



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Olinda Gonçalves Lagido

Matrizes cimentícias reforçadas  
por nanofibras de carbono e fibras  
curtas de carbono

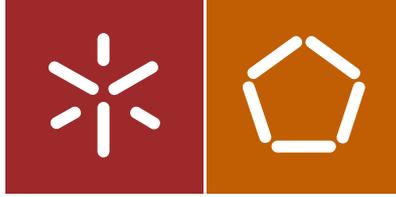
Matrizes cimentícias reforçadas por nanofibras  
de carbono e fibras curtas de carbono

Olinda Gonçalves Lagido

UMinho | 2017

maio de 2017





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Olinda Gonçalves Lagido

Matrizes cimentícias reforçadas  
por nanofibras de carbono 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: Olinda Gonçalves Lagido

Endereço eletrónico: Olinda.lagido@live.com.pt Telefone: 915553432

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14136814

Título da dissertação: Matrizes cimentícias reforçadas por nanofibras de carbono e fibras curtas de carbono

Orientador/a/es:

Professor Doutor Raul Figueiro

Ano de conclusão: 2017

Mestrado integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura: *Olinda Gonçalves Lagido*

## AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é a conclusão de um ciclo que se tornou realidade graças à contribuição de inúmeras pessoas que fazem parte da minha vida.

Foram vários aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A todos agradeço o apoio e disponibilidade dispensados.

À minha família expresseo o meu maior agradecimento, por todo o apoio que me têm dado ao longo deste trabalho.

A todos os departamentos nos quais desenvolvi trabalho, nomeadamente ao grupo Fibrenamics, agradeço os meios colocados à minha disposição.

Ao Professor Raul Fangueiro, sob cuja orientação decorreu realização deste trabalho, quero expressar o meu profundo agradecimento pelo seu apoio, conselhos, orientações, revisão crítica e incentivos permanentes. À doutora Shama Parveen, pela sua importante e decisiva colaboração em todas as etapas desta dissertação.

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

A todos os meus colegas de Engenharia Civil da Universidade do Minho que têm vindo a acompanhar-me ao longo destes anos e, tal como eu, aqui culminam mais uma etapa da sua vida.



## RESUMO

O reforço do betão com fibras tem sofrido grandes avanços ao longo dos últimos anos. Estes avanços tornaram possível a introdução de nanomateriais como as nanofibras de carbono, permitindo o controlo da fissuração a uma escala nanométrica e a monitorização de estruturas de betão em tempo real através de materiais condutores.

Neste trabalho, foram desenvolvidos compósitos cimentícios condutores e estudado o seu comportamento elétrico quando sujeitos a uma carga de tração uniaxial. Neste sentido, foram preparados dois tipos de compósitos de matriz cimentícia, um reforçado com fibras curtas de carbono e um outro compósito híbrido reforçado simultaneamente com nanofibras e fibras curtas de carbono. Na conceção destes dois tipos de compósitos, especial atenção foi dada à correta dispersão da fibra de carbono e das nanofibras na matriz cimentícia para garantia da homogeneidade necessária à maximização das propriedades mecânicas e elétricas.

De um modo geral os resultados obtidos demonstram que as nanofibras e as fibras curtas de carbono foram dispersas efetivamente nas matrizes cimentícias originando compósitos capazes de apresentar o efeito piezoresistivo, ou seja, uma variação da resistência elétrica sob carga de tração uniaxial, demonstrando o seu potencial para uso como sensores de deformação em tempo real, embebidos na própria matriz. Dos ensaios realizados, os melhores resultados obtidos para o 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 nanofibras de carbono, para o ensaio monotónico.

Conclui-se que as nanofibras e as fibras curtas de carbono incorporadas num compósito de matriz cimentícia tornam este material condutor, possibilitando a sua utilização enquanto sensor elétrico de cargas e deformações.

**Palavras-Chave:** Fibra de Carbono; Matrizes Cimentícias; Monitorização; Nanofibras; Resistência elétrica.



## ABSTRACT

The reinforcement of concrete with fibers has undergone great advances in recent years. These advances have made possible the introduction of nanomaterials such as carbon nanofibers, allowing the control of cracking on a nanometric scale and the monitoring of concrete structures in real time through conductive materials.

