



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Miguel Neto Vilela

Matrizes cimentícias reforçadas com
nanotubos e fibras curtas de carbono

Bruno Miguel Neto Vilela Matrizes cimentícias reforçadas com
nanotubos e fibras curtas de carbono



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Miguel Neto Vilela

Matrizes cimentícias reforçadas com
nanotubos e fibras curtas de carbono

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Raul Figueiro

DECLARAÇÃO

Nome: Bruno Miguel Neto Vilela

Endereço Eletrónico: a60070@alunos.uminho.pt

Título da dissertação: Matrizes cimentícias reforçadas com nanotubos e fibras curtas de carbono

Orientador: Professor Doutor Raúl Figueiro

Ano de Conclusão: 2016

Dissertação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTE RELATÓRIO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de expressar a minha sincera gratidão a todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para o sucesso desta dissertação.

A presente dissertação foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho e no Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics. Os respetivos técnicos dos diferentes laboratórios tiveram um papel fulcral no desenvolvimento da dissertação pelo que agradeço a todos pelo apoio e contribuição.

Agradeço também ao Professor Doutor Raúl Figueiro pela orientação, apoio, conselho, revisão crítica e pela disponibilidade que mostrou durante a realização deste trabalho de investigação.

À Doutora Shama Parveen, uma vez que, sem ela esta dissertação não seria possível, pelo que me ajudou nas temáticas relacionadas com a dissertação, o meu maior obrigado pela ajuda, disponibilidade, compreensão e alertas durante o período de realização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, família e amigos que desde sempre me deram força e motivação para a realização da presente dissertação.

RESUMO

O desenvolvimento de materiais compósitos com fibras e nanomateriais tem sido cada vez mais investigado pelas comunidades acadêmica e industrial. Este tipo de materiais apresenta propriedades mecânicas e elétricas que fazem deles, materiais bastante apeteáveis no reforço de matrizes cimentícias. Atualmente, a monitorização de estruturas de betão pode ser realizada em tempo real através de materiais condutores, como as fibras e os nanomateriais.

Desta forma, o objetivo principal da dissertação foi o desenvolvimento de compósitos cimentícios condutores e a análise do seu comportamento elétrico quando sujeitos a uma carga de tração uniaxial. Assim, foram preparados dois tipos de compósitos de matriz cimentícia, um reforçado com fibras curtas de carbono e um outro compósito híbrido reforçado simultaneamente com nanotubos e fibras curtas de carbono. A correta dispersão da fibra de carbono e dos nanotubos na matriz cimentícia é chave para a melhorias das propriedades mecânicas e elétricas.

Os resultados obtidos demonstraram que efetivamente os nanotubos e as fibras curtas de carbono dispersos nas matrizes cimentícias originam compósitos capazes de apresentar uma variação da resistência elétrica sob carga de tração uniaxial, demonstrado o seu potencial para uso como sensores de deformação. Dos ensaios realizados, os melhores resultados obtidos do compósito cimentício enquanto sensor elétrico foram verificados na percentagem de 0.5% de fibras curtas de carbono, para o ensaio de tração cíclico, e com 0.75% de fibras curtas de carbono e 0.1% de nanotubos de carbono, para o ensaio monotónico.

De um modo geral, os nanotubos e as fibras curtas de carbono num compósito de matriz cimentícia tem a capacidade de ser utilizado enquanto sensor elétrico de cargas e deformações.

Palavras chave: Fibra de carbono; Materiais condutores na matriz cimentícia; Matriz cimentícia; Nanotubos de carbono; Resistência elétrica.

ABSTRACT

The use of fibers and nanomaterials for composite material reinforcements has been increasingly investigated by the academic and industrial communities. This type of material present mechanical and electrical properties that make them very desirable as reinforcing materials in cementitious matrices. Currently, monitoring of concrete structures can be performed in real time through conductive materials such as fibers and nanomaterials.

The main goal of this dissertation was to analyze the electrical resistance of cementitious based composite materials when subjected once uniaxial tensile load. Thus, there were prepared two kinds of cementitious composites: one reinforced with short carbon fibers and other reinforced simultaneously with nanotubes and short carbon fibers. The correct dispersion of carbon nanotubes and fibers in the cementitious matrix is the key to the improvement on mechanical and electrical properties.

The results showed that effectively carbon nanotubes and carbon short fibers reinforcing cementitious matrices lead to a variation of the electrical resistance under uniaxial tensile load. Among the various tests performed, the best results were observed in the percentage of 0.5% short carbon fibers, for cyclic tensile testing, and 0.75% of short carbon fibers and 0.1% of carbon nanotubes, for monotonic tensile test.

In general, nanotubes and short carbon fibers in a cementitious matrices composite present the capability to sense loads and deformations.

Keywords: Carbon fiber; Carbon nanotubes; Cementitious matrices; Conductive materials in cementitious matrices; Electrical resistance.

ÍNDICE GERAL

DECLARAÇÃO	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GERAL	ix
ÍNDICE FIGURAS	xii
ÍNDICE TABELAS.....	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do trabalho.....	1
1.2. Objetivos da dissertação	2
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura da dissertação	3
CAPÍTULO II.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. Materiais compósitos.....	7
2.2. Materiais de matriz cimentícia	8
2.3. Matrizes cimentícias reforçada por fibras	9
2.3.1. Tipos de fibras no reforço de compósitos de matriz cimentícia.....	11
2.3.2. Fibra de carbono	15
2.3.3. Técnicas de produção de fibras de carbono.....	16
2.3.4. Técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono em matrizes cimentícias	18
2.3.5. Propriedades mecânicas e elétricas das fibras de carbono	19
2.3.6. Aplicações das fibras de carbono	21

2.4. Matrizes cimentícias reforçadas por nanomateriais	21
2.4.1. Nanotecnologia e nanomateriais	21
2.4.2. Nanotubos de carbono.....	23
2.4.3. Síntese de nanotubos de carbono	24
2.4.4. Técnicas de dispersão de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias	25
2.4.5. Propriedades mecânicas e elétricas de nanotubos de carbono	27
2.4.6. Aplicações de nanotubos de carbono	27
2.5. Monitorização de estruturas a partir de fibras.....	28
2.5.1. Monitorização através de materiais condutores	29
2.5.2. Monitorização através de fibra ótica.....	30
CAPÍTULO III.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1. Introdução	33
3.2. Materiais.....	33
3.2.1. Cimento.....	33
3.2.2. Fibras curtas de carbono	34
3.2.3. Nanotubos de carbono.....	35
3.2.4. Outros materiais	35
3.3. Métodos.....	37
3.3.1. Resistência elétrica.....	37
3.3.2. Tração uniaxial.....	38
CAPÍTULO IV.....	41
4. PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM NANOTUBOS E FIBRAS CURTAS DE CARBONO	41
4.1. Introdução	41
4.2. Combinação matriz cimentícia/SCF	41
4.2.1. Dispersão de SCF.....	41
4.3. Combinação matriz cimentícia/NTC/SCF	45
4.3.1. Dispersão de MWCNT e SCF.....	45
4.4. Preparação da pasta cimentícia	48
4.4.1. Colocação da pasta cimentícia nos moldes	49

CAPÍTULO V	53
5. COMPORTAMENTO ELÉTRICO SOB CARGA DE TRAÇÃO UNIAXIAL	53
5.1. Introdução	53
5.2. Resistência elétrica original (R ₀)	53
5.2.1. Resultados obtidos e discussão	54
5.3. Ensaio de tração cíclico	56
5.3.1. Resultados obtidos e discussão	57
5.4. Ensaio de tração monotónico.....	75
5.4.1. Resultados obtidos e discussão.....	75
CAPÍTULO VI	87
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	87
6.1. Conclusão	87
6.2. Trabalhos futuros	88
BIBLIOGRAFIA	91

ÍNDICE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 – Classificação de materiais compósitos	8
Figura 2.2 – Sistemas de reforço por fibras	10
Figura 2.3 – Comportamento de tensões com e sem fibras	11
Figura 2.4 – Classificação de fibras quanto à origem	12
Figura 2.5 – Representação de fibra de carbono	16
Figura 2.6 – Efeito da temperatura nas propriedades das fibras de carbono	17
Figura 2.7 – Representação esquemática de métodos de produção de fibras de carbono.....	17
Figura 2.8 – Técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono	18
Figura 2.9 – Fibras curtas de carbono dispersadas em matriz cimentícia.....	19
Figura 2.10 – Representação de tipos nanotubos de carbono	23
Figura 2.11 – Representação microscópica de tipos nanotubos de carbono.....	23
Figura 2.12 – Estrutura não quiral e quiral de nanotubos de carbono	24
Figura 2.13 – Representação de nanotubos de carbono dispersos e aglomerados.....	25
Figura 2.14 – Técnicas de dispersão de nanotubos de carbono	26
Figura 2.15 – MWNTC dispersados na matriz cimentícia.....	26
Figura 2.16 – Representação de princípio de funcionamento da tecnologia Bragg em fibra ótica.....	30

CAPÍTULO III

Figura 3.1 – Fibras curtas de carbono utilizadas no trabalho laboratorial	34
Figura 3.2 – Nanotubos de carbono utilizados no trabalho laboratorial	35
Figura 3.3 – Estrutura química de Pluronic F-127.....	36
Figura 3.4 – Fita de cobre utilizada no trabalho laboratorial	36
Figura 3.5 – Multímetro digital Agilent 34460a	37
Figura 3.6 – Posição de elétrodos no provete	38
Figura 3.7 – Carga uniaxial aplicada no provete	38
Figura 3.8 – Atuador de carga de 25 kN	39

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 – Dispersão em agitadora magnética com Pluronic F-127 e TBP	43
Figura 4.2 – Representação esquemática de trabalho laboratorial realizado para a solução final da combinação matriz cimentícia/SCF	43
Figura 4.3 – Misturadora de eixo vertical, “flat beater”	44
Figura 4.4 – Dispersão de nanotubos de carbono na solução aquosa.....	46
Figura 4.5 – Equipamento de ultrassons.....	46
Figura 4.6 – Representação esquemática de trabalho laboratorial para a solução final da combinação matriz cimentícia/NTC/SCF.....	47
Figura 4.7 – Solução aquosa com nanotubos e fibras curtas de carbono	47
Figura 4.8 – Esquema do molde utilizado	48
Figura 4.9 – Enchimento de molde com pasta cimentícia.....	49
Figura 4.10 – Distâncias de fitas de cobre no provete.....	49
Figura 4.11 – Provete depois do processo de compactação	50
Figura 4.12 – Representação esquemática de realização de um provete.....	50
Figura 4.13 – Provete 24 horas depois da cura.....	51
Figura 4.14 – Provete 28 dias depois sob água	51

CAPÍTULO V

Figura 5.1 – Ensaio de resistência elétrica original (R0).....	54
Figura 5.2 – Resultados de resistência elétrica inicial (R0)	55
Figura 5.3 – Variação de resistência elétrica original (R0)	56
Figura 5.4 – Ensaio de tração cíclico.....	57
Figura 5.5 – Ensaio de tração cíclico na Amostra A (0.2kN).....	58
Figura 5.6 – Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0.2kN).....	59
Figura 5.7 – Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.2kN).....	60
Figura 5.8 – Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.3kN).....	60
Figura 5.9 – Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.4kN).....	60
Figura 5.10 – Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.2kN).....	62
Figura 5.11 – Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.3kN).....	62
Figura 5.12 – Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.4kN).....	62
Figura 5.13 – Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.2kN)	64
Figura 5.14 – Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.3kN)	64

Figura 5.15 – Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.4kN).....	64
Figura 5.16 – Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.2kN)	66
Figura 5.17 – Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.3kN)	66
Figura 5.18 – Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.4kN)	66
Figura 5.19 – Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.2kN)	68
Figura 5.20 – Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.3kN)	68
Figura 5.21 – Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.4kN)	68
Figura 5.22 – Ensaio de tração cíclico na Amostra I (0.2 kN).....	70
Figura 5.23 – Ensaio de tração cíclico na Amostra I (0.3 kN).....	70
Figura 5.24 – Ensaio de tração cíclico na Amostra I (0.4 kN).....	70
Figura 5.25 – Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.2 kN)	72
Figura 5.26 – Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.3 kN)	72
Figura 5.27 – Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.4kN)	72
Figura 5.28 – Ensaio de tração monotónico na Amostra C	76
Figura 5.29 – Ensaio de tração monotónico na Amostra D	77
Figura 5.30 – Ensaio de tração monotónico na Amostra F	78
Figura 5.31 – Ensaio de tração monotónico na Amostra G	79
Figura 5.32 – Ensaio de tração monotónico na Amostra H	80
Figura 5.33 – Ensaio de tração monotónico na Amostra I.....	81
Figura 5.34 – Ensaio de tração monotónico na Amostra J.....	82
Figura 5.35 – Variação da resistência à tração e da mudança fracional da resistência no ensaio de tração monotónico	83
Figura 5.36 – Provete depois de ensaio de tração monotónico.....	85
Figura 5.37 – Interior do provete depois de ensaio de tração monotónico	85

ÍNDICE TABELAS**CAPÍTULO II**

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas de fibra de aço	13
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de fibras de vidro.....	14
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de fibra de polipropileno	15
Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas de materiais precursores de fibra de carbono.....	19
Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas de fibra de carbono PAN.....	20
Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas e elétricas de nanotubos de carbono.....	27

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas de fibras de carbono utilizadas no trabalho laboratorial	34
Tabela 3.2 – Propriedades físicas de MWNTC utilizados no trabalho laboratorial	35
Tabela 3.3 – Propriedades de Pluronic F-127 utilizado no trabalho laboratorial	36

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 – Quantidades de químicos da solução aquosa de referência	42
Tabela 4.2 – Quantidades de SCF utilizadas no trabalho laboratorial.....	44
Tabela 4.3 – Quantidades de MWNTC utilizados no trabalho laboratorial	45
Tabela 4.4 – Composição das Amostras.....	48

CAPÍTULO V

Tabela 5.1 – Mudança fracional da resistência na Amostra A	58
Tabela 5.2 – Mudança fracional da resistência na Amostra B	59
Tabela 5.3 – Mudança fracional da resistência na Amostra C	61
Tabela 5.4 – Mudança fracional da resistência na Amostra D	63
Tabela 5.5 – Mudança fracional da resistência na Amostra F.....	65
Tabela 5.6 – Mudança fracional da resistência na Amostra G	67
Tabela 5.7 – Mudança fracional da resistência na Amostra H	69

Tabela 5.8 – Mudança fracional da resistência na Amostra I.....	71
Tabela 5.9 – Mudança fracional da resistência na Amostra J	73
Tabela 5.10 – Resultados de ensaios de tração cíclicos	74
Tabela 5.11 – Mudança fracional da resistência na Amostra C.....	76
Tabela 5.12 – Mudança fracional da resistência na Amostra D.....	77
Tabela 5.13 – Mudança fracional da resistência na Amostra F	78
Tabela 5.14 – Mudança fracional da resistência na Amostra G.....	79
Tabela 5.15 – Mudança fracional da resistência na Amostra H.....	80
Tabela 5.16 – Mudança fracional da resistência na Amostra I	81
Tabela 5.17 – Mudança fracional da resistência na Amostra J.....	82
Tabela 5.18 – Resultados de resistência à tração e de mudança fracional da resistência no ensaio de tração monotónico.....	83

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Ad – Água destilada;

FBG – “Fiber Bragg grating” (Bragg em fibra ótica);

g/cm³ – Unidade de massa Volúmica;

GF – “Gauge factor” (Fator de medição);

GPa – Giga Pascal;

kN – Quilo Newton;

mm – Milímetros;

MWCNT – “Multi-Walled nanotubes” (Nanotubos de parede múltipla);

NTC – Nanotubos de Carbono;

PAN – Poliacrilonitrilo;

Plu – Pluronic F-127;

Ri – Resistência Inicial;

Rp – Pico de Resistência;

SCF – “Short Carbon Fibers” (Fibras curtas de carbono);

SHM – “Structural health monitoring” (Monotorização de integridade estrutural);

SWCNT - Single-Wall nanotubes (Nanotubos de camadas simples);

TBP - Fosfato de tributilo;

Ω - Ohm;

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do trabalho

Nos dias de hoje, existe um elevado interesse na otimização de diferentes propriedades do betão e de outros materiais de base cimentícia, que possam obviar as suas limitações. O reforço de materiais compósitos de matriz cimentícia vem já sendo desenvolvido com o reforço mecânico por partes de fibras e nanomateriais, sendo que, desde há pouco tempo, se começa a estudar outras propriedades que a inclusão de fibras e nanomateriais, podem aportar ao betão, fazendo dele um material cada vez mais inteligente.

O betão, na sua forma simples, é o material mais utilizado na construção civil em todo o mundo. No entanto, este fato faz com diversos desenvolvimentos até os dias de hoje, com novas formas de reforço, que fazem dele um material de extrema importância na construção civil. O reforço do betão com outros materiais, como o aço, teve e tem uma vasta utilização, podendo igualmente serem adicionados outro tipo de materiais como reforço, a partir dos quais, para além das propriedades mecânicas, possam também ser melhoradas as propriedades elétricas e térmicas.

A utilização das fibras enquanto material de reforço já vem sendo usado desde os tempos mais antigos, mas foi mais recentemente que ganhou um papel cada vez mais importante no reforço de matrizes cimentícias, uma vez que para além das propriedades mecânicas aportadas, podem igualmente conferir outras características, como capacidade de condução de eletricidade, transformando-o num material sensor elétrico. Entre as fibras mais utilizadas destacam-se as fibras de aço, carbono, poliméricas e de vidro.

A nanotecnologia é uma ciência relativamente recente e apenas atualmente começa a ter um papel mais preponderante nas mais diversas áreas. A integração desta ciência na engenharia

civil surgiu pelo interesse do reforço dos compósitos cimentícios a uma escala nanométrica, e desde logo, se percebeu as suas elevadas propriedades mecânicas e elétricas, para além do controlo de fissurações à nanoescala.

A combinação de materiais de reforço à multiescala, é uma abordagem inovadora, procurando-se que sistemas de reforço com configurações e dimensões diferenciadas possam responder ao altamente complexo modo de rotura de materiais cimentícios. Neste sentido, a combinação de nanotubos e de fibras curtas de carbono, permite desde logo uma melhoria do comportamento mecânico. No entanto, neste trabalho, explora-se fundamentalmente a capacidade de conferirem condutividade elétrica a materiais de base cimentícia pela sua natureza intrinsecamente condutora.

Assim, a aplicação deste tipo de compósitos em engenharia civil adivinha-se que, num futuro próximo, ganhe cada vez mais utilização, sendo possível realizar a monitorização de estruturas através de sensores elétricos, que permite uma avaliação rigorosa do estado de deformação da estrutura.

1.2. Objetivos da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo principal estudar a viabilidade de conferir capacidade de monitorização a compósitos cimentícios, reforçados à multiescala a partir de fibras curtas de carbono e de nanotubos de carbono. Assim, pretende-se desenvolver compósitos de matriz cimentícia capazes de ser utilizados como sensores de deformações a partir de variações da sua resistência elétrica.

Tendo em vista uma melhor análise do comportamento dos compósitos, serão realizadas diferentes composições com fibras curtas de carbono, e um híbrido com nanotubos e fibras curtas de carbono. A correta combinação, matriz cimentícia nanotubos e fibra, é o um fator chave, uma vez que uma incorreta combinação fará com que os diferentes materiais percam propriedades mecânicas e elétricas.

1.3. Metodologia

A metodologia para a realização da dissertação passa por duas fases principais.

Numa primeira fase é realizada uma revisão bibliográfica através da análise do conhecimento proporcionado por outros autores, sobre as diferentes temáticas em causa.

Na segunda fase desenvolve-se o trabalho experimental laboratorial que consistiu em duas etapas. Numa primeira etapa, é desenvolvida a preparação dos compósitos de matriz cimentícia com nanotubos e fibras curtas de carbono, com explicação do processo e apresentação das diferentes composições utilizadas. A segunda etapa, consiste na análise do comportamento elétrico do compósito cimentício sob carga de tração uniaxial, e o estabelecimento de correlações entre as variáveis deformação e resistência elétrica.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em 6 capítulos principais incluindo:

- Capítulo I – Introdução.

A introdução é o primeiro capítulo da dissertação onde, de uma forma resumida, se apresenta o enquadramento da dissertação, os seus objetivos, assim como metodologia selecionada.

- Capítulo II – Revisão bibliográfica.

O segundo capítulo tem como objetivo apresentar a pesquisa bibliográfica efetuada sobre as várias temáticas desenvolvidas. Para suportar cientificamente este trabalho é analisado de forma crítica o trabalho realizado por vários autores, em que, para além de um aprofundamento dos conceitos a abordar, são identificadas futuras dificuldades, assim como as suas possíveis soluções.

A revisão bibliográfica dividiu-se assim, em materiais compósitos, materiais de matriz cimentícia, matriz cimentícia reforçada por fibras, matrizes cimentícias reforçadas por nanomateriais e monitorização de estruturas a partir de fibras. As diferentes temáticas abordadas, centraram-se, de uma forma geral, nos materiais utilizados na presente dissertação no reforço da matriz cimentícia, os nanotubos e a fibra de carbono. Para além da descrição das

suas características principais, são abordadas as formas de produção, diferentes aplicações, centrando-se em grande parte nas técnicas de dispersão e nas suas propriedades mecânicas e elétricas.

- Capítulo III – Materiais e Métodos.

No Capítulo III é abordado os materiais e os métodos utilizados para análise do comportamento elétrico sob carga de tração uniaxial.

Numa primeira fase, em materiais, são apresentadas informações dos materiais utilizados para a preparação do compósito cimentício. De seguida, em métodos, são abordadas as diferentes componentes da resistência elétrica e da tração uniaxial.

- Capítulo IV – Preparação do compósito cimentício com nanotubos e fibras curtas de carbono.

No quarto capítulo, é abordado a preparação do compósito, com atenção especial para a dispersão dos nanotubos e das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia.

Para as diferentes combinações da matriz cimentícia com fibras e da matriz cimentícia com nanotubos e fibras é analisado o processo laboratorial utilizado, assim como, as diferentes quantidades utilizadas de materiais envolvidos no processo laboratorial. Por último, é apresentada com pormenorização a preparação das argamassas, e é onde são apresentadas as diferentes composições do compósito com fibras curtas de carbono e do compósito híbrido com nanotubos e fibras curtas de carbono.

- Capítulo V – Comportamento elétrico sob ação de uma carga uniaxial.

No capítulo V, é analisado o comportamento elétrico do compósito cimentício sob carga de tração uniaxial, em que são observados os resultados obtidos e realizada a sua discussão.

O comportamento elétrico é observado sob a forma de resistência elétrica original (R_0), em ensaios de tração cíclicos, e sob a forma de ensaios de tração monotónicos. Os resultados obtidos são discutidos e analisados, para as diferentes composições dos compósitos com fibras curtas e do híbrido com nanotubos e fibras curtas de carbono.

- Capítulo VI – Conclusão e trabalhos futuros.

Por fim, no capítulo VI é apresentada uma conclusão geral do trabalho desenvolvido, com a apresentação dos melhores resultados obtidos, assim como, trabalhos futuros que poderão ser realizados para complementar a presente dissertação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais compósitos

Por definição, um material compósito refere-se à combinação de dois ou mais materiais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface [1].

Um dos primeiros exemplos são os tijolos de argila reforçados com fibras de palha, sendo que atualmente se utiliza um material compósito em grande escala, que é o betão armado. A combinação da resistência a compressão do betão e resistência à tração do aço, leva a que seja conseguida uma peça com um elevado desempenho [2].

Os materiais compósitos são compostos por duas fases. Uma que é denominada de matriz e a fase dispersa, ou reforço. A matriz, é contínua e rodeia a fase dispersa. As propriedades dos compósitos são em função das propriedades das constituintes das fases, as suas quantidades relativas, e a geometria da fase dispersa [3]. Podem-se agrupar, relativamente ao tipo de matriz usada, em materiais compósitos de matriz cimentícia, polimérica, metálica e cerâmica [2].

A classificação dos materiais compósitos está dividida em 3 grupos principais: particulados, estruturais e reforçados por fibras. Os particulados podem ser formados por grandes partículas, ou reforçados por dispersão. Nos materiais compósitos reforçados por fibras, as fibras, que geralmente têm diâmetros muito reduzidos, proporcionam ao compósito a resistência e a rigidez. A matriz que comparativamente às fibras tem fracas propriedades mecânicas, mantém junto as fibras conferindo-lhe a sua disposição. A escolha do tipo de fibras usadas poderá depender do fim a que se destina o material compósito, do custo e do seu desempenho. Por outro lado, os compósitos estruturais, são formados por materiais homogêneos e compósitos com propriedades dependentes da orientação relativa dos componentes, estando divididos em

Laminados, Painéis de Sandwich e com materiais têxteis. Na Figura 2.1 apresenta-se de forma esquemática a classificação dos materiais compósitos.

