmo tende a acontecer com os CNTs.

- Em relação ao custo versus desempenho, as argamassas com CNTs do tipo SWNT-COOH são as que apresentam maior custo e desempenho pouco satisfatório. As argamassas com CNTs do tipo MWNT são as que apresentam menor custo, no entanto, o seu desempenho também não é satisfatório. Já as argamassas com CNTs do tipo SWNT são os que apresentam melhor relação custo versus desempenho. Custam cerca do dobro da argamassa de referência e apresentam resultados à flexão e compressão semelhantes, e ainda apresentam elevado desempenho em termos de rigidez. As argamassas com CNTs do tipo MWNT-COOH têm custos próximos das argamassas de SWNT, no entanto estas são as que apresentam pior desempenho.

5.1. Perspetivas para futuros trabalhos de investigação

A realização deste trabalho de pesquisa certamente deverá ter continuidade num futuro próximo. Os nanotubos de carbono têm vindo a ganhar destaque na engenharia civil e, cada vez mais, estão a ser alvo de trabalhos experimentais. Este trabalho experimental também poderá levar a outros trabalhos de investigação, tendo em vista o uso dos nanotubos como reforço do betão. Esses trabalhos a levar a cabo são apresentados de seguida.

- Deverão ser estudadas argamassas com outras percentagens de nanotubos de carbono para encontrar a quantidade ótima que permita a obtenção de um reforço considerável.

- Estudo comparativo entre o uso de nanotubos de carbono e a armadura convencional.

- Investigação sobre a possibilidade de usar os nanotubos de carbono com outros tipos de cimentos, bem como utilizar em conjunto com adjuvantes.

- Os nanotubos de carbono são um excelente condutor elétrico, pelo que se deve estudar a capacidade que os nanotubos para transmitir corrente elétrica ao longo do betão, tornando-se piezorresistivo.

- Trabalho de investigação sobre a possibilidade de monitorização em tempo real de estruturas reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 544.5R-10, (2010) - "*Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete*", ACI – American Concrete Institute, Committee 544.

Andrady, A. L., (2008) - "*Science and Technology of Polymer Nanofibers*" - Publicado por John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Balaguru, P., (1988) - "*Evaluation of new synthetic fiber for use in concrete*". Civil Engineering Report, No. 88-10, pp. 93

Barros, J., (2000) - **"***Betão reforçado com fibras de aço - Conceitos fundamentais***" –** Artigo, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Barros, J., (2004) – "*Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas"* – Jornadas de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Barros, J., (1996) – "*Comportamento do Betão Reforçado com Fibras*" – Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal.

Bastos, P., Lemonge, A., Sigiliano, V., Resende, S., (2010) – "*Estudo do Módulo de Elasticidade de Argamassas de Revestimento Sujeitas à Sucção de Água pela Base*" – Artigo, Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

Brito, J., Paramés, J. (2010) – "*Adições nanoparticuladas para materiais de construção ignífugos"* - Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Secção de Construção, Lisboa, Portugal.

BS EN 196-1:1995 - (1995) – "*Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength*" – European Standard.

BS EN 1015-03:2004 - (2004) – "*Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*" – European Standard.

BS EN 1015-11:1999 (1999) – "*Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*" – European Standard.

Caraterísticas do cimento utilizado. Disponível: http://www.secil.pt/pdf/CEMIIAL425R.pdf; visitado em abril de 2013.

Caraterísticas dos nanotubos de MWNT utilizados. Disponível: http://www.nanoamor.com/inc/pdetail?v=1&pid=1364; visitado em março de 2013.

Caraterísticas dos nanotubos de SWNT utilizados. Disponível: http://www.nanoamor.com/inc/sdetail/9539; visitado em março de 2013.

Caraterísticas dos nanotubos de MWNT-COOH utilizados. Disponível: http://www.nanoamor.com/inc/sdetail/9926; visitado em março de 2013.

Caraterísticas dos nanotubos de SWNT-COOH utilizados: Disponível: http://www.nanoamor.com/inc/sdetail/9924; visitado em março de 2013.

Cement & Concrete institute (2010) – "*Fibre Reinforced Concrete*" – Publicado por cement & concrete institute, midrand, 2010.

Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Torkittikul, P., (2010) – "*Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites*" - Materials Science and Engineering A.

Chung, D.D.L., (2000) - " *Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional materia*l" - Composite Materials Research Laboratory, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.

Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. – (2001) - "*Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications"* - Springer – Verlag Berlin Heideberg.

Especificação LNEC E 395-1993 (1993) – "*Betões – Determinação da absorção d água por imersão.*" – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Fiação eletrostática – formação das nanofibras. Disponível: http://www.snsnano.com; visitado em fevereiro de 2013.