In this dissertation, conductive cementitious composites and their electrical behavior were studied when subjected to a uniaxial tensile load. Therefore, two types of cementitious matrix composites were prepared, one reinforced with short carbon fibers and another hybrid composite reinforced simultaneously with nanofibers and short carbon fibers. In the design of these two types of composites, the correct dispersion of the carbon fiber and the nanofibers in the cement matrix to improve the mechanical and electrical properties is very important.

In general, the results showed that the nanofibers and the short carbon fibers were effectively dispersed in the cementitious matrix producing composites capable of presenting the piezoresistive effect, ie a variation of the electrical resistance under a uniaxial tensile load, demonstrating their potential for use as strain sensors. From the tests performed, the best results obtained from the cementitious composite as an electric sensor were verified in the percentage of 0.5% of short carbon fibers for the cyclic traction test and with 0.75% of short carbon fibers and 0.1% of carbon nanofibers, for the monotonic assay.

It's concluded that the nanofibers and the short carbon fibers in a cementitious matrix composite act as an electric sensor of loads and deformations.

**Keywords:** Carbon Fiber; Cement Matrix; Monitoring; Carbon Nanofibers; Electrical resistance.



# ÍNDICE

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	viii
Abstract .....	x
Lista de Figuras .....	xvi
Lista de Tabelas.....	xx
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos .....	xxiii
1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos e planeamento do trabalho .....	2
1.3 Organização da dissertação .....	2
2. Revisão bibliográfica .....	5
2.1 Matrizes cimentícias reforçadas com fibras .....	5
2.1.1 Tipo de fibras .....	7
2.1.2 Fibra de aço .....	10
2.1.3 Fibra de vidro .....	11
2.1.4 Fibra de polipropileno .....	12
2.1.5 Fibra de carbono.....	13
2.1.6 Técnicas de produção de fibras de carbono .....	15
2.1.7 Técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono em matrizes cimentícias 16	
2.1.8 Propriedades mecânicas e elétricas das fibras de carbono .....	17
2.1.9 Aplicações das fibras de carbono .....	18
2.1.10 Comparação das propriedades das fibras .....	19
2.2 Matrizes cimentícias reforçadas por nanomateriais.....	20
2.2.1 Nanotecnologia e Nanomateriais .....	21
2.2.2 Nanofibras de carbono .....	22
2.2.3 Síntese de nanofibras de carbono .....	23
2.2.4 Técnicas de dispersão de nanofibras de carbono em matrizes cimentícias 25	
2.2.5 Propriedades mecânicas e elétricas das nanofibras de carbono .....	27
2.2.6 Aplicações de nanofibras de carbono.....	28
2.3 Monitorização de estruturas a partir de fibras .....	28

2.3.1	Monitorização através de materiais condutores .....	29
2.3.2	Monitorização através de fibra ótica.....	30
3.	Materiais e métodos.....	33
3.1	Introdução e plano experimental.....	33
3.2	Materiais.....	33
3.2.1	Cimento.....	33
3.2.2	Fibras curtas de carbono .....	34
3.2.3	Nanofibras de carbono .....	35
3.2.4	Outros materiais .....	35
3.3	Métodos.....	36
3.3.1	Resistência elétrica .....	36
3.3.2	Tração uniaxial .....	38
4.	Preparação do compósito cimentício com nanofibras e fibras curtas de carbono... 41	
4.1	Introdução .....	41
4.2	Combinação matriz cimentícia/SCF .....	41
4.2.1	Dispersão de SCF.....	41
4.3.1	Dispersão de CNF e SCF .....	44
4.4	Preparação da pasta cimentícia .....	46
4.4.1	Colocação da pasta cimentícia nos moldes.....	47
5.	Comportamento Elétrico sob carga de tração uniaxial dos compósitos cimentícios	49
5.1	Introdução .....	49
5.2	Resistência elétrica original (R0).....	49
5.2.1	Resultados obtidos e discussão .....	50
5.3	Ensaio de tração cíclico.....	53
5.3.1	Resultados obtidos e discussão .....	54
5.4	Ensaio de tração monotónico .....	73
5.4.1	Resultados obtidos e discussão .....	74
6.	Conclusão e trabalhos futuros .....	84
6.1	Conclusão.....	84