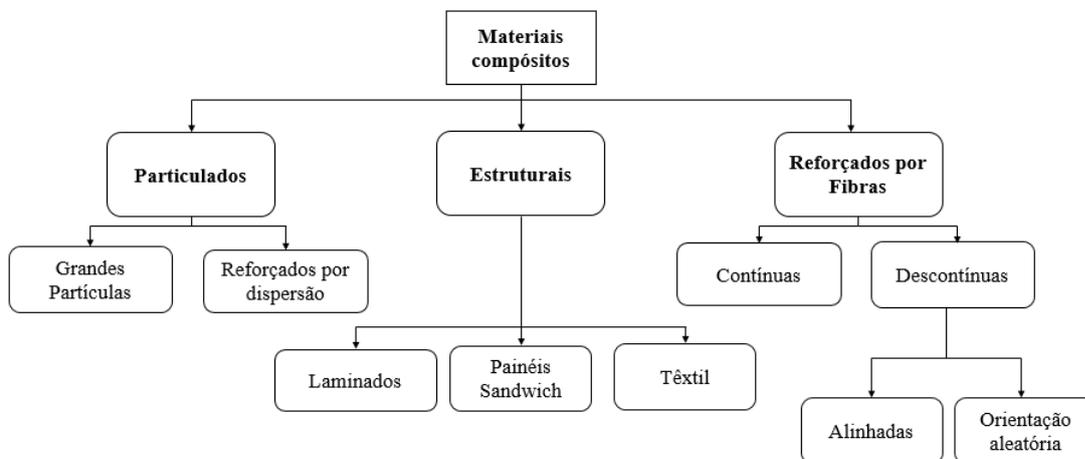


Figura 2.1 – Classificação de materiais compósitos (adaptado [3])

2.2. Materiais de matriz cimentícia

O betão é uma mistura quimicamente estável composta por um ligante, uma fase contínua e um conjunto de agregados, sólidos, vazios preenchidos por água e ar. Esta mistura no seu conjunto é capaz de transmitir esforços mecânicos e de conferir uma proteção a materiais que por ela são revestidos [4].

As propriedades da matriz resultam da sua formação a partir da reação de dois componentes principais da mistura, a água e o cimento, processo que se designa por hidratação, a qual transforma uma pasta fluida num corpo capaz de transmitir esforços. Este corpo sólido designa-se por betão endurecido e a sua estrutura pode ser decomposta em três fases físicas: a sólida composta por grãos de agregado de diferentes dimensões e pelo gel de cimento formado por partículas de cimento hidratado ou em processo de hidratação, que conferem a capacidade ligante; a líquida formada pela solução aquosa que preenche total ou parcialmente a rede porosa-capilar, responsável pelo fluxo de natureza iónica, os quais originam precipitações ou dissoluções de material; e finalmente a fase gasosa formada pelo volume da rede não preenchida pela solução aquosa, responsável por fenómenos de porosidade e difusão de produtos gasosos, entre os quais alguns potencialmente agressivos e que podem condicionar o desempenho do material [4].

Para um controlo eficaz da sua qualidade, desde a mistura dos seus componentes, é necessária uma idade de 28 dias de cura do material, em que a matriz tem profundas alterações químicas, principalmente nos primeiros 3 dias.

Dentro das suas propriedades mecânicas, destaca-se a elevada resistência à compressão, mas, por outro lado, a baixa resistência à tração, o que constitui uma séria limitação no caso de não ser reforçado. A capacidade de se adequar a várias condições de produção, assim como o fato de possibilitar facilmente a variação de forma, apresentam-se como principais vantagens na construção civil.

O reforço de matrizes cimentícias com diferentes tipos de materiais, tem sido cada vez mais estudado por parte da comunidade científica. Dos diferentes materiais utilizados como reforço tem-se destacado as fibras e os nanomateriais, que, para além das suas propriedades mecânicas, são capazes de desenvolver no compósito propriedades enquanto material condutor elétrico. Da combinação fibras e nanomateriais resulta um material compósito reforçado à multiescala, uma vez que a matriz cimentícia é composta por dois materiais com diferentes dimensões, enquanto que o fator de escala das fibras é o mm, nos nanomateriais estão numa nanoescala.

2.3. Matrizes cimentícias reforçada por fibras

O uso de fibras para reforço de materiais já remonta a tempos antigos dos Romanos e Egípcios, no reforço de pastas de argila com fibras naturais. O betão reforçado com fibras, é um material compósito de matriz cimentícia [5]. As elevadas propriedades mecânicas e baixa massa volúmica das fibras contribuem para um aumento significativo da rigidez do betão. Enquanto que no betão armado, as armaduras são colocadas numa posição específica para resistir aos esforços de tração, as fibras são adicionadas e espalhadas aleatoriamente e dispersas na matriz cimentícia, formando uma rede de reforço tridimensional. A dispersão das fibras na matriz é um fator muito importante, uma vez que se a dispersão não for correta, o reforço pode não ser eficaz.

O reforço pode ocorrer por fibras contínuas ou curtas. Nas fibras contínuas o reforço é realizado através de fibras longas, que são incorporadas na matriz por técnicas como enrolamento filamental ou lay-up de camadas de fibra. As fibras curtas, são geralmente inferiores a 50 mm

de comprimento, sendo adicionadas aleatoriamente na matriz cimentícia. A Figura 2.2 ilustra os sistemas de reforço através de fibras.

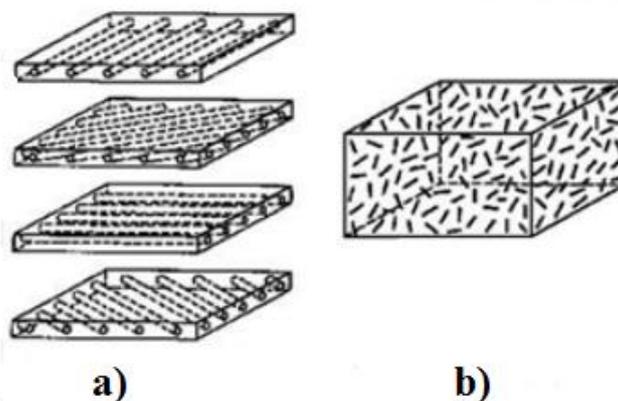


Figura 2.2 – Sistemas de reforço por fibras (a) com fibras contínuas e (b) com fibras curtas (adaptado de [6])

O reforço de matrizes cimentícias por fibras oferece o aumento da resistência à tração de betões e argamassas, diminuindo a sua fendilhação, e os mecanismos responsáveis pela propagação das fendas. As características mecânicas, bem como outras propriedades físicas do betão e argamassas reforçados com fibras, dependem das propriedades da fibra, da matriz, da interação fibra-matriz, e da dispersão de fibras dentro da matriz cimentícia [6]. O teor em fibras tem um papel determinante nas propriedades finais que a matriz cimentícia reforçada apresenta [7].

As fibras inibem o início da propagação das fissuras no betão. Mas é no estado pós-fissuração que as fibras exercem o seu principal efeito que é intercetar a propagação de microfissuras, evitando assim a rutura brusca. 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 [8]. A Figura 2.3 apresenta o comportamento de tensões numa fissura com e sem fibras.

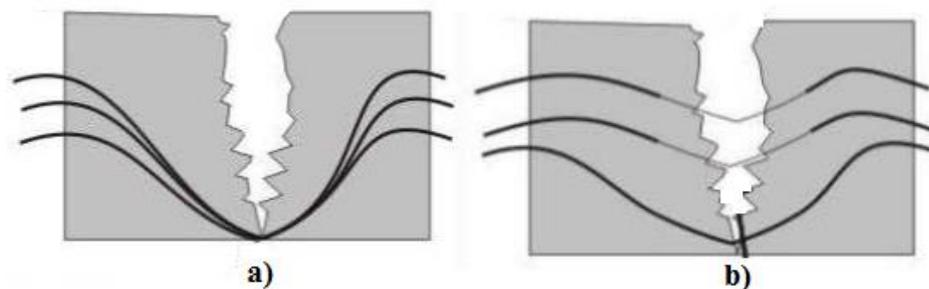


Figura 2.3 – Comportamento de tensões com e sem fibras; a) concentração de tensões numa fissura sem fibras; (b) fibras atuando como ponte de transferência de tensões [9]

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. Por exemplo, com um betão de elevada resistência deve-se evitar fibras longas, de forma a impedir a rotura das fibras na secção da fenda. Num betão de resistência baixa e com inertes de maior dimensão deve-se utilizar fibras longas com o intuito de haver maior probabilidade de existirem fibras a “cozerem” os vazios e microfendas que ocorrem em maior número neste betão. Em termos gerais e de uma forma simplificada pode-se dizer que, se a rotura das fibras na secção da fenda for evitada, deve-se optar por um tipo de fibra que conduza ao maior número de fibras por unidade de volume de betão [10].

2.3.1. Tipos de fibras no reforço de compósitos de matriz cimentícia

Independentemente da sua natureza, as fibras podem afetar significativamente as propriedades finais da matriz cimentícia consoante a sua orientação, comprimento, formas comerciais e origem.

As fibras são elementos filiformes que apresentam um elevado comprimento em relação à dimensão transversal máxima, sendo caracterizadas pelas suas flexibilidade e finura. As fibras são constituídas por macromoléculas, os polímeros, que, por sua vez, são compostos por uma sequência de monómeros (unidade que se repete num polímero). Os polímeros são quimicamente estáveis, enquanto os monómeros são quimicamente instáveis, o que explica a reação de união de monómeros na formação do polímero de base que constitui as fibras [11].

Em relação ao comprimento, são classificadas como contínuas ou descontínuas, isto é, as contínuas apresentam comprimento limitado, enquanto que as descontínuas apresentam

comprimento ilimitado. As fibras longas são aquelas que apresentam comprimento igual ou superior a 6mm [7]. A Figura 2.4 apresenta de forma esquemática a classificação das fibras, em fibras naturais e não naturais.

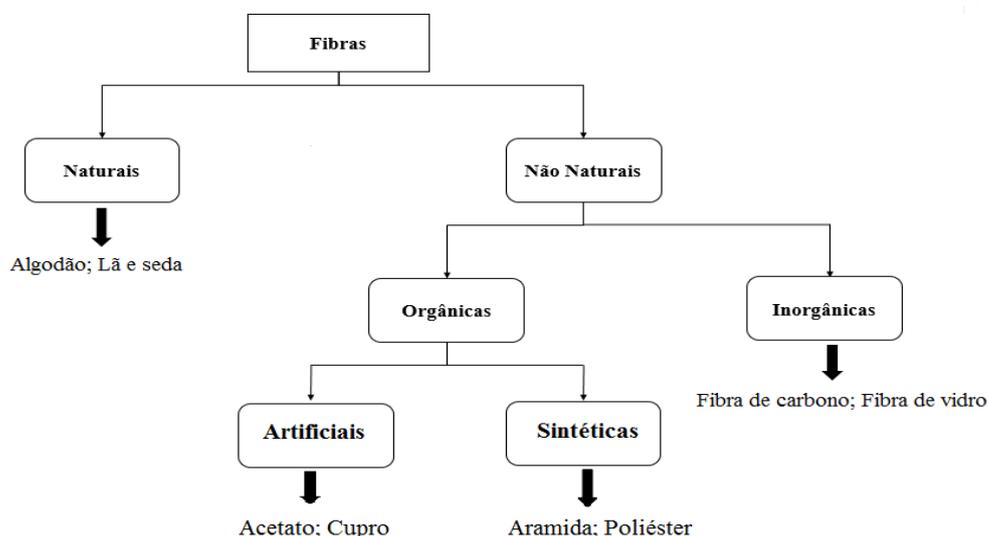


Figura 2.4 – Classificação de fibras quanto à origem [7]

As fibras naturais, podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Das fibras naturais, destacam-se a entre outras a lã e a seda. Estruturas fibrosas com base em fibras naturais têm ganho um espaço fundamental quando é necessário desempenhar funções de separação, drenagem, filtração, proteção e reforço, em solo. A utilização das fibras naturais torna as obras de engenharia mais sustentáveis, visto tratar-se de matérias-primas renováveis, biodegradáveis, de baixo consumo energético e não tóxicas [12].

As fibras não naturais, ou também conhecidas como fibras feitas pelo homem, são desenvolvidas com o intuito de melhorar várias propriedades como o rendimento mecânico, estabilidade térmica e condutividade elétrica. Podem ser inorgânicas e orgânicas, enquanto que as inorgânicas, também apelidadas de fibras de alto desempenho, apresentam características em que as diferem das restantes fibras não naturais como elevadas resistências mecânicas e térmicas, destacando-se a fibra de carbono. As fibras orgânicas são fibras que desempenham uma função específica, por outras palavras como característica fora do comum, e podem ser artificiais ou sintéticas.

Atualmente, são várias as fibras usadas como reforço de matrizes cimentícias, destacando-se as fibras de aço, de carbono, de polipropileno e de vidro.

- Fibra de aço

A fibra de aço é das fibras com maior aplicação em diversas áreas, existindo numa grande variedade de formas e tamanhos, dependendo do processo de fabrico. As secções podem ser circulares, quadradas, irregulares, entre outras. 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. A relação entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro define o que se designa por fator de forma da fibra, variando, geralmente entre 30 e 100 [10].

No betão reforçado com fibras de aço, as fibras são adicionadas aleatoriamente no betão. Um dos seus principais benefícios é o aumento da ductilidade, bem como o desempenho do betão quando o esforço predominante é o de flexão. O reforço do betão com fibras de aço pode substituir completamente as armaduras convencionais, já em estruturas em que se exige capacidade de carga significativa, pode ser usado como reforço adicional à armadura convencional. A Tabela 2.1 apresenta as propriedades mecânicas da fibra de aço.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas de fibra de aço (adaptado de [2], [9], [10])

Fibra	Massa volúmica (g/ cm³)	Diâmetro equivalente [mm]	Extensão de Rotura (%)	Módulo de Young [GPa]	Resistência à Tração [GPa]
Aço	7.8	0.15-1	20	200	0.5-3

- Fibra de vidro

A fibra de vidro também tem grande utilização no reforço da matriz cimentícia. Mas é na produção de materiais compósitos, como reforço da matriz polimérica que a fibra é mais utilizada. O vidro fundido pode ser produzido em filamentos contínuos integrados em mechas (“rovings”). No processo de fabrico a superfície da fibra é revestida quimicamente para melhorar a impregnação na matriz e proporcionar uma melhor adesão entre os constituintes do compósito [13].

As fibras de vidro na matriz cimentícia podem ser dispersas (curtas) ou contínuas (longas) [9], e são excelentes fibras nos sistemas de reforço devido às suas excelentes propriedades

mecânicas, uma vez que para além da elevada resistência à tração também apresentam um elevado módulo de Young.

A fibra de vidro poderá ser agrupada em diferentes grupos: “A-Glass fiber”, que é um excelente isolante acústico e térmico; “E-Glass fiber” contém baixa alcalinidade e é muito resistente; boa resistência à tração e compressão; boas propriedades elétricas, e relativo baixo custo; baixa resistência ao impacto, é o tipo de fibra mais utilizada como reforço quando aplicada uma resina polimérica como matriz e tem grandes aplicações na indústria automóvel e têxtil; “C-Glass” contém um bom comportamento ao ataque químico; usado principalmente como superfície de um tecido ou como camada exterior em laminados; “R-Glass” alta resistência à tração e um módulo de elasticidade superior comparativamente com “E-Glass” assim como uma melhor absorção de energia; “S-Glass” caracterizado por uma alta rigidez sendo usado em aplicações que requerem boas propriedades mecânicas; e “AR-Glass” usado como reforço em cimentos confere às fibras excelente resistência alcalina aumentando a durabilidade do betão; alta resistência à tração, sendo então utilizado como reforço no betão para melhorar as propriedades mecânicas [14]. A Tabela 2.2 apresenta as propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibra de vidro.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de fibras de vidro (adaptado de [9], [15], [16])

Fibra	Massa volúmica (g/ cm³)	Diâmetro equivalente [mm]	Extensão de Rotura (%)	Módulo de Young [GPa]	Resistência à Tração [GPa]
E-Glass	2.6	0.005-0.15	2.4	72.4	3.45
S-Glass	2.4	0.005-0.15	3.3	85.5	4.58
C-Glass	2.49	0.005-0.15	-	69	3.30

- 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 [4]. Estas fibras têm revelado grande estabilidade em ambientes alcalinos. Tem-se observado, todavia que a elevação de temperatura provoca uma diminuição das suas propriedades, com

perdas significativas acima dos 50°C, o que vêm de algum modo trazer incertezas quanto ao seu desempenho a longo termo [17]. O uso destas fibras aumenta a tenacidade do betão, que pode ser enfraquecida se não houver eficácia na ligação fibra matriz cimentícia. O fato de ser quimicamente inerte, torna também resistente a ataques químicos. A Tabela 2.3 apresenta as propriedades mecânicas da fibra de polipropileno.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de fibra de polipropileno (adaptado de [5, 9])

Fibra	Massa volúmica (g/cm³)	Diâmetro equivalente [mm]	Extensão de Ruptura (%)	Módulo de Young [GPa]	Resistência à Tração [GPa]
Polipropileno	0.9-0.95	0.02-1	15-25	3.5-10	0.45-0.76

Uma vez que as fibras de carbono são o objeto de estudo na presente dissertação, serão mais aprofundadas no ponto 2.3.2.

2.3.2. Fibra de carbono

A descoberta da fibra de carbono remonta ao século XIX, em que Thomas Edison e Joseph Swan as usaram como filamentos das primeiras lâmpadas elétricas incandescentes. Embora a primeira preparação tenha ocorrido em 1878, é apenas a partir de 1964 que as fibras de carbono começam a ser produzidas comercialmente, isto devido ao interesse das indústrias aeronáuticas e bélicas pela necessidade de materiais mais leves e resistentes. Nesta época, a produção comercial deste material segue um caminho semelhante ao utilizado por Edison e Swan, e são produzidas fibras de carbono a partir de fibras de rayon [18]. Atualmente, os principais materiais precursores utilizados na produção de fibras de carbono são o rayon, a poliácridonitrila (PAN) e o pitch de petróleo [19].

As fibras de carbono apresentam uma morfologia fibrosa, geralmente de estrutura não grafitica, obtidas por carbonização de fibras orgânicas naturais, sintéticas ou procedentes de precursores orgânicos. Atualmente são produzidas em rolos “Anilox”, sendo estes rolos constituídos por milhares de fibras individuais entrelaçadas, misturadas numa resina epoxy e curadas para obterem a aparência final. A orientação que se dá às fibras no processo de colagem é

fundamental na definição das propriedades físicas e mecânicas do compósito, em especial, a elevada resistência à tração elevado modulo de elasticidade e boa condutividade elétrica [19].

As fibras podem ser contínuas (longas) ou curtas. As fibras contínuas estão dispostas unidireccionalmente dentro das matrizes poliméricas e absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes. As fibras curtas de carbono, são dispersas aleatoriamente na matriz proporcionando pontes de transferência nas tensões de corte entre o betão e as fibras curtas de carbono.

O comprimento da fibra individual pode variar entre os 3 mm até aos 10-13 mm, com diâmetros da ordem dos 10-18 μm . É pois o que se designa por microfibra ao contrário de outras que apresentam uma gama de variação no seu comprimento de 45mm até 80 mm [4]. As fibras de carbono superam muitos dos aspetos negativos presentes nas outras fibras e tornam-na assim num material de eleição para a constituição do compósito fibra-cimento. Em comparação com fibras de vidro, apresentam maior rigidez, e pesa o fato de cada vez mais se tornarem acessíveis economicamente. A Figura 2.5 apresenta uma representação de uma fibra de carbono em comparação com um fio de cabelo.

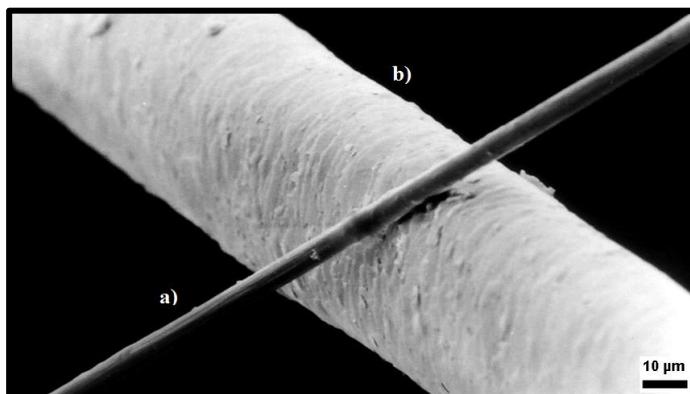


Figura 2.5 – Representação de fibra de carbono;(a) fibra de Carbono; b) fio de cabelo [20]

2.3.3. Técnicas de produção de fibras de carbono

O processo de fabrico pode variar segundo o precursor utilizado. O processo, numa primeira fase, consiste na oxidação do material precursor a uma temperatura próxima dos 200°C. Este processo divide-se em 3 fases: a preparação do material precursor, a fiação onde o material precursor é transformado em fibra, e, por fim, a estabilização onde para endurecer as fibras se procede à sua oxidação parcial a uma temperatura não superior aos 200°C. A elevação da

temperatura deve ser feita de forma gradual e controlada para evitar a fusão ou excessiva volatilização do material. É durante este processo que se observa alteração da cor do polímero para a cor negra [21]. A Figura 2.6 ilustra o efeito da temperatura nas propriedades das fibras de carbono.

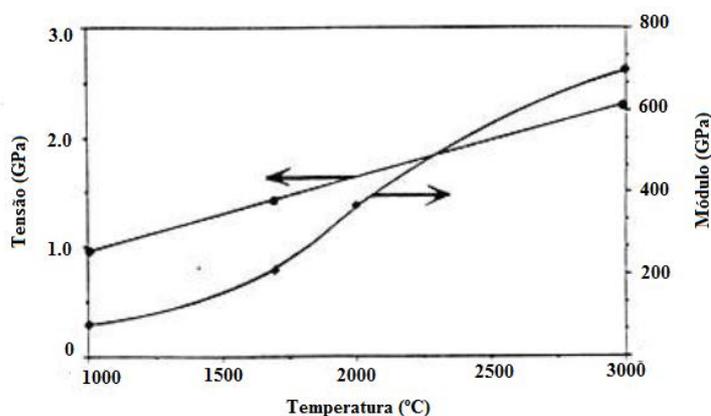


Figura 2.6 – Efeito da temperatura nas propriedades de fibras de carbono [4]

O processo seguinte, a carbonização, consiste em refinar e purificar o material do processo anterior. Para isso a temperatura é elevada aos 1600°C numa atmosfera inerte, em que são removidas as impurezas das cadeias moleculares, até que o polímero tenha o teor de carbono com a qualidade que pretende a fibra. Dependendo das características pretendidas, pode-se ainda realizar uma segunda fase com elevada temperatura, de onde resulta um material com características semelhantes à grafite, sendo este processo a grafitização. Por último, procede-se a uma oxidação superficial onde as fibras são sujeitas a tratamento de oxidação de modo a aumentar a sua rugosidade e polaridade superficial [21]. A Figura 2.7 apresenta, de uma forma esquemática, o processo de produção das fibras de carbono.

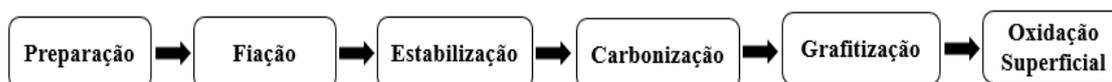


Figura 2.7 – Representação esquemática de métodos de produção de fibras de carbono

2.3.4. Técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono em matrizes cimentícias

As fibras curtas de carbono (SCF) são dispersadas aleatoriamente na matriz cimentícia. A sua mistura direta em cimento pode conduzir a um reforço não eficaz da matriz cimentícia. As técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono dividem-se em métodos químicos, físicos e a combinação dos dois métodos, como é apresentando na Figura 2.8.