Fangueiro, R., Rana, S. (2012) - "*Fibres: Future Materials for Advanced Emerging Applications*" - Fibrous Materials Research Group (FMRG), University of Minho, Guimarães, Portugal.

Ferreira, N., (2008) - "*Influência das Caraterísticas das Fibras no Desempenho do Betão*" – Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal.

Ferreira, O., (2003) – "*Nanoubos de Carbono: Preparação e Caracterização*" – Monografia, Instituto de Química da UNICAMP, Brasil.

Gonzalez, J., (2007) - " *Betões Reforçados com Fibras de Carbono Estudo de Propriedades Mecânicas e Físicas*" – Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Hegde, R. R., Dahiya, A., Kamatha, M. G., (2005) – "*Nanofiber Nonwovens*" – Updated: June 13, 2005.

Joshua A. Hoheneder – (2012) - "*Smart Carbon Nanotube/fiber and Pva Fiber- Reinforced Composites for Stress Sensing and Chloride Ion Detection*" - Master Thesis, University of Wisconsin-Milwaukee.

Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., Shah, S. P. (2010) - "*Highly Dispersed Carbon Nanotube Reinforced Cement Based Materials*" - Cement and Concrete Research.

Kumar, A., (2010) – "*Nanofibers*" – Livro editado por Intech, Vukovar, Croatia.

Lin, T., (2011) - "*Nanofibers – Production, Properties and Functional Applications*" – Publicado por InTech, Croacia.

Martins, A., Pereia, C., Faria, P., Fangueiro, R., (2012) – "*Argamassas Reforçadas com Resíduos Industriais*" – Fibrenamics Outdoor, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal.

Moreira, A., (2008) - "*Materiais Compósitos*" – Materiais de Construção I, 2008/2009, 1º semestre, Escola superior de tecnologia de Tomar, Portugal.

Naaman, A., - (2007) "*High performance fiber reinforced cement Composites: classification and applications*" - CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan.

NI, (2011) - "*Production and Application of Carbon Nanotubes, Carbon Nanofibers, Fullerenes, Graphene and Nanodiamonds: A Global Technology Survey and Market Analysis*" - Nanotechnology Industry.

Nochaiya, T., Chaipanich, A., (2011) - "*Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials*" - Applied Surface Science.

Quynh P. Pham, Upma sharma, Ph.d., and Antonios g. Mikos, Ph.D. (2006) - "*Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review*" - Tissue Engineering, Volume 12, Number 5.

Paiva, M., (2006) – "*Opção I - Polímeros de Elevado Desempenho - Nanotubos de Carbono*" – Apontamentos da aula, Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Parveen, S., Rana, S., Fangueiro, R., Patinha, S., Mateus, P., (2013) – "*Micro-structure and mechanical properties of carbon nanotube/cement nanocomposites*" - Fibrous Materials Research Group (FMRG) School of Engineering, University of Minho, Portugal.

Pereira, C., Fangueiro, R., Jalali, S., (2012) – "*O novo mundo dos materiais à base de fibras*" – ciclo de workshops, Fibrenamics Outdoor, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal.

Rana, S., Parveen, S., Fangueiro, R. (2012) - "*Carbon Nanomaterial Based Multi-scale Composites*" - Fibrous Materials Research Group (FMRG), Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Rosado, K., Guise, C., Rebelo, R., Fangueiro, R. (2011) – "*Fibrous based materials in sustainable civil and architectural applications - a review*" – International Conference on Engineering UBI, 2011.

Sanchez, F., Zhang, L., Ince, C. (2009) -"*Multi-scale Performance and Durability of Carbon Nanofiber/Cement Composites"*.

Shah, S., (2011) - "*Crack Free Concrete Made with Nanofiber Reinforcement*" - Relatório final apresentado à Infraestrutura Instituto de Tecnologia.

Silva, B., (2005) - "*Estruturas Inteligentes Utilizando Betão e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono*" – Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Silva, R., (2010) – "*Síntese e caracterização de nanotubos de carbono obtidos por CVD*", Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal.

Szabó, A., Perri, C., Cstó, A., Giordano, G., Vuono, D., Nagy, J., (2010) – " *Synthesis Methods of Carbon Nanotubes and Related Materials"* – Materials

SOTEXFIL., (2006) – "*Betão Reforçado com Fibra de Polipropileno*" - Fibtex Fibra de Polipropileno - Sociedade Têxtil de Fibras e Filamentos, LDA, Lousã, Portugal.

Tipo de fibras. Disponível: http://www.fibrenamics.com; visitado em fevereiro de 2013.