6.2	Trabalhos Futuros .....	86
7.	Referências bibliográficas .....	87



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistemas de reforço por fibras com fibras contínuas (esquerda) e com fibras curtas (direita) (Rosado, Guise, Rebelo, & Fangueiro, 2011).....	6
Figura 2.2: Comportamento de tensões com e sem fibras (Figueiredo, 2011).....	6
Figura 2.3: Diversos tipos de fibras de aço, secções longitudinais (Gonzalez, 2007). ..	10
Figura 2.4: Fibras de vidro sob a forma de strand, mergulhadas na pasta de cimento (Gonzalez, 2007). .....	12
Figura 2.5: Redes de polipropileno (Gonzalez, 2007). .....	13
Figura 2.6: Fibras curtas de carbono (Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics). .....	14
Figura 2.7: Fases de formação das fibras de carbono (Gonzalez, 2007).....	16
Figura 2.8: Diferença entre uma dispersão deficiente (lado esquerdo) e uma boa dispersão (lado direito) (Chung, 2005).....	17
Figura 2.9: Imagem SEM representativa da morfologia de nanofibras de carbono (CNF) numa matriz cimentícia (Shah, 2011). .....	22
Figura 2.10: Esquema do processo da deposição química em fase de vapor (CVD) com a ilustração das CNFs em camadas (Zhang, Aboagye, Kelkar, Lai, & Fong, 2014). .....	24
Figura 2.11: Esquema da Eletrofiliação de fibras PAN, que geralmente é seguida pela estabilização e carbonatação de forma a criar as CNFs (Zhang, Aboagye, Kelkar, Lai, & Fong, 2014). .....	25
Figura 2.12: Superfície de fratura de nanocompósitos de CNF/cimento, mostrando CNFs individualmente dispersas (Parveen, Rana, & Fangueiro, 2013) .....	27
Figura 2.13: Representação esquemática do sistema ótico FBGs (“Spider 8”: sistema de aquisição de dados) (Oliveira, Ramos, Frazão, & Marques, 2007). .....	31
Figura 3.1: Fibras curtas de carbono utilizadas no trabalho laboratorial. ....	34
Figura 3.2: Nanofibras de carbono utilizados no trabalho laboratorial (Laboratório de Nanomateriais da Fibrenamics).....	35
Figura 3.3: Estrutura química do Pluronic F-127.....	36
Figura 3.4: Fita de cobre utilizada.....	36
Figura 3.5: Multímetro digital Agilent 34460A. ....	37
Figura 3.6: Representação da posição dos elétrodos no provete.....	37
Figura 3.7: Representação do Set-up do ensaio. ....	38

Figura 4.1: Dispersão do Pluronic F-127 e do TBP na água destilada .....	42
Figura 4.2: Misturadora de eixo vertical (Mateus, 2013). .....	43
Figura 4.3: Dispersão das CNFs na solução aquosa. ....	45
Figura 4.4: Equipamento de ultrassons com duas soluções.....	45
Figura 4.5: Dispersão das CNFs e SCFs na solução aquosa.....	46
Figura 4.6: Estrutura do molde utilizado (Wen & Chung, 2000). ....	46
Figura 4.7: Colocação da argamassa nos moldes. ....	47
Figura 4.8: Distâncias fitas de cobre no provete (I1: 80 mm; V1:70 mm). ....	47
Figura 5.1: Ensaio de resistência elétrica original (R0); PC com software de análise MATLAB; Multímetro digital Agilent 34460A; Provete com elétrodos. ....	50
Figura 5.2: Resultados das melhores amostras da resistência elétrica inicial (R0). ....	52
Figura 5.3: Variação da resistência elétrica original (R0). ....	53
Figura 5.4: Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0,2 KN) .....	55
Figura 5.5: Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0.3kN) .....	55
Figura 5.6: Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0.4kN) .....	55
Figura 5.7: Comparação dos Ensaio de tração cíclico na Amostra B com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N. ....	56
Figura 5.8: Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.2kN). ....	57
Figura 5.9: Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.3kN). ....	57
Figura 5.10: Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.4kN). ....	57
Figura 5.11: Comparação dos Ensaio de tração cíclico na Amostra C com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N .....	58
Figura 5.12: Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.2kN).....	59
Figura 5.13: Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.3kN).....	59
Figura 5.14: Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.4kN).....	60
Figura 5.15: Comparação dos Ensaio de tração cíclico na Amostra D com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N .....	60
Figura 5.16: Ensaio de tração cíclico na Amostra E (0.2kN) .....	62
Figura 5.17: Ensaio de tração cíclico na Amostra E (0.3kN) .....	62
Figura 5.18: Ensaio de tração cíclico na Amostra E (0.4kN) .....	62
Figura 5.19: Comparação dos Ensaio de tração cíclico na Amostra E com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N .....	63
Figura 5.20: Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.2 KN).....	64
Figura 5.21: Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.3 kN) .....	64
Figura 5.22: Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.4 kN) .....	65