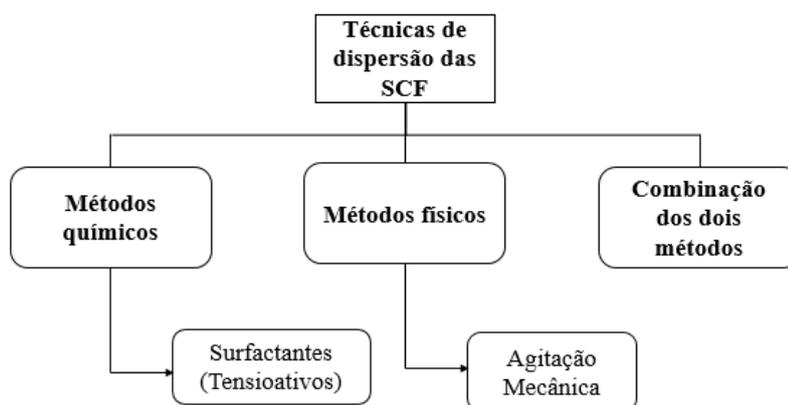


Figura 2.8 – Técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono (adaptado: [22])

O método químico consiste na adição de surfactantes, que são agentes químicos que têm a capacidade de alterar as propriedades superficiais e internas de um líquido, facilitando a dispersão das fibras curtas de carbono. O método físico baseia-se na utilização de um equipamento de agitação mecânica, enquanto que a combinação dos métodos físicos e químicos consiste na dispersão das fibras curtas na matriz cimentícia pelos métodos químicos e físicos.

Durante o processo, para que o reforço com fibras seja eficaz, é necessário que se impeça a sua aglomeração durante a realização da argamassa. A aglomeração das fibras está relacionada com a esbelteza das fibras e sua percentagem, com o tamanho dos agregados, com a composição granulométrica, com a razão água-cimento. O aumento da esbelteza e da percentagem de fibras, tamanho e quantidade de agregados graúdos intensifica a tendência para a aglomeração das fibras, diminuindo a trabalhabilidade da mistura [23]. A Figura 2.9 ilustra a dispersão de fibras curtas em matriz cimentícia.

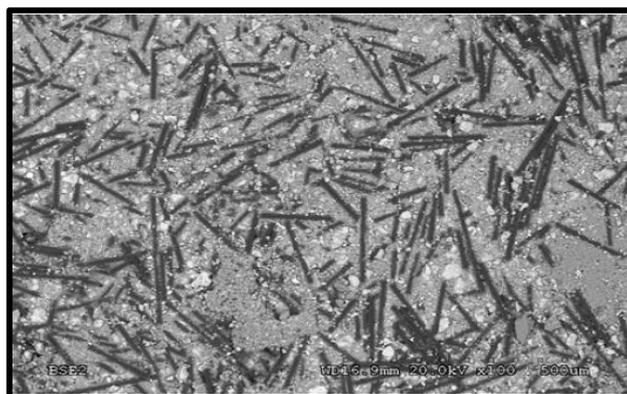


Figura 2.9 – Fibras curtas de carbono dispersadas em matriz cimentícia [24]

2.3.5. Propriedades mecânicas e elétricas das fibras de carbono

A sua estrutura anisotrópica associada a ligações carbono-carbono, faz com as fibras de carbono tenham como propriedades mecânicas principais o elevado módulo de Young, elevada resistência à tração, baixa massa volúmica, tensão de rotura elevada, baixo coeficiente de expansão térmica e elétrica, seja inerte e não inflamável. Estas fibras também têm o inconveniente de terem uma baixa resistência ao impacto, serem frágeis e admitem baixas deformações na rutura. Com estas propriedades a integração das fibras de carbono na matriz cimentícia faz com que o compósito obtenha propriedades mecânicas bastante aceitáveis, com o consideravelmente aumento do módulo de Young e da resistência à tração. A Tabela 2.4 apresenta as propriedades mecânicas para os materiais precursores PAN, Pitch e Rayon das fibras de carbono.

Tabela 2.4- Propriedades mecânicas dos materiais precursores de fibra de carbono (adaptado [25, 26])

Fibra	Massa volúmica (g/cm ³)	Diâmetro equivalente [mm]	Extensão de rotura (%)	Módulo de Young [GPa]	Resistência à tração [GPa]
PAN	1.75-1.9	0.004-0.008	0.6-2.5	200-350	2.4-6.90
Pitch	1.9-2.15	0.008-0.0011	0.3-0.9	170-800	1.35-3.20
Rayon	1.6	0.008-0.009	2.5	40	1.

As fibras de carbono do tipo PAN encontram-se divididas em 4 grupos, dependendo das suas características: HS (“High Strength”); IM (“Intermediate Modulus”); HM (“High Modulus”); UHM (“Ultra High Modulus”) [13]. A Tabela 2.5 apresenta as propriedades mecânicas das fibras de carbono do tipo PAN.

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas de fibra de carbono PAN (adaptado de [15])

Fibra de Carbono (PAN)	Massa volúmica (g/cm³)	Extensão de Ruptura (%)	Módulo de Young [GPa]	Resistência à Tração [GPa]
HS	1.8	2.0	230	4.5
IM	1.76	1.1	290	3.1
HM	1.86	0.7	380	2.7
UHM	1.94	0.7	588	2.4

Uma outra propriedade conhecida das fibras de carbono é a sua condutividade elétrica. A fibra de carbono apresenta como resistência elétrica 2.3×10^{-4} (Ω -cm) [24]. Trata-se de um material com boa condutividade e apresenta uma variação da sua resistência elétrica que é inversamente proporcional ao aumento da temperatura no tratamento térmico. Isto deve-se fundamentalmente ao maior grau de perfeição das cadeias de carbono, que são obtidas durante o processo de aquecimento deste material [27]. Esta propriedade faz com que seja possível estabelecer uma conexão para este material compósito, que é constituir um sensor durante o um estado de tensão, através da variação da resistência elétrica quando a corrente elétrica percorre o material. As propriedades elétricas do compósito já provaram ser bastante eficazes no monitoramento de tráfego, e na monitorização de deformações e fissuras em pavimentos asfálticos [28].

2.3.6. Aplicações das fibras de carbono

As propriedades da fibra de carbono permitem a sua aplicação nas mais diversas áreas. As suas propriedades mecânicas aliadas à sua baixa massa volúmica fazem delas um material que desde da sua descoberta vem sido desenvolvido para cada vez mais satisfazer necessidades na mais diversidade de aplicações. O seu reforço em matriz cimentícia cada vez é mais habitual, aproveitando as suas características de condutor fazem delas um material cada vez mais prometedora na construção civil. Mas é nas indústrias automóvel e aeroespacial, que vêm cada vez mais são desenvolvidas, pelo fato de ao serem incorporadas na matriz de vários materiais aumentarem de uma forma significativa as suas propriedades mecânicas.

2.4. Matrizes cimentícias reforçadas por nanomateriais

O reforço de matrizes cimentícias por nanomateriais é relativamente recente, uma vez que apenas atualmente se começa a perceber as vantagens da integração da nanotecnologia na construção.

A introdução de nanomateriais como reforço de betões ou argamassas, permite o reforço e o controlo da fissuração a uma escala nanométrica, para além de um significativo aumento das propriedades elétricas, sendo que se advinha, num futuro próximo, um papel cada vez mais crescente da nanotecnologia na engenharia civil. Tal como no reforço do betão com fibras, a sua dispersão na matriz cimentícia é a maior dificuldade, podendo fazer que a matriz cimentícia não adquira as propriedades pretendidas [29].

Os nanotubos de carbono surgem como o nanomaterial que tem sido mais alvo de investigação como nanomaterial de reforço de matrizes à base de cimento; mas nanomateriais como a nanocelulose também começam a ser desenvolvidos e aplicados em engenharia civil.

2.4.1. Nanotecnologia e nanomateriais

“Nanotecnologia consiste no processo de separação, consolidação e deformação de materiais átomo por átomo ou molécula por molécula” (Norio Taniguchi, 1974).

O termo nanotecnologia surge pela primeira vez em 1974, pelo professor da Universidade de Ciências de Tóquio, Norio Taniguchi. Mas foi em 1959, ainda sem o termo de

nanotecnologia, que o físico Americano Richard Feynman, antecipou conceitos que ainda hoje fazem parte da sua atividade experimental. O principal passo para o desenvolvimento da nanotecnologia foi a invenção do Microscópio de Tunelamento por Varrimento (STM), na década de 1980, que permitiu aos cientistas ver e mover átomos individuais pela primeira vez. Eric Drexler, motivado por Richard Feynman, explorou o conceito no livro de 1986 “Engines of Creation - The Coming Era of Nanotechnology”, introduzindo a utilização de máquinas que trabalham numa escala molecular para estruturar matéria de baixo para cima, definindo nanotecnologia como uma tecnologia com grande potencial.

Nanotecnologia consiste na arte e ciência de manipular matéria à escala molecular. Por outras palavras, é descrita como o desenvolvimento e aplicação de materiais e estruturas com pelo menos uma das suas dimensões igual ou inferior a 100 nm. Os nanomateriais têm dimensões na ordem dos 10^{-9} m e a sua aplicação em diversas áreas científicas tem-se revelado como uma das abordagens de inovação e desenvolvimento mais promissoras.

Atualmente, os nanomateriais são produzidos através de duas abordagens, a *Bottom-up* e a *Top-down*. Na abordagem *Bottom-up*, os nanomateriais são desenvolvidos através da construção de estruturas átomo por átomo ou molécula por molécula. O processo mais utilizado é o químico, mas também podem ser utilizados processos físicos, como é o caso da técnica de *electrospinning*. A abordagem, *Top-down*, os nanomateriais são desenvolvidos por desgaste de materiais macroscópicos, por meio de processos físicos onde, por exemplo, os materiais podem ser moídos até se obter partículas muito pequenas com baixa homogeneidade granulométrica na escala nanométrica [11].

Os nanomateriais têm suscitado muito interesse da comunidade científica, devido às suas multifuncionalidades e diversidades de aplicação, devendo-se o fato das propriedades e funcionalidades que são desenvolvidas e potenciadas quando um material é transformado à escala nano. Estes materiais, podem ser produzidos sob a forma de filmes finos, nanofibras, nanopartículas, nanoestruturados e nanotubos, e são caracterizados por terem maior área de superfície, maior proporção de átomos na superfície e possibilidade de controlar a estrutura dos materiais a uma nanoescala.

2.4.2. Nanotubos de carbono

A descoberta de uma forma tubular de carbono, a que foi dado o nome de nanotubos de carbono (NTC), foi descoberta pelo físico japonês Sumio Iijima em 1991. Desde então que tem atraído especial interesse por apresentarem notáveis propriedades mecânicas, elétricas, bem como outras características físicas de relevo.

Os nanotubos de carbono podem se dividir em dois grupos, os de paredes múltiplas e de parede única. Os primeiros a serem descobertos por Iijima, foram os chamados nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT), que são constituídos por múltiplas camadas (tubos concêntricos) de grafite cuja separação ronda os 0,34 nm, com diâmetros de alguns nanômetros e uma elevada relação comprimento/diâmetro. Cerca de dois anos mais tarde, o físico japonês reportou também observações de nanotubos de carbono de parede única (SWCNT), que consistem em uma única folha de grafite perfeitamente enrolada como um tubo cilíndrico [29]. As Figuras 2.10 e 2.11 apresentam as representações esquemáticas e as imagens microscópicas, respetivamente, dos tipos de nanotubos de carbono.

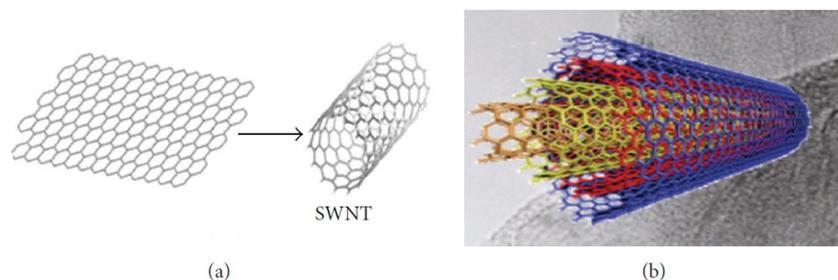


Figura 2.10 – Representação de tipos nanotubos de carbono; (a) SWCNT; (b) MWCNT [29]

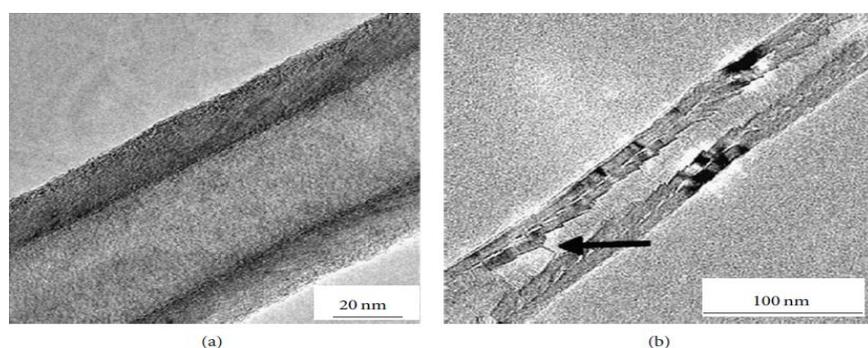


Figura 2.11 – Representação microscópica de tipos nanotubos de carbono; (a) SWCNT; (b) MWCNT [29]

Os SWCNT são mais difíceis de produzir e de analisar as suas propriedades do que os MWCNT devido a um menor tamanho (principalmente diâmetro) e uma maior instabilidade estrutural [30].

Existem várias formas de enrolar o grafeno e gerar um nanotubo de carbono. O vetor que define a estrutura de rede é chamado de vetor quiral. Dependendo do vetor quiral, a forma como a folha de grafeno é enrolada, o nanotubo pode ter as diferentes propriedades físicas, podendo ser condutor ou semicondutor [30]. Os NTC podem apresentar uma estrutura quiral ou não quiral, os nanotubos quirais são assimétricos, enquanto que os não quirais são simétricos podem ter uma estrutura *armchair* ou *zig-zag*. A Figura 2.12 ilustra as estruturas quirais e não quirais de nanotubos de carbono.

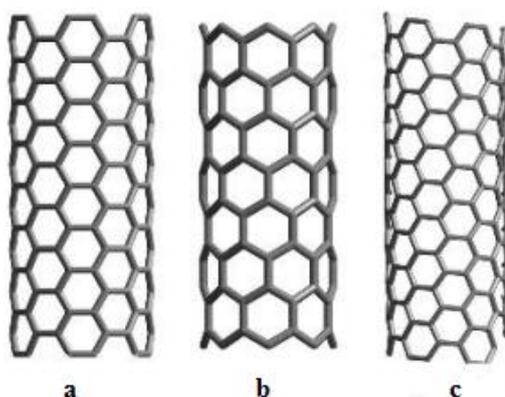


Figura 2.12 – Estrutura não quiral e quiral de nanotubos de carbono; (a) *armchair*, (b) *zig-zag*; (c) *quiral* [31]

2.4.3. Síntese de nanotubos de carbono

Diferentes técnicas de síntese de nanotubos de carbono tem vindo a ser desenvolvidas, sendo as mais utilizadas o arco elétrico, ablação por laser e a deposição química em fase vapor (CVD). A técnica CVD usa a decomposição de gases que contenham carbono, como hidrocarbonetos sobre um catalisador metálico, com temperaturas de processamento moderadas, sendo o método de produção mais utilizado. As técnicas do arco elétrico e ablação por laser são bastante semelhantes, em que se baseia na condensação de átomos de carbono a partir de grafite de alta pureza, as temperaturas atingidas nestes dois processos são consideravelmente altas, e diferem no grau de pureza dos nanotubos obtidos. O método do arco elétrico foi o método utilizado pela primeira vez por Iijima para a produção de nanotubos de carbono, (adaptado [32]).

2.4.4. Técnicas de dispersão de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias

A dispersão dos nanotubos de carbono na matriz cimentícia é um dos principais fatores que pode influenciar as propriedades no nanocompósito. Os nanotubos de carbono têm uma forte tendência em se aglomerar devido à presença das forças atrativas de Van der Waals. A infiltração de aglomerados em matrizes cimentícias é muito difícil, sendo um potencial problema na composição do nanocompósito. O processo de desaglomeração e subsequente distribuição dos nanotubos de carbono dentro da matriz cimentícia é a chamada dispersão. A Figura 2.13 apresenta, de uma forma representativa, os nanotubos dispersos e aglomerados,



Figura 2.13 – Representação de nanotubos de carbono dispersos e aglomerados; (a) dispersos, (b) aglomerados [33]

A dispersão pode ocorrer devido ao descolamento contínuo em pequenos fragmentos sob alta tensão (rutura) ou devido a descolamento contínuo de pequenos fragmentos com uma tensão relativamente mais baixa (erosão). O comportamento da dispersão dos nanotubos depende do seu comprimento, a densidade de emaranhamento, fração de volume, viscosidade da matriz e forças atrativas [29]. A mistura direta nos nanotubos de carbono em cimento pode conduzir a uma mistura não homogênea, assim a sua dispersão é feita primeiramente em água. As técnicas de dispersão dos nanotubos de carbono dividem-se em métodos físicos, químicos e na combinação dos dois, como é apresentando na Figura 2.14.

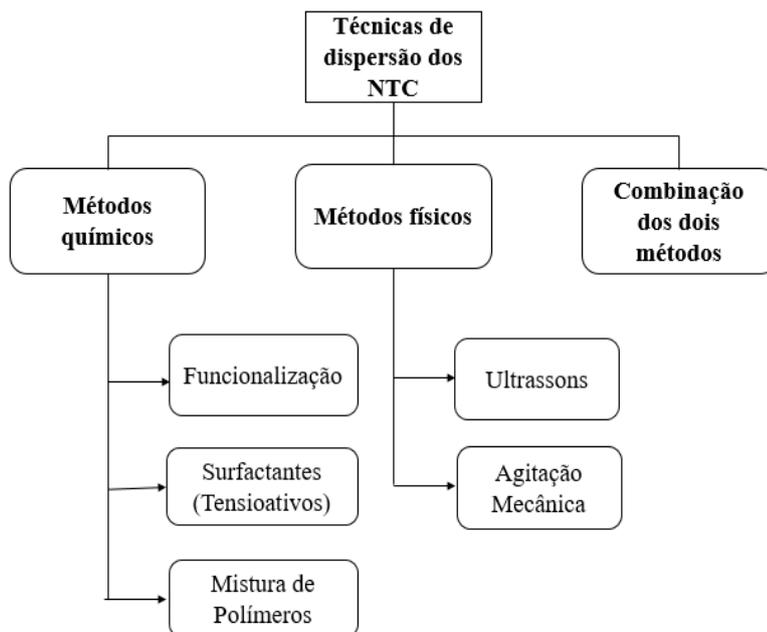


Figura 2.14 – Técnicas de dispersão de nanotubos de carbono [22]

A técnica de dispersão por um método físico baseia-se na utilização de um equipamento de ultrassons, enquanto que os métodos químicos utilizados se baseiam na utilização de solventes, agentes tensioativos, funcionalização com ácidos, entre outros. A melhor solução para uma correta dispersão nos nanotubos de carbono passa pela combinação dos dois métodos, uma vez que os diferentes métodos quando utilizados individualmente apresentam efeitos indesejados para os materiais, como afetar a hidratação do cimento no caso dos métodos químicos, e fato de como os métodos físicos tendem a ser morosos podem afetar as características dos nanotubos de carbono. A Figura 2.15 ilustra a dispersão dos MWCNT na matriz cimentícia.

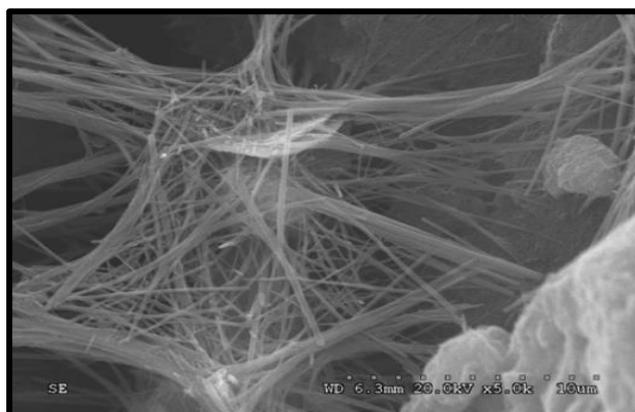


Figura 2.15 – MWNTC dispersados na matriz cimentícia [24]

2.4.5. Propriedades mecânicas e elétricas de nanotubos de carbono

As suas propriedades estruturais como as fortes ligações entre os átomos de carbono conferem a este nanomaterial um elevado módulo de Young, dureza e resistência à tração. A resistência à tração nos nanotubos depende da distribuição de defeitos, bem como das interações entre as camadas nos MWCNT e nos aglomerados SWCNT. O módulo de Young indica-nos a rigidez do material, que por exemplo, em comparação com o aço é 5 vezes maior no caso dos MWCNT. A estas características alia-se uma baixa densidade, devido ao diâmetro nanométrico e ao alto rácio da relação comprimento/diâmetro [30].

Os nanotubos de carbono são excelentes condutores de eletricidade. As suas propriedades elétricas dependem diretamente do seu diâmetro e do seu valor quiral, podendo um nanotubo de carbono ser condutor ou semicondutor, como foi abordado no ponto 2.4.2. A resistência elétrica nos nanotubos de carbono é alterada quando submetida a uma força que deforma o betão, tornando-se piezoresistivo. A Tabela 2.6 apresenta as propriedades mecânicas dos tipos de nanotubos de carbono.

Tabela 2.6 - Propriedades mecânicas e elétricas de nanotubos de carbono (adaptado [24] [34])

NTC	Massa volúmica (g/m ³)	Módulo Young [GPa]	Resistência elétrica [Ω-cm]	Resistência à tração [GPa]
SWNTC	~1	500-1500	10 ⁵ -10 ⁶ (metálico) 10 (semicondutor)	20-100
MWNTC	2.16	20-1000	<10 ⁻²	10-60

2.4.6. Aplicações dos nanotubos de carbono

As suas propriedades mecânicas, elétricas, térmicas e sua baixa densidade faz com que este nanomaterial tenha várias aplicações possíveis em diversas áreas. No setor da construção, tem extraordinárias propriedades mecânicas em comparação com outros materiais atualmente utilizados. Os nanotubos de carbono podem agir como agente de reforço de materiais, bem como sensores, devido às suas propriedades elétricas.

A sua baixa densidade faz deles também materiais bastante apetecíveis para a aplicação em estruturas espaciais, bem como na indústria automóvel, em que, neste último caso, devido às suas propriedades térmicas, os nanotubos de carbono poderão ser usados para combater o degelo. Na eletrónica, as propriedades dos nanotubos de carbono estão a mostrar cada vez mais potencial para aplicações em energia fotovoltaica, têxteis inteligentes e dispositivos de conversão de energia, entre outros. Na medicina também tem sofrido grandes avanços, e espera-se que no futuro, com a sua aplicação, seja possível o tratamento de infeções, em terapia genética mediante a libertação de ADN, na regeneração de tecidos, síndrome de Alzheimer, entre outros. Outra das suas aplicações é na indústria têxtil, já que podem ser usados como reforço de matrizes poliméricas, estando em vista uma próxima geração de tecidos têxteis com propriedades elétricas.

2.5. Monitorização de estruturas a partir de fibras

A monitorização de integridade estrutural (SHM – Structural health monitoring) tem um papel contínuo no acompanhamento e avaliação do estado de sistemas estruturais. Os SHM são sistemas capazes de fornecer dados em tempo real sobre o estado das estruturas usando uma rede de parâmetros de medição dispositivos sensoriais como o deslocamento, a tensão e temperatura. Esta informação ajuda na deteção oportuna de anomalias no desempenho de estruturas [24]. Muitas vezes descritos como materiais estruturais inteligentes (autocontrolo), os materiais à base de cimento com condutores tornaram-se recentemente objeto de um número de estudos.

A monitorização surge como meio eficaz para prevenir, em tempo útil, a necessidade de eventuais ações de reabilitação, monitorizando três grandezas, sendo estas mecânicas (deslocamentos, força, pressão, tensão, deformação), físicas (temperatura, humidade relativa) e químicas (PH, corrosão das armaduras e corrosão do aço).

Dos sistemas de monitorização por fibras destacam-se, a monitorização através de materiais condutores elétricos e por fibras óticas, que são sistemas baseados por sensores. Basicamente, os dois métodos baseiam-se na integração de fibras na estrutura como sensores elétricos.

2.5.1. Monitorização através de materiais condutores

A integração de fibras em matrizes cimentícias com propriedades condutoras elétricas têm sido recentemente bastante desenvolvida, propondo o uso de fibras como sensores elétricos na monitorização da integridade estrutural.

As fibras quando adicionadas na matriz cimentícia permitem desenvolver uma ligação com a matriz, funcionando com um efeito piezoresistivo. O efeito piezoresistivo acontece quando a resistência elétrica de um material se altera quando sujeita a uma tensão mecânica. Aplicando uma diferença de potencial pode medir-se a sua resistência elétrica e relacionar estas alterações com as deformações provocadas no material pela tensão aplicada [35]. A piezoresistividade é caracterizada pelo *Gauge Factor* (GF) sendo este também denominado de fator sensor da deformação em função da resistência elétrica [36]. O GF pode ser apresentado de acordo com a equação 2.1.

$$GF = \frac{\text{Variação relativa da resistência}}{\text{Deformação aplicada}} = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Em que:

ΔR – Aumento da resistência elétrica causada pela aplicação de uma deformação;

R_0 – Resistência elétrica inicial ou resistência quando $\varepsilon = 0$;

$\Delta R / R_0$ – Quociente entre o aumento da resistência elétrica e a resistência elétrica inicial.