Yakobson, B.I, Smalley, R.E., - (1997) – "*Fullerene Nanotubes: $C_{1,000,000}$ and Beyond*". Am. Scient., v.85, n.4, p.324-337.

.

ANEXO 1 – Caraterísticas do cimento Portland usado

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO3)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

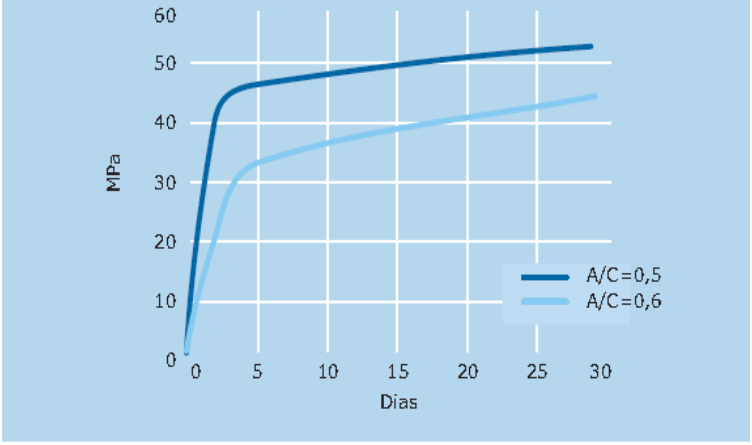
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
≥20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m3 de cimento CEM I 42,5R



ANEXO 2 – Resultados do Ensaio à Flexão

Quadro A2.1 – Resultados do Ensaio à Flexão

Argamassa	Ensaio à Flexão [kN]		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
Argamassa Referência	3,637	3,695	3,218
5%Plu + 1,67%FTrib	2,931	2,986	2,987
0.1%MWNT + 5%P + 1,67%FTrib	2,182	2,301	2,189
0.1%MWNT + 5%P + 2,5%FTrib	2,481	2,709	2,938
0.1%MWNT + 3%P + 1,5%FTrib	0,000	2,558	0,000
0.08%MWNT + 3%P + 1,5%FTrib	3,231	2,993	3,212
0.1%SWNT + 5%P + 2,5%FTrib	3,393	3,193	3,126
0.1%SWNT + 3%P + 1,5%FTrib	3,400	3,071	3,298
0.08%SWNT + 3%P + 1,5%FTrib	3,110	3,185	3,369
0.1%MWNT-COOH + 5%P +2,5%FTrib	2,909	3,080	3,080
0.1%MWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	3,064	2,838	3,179
0.08%MWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	2,805	2,796	2,993
0.1%SWNT-COOH + 5%P +2,5%FTrib	2,962	3,135	2,981
0.1%SWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	2,956	2,725	2,877
0.08%SWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	2,634	2,736	2,845

ANEXO 3 – Resultados do Ensaio à Compressão

Quadro A3.1 – Resultados do Ensaio à Compressão

Argamassa	Ensaio à Compressão [kN]					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Argamassa Referência	73,80	75,20	74,00	70,60	69,14	71,50
5%Plu + 1,67%FTrib	56,36	51,92	53,94	53,66	54,00	48,41
0.1%MWNT + 5%P + 1,67%FTrib	29,78	32,98	31,81	33,28	34,09	30,97
0.1%MWNT + 5%P + 2,5%FTrib	43,72	47,33	41,93	47,97	52,68	50,95
0.1%MWNT + 3%P + 1,5%FTrib	54,42	54,48	48,80	54,42	52,73	51,10
0.08%MWNT + 3%P + 1,5%FTrib	54,99	50,47	57,61	58,11	57,94	56,12
0.1%SWNT + 5%P + 2,5%FTrib	69,00	63,76	60,75	62,57	61,15	64,30
0.1%SWNT + 3%P + 1,5%FTrib	63,63	69,07	62,83	68,06	69,88	69,26
0.08%SWNT + 3%P + 1,5%FTrib	65,02	67,36	68,27	63,05	63,74	66,24
0.1%MWNT-COOH + 5%P +2,5%FTrib	47,29	52,79	49,83	50,13	52,30	50,83
0.1%MWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	57,09	58,01	54,19	56,25	57,27	57,72
0.08%MWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	50,08	59,46	52,71	56,63	55,40	57,05
0.1%SWNT-COOH + 5%P +2,5%FTrib	59,13	58,00	57,34	63,81	54,50	54,57
0.1%SWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	46,91	48,74	51,70	51,49	55,66	51,76
0.08%SWNT-COOH + 3%P +1,5%FTrib	46,74	50,38	44,83	46,38	51,00	56,39