Figura 5.23 Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra F com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N .....	65
Figura 5.24: Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.2 kN) .....	66
Figura 5.25: Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.3 kN) .....	67
Figura 5.26: Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.4 kN) .....	67
Figura 5.27: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra G com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N .....	67
Figura 5.28: Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.2 kN) .....	68
Figura 5.29: Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.3 kN) .....	69
Figura 5.30: Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.4 kN) .....	69
Figura 5.31: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra H com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N .....	69
Figura 5.32: Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.2 kN).....	71
Figura 5.33 Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.3 kN).....	71
Figura 5.34: Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.4 kN).....	71
Figura 5.35: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra J com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N .....	72
Figura 5.36: Ensaio de tração monotónico na Amostra B.....	74
Figura 5.37: Ensaio de tração monotónico na Amostra C.....	75
Figura 5.38: Ensaio de tração monotónico na Amostra E.....	76
Figura 5.39: Ensaio de tração monotónico na Amostra F. ....	77
Figura 5.40: Ensaio de tração monotónico na Amostra G. ....	78
Figura 5.41: Ensaio de tração monotónico na Amostra H. ....	79
Figura 5.42: Ensaio de tração monotónico na Amostra J.....	80
Figura 5.43: Variação de mudança fracional da resistência e resistência à tração no ensaio de tração monotónico. ....	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas das fibras de carbono em função do precursor utilizado (Magalhães, 2015).....	18
Tabela 2.2: Propriedades mecânicas das fibras de carbono do tipo PAN (Magalhães, 2015).....	18
Tabela 2.3: Propriedades mecânicas das fibras de aço, vidro, polipropileno e carbono (PAN) (Adaptado de (Moura, Magalhães, & Morais, 2009), (Barros J. A., 2000), (Bentur & Mindess, 2007), (Fangueiro, 2011), (Magalhães, 2015)).....	20
Tabela 2.4: Propriedades das nanofibras de carbono (CNF) em função do processo de produção (Poveda & Gupta, 2016).....	28
Tabela 3.1: Propriedades mecânicas das fibras de carbono. ....	34
Tabela 3.2: Propriedades das CNFs de acordo com o fabricante. ....	35
Tabela 4.1: Quantidades dos químicos utilizados na solução aquosa. ....	42
Tabela 4.2: Quantidades de fibras de carbono utilizadas. ....	43
Tabela 4.3: Quantidades de CNF utilizadas. ....	44
Tabela 5.1: Quantidades de SCF e CNF na matriz cimentícia.....	51
Tabela 5.2: Mudança fracional da resistência na Amostra B (0.75% SCF).....	56
Tabela 5.3: Mudança fracional da resistência na Amostra C (0.5% SCF).....	58
Tabela 5.4: Mudança fracional da resistência na Amostra D (0.25% SCF).....	61
Tabela 5.5: Mudança fracional da resistência na Amostra E (0.75% SCF+0.1% CNF). 63	
Tabela 5.6: Mudança fracional da resistência na Amostra F (0.25% SCF+0.1% CNF). 66	
Tabela 5.7: Mudança fracional da resistência na Amostra G (0.5% SCF+0.1% CNF). .68	
Tabela 5.8: Mudança fracional da resistência na Amostra H (0.75% SCF+ 0.15% CNF). .....	70
Tabela 5.9: Mudança fracional da resistência na Amostra J (0.5% SCF+ 0.15% CNF).72	
Tabela 5.10: Compilação de todos dos resultados relativos à mudança fracional de resistência durante o ensaio cíclico. ....	73
Tabela 5.11: Mudança fracional da resistência na Amostra B (0.75% SCF).....	75
Tabela 5.12: Mudança fracional da resistência na Amostra C (0.5% SCF).....	76
Tabela 5.13: Mudança fracional da resistência na Amostra E (0.75% SCF+0.1% CNF). .....	76