Este fenómeno permite a utilização do material, como um sensor de deformação, pois a resistência elétrica medida pode ser relacionada com a tensão. A resistividade aumenta linearmente com a carga aplicada sob tração e diminui linearmente com carga aplicada sob compressão.

É óbvio que a aplicação deste tipo de sistema de monitorização, apesar de ser uma solução muito interessante, é sempre dependente dos fatores externos para o seu correto funcionamento. A intromissão de outros materiais ou sistemas condutores é uma das questões-chave a serem tomadas em consideração com esta técnica, especialmente quando aplicado em produtos utilizados no ambiente aquoso ou húmido, já que essas condições ambientais podem interferir com as medições de resistividade elétrica. No entanto, esta limitação técnica pode ser com

facilidade ultrapassada, revestindo os componentes/materiais elétricos com substratos isolantes [37].

A fibra mais utilizada como sensor na matriz cimentícia tem sido a fibra de carbono uma vez que combina as suas elevadas propriedades mecânicas com as elétricas, mas outros materiais como os nanotubos de carbono começam a ser desenvolvidos para os mesmos fins, por apresentarem propriedades elétricas superiores. dentro da matriz cimentícia.

2.5.2. Monitorização através de fibra ótica

Durante as últimas três décadas as tecnologias e propriedades das fibras óticas têm sido estudadas para a avaliação de diferentes grandezas com recurso à medição de variações nas características da luz transportada nas fibras óticas, sendo estas, a sua intensidade, frequência, comprimento de onda, fase ou polaridade.

A monitorização através de Fibra ótica é um sistema baseado em tecnologia Bragg em Fibra ótica (FBG), concebido para determinar com precisão parâmetros estruturais de estruturas, como pontes, barragens, túneis, edifícios históricos, durante a operação de construção, validação de projeto e tempo de vida [38].

O FBG pode ser definido como uma microestrutura capaz de provocar uma alteração periódica no índice de refração do núcleo da fibra. O conceito deste fenómeno designa-se por fotossensibilidade. Esta, quando associada a fibras óticas, define-se como a capacidade de introduzir alterações permanentes no índice de refração do núcleo, quando exposto a luz com características específicas ao qual é sensível [39]. A Figura 2.16 ilustra a representação dos FBGs.

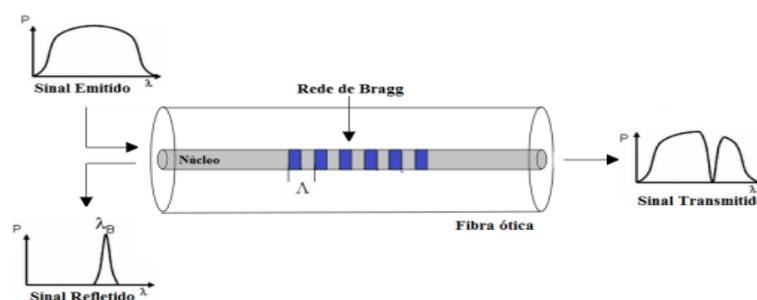


Figura 2.16 – Representação de princípio de funcionamento da tecnologia Bragg em fibra ótica [40]

Os FBGs utilizam o comprimento de onda como mecanismo de leitura em detrimento da intensidade da luz. O comprimento de onda refletido, também denominado comprimento de onda de Bragg (λ_B), permite fazer a caracterização e estudo sensorial [40], de acordo com a equação 2.2.

$$\lambda_B = 2n_{eff} * \Lambda \quad (2.2)$$

Em que:

n_{eff} – Índice de refração efetivo;

Λ – Período de cada elemento constituinte da rede de Bragg.

Esta tecnologia é hoje em dia suficientemente conhecida, as soluções de controlo de FBG têm-se revelado particularmente eficaz quando aplicada a estruturas de grande escala, permitindo a implantação de centenas de sensores para a medição a longo prazo de diferentes parâmetros físicos [38].

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Tal como já foi enunciado, um dos objetivos da presente dissertação consiste no desenvolvimento de um compósito de matriz cimentícia com nanotubos e fibras curtas de carbono.

Neste capítulo irão descrever-se os materiais utilizados na conceção do compósito cimentício, assim como, os métodos utilizados para análise do seu comportamento em termos elétricos, sob ação de uma carga uniaxial.

3.2. Materiais

Os materiais apresentados são os principais intervenientes na preparação do compósito cimentício. O ligante utilizado foi o cimento, ao qual foram adicionados nanotubos e fibras curtas de carbono. Também são especificados os materiais utilizados na dispersão dos nanotubos e das fibras na matriz cimentícia, assim como, o material utilizado como superfície condutora, para avaliação do comportamento da resistência elétrica no compósito cimentício

3.2.1. Cimento

O ligante utilizado foi o Cimento Portland do tipo CEM I 42,5R fabricado pela empresa SECIL, tendo sido disponibilizado pelo Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. O cimento Portland CEM I 42,5 R é bastante utilizado em obras de engenharia civil, e no fabrico de betões de elevada a muito elevada resistência, é também particularmente utilizado em trabalhos onde se exige uma resistência

muito elevada nos primeiros dias após aplicação [41]. No Laboratório de Materiais de Construção de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde o cimento foi disponibilizado, teve-se em atenção o fato de não se apresentar demasiadamente seco para obtenção de melhores resultados nas diferentes amostras.

3.2.2. Fibras curtas de carbono

A fibra de carbono utilizada foi a Tenax-e HTA40, tendo sido fornecida pela Fibrenamics. Pode observar-se as propriedades mecânicas das fibras de carbono Tenax-HTA40 na Tabela 3.1. Foram utilizadas diferentes quantidades de fibras curtas de carbono, tendo sido calculadas em relação ao cimento utilizado. A fibra de carbono foi devidamente cortada num comprimento de 5 mm, como se pode observar na Figura 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas de fibras de carbono utilizadas no trabalho laboratorial
(*Dados Fabricante)

Fibra de Carbono	Massa volúmica (g/ cm³)*	Diâmetro equivalente [mm]*	Extensão de Rotura (%)*	Módulo de Young [GPa]*	Resistência à Tração [GPa]*
Tenax-e HTA40	1.77	0.007	1.7	240	4.1



Figura 3.1 – Fibras curtas de carbono utilizadas no trabalho laboratorial

3.2.3. Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono utilizados foram do tipo MWNTC ao longo de todo o trabalho experimental, tendo sido fornecidos pela Fibrenamics. Na Tabela 3.2, pode observar-se as propriedades físicas dos nanotubos utilizados, pelos dados do fabricante. Foram utilizadas diferentes quantidades de nanotubos de carbono, tendo sido calculados em relação ao cimento utilizado. Na figura 3.2 pode observar-se as propriedades físicas dos MWNTC utilizados.

Tabela 3.2 – Propriedades físicas de MWNTC; (*Dados Fabricante)

Tipo de NTC	Diâmetro (nm)*		Comprimento (µm)*	Área de superfície* (m ² /g)	Elementos		Impureza (%)*
					C*	O*	
MWNTC	2-5nm (interior)	<8nm (exterior)	10-30	350-420	92.1	7.9	0

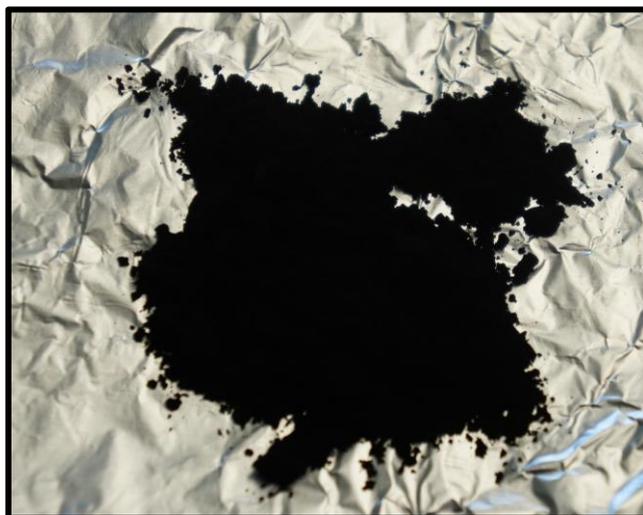


Figura 3.2 – Nanotubos de carbono utilizados no trabalho laboratorial

3.2.4. Outros materiais

Para além dos materiais anteriormente referidos, durante o trabalho laboratorial também foram utilizados outros materiais, fornecidos pela Fibrenamics. Na conceção das soluções aquosas, para facilitar a dispersão dos nanotubos e das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia, foi utilizada água destilada, o químico dispersante Pluronic F-127 e o antiespumante fosfato de

tributilo (TBP). A Tabela 3.3 apresenta as propriedades do químico Pluronic F-127, e a Figura 3.3 ilustra a sua estrutura química.

Tabela 3.3 – Propriedades de Pluronic F-127; (*Dados Fabricante)

Tipo de surfactante	Mol. Wt. (gmol ⁻¹) *	Solubilidade aquosa (em 25°C) *	CMC (wt.% em 25°C) *
Pluronic F-127	12600	>10%	0.004-0.091



Figura 3.3 – Estrutura química de Pluronic F-127 (Fonte: [42])

No compósito de matriz cimentícia com nanotubos e fibras curtas de carbono, foi colocada fita de cobre, tendo sido fornecida pela Fibrenamics. A fita de cobre foi utilizada como superfície condutora para medição do comportamento da resistência elétrica. Com ambos os lados da superfície condutores, foi devidamente cortada nas dimensões de 30x15 [mm]. A Figura 3.3 ilustra a fita de cobre utilizada no trabalho laboratorial.

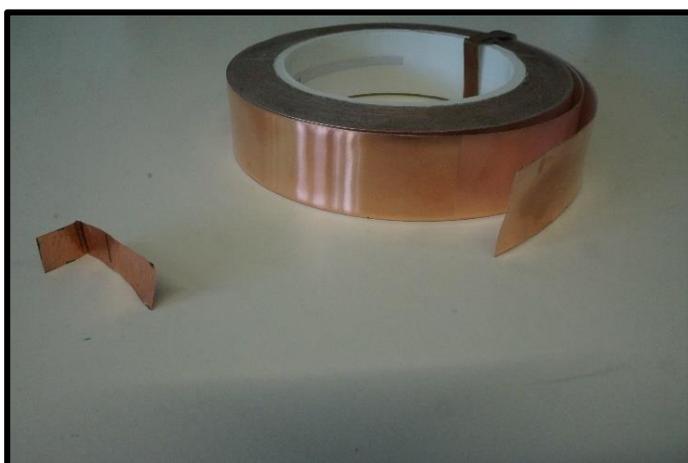


Figura 3.4 – Fita de cobre utilizada no trabalho laboratorial

3.3. Métodos

Para avaliar o comportamento da resistência elétrica do compósito de cimento com nanotubos e fibras curtas de carbono, foram realizados os ensaios de medição da resistência elétrica original (R_0), ensaios de tração cíclicos e ensaios de tração monotônicos. Assim, as componentes observadas foram a resistência elétrica e a tração uniaxial.

3.3.1. Resistência elétrica

A resistência elétrica representa a oposição de um material à passagem de corrente elétrica. A componente da resistência elétrica foi calculada utilizando um multímetro digital Agilent 34460a, tendo sido fornecido pelo grupo Fibrenamics. A Figura 3.5 ilustra o Multímetro digital.



Figura 3.5 – Multímetro digital Agilent 34460a [43]

Uma vez que a medição de corrente contínua de resistência elétrica é tecnicamente difícil devido aos efeitos de polarização, as medições da resistência elétrica foram realizadas utilizando corrente alternada. A técnica utilizada foi a quatro-sondas, conhecida como “*four-probe*”, em que a corrente flui através de dois eletrodos exteriores enquanto que os dois eletrodos interiores medem a tensão [24]. A Figura 3.6 ilustra a posição dos eletrodos no provete.

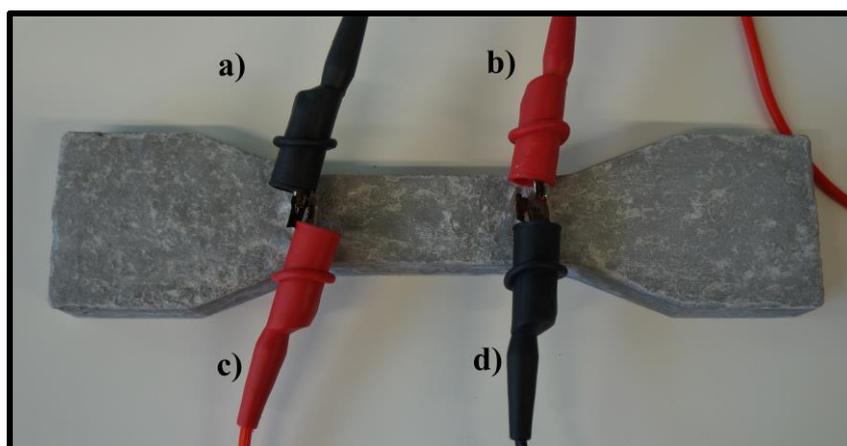


Figura 3.6 – Posição de elétrodos no provete; a) Eléctrodo exterior esquerdo de corrente, b) Eléctrodo exterior direito de corrente; c) Eléctrodo interior esquerdo de tensão; d) Eléctrodo exterior esquerdo de tensão

Os valores da resistência eléctrica que resultam da medição pelo multímetro digital Agilent 34460a, foram tratados pelo software de análise MATLAB, sendo os resultados obtidos sob a forma de gráfico, e posteriormente convertidos em ficheiros de cálculo *Excel*.

3.3.2. Tração uniaxial

O ensaio de tração uniaxial é aquele que melhor permite caracterizar os benefícios proporcionados pelo reforço das fibras e nanotubos na matriz cimentícia. O ensaio de tração consiste em aplicar ao material uma carga de tração uniaxial, obrigando-o a alongar ciclicamente ou até à rutura. A Figura 3.7 ilustra a aplicação da carga de tração uniaxial no provete utilizado.

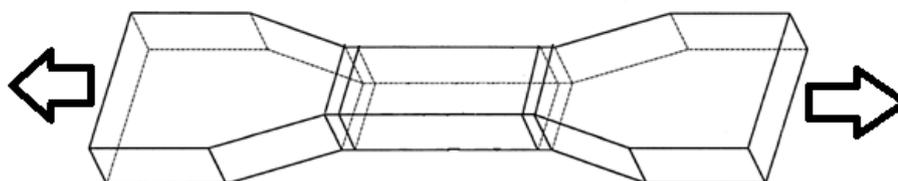


Figura 3.7 – Carga uniaxial aplicada no provete

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. A tração uniaxial foi realizada sob a forma de carga de carga de tração cíclica e até a rutura do provete. Os ensaios foram realizados numa

prensa constituída por um atuador de carga de capacidade máxima 25 kN, e um transdutor interno de controlo de ensaio, com possibilidade de controlo em força e deslocamento A Figura 3.8 ilustra o atuador de carga utilizado para atuação da carga de tração uniaxial.



Figura 3.8 – Atuador de carga de 25 kN

O ensaio realizou-se com uma velocidade de carregamento de 0.5 mm/min. Os provetes foram fixados pelas extremidades nas amarras da máquina, uma conectada no atuador e outro fixado na estrutura de reação, distanciadas em 160 mm. O *set-up* utilizado foi o software *Dynatest*, em que através do software os valores da carga aplicada e deslocamento são automaticamente convertidos em ficheiros de cálculo *Excel*.

CAPÍTULO IV

PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM NANOTUBOS E FIBRAS CURTAS DE CARBONO

4.1. Introdução

No Capítulo IV irá descreve-se a preparação do compósito de matriz cimentícia com nanotubos e fibras curtas de carbono. Como já foi referido anteriormente, a correta dispersão dos nanotubos e das fibras é um fator chave para as propriedades mecânicas e elétricas do compósito cimentício.

A dispersão foi efetuada com duas diferentes combinações, uma com matriz cimentícia e fibras curtas de carbono, e outra com matriz cimentícia, nanotubos e fibras curtas de carbono.

4.2. Combinação matriz cimentícia/SCF

Da combinação matriz cimentícia/SCF resulta o material compósito de matriz cimentícia com fibras curtas de carbono. As fibras curtas de carbono são distribuídas aleatoriamente no cimento, para facilitar a sua dispersão, foi confeccionada uma solução aquosa com adição de agentes químicos em água, através do método químico e físico, sendo esta a abordagem mais comum para a melhor combinação matriz cimentícia/SCF. Este processo foi realizado no Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics com a colaboração da Doutora Shama Parveen.

4.2.1. Dispersão de SCF

Para facilitar a dispersão das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia utilizou-se a técnica química de adição de surfactantes, que são agentes químicos que têm a capacidade de alterar propriedades superficiais e internas de um líquido. Para utilização desta técnica foi utilizado

o químico dispersante Pluronic F-127, com o objetivo de facilitar a dispersão das fibras, e o antiespumante TBP, para impedir a formação de espuma durante a dispersão. A quantidade de Pluronic F-127 (Plu) foi calculada em relação à água destilada (Ad), de acordo com a equação 4.1, enquanto que o TBP foi em relação à quantidade de Pluronic F-127, de acordo com a equação (4.2), e as suas quantidades não variam ao longo de todo o trabalho laboratorial. Na Tabela 4.1 são apresentadas as quantidades dos químicos utilizados para a solução aquosa de referência.

$$Plu (g) = \frac{Ad (ml) \times Plu(\%)}{100} \quad (4.1)$$

$$TBP (ml) = \frac{Plu (g) \times 0.97 (densidade)}{100} \quad (4.2)$$

Tabela 4.1 – Quantidades dos químicos da solução aquosa de referência

Água destilada (ml)	Pluronic F-127 (%)	Pluronic F-127 (g)	TBP (ml)
315	5	15.75	7.638

A quantidade de Pluronic F-127 foi previamente pesada, numa balança de precisão, e a água destilada e o TBP foram medidos volumetricamente. A técnica passa pela adição dos dois químicos na água destilada por agitação magnética durante cerca de 15 minutos. A Figura 4.1 ilustra a dispersão dos químicos Pluronic F-127 e do TBP em água destilada.

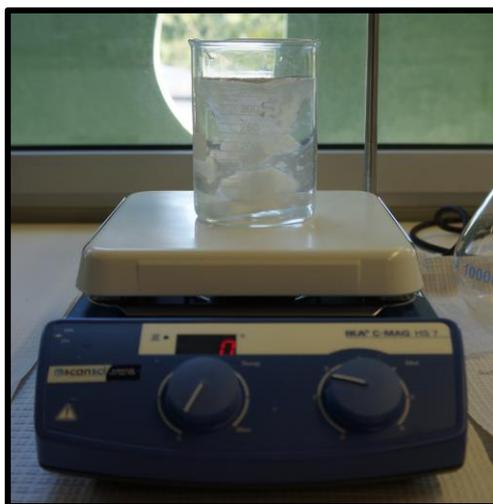


Figura 4.1 – Dispersão em agitadora magnética com Pluronic F-127 e TBP

A Figura 4.2 apresenta, de forma esquemática, o trabalho laboratorial, da solução final para uma correta combinação Matriz cimentícia/SCF.

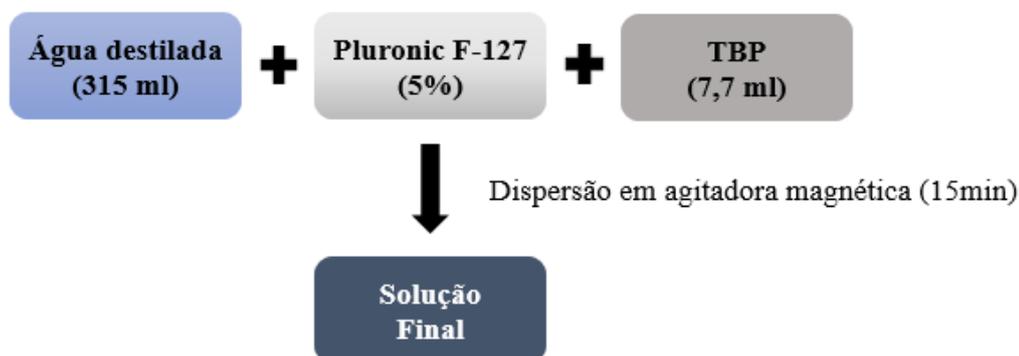


Figura 4.2 – Representação esquemática de trabalho laboratorial realizado para a solução final da combinação matriz cimentícia/SCF

As soluções aquosas realizadas permaneceram em repouso durante 24 horas e apenas depois foram utilizadas na concepção das diferentes argamassas.

Na realização dos provetes foram utilizadas as percentagens em massa de 0.25%, 0.5% e 0.75% de SCF e variaram para as diferentes composições do compósito cimentício, tendo sido calculadas em relação ao cimento utilizado, de acordo com a equação 4.3. A Tabela 4.2 apresenta as quantidades de fibras curtas de carbono utilizadas no trabalho laboratorial.

$$SCF (g) = \frac{Cimento (g) \times SCF (\%)}{100} \quad (4.3)$$

Tabela 4.2 – Quantidades SCF utilizadas no trabalho laboratorial

Cimento (g)	SCF (%)	SCF (g)
900	0.25	2.25
	0.5	4.5
	0.75	6.75

Na conceção das diferentes pastas cimentícias, para facilitar a dispersão das fibras curtas de carbono, uma grande parte das fibras foram misturadas na solução aquosa, enquanto que as restantes foram adicionadas ao cimento seco, sendo manualmente misturadas. A solução com as fibras curtas de carbono foi adicionada progressivamente no cimento, tendo a argamassa sido realizada na misturadora de argamassas de eixo vertical. A Figura 4.3 apresenta a misturadora de eixo vertical.



Figura 4.3 – Misturadora de eixo vertical, “flat beater”

4.3. Combinação matriz cimentícia/NTC/SCF

Da combinação matriz cimentícia/NTC/SCF resulta o material compósito reforçado à multiescala, uma vez que são adicionados à matriz cimentícia dois materiais com diferentes dimensões, enquanto que o fator da escala das fibras curtas de carbono é o mm, os nanotubos estão a uma nanoescala.

Para a melhor combinação matriz cimentícia/SCF utilizou-se a técnica química de adição de surfactantes, para facilitar a dispersão das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia. Para a combinação matriz cimentícia/NTC/SCF é necessário a dispersão dos nanotubos de carbono em água. Para isso, é necessário a combinação de métodos químicos e físicos, já que a combinação dos dois métodos anula as desvantagens que possam ocorrer quando é utilizado apenas um dos métodos. O processo experimental foi realizado no Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics, e contou a colaboração da Doutora Shama Parveen.

4.3.1. Dispersão de MWCNT e SCF

Para a dispersão nanotubos e das fibras curtas de carbono foi utilizada a combinação dos dois métodos, químicos e físicos. Como descrito anteriormente, a técnica química utilizada foi a adição de surfactantes, sendo combinado, de seguida com equipamento de ultrassons do método físico. Os agentes químicos foram o Pluronic F-127, para facilitar a dispersão das fibras e dos nanotubos em água, e o antiespumante TBP, para impedir a formação de espuma no processo de dispersão, sendo dispersados numa agitadora magnética durante 15 minutos. As quantidades dos químicos são exatamente as mesmas da solução de referência, que se pode observar na Tabela 4.1. Os nanotubos de carbono foram calculados em relação ao cimento utilizado, de acordo com a equação 4.4. A Tabela 4.3 apresenta as quantidades de nanotubos de carbono utilizadas no trabalho laboratorial.

$$MWCNT (g) = \frac{Cimento (g) \times MWCNT (\%)}{100} \quad (4.4)$$

Tabela 4.3 – Quantidades de MWNTC utilizados no trabalho laboratorial

Cimento (g)	MWNTC (%)	MWNTC (g)
900	0.1	0.9
	0.15	1.35

Preparação do compósito cimentício com nanotubos e fibras curtas de carbono

Seguidamente, os MWNTC, previamente pesados numa balança de precisão, foram adicionados na solução aquosa de referência, estando na agitadora magnética durante mais 5 minutos para uma total dispersão. A Figura 4.4 ilustra a dispersão dos MWCNT na solução aquosa.



Figura 4.4 – Dispersão de nanotubos de carbono na solução aquosa

Por fim, a solução foi levada ao equipamento de ultrassons com frequência de 45 kHz, durante 1 hora, de modo a completar a homogeneização. As Figura 4.5 ilustra o equipamento de ultrassons com a solução aquosa com nanotubos de carbono, enquanto a Figura 4.6 apresenta, de forma esquemática, o trabalho laboratorial na combinação matriz cimentícia, nanotubos e fibras curtas de carbono.



Figura 4.5 – Equipamento de ultrassons

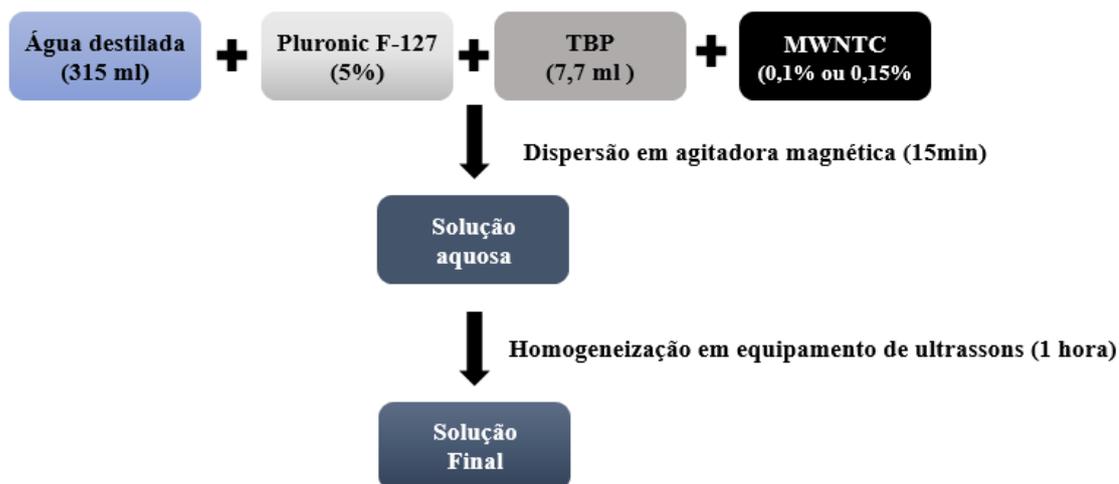


Figura 4.6 – Representação esquemática de trabalho laboratorial para a solução final da combinação matriz cimentícia/NTC/SCF

As soluções aquosas realizadas ficaram em repouso durante 24 horas e apenas depois foram utilizadas na conceção das pastas cimentícias. A dispersão das fibras curtas de carbono na pasta cimentícia, foi um processo completamente semelhante ao já abordado no ponto 4.2.1. As quantidades de fibras curtas de carbono utilizadas são exatamente as mesmas da combinação da matriz cimentícia com fibras, como se pode observar na Tabela 4.2. A Figura 4.7 ilustra a solução aquosa com nanotubos e fibras curtas de carbono.



Figura 4.7 – Solução aquosa com nanotubos e fibras curtas de carbono

4.4. Preparação da pasta cimentícia

A metodologia adotada para a preparação dos provetes segundo a norma EN 196-1:2006, tendo o processo sido realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Os provetes adotados têm a forma de “Dog-bone-shaped”, como se apresenta na Figura 4.8.

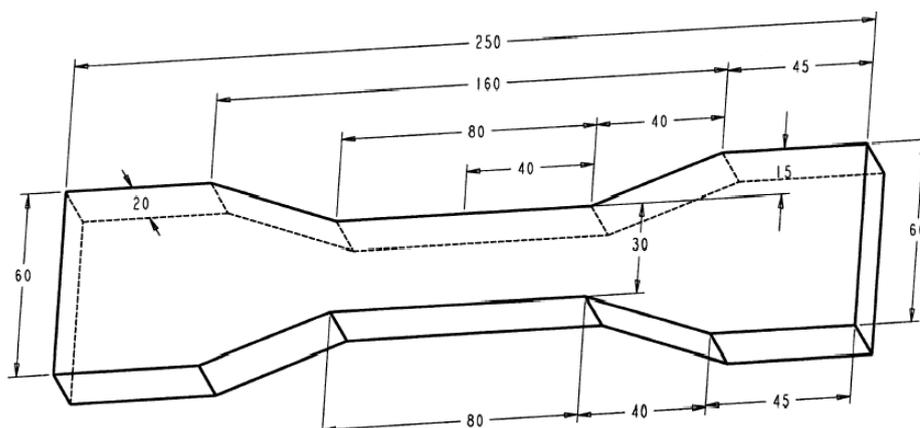


Figura 4.8 – Esquema de molde utilizado [44]

Para cada amostra foram realizados dois provetes, uma vez que a quantidade de cimento foi estipulada para utilização em dois moldes. A Tabela 4.4 apresenta as composições do compósito com fibra de carbono e do compósito híbrido com nanotubos e fibras curtas de carbono. Os cálculos das quantidades de nanotubos e fibras curtas de carbono foram efetuados de acordo com as equações 4.3 e 4.4.

Tabela 4.4 – Composição das Amostras

Amostra	Cimento (g)	SCF (%)	SCF (g)	MWCNT (%)	MWCNT (g)
A	900	-	-	-	-
B	900	0.25	2.25	-	-
C	900	0.5	4.5	-	-
D	900	0.75	6.75	-	-
E	900	0.25	2.25	0.1	0.9
F	900	0.5	4.5	0.1	0.9
G	900	0.75	6.75	0.1	0.9
H	900	0.25	2.5	0.15	1.35
I	900	0.5	4.5	0.15	1.35
J	900	0.75	6.75	0.15	1.35

4.4.1. Colocação da pasta cimentícia nos moldes

Depois de produzida a pasta cimentícia, prosseguiu-se com o enchimento dos moldes, tendo o maior cuidado para que toda a pasta cimentícia fosse usada no enchimento dos dois moldes. A Figura 4.9 ilustra um molde com a pasta cimentícia confeccionada.



Figura 4.9 – Enchimento de molde com pasta cimentícia

De seguida, foram colocadas 4 fitas de cobre por provete, tendo sido utilizadas como superfícies condutoras na avaliação do comportamento da resistência elétrica. As fitas de cobre foram colocadas a uma distância de 80 mm e os interiores a 70 mm. A Figura 4.10 ilustra a posição das fitas no provete.

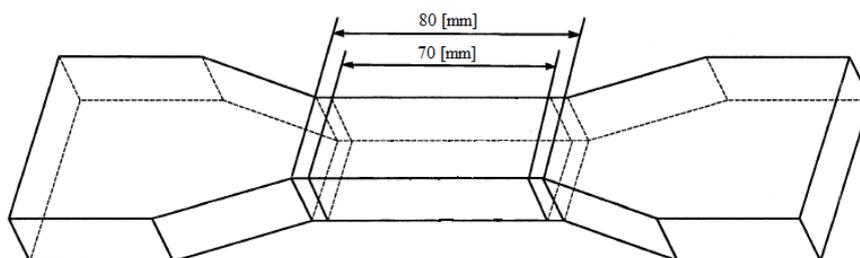


Figura 4.10 – Distâncias fitas de cobre no provete

De seguida os provetes foram colocados no equipamento de compactação durante cerca de 10 segundos para um completo espalhamento da pasta no molde, durante este processo é necessário que as fitas de cobre mantenham as posições previamente definidas. A Figura 4.11 ilustra o provete depois do processo de compactação.



Figura 4.11 – Provette depois de processo de compactação

Os moldes foram colocados na câmara de cura, durante 24 horas. Ao fim desse tempo, foi efetuada a desmoldagem dos moldes. A Figura 4.12 apresenta, de forma esquemática, o trabalho laboratorial realizado para a composição das pastas cimentícias, enquanto que a Figura 4.13 ilustra o provete desmoldado depois das 24 horas de cura.

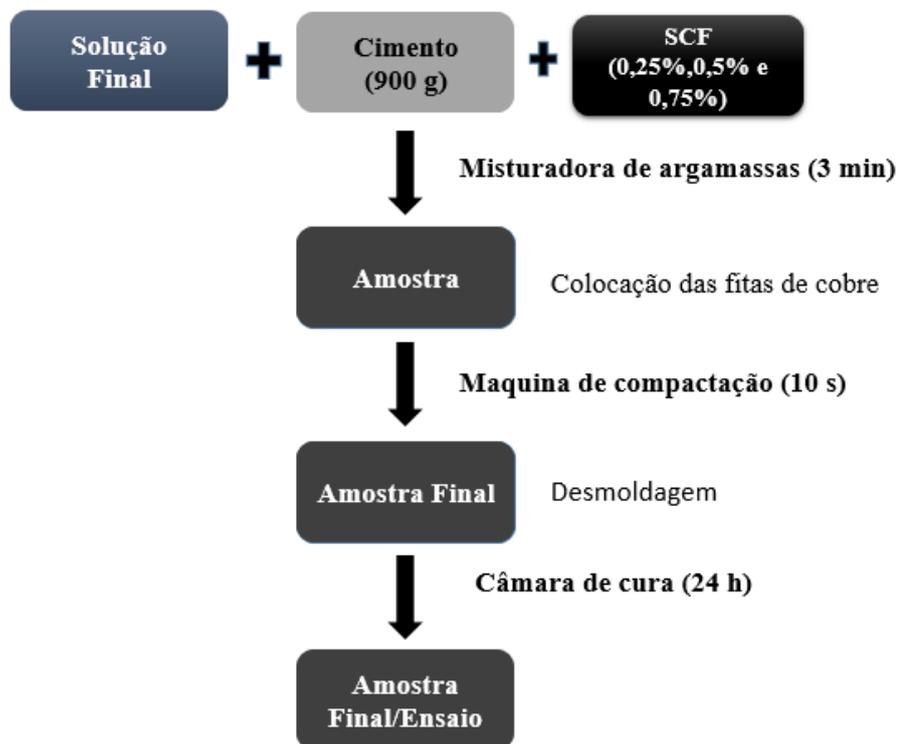


Figura 4.12 – Representação esquemática de realização de um provete



Figura 4.13 – Provete 24 horas depois de cura

Os provetes foram imediatamente catalogados e colocados num recipiente em água, durante 28 dias, no Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics. A Figura 4.14 ilustra o provete depois dos 28 dias no recipiente sob água.



Figura 4.14 – Provete 28 dias depois sob água

CAPÍTULO V

COMPORTAMENTO ELÉTRICO SOB CARGA DE TRAÇÃO UNIAXIAL

5.1. Introdução

No Capítulo V, serão observados e discutidos todos os resultados obtidos na análise do comportamento elétrico sob carga de tração uniaxial, em que foram realizados 3 diferentes ensaios.

Primeiramente, o comportamento da resistência elétrica foi analisado sem qualquer tipo de carga de tração uniaxial, pelo ensaio da resistência elétrica original (R_0). De seguida, foram realizados os ensaios de tração cíclicos e os ensaios de tração monotónicos, em que foi possível observar a variação da resistência elétrica quando sujeita a uma carga de tração uniaxial cíclica e até à rotura do compósito cimentício, respetivamente.

5.2. Resistência elétrica original (R_0)

A resistência elétrica original (R_0) foi analisada através do multímetro digital Agilent 34460a, tendo o ensaio sido realizado no Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics.

No ensaio apenas foram observados os valores da resistência elétrica durante 60 segundos. Foi o primeiro ensaio a ser realizado, uma vez que era pretendido que os provetes fossem ensaiados na sua forma original, isto é, sem ter sofrido qualquer tipo de esforço que pudesse provocar alterações na sua matriz cimentícia. A Figura 5.1 ilustra o ensaio da Resistência Elétrica Original (R_0), com os componentes utilizados.

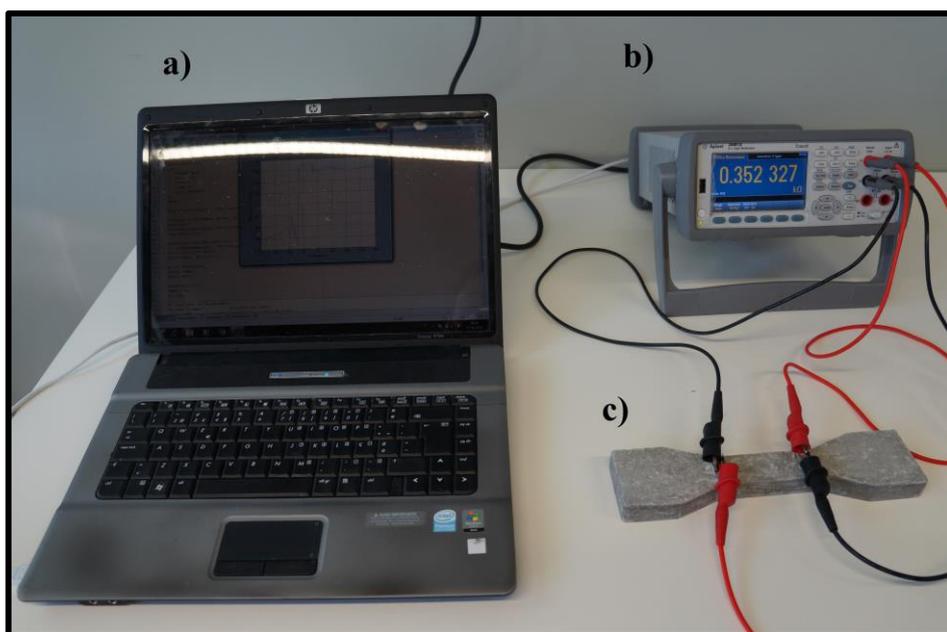


Figura 5.1 – Ensaio de resistência elétrica original (R_0); a) PC com software de análise MATLAB; b) Multímetro digital Agilent 34460a; c) Provete com eletrodos

A medição da resistência elétrica Original (R_0) foi efetuada para observar desde logo os valores iniciais de resistência elétrica dos compósitos cimentícios, e para analisar comparativamente a resistência elétrica ao longo da aplicação das cargas de tração.

5.2.1. Resultados obtidos e discussão

Uma vez que não foi aplicada qualquer carga de tração uniaxial, tal como esperado, os valores da resistência elétrica mantiveram-se relativamente constantes ao longo dos 60 segundos. Assim, os resultados apresentados para as diferentes amostras são os valores médios da resistência elétrica nesse período.

O valor da resistência elétrica para a Amostra A, apenas com cimento, foi observado um valor de 17818Ω . O provete, sem qualquer tipo de material condutor, e tal como esperado, resultou num valor bastante elevado de resistência elétrica em comparação com as outras amostras com materiais condutores elétricos.

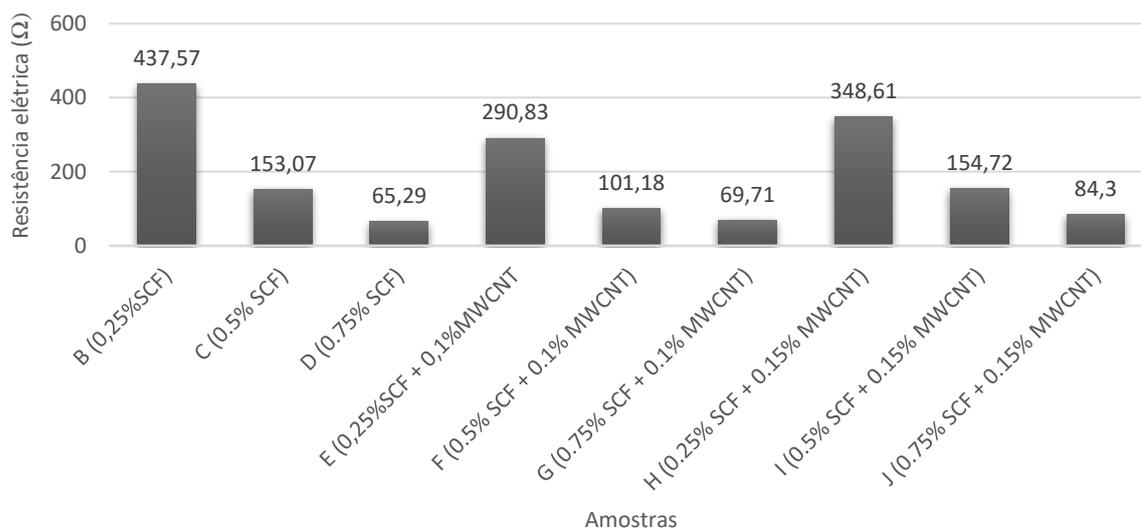


Figura 5.2 – Resultados de resistência elétrica inicial (R_0)

Desde logo, foi possível observar que os nanotubos e as fibras curtas de carbono tiveram influência nas propriedades da matriz cimentícia enquanto materiais condutores elétricos.

No compósito com fibras curtas de carbono a resistência elétrica diminui progressivamente com o aumento da percentagem das fibras, o que seria de esperar, já que o aumento do seu teor na matriz cimentícia aumenta a sua condutividade elétrica. Na amostra B (0.25% SCF), com a menor percentagem de fibras curtas de carbono no compósito cimentício, logo uma menor influência enquanto material condutor, verificou-se a mais elevada resistência elétrica de todas as amostras, com o valor de 437.57 Ω . Nas restantes composições os valores obtidos são relativamente próximos com os dos compósitos híbridos.

No compósito híbrido com SCF e 0.1% MWCNT, a resistência elétrica diminuiu em comparação com o compósito apenas com fibras. O aumento da percentagem de fibras curtas de carbono resulta numa diminuição progressiva da resistência elétrica, tal como o sucedido no compósito com fibras de carbono. A integração dos nanotubos de carbono na matriz cimentícia fez com que a resistência elétrica diminuísse, uma vez que nas Amostras E (0.25% SCF + 0.1% MWCNT) e F (0.5%SCF + 0.1% MWCNT), é visível uma clara diminuição em comparação com o compósito com fibras curtas de carbono, enquanto que na Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWCNT) é observado um valor bastante próximo.

No compósito híbrido com SCF e 0.15% MWCNT, o aumento da percentagem de fibras curtas de carbono resultou numa diminuição progressiva da resistência elétrica, mas com o aumento

da percentagem de nanotubos de carbono a resistência elétrica não diminuiu em comparação com o observado no compósito híbrido com 0.1% MWCNT. Os nanotubos de carbono têm grande tendência em se aglomerar devido à presença das forças atrativas de Van der Waals, o que com o aumento da sua percentagem na matriz cimentícia, fez com isso provavelmente acontecesse, o que resultou numa perda circunstancial das suas propriedades enquanto condutores elétricos, ao ponto de os seus valores da resistência elétrica serem comparados com compósito cimentício constituído apenas por fibras curtas de carbono. A Figura 5.3 ilustra a variação da resistência elétrica do compósito com fibras curtas de carbono, e dos compósitos híbridos com nanotubos e fibras curtas de carbono.

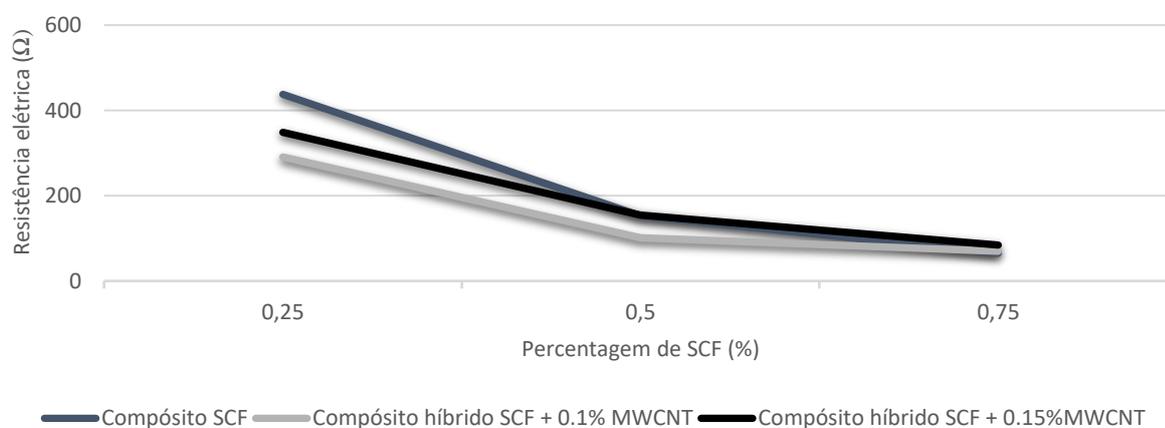


Figura 5.3 – Variação de resistência elétrica original (R0)

De uma forma geral, foi possível observar que para o compósito híbrido com SCF e 0.1% MWCNT, a resistência elétrica observada foi menor nas percentagens de 0.25% SCF e 0.5% SCF, enquanto que com 0.75% SCF foi também bastante reduzida. É possível também concluir que com o aumento de fibras curtas de carbono na matriz cimentícia dos diferentes compósitos, a diferença da resistência elétrica foi sendo progressivamente menor.

5.3. Ensaio de tração cíclico

No Ensaio de tração cíclico os provetes foram sujeitos a uma carga de tração uniaxial cíclica, pelo atuador de carga de 25 kN, tendo sido verificado simultaneamente o comportamento da resistência elétrica, pelo multímetro digital Agilent 34460a. O ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Foram efetuados 4 ciclos, com uma taxa de carregamento de 20 segundos, para cada ciclo, com uma duração total do ensaio de 80 segundos. Os ciclos de carga foram aplicados até 0.2 kN, 0.3 kN e 0.4 kN, com descarga no ciclo até valores perto dos 0.05 kN.



Figura 5.4 – Ensaio de tração cíclico; a) provete nas amarras com elétrodos; b) atuador de carga de 25 kN; c) multímetro digital Agilent 34460a; d) PC com software de análise da resistência elétrica; e) PC com software de análise da carga de Tração uniaxial

5.3.1. Resultados obtidos e discussão

Para a análise do comportamento da resistência elétrica sob uma carga de tração uniaxial, são apresentados os valores da resistência elétrica inicial (R_i) e o pico de resistência (R_p) para cada ciclo, o que resultou no cálculo da mudança fracional da resistência (MFR), de acordo com a equação 5.1. Se a mudança fracional da resistência for superior a 1%, então considera-se uma alteração efetiva da resistência elétrica sob carga de tração uniaxial.

$$MFR (\%) = \left(\frac{R_p - R_i}{R_i} \right) \times 100 \quad (5.1)$$

De todas as amostras realizadas, não é apresentado qualquer resultado na Amostra E (0.25% SCF + 0.1% MWCNT), uma vez que os provetes quebraram durante o ensaio. A má colocação dos provetes nas extremidades das amarras é a explicação mais plausível, uma vez que a

dispersão dos nanotubos e das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia foi conseguida nas restantes composições.

Os resultados obtidos e a sua discussão são respetivos a um provete de cada amostra, e as figuras seguintes ilustram o comportamento da resistência elétrica sob uma carga de tração uniaxial.

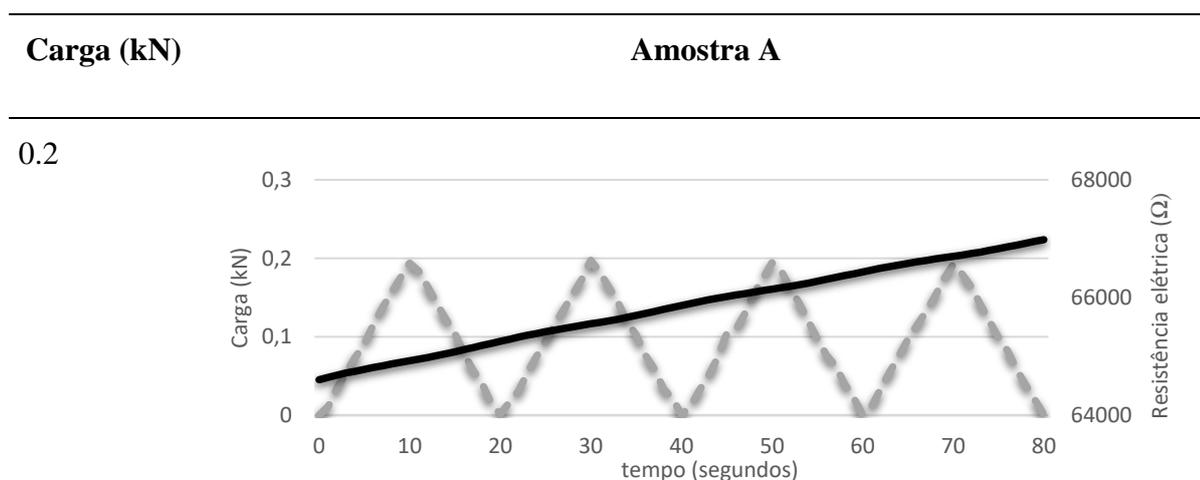


Figura 5.5 – Ensaio de tração cíclico na Amostra A (0.2kN)

Tabela 5.1 – Mudança fracional da resistência na Amostra A

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	64604	65291	65985	66467
	Pico de resistência	65255	65863	66435	66983
	Mudança fracional da resistência	1.01	0.88	0.82	0.78

A Amostra A tem uma elevada resistência elétrica, devido à fraca condutividade elétrica do cimento sem qualquer tipo de material condutor na sua matriz. Tal como se pode observar na Figura 5.5, a resistência elétrica é crescente, uma vez que a sua composição cimentícia faz com que seja consideravelmente frágil quando sujeita a uma carga de tração uniaxial. Assim com o avanço de ensaio foram provocadas microfissuras na matriz cimentícia e sem as fibras como pontes de transferência, fez com que a resistência elétrica fosse aumentando. O ensaio de tração

cíclico foi apenas realizado para a carga de 0.2 kN, uma vez que durante a execução do ensaio para 0.3 kN a amostra quebrou.