Tabela 5.14: Mudança fracional da resistência na Amostra F (0.25% SCF+0.1% CNF). .....	77
Tabela 5.15: Mudança fracional da resistência na Amostra G (0.5% SCF+0.1% CNF). .....	78
Tabela 5.16: Mudança fracional da resistência na Amostra B (0.25% SCF+0.15% CNF). .....	79
Tabela 5.17: Mudança fracional da resistência na Amostra J (0.75% SCF+0.15% CNF). .....	80
Tabela 5.18: Valores da resistência à tração e mudança fracional da resistência obtidas no ensaio de tração monotónico.....	81



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

BRF - Betão Reforçado com Fibras;  
BRFA - Betão Reforçado com Fibras de Aço;  
cm - Centímetro;  
CNTs – Carbon nanotubes - Nanotubos de carbono;  
CNFs – Carbon nanofibers - Nanofibras de carbono;  
E - Módulo de Elasticidade ou de Young;  
EN- European Norm – Norma europeia;  
GPa - Giga Pascal;  
kHz - Quilohertz  
km - Quilómetros;  
LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil;  
m<sup>2</sup>/g – Metros quadrados por grama;  
mm – Milímetro;  
mm<sup>2</sup> – Milímetros quadrados;  
MPa - Mega Pascal;  
N – Newton;  
N/s – Newton por segundo;  
nm - Nanómetro (10<sup>-9</sup> metros);  
Pa – Pascal;  
PAN – Poliacrilonitrilo;  
Plu - Plurónico F-127;  
VGCNF - Nanofibras cultivadas a vapor;  
ECNF – Eletrofição de Nanofibras;  
µm - Micrómetro (10<sup>-6</sup> metros).



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Atualmente o betão é de longe um dos mais importantes materiais de construção e o seu consumo está a aumentar em todo o mundo. Este fenómeno deve-se ao facto de os componentes constituintes do betão estarem disponíveis em qualquer parte do mundo, de ter um custo relativamente baixo, da sua produção ser relativamente simples e da sua ajustabilidade a uma vasta variedade de construções e infraestruturas. No entanto, o betão também é caracterizado pela sua baixa resistência à tração, pela sua má resistência à abertura de fissuras, por ser poluente, elevado peso próprio nas estruturas, a necessidade de mistura, lançamento e cura, para garantir a resistência desejada.

Para contrariar a natureza frágil do betão, utiliza-se usualmente varões de aço para o reforço do betão. Deste modo, o betão e o aço trabalham em conjunto, uma vez que, o betão, resiste aos esforços de compressão, e o aço, absorve os esforços à tração cujo betão apresenta baixa resistência. No entanto, a utilização deste tipo de reforço apresenta como principal desvantagem o aparecimento de problemas de corrosão que surgem a médio/longo prazo. Estes problemas são acelerados quando o betão apresenta recobrimento insuficiente, fissuras que deixam a armadura exposta ou quando se encontra exposto a ambientes corrosivos, como no caso das construções à beira-mar.