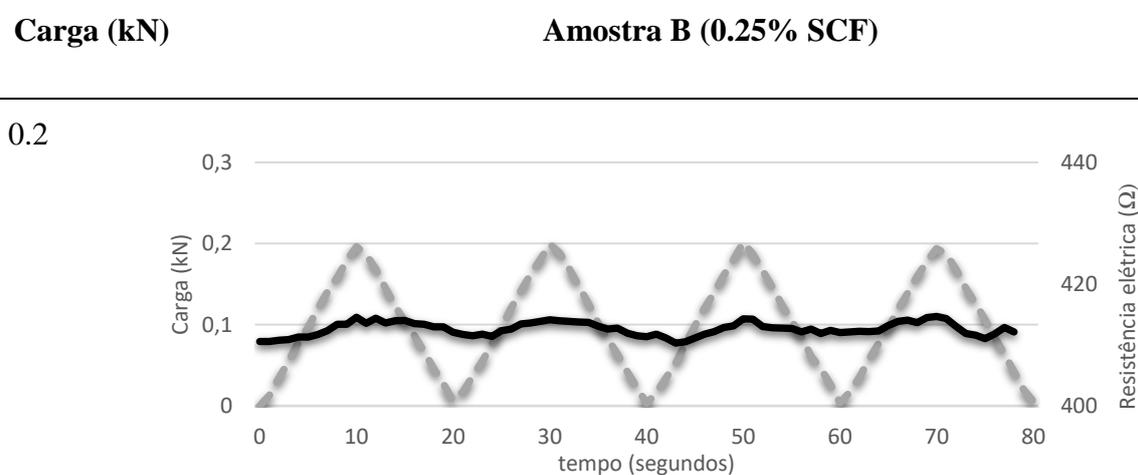


Figura 5.6 – Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0.2kN)

Tabela 5.2 – Mudança fracional da resistência na Amostra B (0.25% SCF)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de Resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	410.57	411.76	411.79	412.79
	Pico de resistência	414.56	414.6	414.29	414.69
	Mudança fracional da resistência	0.97	0.70	0.61	0.62

Na Amostra B (0.25% SCF) a variação da resistência elétrica sob carga de tração cíclica de 0.2 kN foi reduzida, embora seja possível verificar algumas variações, como se ilustra na Figura 5.6.

Embora no primeiro ciclo a mudança fracional da resistência seja bastante próxima de 1%, com o decorrer do ensaio provavelmente surgiram microfissuras que aliado ao baixo teor de fibras utilizado, não foi o suficiente registrar a variação da resistência elétrica utilizada, como se pode observar na Tabela 5.2. O ensaio cíclico de tração apenas foi realizado para a carga 0.2 kN, uma vez que durante a execução do ensaio para 0.3 kN a amostra quebrou.

Carga (kN)

Amostra C (0.5% SCF)

0.2

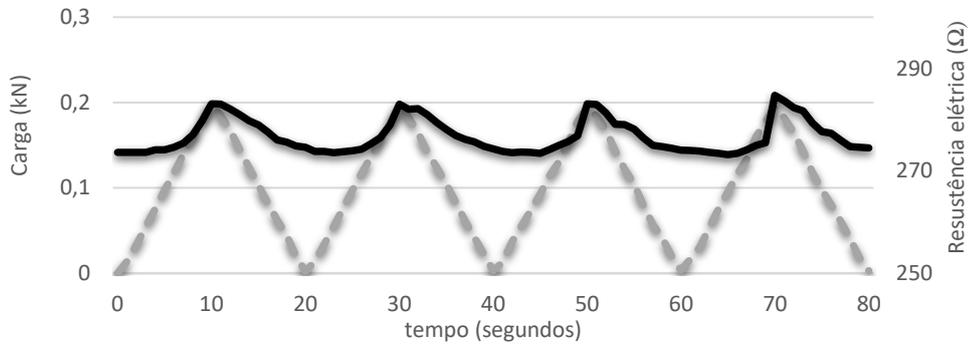


Figura 5.7 – Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.2kN)

0.3

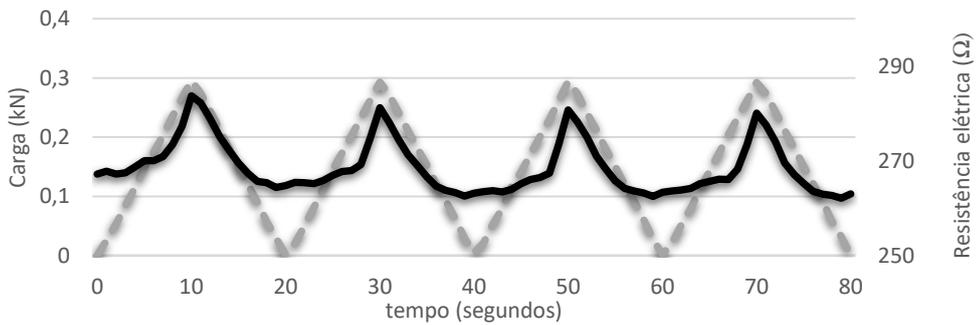


Figura 5.8 – Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.3kN)

0.4

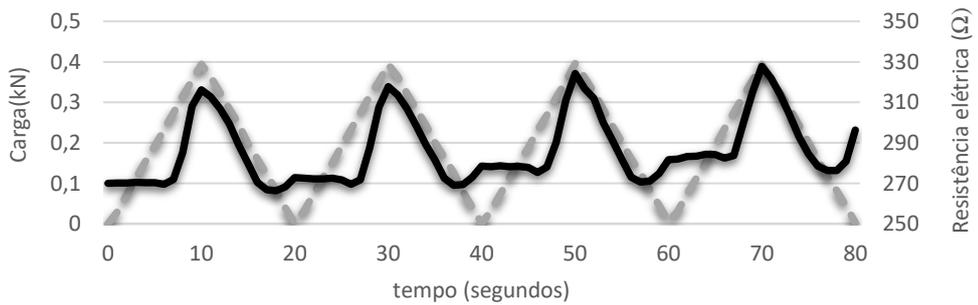


Figura 5.9 – Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.4kN)

Tabela 5.3 – Mudança fracional da resistência na Amostra C (0.5% SCF)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	273.6	273.82	273.8	273.98
	Pico de resistência	283.07	283.4	283.05	284.74
	Mudança fracional da resistência	3.46	3.50	3.38	3.93
0.3	Resistência inicial	267.22	265.43	263.49	263.65
	Pico de resistência	283.71	281.22	280.76	280.04
	Mudança fracional da resistência	6.17	5.95	6.55	6.23
0.4	Resistência inicial	270	271.51	278.21	282
	Pico de resistência	316.24	317.86	342.19	327.77
	Mudança fracional da resistência	17.13	16.64	16.53	16.23

Na Amostra C (0.5% SCF) a resistência elétrica variou consideravelmente sob cargas de tração cíclicas. Durante os diferentes ciclos de carga, a resistência elétrica aumentou consideravelmente em resposta ao aumento da carga, enquanto que diminuiu quando a carga volta aos valores iniciais, sendo que este fato se verificou para as 3 diferentes cargas cíclicas aplicadas, como se pode observar nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9.

O comportamento enquanto sensor elétrico foi evidente em todos os ciclos das diferentes cargas, resultando numa mudança fracional de resistência superior a 1 %. A mudança fracional da resistência aumenta com a carga aplicada, uma vez que com uma maior carga de tração uniaxial significa um maior alongamento das fibras, resultando numa maior variação da resistência elétrica, tal como se pode observar na Tabela 5.3.

Carga (kN) Amostra D (0.75% SCF)

0.2

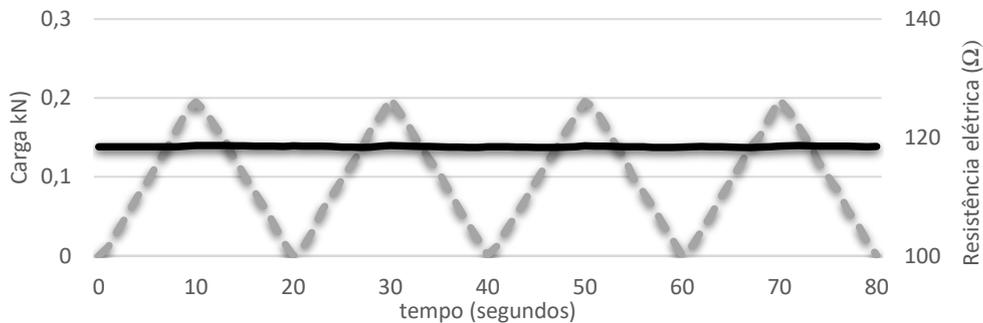


Figura 5.10 – Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.2kN)

0.3

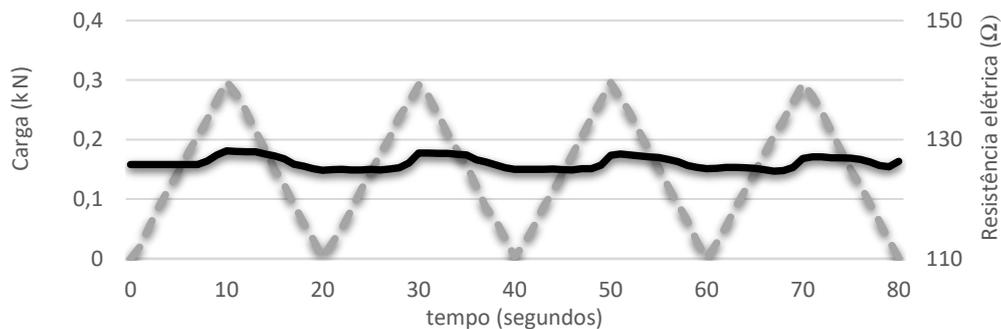


Figura 5.11 – Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.3kN)

0.4

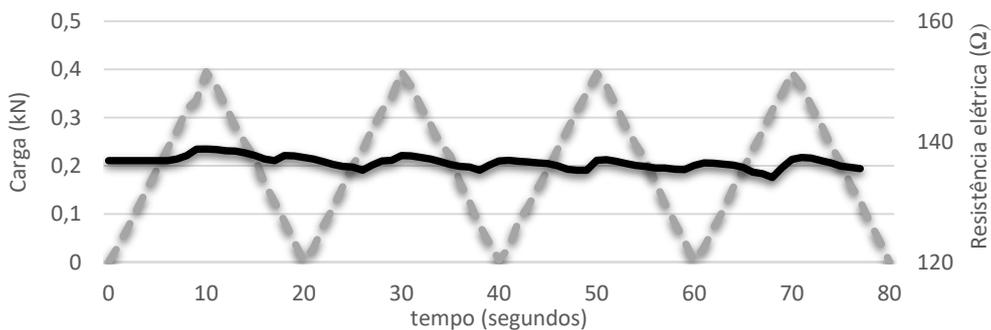


Figura 5.12 – Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.4kN)

Tabela 5.4 – Mudança fracional da resistência na Amostra D (0.75% SCF)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de Resistência (Ω) / Mudança fracional da Resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	118.42	118.56	118.41	118.45
	Pico de Resistência	118.64	118.64	118.58	118.64
	Mudança fracional da resistência	0.19	0.07	0.14	0.16
0.3	Resistência inicial	125.81	124.94	124.99	125.15
	Pico de Resistência	128.12	127.77	127.58	127.12
	Mudança fracional da resistência	1.84	2.27	2.07	1.57
0.4	Resistência inicial	136.86	137.12	136.91	136.5
	Pico de resistência	138.78	137.72	137.01	137.39
	Mudança fracional da resistência	1.40	0.44	0.07	0.65

Na Amostra D (0.75% SCF) foi visível a variação da resistência elétrica sob cargas de tração cíclicas, principalmente para a carga 0.3 kN, onde foi possível observar uma maior variação em comparação com as outras cargas aplicadas, como se ilustra nas Figura 5.10, 5.11 e 5.12.

Como se pode observar na Tabela 5.4, para a carga de tração cíclica de 0.2 kN resultou uma mudança fracional da resistência bastante reduzida, muito distante de 1%. A elevada percentagem de fibras curtas de carbono fez com que na sua disposição na matriz cimentícia ficassem demasiado próximas, ou até “juntas”, Este fato, reduziu as propriedades das fibras enquanto material condutor elétrico, o que fez com que o que quando aplicada uma carga inferior fez com que não tivesse o mesmo comportamento enquanto sensor elétrico. Tal como esperado, para a carga de 0.3 kN houve o aumento da mudança fracional da resistência com o aumento da carga de tração resultando em valores superiores a 1 %, em que foi visível a variação da resistência elétrica com o aumento da carga, bem como a sua diminuição no descarregamento da carga. Para a carga 0.4 kN, era esperado que a mudança fracional aumentasse em relação à carga anterior, o que não aconteceu. Uma vez que o provete já tinha sido sujeito às cargas anteriores, com provável existência de um maior número de microfissuras, fez com que o comportamento das fibras enquanto sensores da carga de tração uniaxial não fosse tão eficaz, resultando numa mudança fracional da resistência apenas superior a 1% no primeiro ciclo.

Carga (kN)

Amostra F (0.5% SCF + 0.1% MWNTC)

0.2

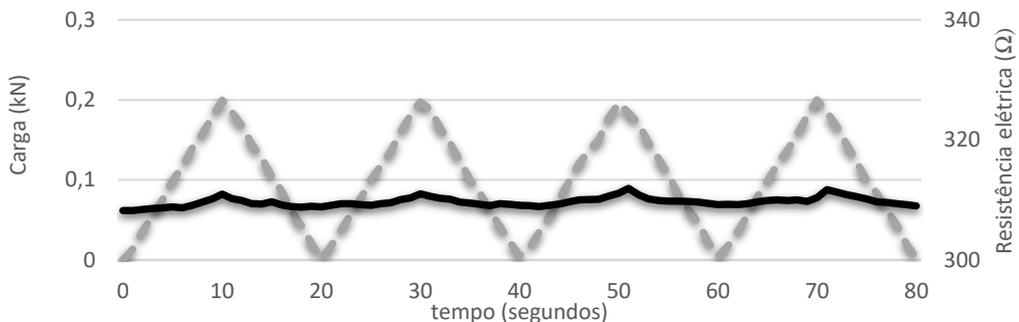


Figura 5.13 – Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.2kN)

0.3

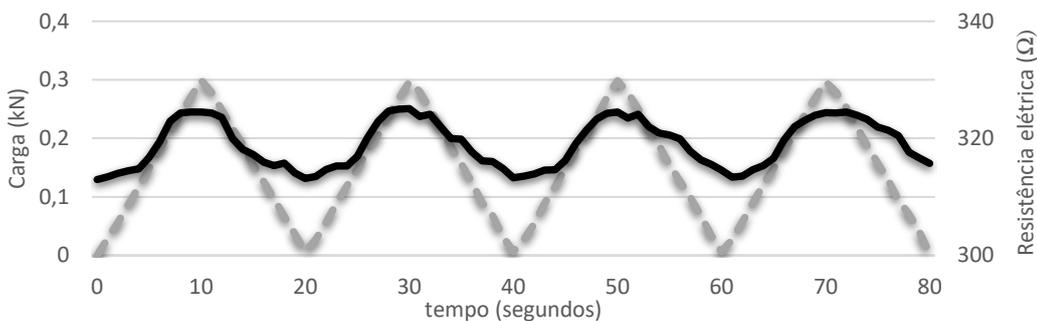


Figura 5.14 – Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.3kN)

0.4

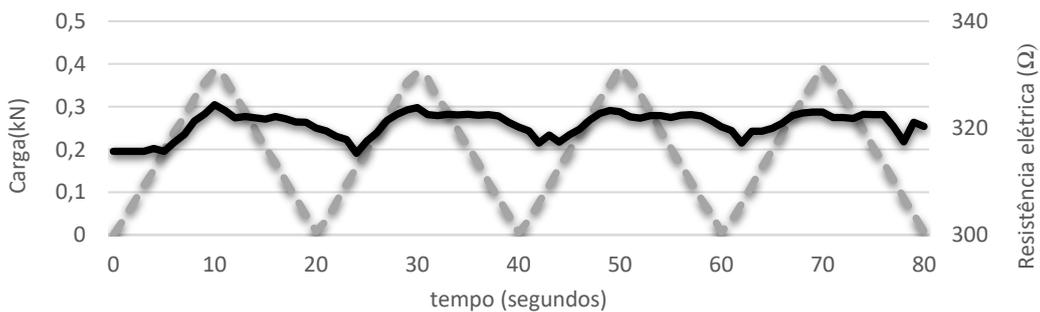


Figura 5.15 – Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.4kN)

Tabela 5.5 – Mudança fracional da resistência na Amostra F (0.5% SCF + 0.1% MWCNT)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	315.65	319.44	319.45	319.5
	Pico de resistência	324.38	323.83	323.27	323.02
	Mudança fracional da resistência	0.90	0.62	0.93	0.79
0.3	Resistência inicial	312.96	313.18	313.25	313.37
	Pico de resistência	324.51	325.08	324.48	324.5
	Mudança fracional da resistência	3.70	3.80	3.59	3.55
0.4	Resistência inicial	308.23	309.08	305.06	309.26
	Pico de resistência	310.97	311.01	311.92	311.71
	Mudança fracional da resistência	2.77	1.37	1.20	1.10

Na Amostra F (0.5% SCF + 0.1% MWCNT) a resistência elétrica variou consideravelmente sob cargas de tração cíclicas como se pode observar nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15.

Tal como se pode observar na Tabela 5.5, na carga de tração uniaxial 0.2 kN a mudança fracional da resistência não foi superior a 1%, o que significou que com uma carga inferior o provete não teve um comportamento positivo enquanto sensor elétrico. Com o aumento de carga para 0.3 kN, já foi possível observar um aumento da variação da resistência elétrica, o que era espectável devido à maior carga provocar um maior alongamento das fibras, o que significa um maior aumento da variação da resistência elétrica. Na carga de 0.4 kN era de esperar que resultasse também o aumento da mudança fracional da resistência em relação à carga anterior, o que não se verificou, apesar de ser verificado alguma variação da resistência elétrica. O fato do provete já ter vindo a ser esforçado nas cargas anteriores, fez com o comportamento enquanto sensor elétrico não fosse tão eficaz.

Carga (kN)

Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWNTC)

0.2

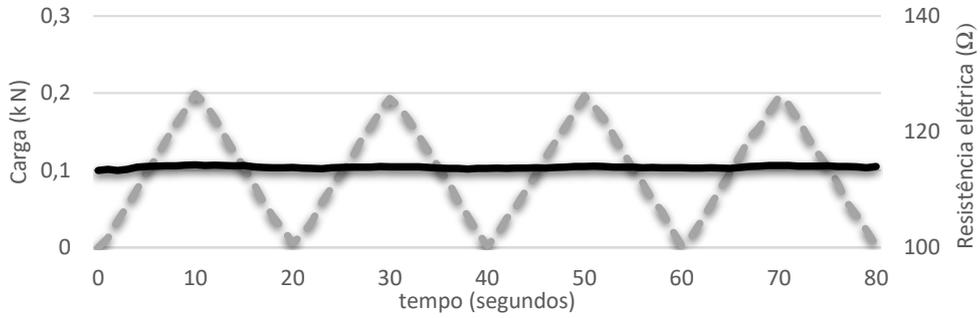


Figura 5.16 – Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.2kN)

0.3

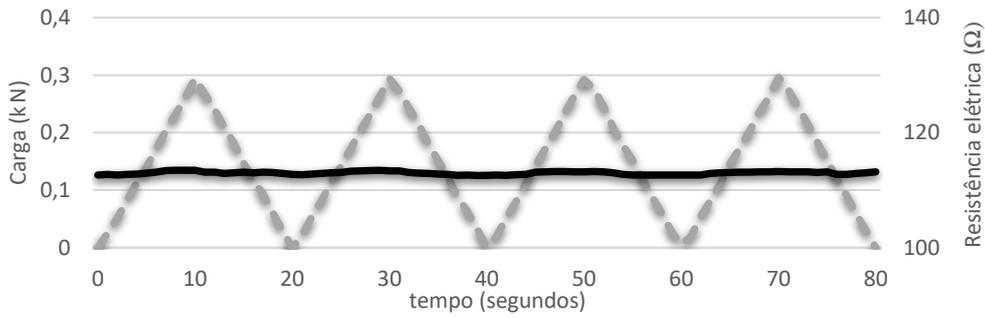


Figura 5.17 – Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.3kN)

0.4

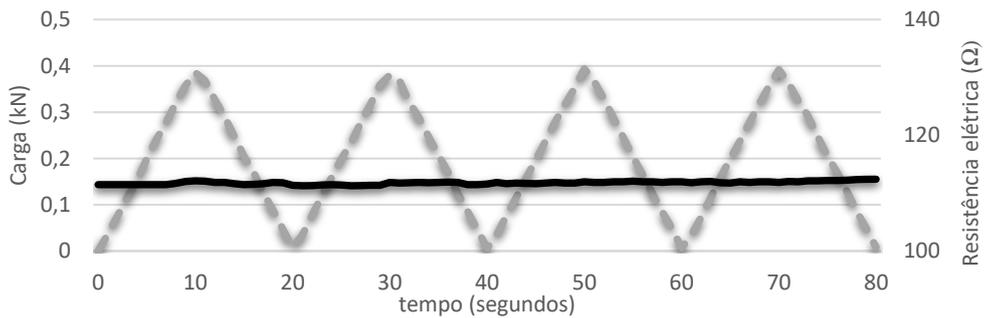


Figura 5.18 – Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.4kN)

Tabela 5.6 – Mudança fracional da resistência na Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWCNT)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	113.32	113.75	113.72	113.71
	Pico de resistência	114.03	114.04	114.04	114.19
	Mudança fracional da resistência	0.85	0.25	0.28	0.42
0.3	Resistência inicial	112.65	112.69	112.61	112.64
	Pico de resistência	113.45	113.45	113.24	113.22
	Mudança fracional da resistência	0.70	0.67	0.56	0.51
0.4	Resistência inicial	111.45	111.28	111.87	111.82
	Pico de resistência	112.12	111.91	112.05	112.4
	Mudança fracional da resistência	0.60	0.57	0.16	0.52

Na Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWCNT) a resposta da resistência elétrica sob uma carga de tração uniaxial foi praticamente nula, como se pode observar nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18.

Tal como já foi referido, na Amostra D (0.75% SCF), a elevada percentagem de fibras curtas de carbono fez com que na sua disposição na matriz cimentícia ficassem demasiado próximas, o que fez com que as suas propriedades elétricas enquanto material condutor no compósito cimentício fossem reduzidas. Ao contrário do que aconteceu no compósito com 0.75% SCF, em que com o aumento da carga de tração cíclica para 0.3 kN foi possível observar a variação da resistência elétrica, com a integração dos nanotubos não foi observada grande variação, resultando numa mudança fracional de resistência inferior a 1% em todos os ciclos das diferentes cargas, como se pode observar na Tabela 5.6.

Carga (kN) Amostra H (0.25% SCF + 0.15% MWNTC)

0.2

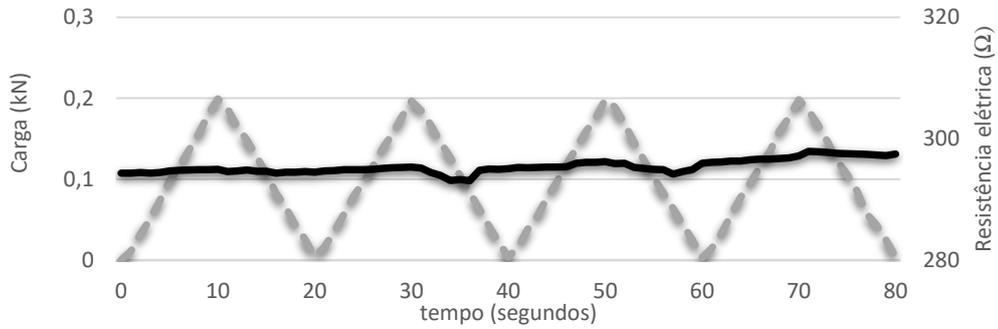


Figura 5.19 – Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.2kN)

0.3

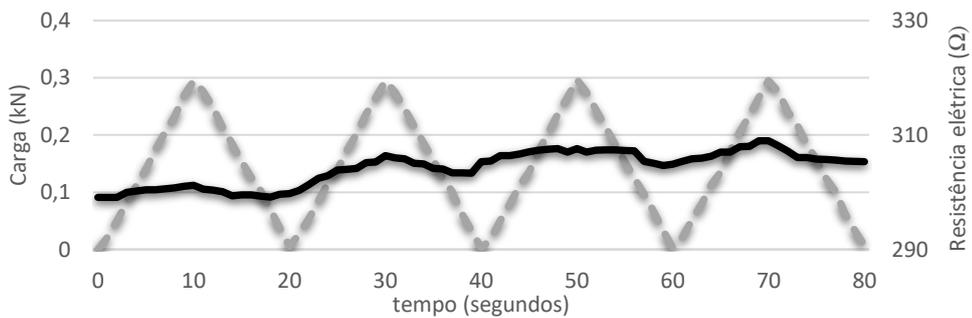


Figura 5.20 – Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.3kN)

0.4

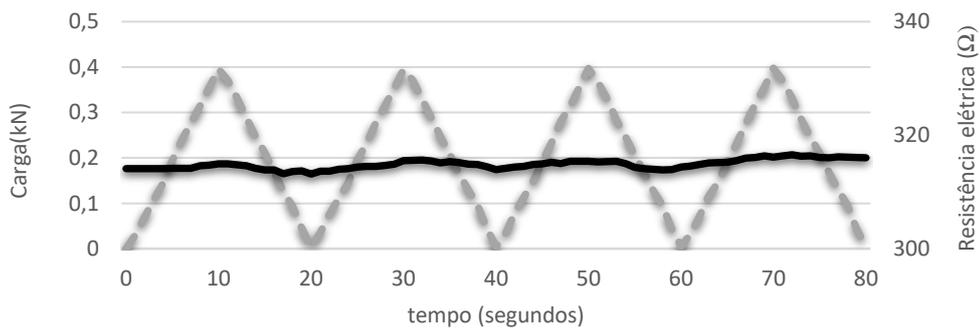


Figura 5.21 – Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.4kN)

Tabela 5.7 – Mudança fracional da resistência na Amostra H (0.25% SCF + 0.15% MWCNT)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	294.34	294.68	295.28	296.1
	Pico de resistência	294.68	294.36	296.25	297.93
	Mudança fracional da resistência	0.22	0.23	0.33	0.33
0.3	Resistência inicial	299.1	300.3	305.43	305.4
	Pico de resistência	301.23	306.39	307.63	308.99
	Mudança fracional da resistência	0.71	2.02	0.72	1.18
0.4	Resistência inicial	314.11	313.63	314.14	314.56
	Pico de resistência	314.94	315.64	315.42	316.55
	Mudança fracional da resistência	0.26	0.64	0.41	0.63

Na Amostra H (0.25% SCF + 0.15% MWCNT) a variação da resistência elétrica sob cargas de tração cíclicas foi bastante reduzida, como se ilustra nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21.

Como foi referido no ensaio da resistência elétrica original (R_0), com o aumento da percentagem de MWCNT no compósito híbrido, os nanotubos provavelmente aglomeraram-se, o que desde logo alterou as suas propriedades enquanto condutores elétricos na matriz cimentícia. Como se pode observar na Tabela 5.7, nas diferentes cargas há alguma variação da resistência elétrica, mas a mudança fracional da resistência é inferior a 1%, em todos os ciclos das cargas cíclicas 0.2 kN e 0.4 kN, enquanto que na carga 0.3 kN, é possível observar ainda em dois dos ciclos uma mudança fracional da resistência superior a 1%.

Carga (kN) Amostra I (0.5% SCF + 0.15% MWNTC)

0.2

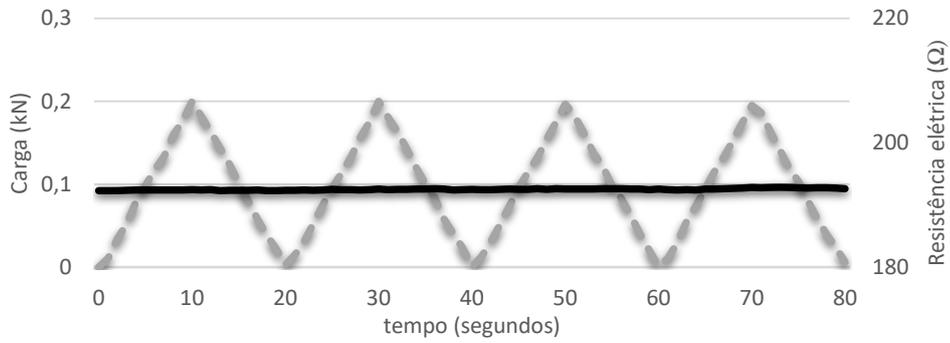


Figura 5.22 – Ensaio de tração cíclico na Amostra I (0.2 kN)

0.3

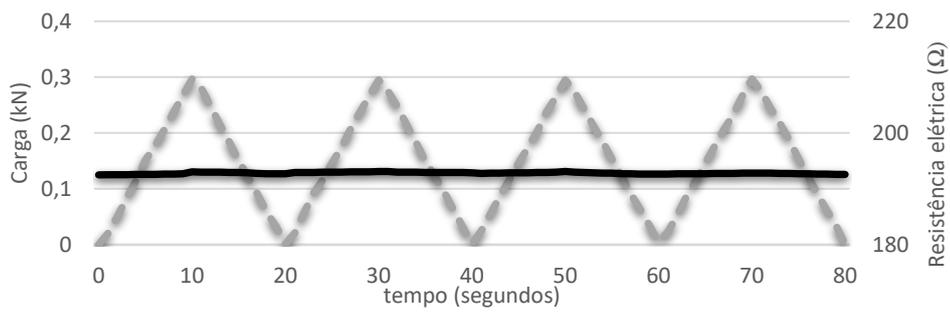


Figura 5.23 – Ensaio de tração cíclico na Amostra I (0.3 kN)

0.4

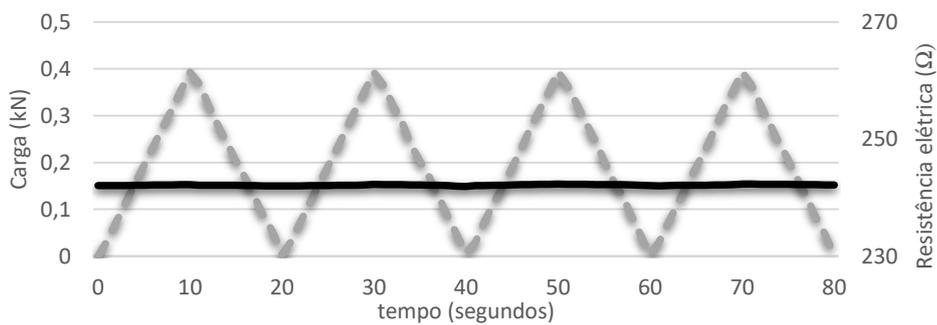


Figura 5.24 – Ensaio de tração cíclico na Amostra I (0.4 kN)

Tabela 5.8 – Mudança fracional da resistência na Amostra I (0.5% SCF + 0.15% MWCNT)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	192.3	192.38	192.44	192.45
	Pico de resistência	192.44	192.54	192.63	192.84
	Mudança fracional da resistência	0.07	0.08	0.09	0.21
0.3	Resistência inicial	192.5	192.92	192.78	192.66
	Pico de resistência	193.04	193.1	193.11	192.84
	Mudança fracional da resistência	0.28	0.09	0.17	0.09
0.4	Resistência inicial	242.06	242	242.04	242
	Pico de resistência	242.22	242.27	242.32	242.32
	Mudança fracional da resistência	0.07	0.11	0.12	0.13

Na Amostra I (0.5% SCF + 0.15% MWCNT) a variação da resistência elétrica sob uma ação de carga de tração uniaxial foi praticamente nula, como se ilustra nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24.

O comportamento da resistência elétrica sob cargas de tração cíclicas foi praticamente nulo. Como foi anteriormente referido, com a percentagem de 0.15% MWCNT poderá ter ocorrido a aglomeração dos nanotubos na matriz cimentícia, o que resultou numa redução das propriedades dos nanotubos enquanto materiais condutores na matriz cimentícia. Como se pode observar na Tabela 5.8, a mudança fracional da resistência foi praticamente nula em todos os ciclos das diferentes cargas cíclicas, não tendo se verificado em nenhum dos ciclos das diferentes cargas uma mudança fracional da resistência superior a 1%.

Carga (kN) **Amostra J (0.75% SCF + 0.15% MWNTC)**

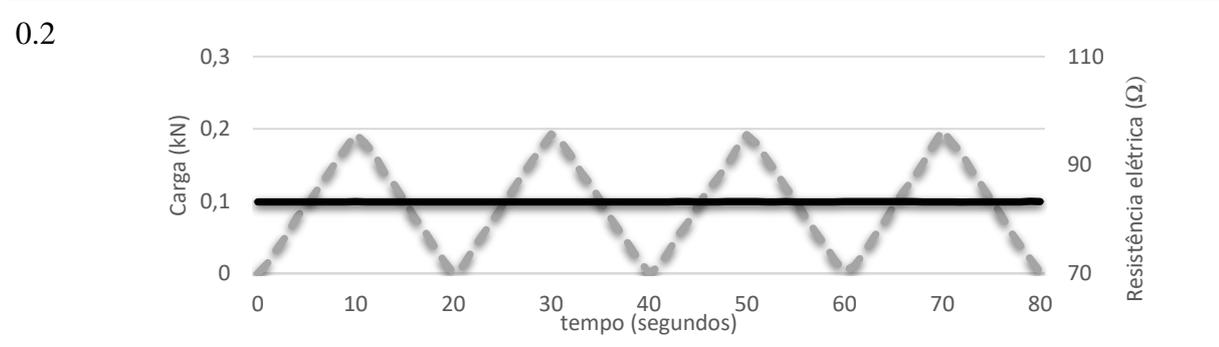


Figura 5.25 – Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.2 kN)

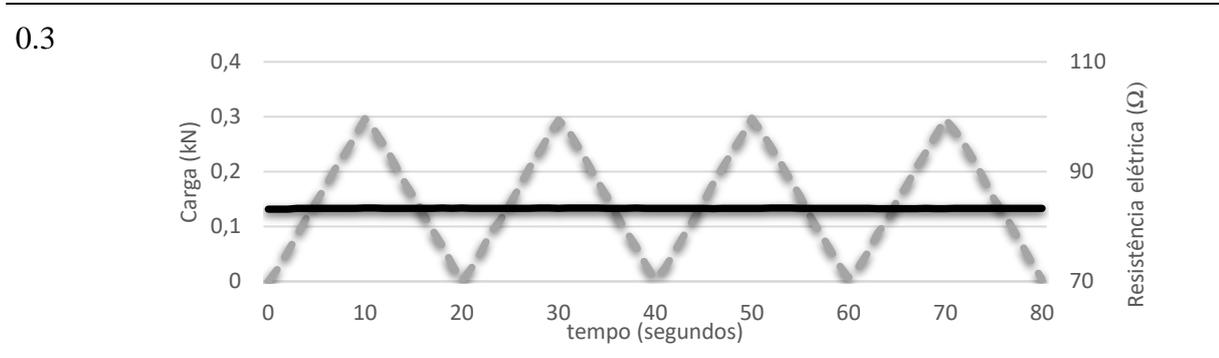


Figura 5.26 – Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.3 kN)

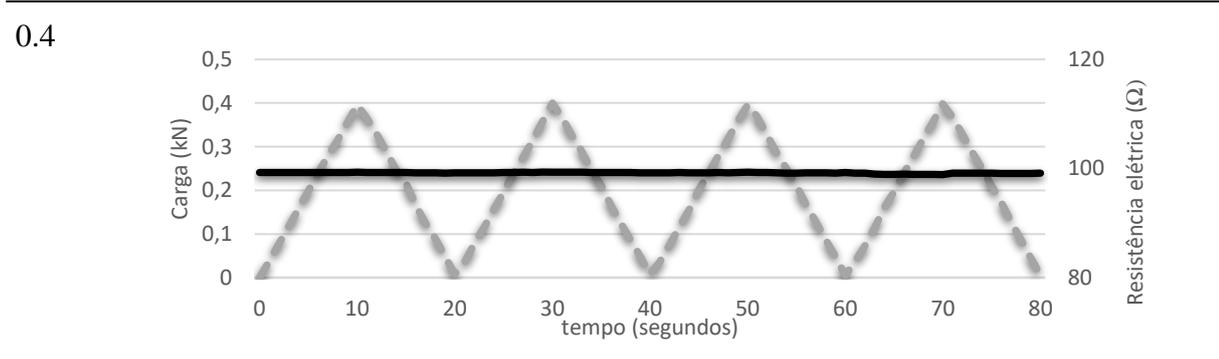


Figura 5.27 – Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.4kN)

Tabela 5.9 – Mudança fracional da resistência na Amostra J (0.75% SCF + 0.15% MWCNT)

Carga (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos			
		1	2	3	4
0.2	Resistência inicial	83.17	83.17	83.18	83.24
	Pico de resistência	83.24	83.21	83.26	83.31
	Mudança fracional da resistência	0.09	0.05	0.09	0.09
0.3	Resistência inicial	83.16	83.31	83.34	83.24
	Pico de resistência	83.37	83.37	83.37	83.34
	Mudança fracional da resistência	0.25	0.07	0.04	0.06
0.4	Resistência inicial	99.26	99.24	99.24	99.18
	Pico de resistência	99.31	99.45	99.30	99.17
	Mudança fracional da resistência	0.05	0.09	0.04	-0.08

Na Amostra J (0.75%SCF + 0.15%MWCNT), a variação da resistência elétrica sob uma ação de carga de tração uniaxial foi praticamente nula, como se ilustra nas Figuras 5.25, 5.26 e 5.27.

Para além de na composição com 0.15% MWCNT, ter provavelmente ocorrido a aglomeração dos nanotubos na matriz cimentícia, a composição de 0.75% SCF fez com as fibras estivessem demasiado próximas na matriz cimentícia, o que alterou o comportamento do compósito híbrido como sensor elétrico, resultando, resultando numa mudança fracional da resistência bastante inferior a 1%, como se pode observar na Tabela 5.9.

Na Tabela 5.10 é possível observar todos os resultados da mudança fracional de resistência durante o ensaio de tração cíclico.

Tabela 5.10 – Resultados de todos os ensaios de tração cíclicos

Amostra	Carga 0.2 kN				Carga 0.3 kN				Carga 0.4 kN			
	Ciclos / MRF (%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Referência	1.01	0.88	0.82	0.78								
B (0.25%SCF)	0.97	0.70	0.61	0.62								
C (0.5%SCF)	3.46	3.50	3.38	3.93	6.17	5.95	6.55	6.23	17.1	16.6	16.5	16.2
D (0.75%SCF)	0.19	0.07	0.14	0.16	1.84	2.27	2.07	1.57	1.40	0.44	0.07	0.65
F (0.5%SCF + 0.1%MWCNT)	2.77	1.37	1.20	1.10	3.70	3.80	3.59	3.55	0.90	0.62	0.93	0.79
G (0.75%SCF + 0.1%MWCNT)	0.85	0.25	0.28	0.42	0.70	0.67	0.56	0.51	0.60	0.57	0.16	0.52
H (0.25%SCF + 0.15%MWCNT)	0.22	0.23	0.33	0.33	0.71	2.02	0.72	1.18	0.26	0.64	0.41	0.63
I (0.5%SCF + 0.15%MWCNT)	0.07	0.08	0.09	0.21	0.28	0.09	0.17	0.09	0.07	0.11	0.11	0.13
J (0.75%SCF + 0.15%MWCNT)	0.09	0.05	0.09	0.09	0.25	0.07	0.04	0.06	0.05	0.09	0.04	-0.08

5.4. Ensaio de tração monotónico

Para observar de forma mais detalhada o comportamento da resistência elétrica quando sujeita uma carga de tração uniaxial foi realizado o ensaio de tração monotónico. O ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Foi o último ensaio realizado, e ao contrário do ensaio de tração cíclico, neste ensaio não existem ciclos nem variação de diferentes cargas aplicadas, uma vez que a carga de tração uniaxial aplicada é crescente até à rutura do provete. A única alteração efetuada foi no *set-up* do programa de tração uniaxial. Neste ensaio foi observada a resistência inicial (R_i), a resistência pico (R_p) que resultou na mudança fracional da resistência, assim como a carga de tração uniaxial máxima.

5.4.1. Resultados obtidos e discussão

É de referir que este ensaio foi o último realizado, o que fez com que a estrutura da matriz cimentícia com os diferentes materiais pudesse ter sido alterada uma vez que já tinham sido sujeitas a cargas de tração uniaxiais no ensaio anterior. Para além disso, não foi conseguido realizar o ensaio em todas as amostras já que durante o ensaio de tração cíclico algumas quebraram, não tendo sido possível verificar os resultados neste ensaio.

Os valores da resistência elétrica apresentados foram a resistência inicial (R_i) e o pico de resistência (R_p) para cada ciclo, o que resultou no cálculo da mudança fracional da resistência (MFR), de acordo com a equação 5.1.

Neste ensaio, a mudança fracional deve ter valores superiores aos dos cíclicos anteriores, uma vez que as diferenças de resistências pico e inicial devem ser maiores. As figuras seguintes ilustram os resultados obtidos para as diferentes composições das diferentes amostras.

Amostra C (0.5% SCF)

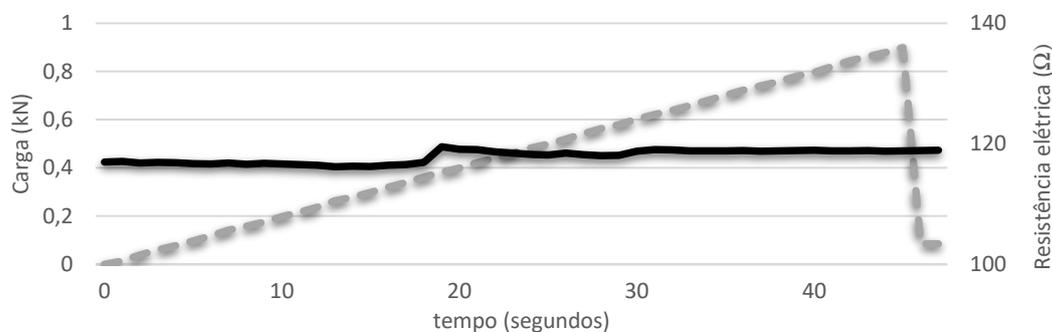


Figura 5.28 – Ensaio de tração monotônico na Amostra C

Tabela 5.11 – Mudança fracional da resistência na Amostra C (0.5% SCF)

Carga Max (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	
0.9	Resistência inicial	116.96
	Pico de resistência	119.51
	Mudança fracional da resistência	2.18

Na Amostra C (0.5% SCF), a carga máxima de tração uniaxial foi de 0.9 kN. A resistência elétrica aumenta muito pouco ao longo do aumento carga, o que resultou numa mudança fracional da resistência relativamente baixa, como se pode observar na Tabela 5.11.

Como se pode observar na Figura 5.28, a variação da resistência elétrica foi praticamente nula, tendo-se verificado um pequeno acréscimo da resistência elétrica, pelos 20 segundos na carga 0.38 kN, onde é provável a existência de uma microfissura. O fato do provete já ter sido anteriormente sujeito a cargas de tração uniaxiais pode ter implicado que fosse menos eficaz enquanto sensor elétrico na matriz cimentícia.

Amostra D (0.75% SCF)

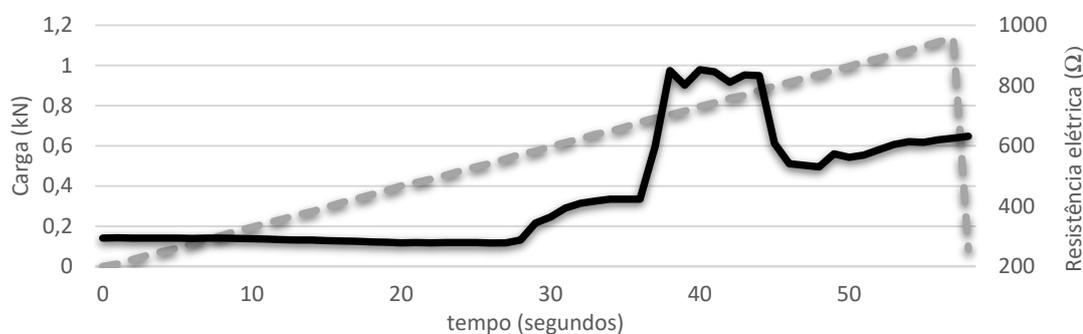


Figura 5.29 – Ensaio de tração monotônico na Amostra D

Tabela 5.12 – Mudança fracional da resistência na Amostra D (0.75% SCF)

Carga Max (kN)	Resistência inicial (Ω)/ Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	
1.13	Resistência inicial	293.80
	Pico de resistência	852.56
	Mudança fracional da resistência	190.10

Na Amostra D (0.75% SCF), a carga de tração uniaxial máxima foi de 1.13 kN. A resistência elétrica aumentou ao longo do aumento da carga, o que resultou numa elevada mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.12.

Como se pode observar na Figura 5.29, a variação da resistência elétrica é praticamente nula até aos 35 segundos, onde existe um acréscimo da resistência elétrica com a carga de 0.55 kN, o que mostra que provavelmente o provete sofreu uma fissura que alterou desde logo o comportamento da resistência elétrica. A partir desse momento com a existência de microfissuras implica que a análise da resistência elétrica não seja tão eficaz, uma vez que o compósito híbrido não tem as mesmas propriedades enquanto sensor elétrico na matriz cimentícia.

Amostra F (0.5% SCF + 0.1% MWNTC)

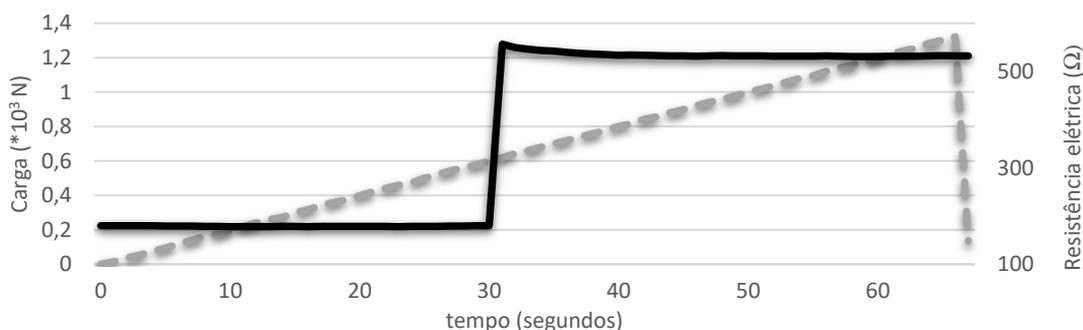


Figura 5.30 – Ensaio de tração monotônico na Amostra F

Tabela 5.13 – Mudança fracional da resistência na Amostra F (0.5% SCF + 0.1% MWCNT)

Carga Max (kN)	Resistência inicial (Ω)/ Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	
1.32	Resistência inicial	180.22
	Pico de resistência	556.64
	Mudança fracional da resistência	208.87

Na Amostra F (0.5% SCF + 0.1% MWCNT), a carga de tração uniaxial máxima foi de 1.32 kN. A resistência elétrica aumenta ao longo do aumento carga, o que resultou numa elevada mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.13.

Como se pode observar na Figura 5.30, apesar do comportamento da resistência elétrica ter sido linear até cerca dos 30 segundos quando ultrapassada a carga 0.6 kN, a resistência elétrica sofreu um acréscimo abrupto, provocada pela possível existência de uma fissura no provete. A partir desse momento com a existência de microfissuras implica que a análise da resistência elétrica não seja tão eficaz, uma vez que o compósito híbrido não tem as mesmas propriedades enquanto sensor elétrico na matriz cimentícia.

Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWNTC)

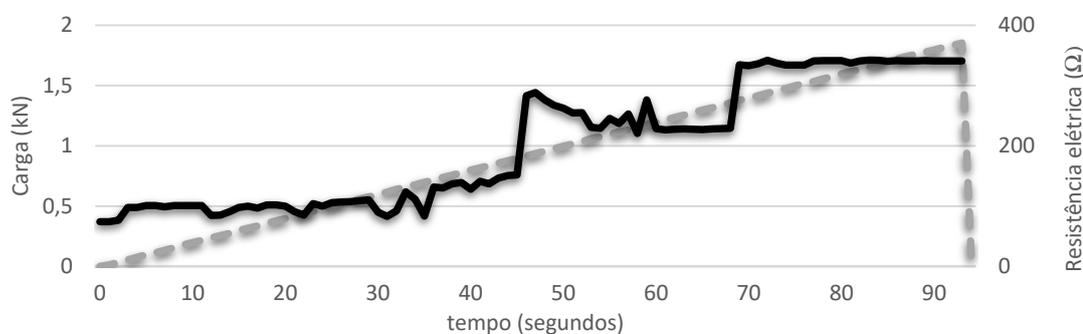


Figura 5.31 – Ensaio de tração monotônico na Amostra G

Tabela 5.14 – Mudança fracional da resistência na Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWCNT)

Carga Max (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	
1.85 kN	Resistência inicial	74.019
	Pico de resistência	342.19
	Mudança fracional da resistência	362.30

Na Amostra G (0.75% SCF e 0.1% MWCNT) a carga de tração uniaxial máxima foi de 1.85 kN. A resistência elétrica aumenta ao longo do aumento carga, o que resultou numa elevada mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.14.

É possível observar o aumento praticamente linear da resistência elétrica com o aumento da carga de tração. Os acréscimos de resistência elétrica foram observados ao longo do ensaio, mas não tendo sido tão bruscos como na Amostra F (0.5% SCF E 0.1% MWCNT) como se pode observar na Figura 5.31.

Amostra H (0.25% SCF + 0.15% MWNTC)

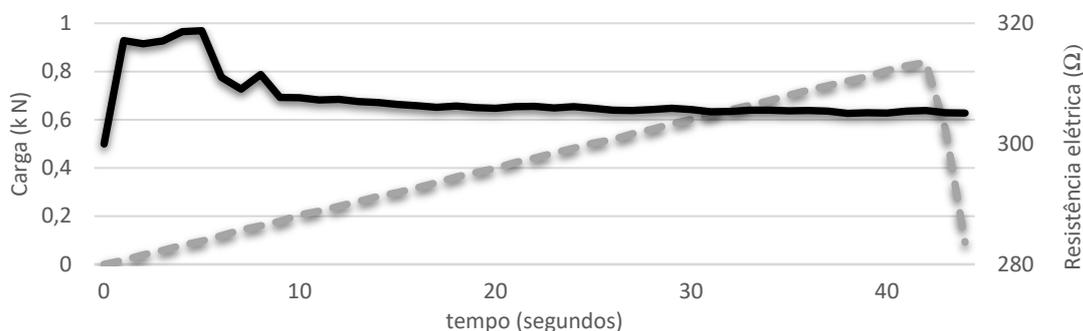


Figura 5.32 – Ensaio de tração monotônico na Amostra H

Tabela 5.15 – Mudança fracional da resistência na Amostra H (0.25%SCF + 0.15%MWCNT)

Carga Max (kN)	Resistência inicial (Ω)/ Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	
0.84	Resistência inicial	299.97
	Pico de resistência	318.77
	Mudança fracional da resistência	6.27

Na Amostra H (0.25% SCF + 0.15%MWCNT), a carga de tração uniaxial máxima foi de 0.84 kN. A resistência elétrica é praticamente linear com o aumento da carga, o que resultou numa reduzida mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.15.

Como foi anteriormente referido, com a percentagem de 0.15% MWCNT no compósito híbrido, poderá ter provocado a aglomeração dos nanotubos, que fez com que perdessem parte das propriedades enquanto condutores elétricos na matriz cimentícia. A baixa percentagem de fibras curtas de carbono, associado ao fato do provete já ter sido anteriormente sujeito a cargas de tração pode ter implicado que fosse menos eficaz como sensor elétrico na matriz cimentícia, como se ilustra na Figura 5.32.

Amostra I (0.5% SCF + 0.15% MWNTC)

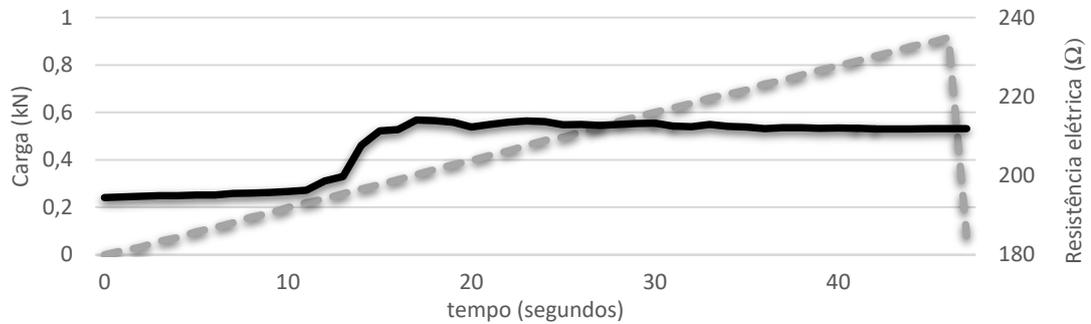


Figura 5.33 – Ensaio de tração monotônico na Amostra I

Tabela 5.16 – Mudança fracional da resistência na Amostra I (0.5%SCF + 0.15%MWCNT)

Carga Max (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	
0.92	Resistência inicial	194.46
	Pico de resistência	214.08
	Mudança fracional da resistência	10.09

Na Amostra I (0.5% SCF + 0.15% MWCNT), a carga de tração uniaxial máxima foi de 0.92 kN. A resistência elétrica aumenta ao longo do aumento carga, mas de uma forma relativamente linear, o que resultou numa reduzida mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.16.

A possível aglomeração dos nanotubos fez com as suas propriedades enquanto material condutor na matriz cimentícia não fosse ideal. Apesar de ser visível um aumento da resistência elétrica aos 13 segundos quando a carga de tração aplicada foi de 0.25 kN, com a existência de uma possível microfissura, não existiu uma grande variação da resistência elétrica com o aumento da carga, como se ilustra na Figura 5.33.

Amostra J (0.75% SCF + 0.15% MWNTC)

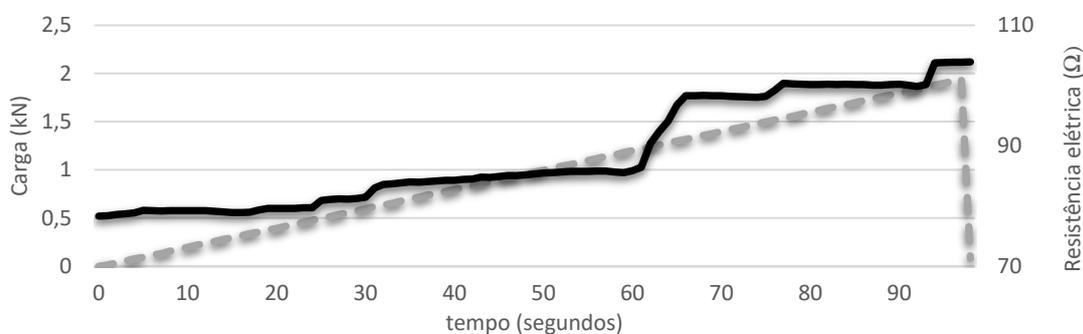


Figura 5.34 – Ensaio de tração monotônico na Amostra J

Tabela 5.17 – Mudança fracional da resistência na Amostra J (0.75% SCF + 0.15% MWCNT)

Carga Max (kN)	Resistência inicial (Ω) / Pico de resistência (Ω) / Mudança fracional da resistência (%)	
1.94	Resistência inicial	73.34
	Pico de resistência	103.78
	Mudança fracional da resistência	32.50

Na Amostra J (0.75% SCF + 0.15% MWCNT), a carga de tração uniaxial máxima foi de 1.94 kN. A resistência elétrica aumentou ao longo do aumento carga, de uma forma linear, o que resultou numa aceitável mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.17.

Como anteriormente referido, as composições com 0.75% SCF e 0.15% MWCNT poderão ter alterado o comportamento da resistência elétrica dos materiais condutores na matriz cimentícia. É possível verificar o aumento linear da resistência elétrica até aos 60 segundos, onde sofre um aumento quando sujeita a uma carga de 1.2 k. Como o acréscimo não foi muito elevado, é provável, a existência de uma microfissura, como se pode observar na Figura 5.34.

A Figura 5.35 ilustra a variação da mudança fracional da resistência e da resistência à tração no ensaio de tração monotônico, e a Tabela 5.18 apresenta os respectivos valores.

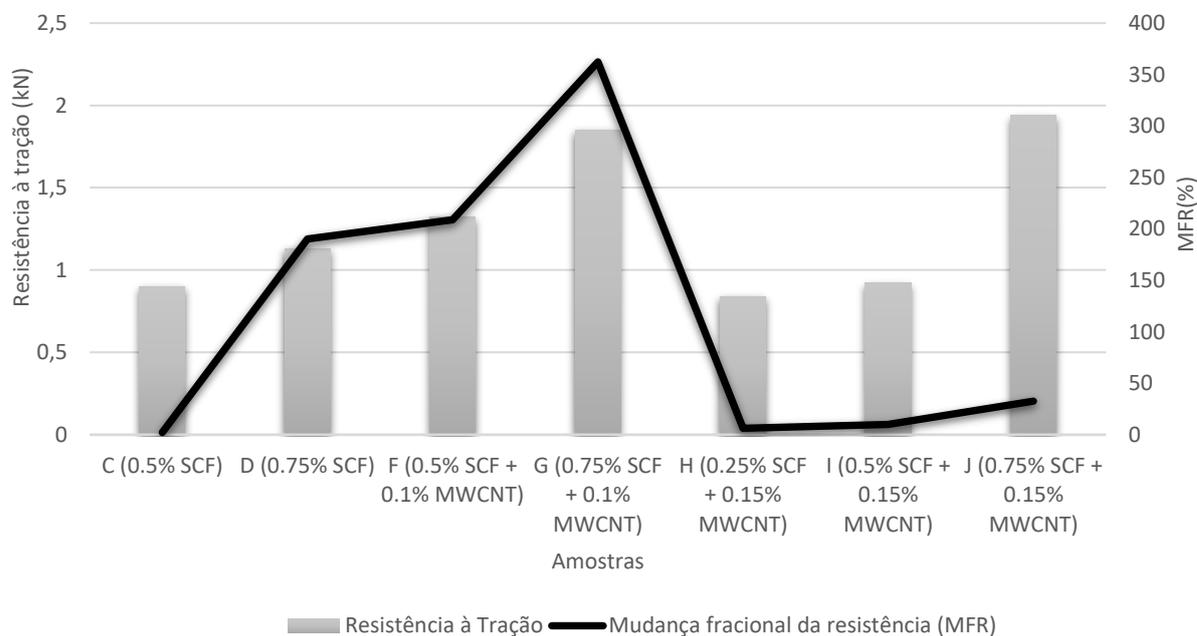


Figura 5.35 – Variação de mudança fracional da resistência e resistência à tração no ensaio de tração monotônico

Tabela 5.18 – Valores da resistência à tração e mudança fracional da resistência obtidas no ensaio de tração monotônico

Amostras	Resistência à tração (kN)	MFR (%)
C (0.5% SCF)	0,9	2,180
D (0.75% SCF)	1,13	190,10
F (0.5% SCF + 0.1% MWCNT)	1,32	208,87
G (0.75% SCF + 0.1% MWCNT)	1,85	362,30
H (0.25% SCF + 0.15% MWCNT)	0,84	6,273
I (0.5% SCF + 0.15% MWCNT)	0,92	10,09
J (0.75% SCF + 0.15% MWCNT)	1,94	32,49

Nos compósitos contendo apenas fibras curtas de carbono quer a resistência à tração, quer a mudança fracional da resistência, aumentaram com o aumento da percentagem de fibras curtas de carbono na matriz cimentícia. Na Amostra D (0.75% SCF) foi onde se observou uma maior resistência à tração e uma maior mudança fracional da resistência.

Nos compósitos híbridos com SCF e 0.1% MWCNT verificou-se novamente o aumento da resistência à tração e da mudança fracional da resistência com o aumento da percentagem das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia. Em comparação, com o compósito com fibras curtas de carbono, a variação da resistência elétrica e a resistência à tração são mais elevadas, o que se justifica pelas propriedades mecânicas e elétricas que os nanotubos de carbono oferecem na matriz cimentícia. Tendo sido na Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWCNT) onde se verificou maior resistência à tração e mudança fracional da resistência.

Nos compósitos híbridos com SCF e 0.15% MWCNT verificou-se novamente o aumento da resistência à tração e da mudança fracional da resistência com o aumento da percentagem das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia. Tal como foi anteriormente referido, o fato da possível aglomeração dos nanotubos na matriz cimentícia, fez com não fosse possível observar da forma mais eficaz o seu comportamento como condutor elétrico na matriz cimentícia. Em comparação com o compósito híbrido com 0.1% MWCNT registou-se uma mudança fracional da resistência relativamente baixa. Tendo sido na Amostra J (0.75% SCF + 0.15% MWCNT) onde se verificou maior mudança fracional da resistência e resistência à tração.

De uma forma geral, é possível verificar que o aumento da percentagem de fibras curtas de carbono, tem uma elevada influência na resistência à tração e no comportamento elétrico. As matrizes cimentícias reforçadas com nanotubos e fibras curtas de carbono revelaram um aumento da resistência à tração, principalmente nos compósito híbridos com 0.75% de SCF onde se verificaram os maiores valores de resistência à tração. Foi também possível observar que a aglomeração dos nanotubos no compósito híbrido com 0.15% MWCNT, apesar de uma visível alteração das suas propriedades enquanto condutores elétricos, resultou na maior resistência à tração de todo o ensaio.

No ensaio de tração monotónico os provetes fissuraram na secção onde foi colocada a fita de cobre. Uma vez que a fita de cobre foi inserida juntamente com a argamassa, provocou uma perda de secção no provete, o que desde logo fez com que quando sujeito às cargas de tração

uniaxiais essa secção do provete fosse menos resistente. As Figuras 5.36 e 5.37 ilustram o provete fissurado e o interior do provete depois de fissurado no ensaio de tração monotónico.



Figura 5.36 – Provete depois do ensaio de tração monotónico



Figura 5.37 – Interior do provete depois do ensaio de tração monotónico

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusão

A combinação de materiais de reforço em matrizes cimentícias à multiescala é uma abordagem inovadora, que procura sistemas de reforço com configurações e dimensões diferenciadas, pelo que é importante que sejam mais desenvolvidos. Neste sentido, a combinação de nanotubos e de fibras curtas de carbono, para além do reforço mecânico, confere condutividade elétrica a matrizes cimentícias. A realização da dissertação permitiu obter um conjunto de conclusões, que são apresentados resumidamente de seguida.

- Na resistência elétrica original (R_0) foi possível observar a diminuição da resistência elétrica com a maior percentagem de fibras curtas de carbono, no compósito com fibras de carbono e no compósito híbrido. No compósito híbrido com 0.15 % MWCNT foi observado aglomeração dos nanotubos que fez com que alterasse as suas propriedades enquanto condutores elétricos na matriz cimentícia.
- A variação da resistência elétrica quando sujeita a uma carga de tração cíclicas foi visível na maioria das amostras. No compósito com fibra curtas de carbono, os melhores resultados foram na Amostra C (0.5 % de SCF), onde a mudança fracional da resistência foi de 17.13% na carga de 0.4 kN, com a percentagem de 0.75% SCF, os resultados não foram tão positivos, uma vez que a elevada percentagem de fibras curtas de carbono ficaram demasiado próximas o que provocou uma menor resposta das fibras enquanto sensores elétricos na matriz cimentícia. No compósito híbrido, os melhores resultados foram na Amostra F (0.5% SCF + 0.1% MWCNT) onde a mudança fracional da resistência foi de 3.69 % na carga de 0.3 kN. Nas composições de 0.15% MWCNT, ocorreu uma aglomeração dos nanotubos de

carbono o que alterou as suas propriedades elétricas, não variando de uma forma efetiva a resistência elétrica quando aplicada uma carga de tração uniaxial.

- No ensaio à tração monotônico a resistência elétrica aumentou com a carga de tração uniaxial. Em algumas das amostras, foi possível analisar alguns aumentos bruscos na resistência elétrica que demonstrou a existência de fissuras na matriz cimentícia. No compósito com fibras curtas de carbono o melhor resultado foi observado na Amostra D (0.75 % SCF), onde a mudança fracional da resistência foi de 190.10%. No compósito híbrido, o melhor resultado foi na Amostra G (0.75% SCF + 0.1% MWCNT) onde a mudança fracional da resistência foi de 362.30%. A carga de tração máxima foi obtida na Amostra J (0.75% SCF + 0.15% MWCNT), o que demonstrou as propriedades mecânicas dos nanotubos e das fibras curtas de carbono.
- O único artigo que utilizou os mesmos materiais foi realizado por Faezeh Azhari e Nemkumar Banthia em 2012, com o título “Cement Based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistivo sensors”. Os compósitos foram testados com uma força à compressão o que faz com que seja impossível comparar os resultados da mudança fracional da resistência obtida da presente dissertação.
- A adição de nanotubos de carbono e fibra de carbono fizeram aumentar consideravelmente a condutividade elétrica de compósitos cimentícios. Estes materiais são também condutores piezoresistive e podem, assim, produzir sensores excelentes. O fator chave passa por uma correta dispersão dos materiais na matriz cimentícia, uma vez que, e como foi observado, uma ineficaz dispersão, resulta num compósito que não responde da mesma forma enquanto sensor elétrico. O compósito cimentício com nanotubos e fibras de carbono respondeu de uma forma positiva a uma carga de tração uniaxial aplicado levando à variação na resistência elétrica, de modo ciclicamente e até á sua rutura.

6.2. Trabalhos futuros

O desenvolvimento de materiais de reforço em matrizes cimentícias à multiescala é prometedor, e adivinha-se que cada vez ganhe mais destaque em engenharia civil. A presente dissertação

poderá levar a outros trabalhos de investigação, tendo em vista o uso de nanotubos e fibras curtas de carbono como material de reforço e como condutores elétricos. Os trabalhos a ser desenvolvidos são apresentados de seguida.

- Desenvolvimento do material à multiescala com outras percentagens de nanotubos e fibras curtas de carbono para encontrar a quantidade ótima para reforço mecânico e para avaliação do comportamento elétrico.
- Desenvolvimento do material à multiescala com nanotubos e fibras curtas de carbono, mas para avaliação do comportamento elétrico em compressão.
- Desenvolvimento de sensores cimentícios de escala múltipla com outro tipo de materiais condutores para avaliação do comportamento elétrico sob carga de tração uniaxial, e em modo compressivo.
- Desenvolvimento de sensores de cimento multiescala para monitoramento em tempo real de pavimentos.

BIBLIOGRAFIA

1. Sousa, G., *Estruturas Entrançadas para Reforço do Betão*. Tese de Mestrado, 2004, Universidade do Minho: Guimarães.
2. Morais, A., A. Magalhães, and M. Moura, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2009: Publindustria.
3. William, D. and J. Callister, *Materials Science and Engineering*. 2007: John Wiley & Sons, Inc.
4. Gonzalez, J., *Betões Reforçados com Fibra de Carbono Estudo de propriedades Mecânicas e Físicas*. Tese de Doutoramento, 2007, Universidade do Minho.
5. Bentur, A. and S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2007.
6. Rosado, K., et al., *Fibrous based materials in sustainable civil and architectural applications - a review*, in *International Conference on Engineering UBI2011*. 2011.
7. Oliveira, F., *Varões Compósitos Híbridos Fibra/Aço*. Tese de Mestrado, 2013, Universidade do Minho.
8. Silva, B., *Estruturas Inteligentes utilizando Betão e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono*. Tese de Mestrado, 2005, Universidade do Minho: Guimarães.
9. Mateus, P., *Betão Reforçado por Nanotubos de Carbono*. Tese de Mestrado, 2013, Universidade do Minho: Guimarães.
10. Barros, J., *Betão Reforçado com Fibras de Aço - Conceitos Fundamentais*. ISISE - Artigos em Revistas Nacionais, 2000.
11. Fibernamics. www.web.fibernamics.com/pt. 2016.
12. Carvalho, R., R. Figueiro, and J. Neves, *Durabilidade de Fibras Naturais para Geotecnia*, in *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*. 2014.

13. Magalhães, R., *Desenvolvimento de Materiais Compósitos Auxéticos para Aplicações Estruturais*. Tese de Mestrado, 2015, Universidade do Minho: Guimarães.
14. Marques, P., *Design of Fibrous Structures for Civil Engineering Applications*. Tese de Mestrado, 2009, Universidade do Minho: Guimarães.
15. Figueiro, R., *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications, 1st Edition*. 2011: Woodhead Publishing limited.
16. Hull, C. and T. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*. 1996: Cambridge University Press.
17. Pu Woei, C., *Carbon Fiber-Reinforced Concrete as a Strain/Stress Sensor Structure Material*. 1994, University of New York at Buffalo.
18. Savage, G., *Carbon-Carbon Composites*. 2012: Springer.
19. Buckley, D. and E. D., *Carbon-Carbon and Composites*. 1993: New Jersey: Noyes Publications.
20. Gearheadbanger. www.gearheadbanger.com. 2016.
21. Arkin, H. and M. Paciuk, *Evaluating intelligent buildings according to level of service systems integration*. *Automation in Construction*, 1997. **6**(5-6): p. 471-479.
22. Parveen, S.R., Sohel. Figueiro, Raul., *Micro-Structure and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes/Cement Nanocomposites*, in *4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure*. 2013: Funchal.
23. Barros, J., *Caracterização do comportamento do betão reforçado com fibras de aço*. ISISE - Artigos em Livros Nacionais, 1996.
24. Azhari Faezeh , B.N., *Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing*. 2012. **34**(7): p. 866–873.
25. Pereira, C., *Compósitos: Desde o espaço ao planeta Terra*. Universidade do Porto: Institute of Mechanical Engineering and Industrial Management.
26. Chand, S., *A Review Carbon fibers for composites*. *Journal of Materials Science*, 2000. **35**(6): p. 1303–1313.
27. Biniak, S., B. Dzielendziak, and J. Siedlewski, *Carbon*. ScienceDirect, 1995. **33**(9): p. 1193-1356.

-
28. Zeng-Qiang Shi, D.D.L.C., *Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion*. Cement and Concrete Research, 1999. **29**: p. 435–439.
 29. Parveen, S.R., Sohel. and R. Figueiro, *A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofibers, Reinforced Cementitious Composites*. Journal of Nanomaterials, 2013: p. 19.
 30. Morinobu, E., S. Lijima, and M. Dresselhaus, *Carbon Nanotubes*. 1996: Pergamon.
 31. Masenelli-Varlot, K., et al., *The relationship between the electrical and mechanical properties of polymer-nanotube nanocomposites and their microstructure*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(10): p. 1533-1539.
 32. Ferreira, O., *Nanotubos de Carbono: Preparação e Caracterização*. Tese de Mestrado, 2003, Instituto de Química da UNICAMP, Brasil.
 33. Hollertz, R., T. Geiger, and B. Tsu-Te Chu, *Improvement of toughness and electrical properties of epoxy composites with carbon nanotubes prepared by industrially relevant processes*. Nanotechnology, 2011. **22**: p. 9.
 34. Mateus, P. and R. Figueiro, *Argamassas Reforçadas por nanotubos de carbono*, in *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*. 2014.
 35. Sze, S., *Semiconductor sensors*. 2000, New York, USA: Wiley.
 36. Beeby, S., et al., *MEMS mechanical sensors*. 2004, Boston: Artech House.
 37. Chung, D.D.L., *Real-time monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement*. Smart Materials and Structures, 1997. **6**: p. 4.
 38. Fibersensing. www.fibersensing.com. 2016.
 39. Alves, J., *Monitorização de estruturas de engenharia baseada em redes de Bragg em fibra ótica*. Tese de Mestrado, 2007, Universidade do Porto.
 40. Monteiro, J., *Sensores de Fibra Ótica Baseados em Novos Materiais Flexíveis*. Tese de Mestrado, 2013, Universidade do Minho.
 41. Secil. www.secil.pt. 2016.

42. Parveen, S., et al., *Microstructure and mechanical properties of carbon nanotube reinforced cementitious composites developed using a novel dispersion technique*. Cement and Concrete Research, 2015. **73**: p. 215-227.
43. Keysight. www.keysight.com. 2016.
44. Sihai Wen, D.D.L.C., *Uniaxial tension in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions*. Cement and Concrete Research, 2000. **30**(1289 - 1294).