Contudo, atualmente existem outros tipos de reforços para o betão, como a adição de fibras curtas de carbono, distribuídas de forma aleatória para reforçar a mistura. Desta forma, é possível aumentar a resistência à tração do betão, diminuindo a sua fendilhação e os mecanismos responsáveis pela propagação das fendas. A fibra de carbono é um material filamentosos, obtido a partir de vários tipos de materiais compostos de carbono através da decomposição térmica sem oxigenação, também conhecida como pirólise, contendo pequenas quantidades de materiais inseridos na sua estruturas. Em virtude da sua resistência mecânica e baixa densidade, é utilizada em diversos ramos e especialmente na construção civil devido à sua resistência. Outra característica importante na utilização desta fibra é que não sofre corrosão, sendo a sua maior vantagem sobre os metais, que por sua vez estão sujeitos à oxidação. As fibras são já usadas correntemente para reforço do betão, sendo acrescentadas à armadura convencional,

substituindo-a, parcialmente. Outro argumento que pode influenciar na substituição da armadura convencional pelas fibras, está relacionado com o fato da produção de uma armadura convencional requerer mão-de-obra cara e especializada, tanto na dobragem como na colocação, sendo que o tempo despendido para a produção da mesma é igualmente moroso. Assim, devido a estes fatores existe uma maior tendência para a utilização das fibras como reforço do betão, em detrimento da armadura convencional.

## **1.2 Objetivos e planeamento do trabalho**

Este projeto centra-se no estudo de compósitos cimentícios reforçados com nanofibras e fibras curtas de carbono. Neste sentido, serão estudadas técnicas de dispersão de nanofibras em matrizes cimentícias e estudadas composições com diversas percentagens de nanofibras e fibras de carbono, tendo como objetivo o estudo do efeito da adição de fibras curtas de carbono e de nanofibras de carbono na condutividade elétrica de matrizes cimentícias como forma de verificar a possibilidade de através do seu comportamento piezoresistivo utilizá-lo como sensor de deformações.

A correta combinação, matriz cimentícia nanofibras e fibras de carbono, é o um fator de grande importância, uma vez que uma incorreta distribuição destas na matriz, fará com que não se utilize todo o potencial de cada um dos materiais, em termos de propriedades mecânicas e elétricas. Com o objetivo de otimizar a análise do comportamento dos compósitos, serão realizadas diferentes composições com fibras curtas de carbono, e uma composição híbrida com nanofibras e fibras curtas de carbono.

## **1.3 Organização 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 a metodologia selecionada.

- Capítulo II – Revisão bibliográfica

O segundo capítulo aborda os conceitos teóricos do tema, tendo em conta o estado do conhecimento estabelecido para este domínio, caracterizando-se alguns tipos de fibras e

de nanofibras, nomeadamente os nanofibras de carbono e exibindo as propriedades físicas e mecânicas das mesmas.

- Capítulo III – Materiais e Métodos.

No Capítulo III são apresentados os materiais utilizados para preparação dos compósitos de matriz cimentícia funcionalizados com fibras curtas de carbono e nanofibra de carbono, e os métodos de ensaio utilizados para análise do comportamento elétrico sob carga de tração uniaxial.

- Capítulo IV – Preparação dos compósitos cimentícios com nanofibras e fibras curtas de carbono.

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

- 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.

- 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.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Matrizes cimentícias reforçadas com fibras**

O betão é o material de maior relevância na construção e o seu consumo está a aumentar de um modo global, uma vez que os seus componentes estão disponíveis em todo mundo, é relativamente barato, a sua produção é simples e a sua aplicação abriga uma enorme variedade de infraestruturas. As únicas desvantagens do betão são a relativa baixa resistência à tração e a pobre resistência à abertura de fendas.

Atualmente, é frequente utilizar o betão reforçado com aço, no entanto, este tipo de reforço leva ao aparecimento de problemas de corrosão, que são acelerados quando existem fissuras ou quando a construção é à beira-mar. Como solução para estes problemas, ou pelo menos para a sua minoração, podem ser adicionadas fibras ao betão de modo a reforçar a mistura, aumentando a resistência a fissuras, restringindo o encolhimento (Brandt, 2008).

O reforço com fibras já vem desde os tempos bíblicos, aproximadamente há 3500 anos, no entanto, o conceito de reforço com fibras foi desenvolvido nos tempos modernos. O betão reforçado com fibras (BRF) é definido como um material compósito de matriz cimentícia (Bentur & Mindess, 2007). Um material compósito, por definição, é uma mistura de vários materiais onde um garante a ligação (matriz), neste caso o betão, e outro garante a resistência (reforço), neste caso, a fibra.

O reforço pode ocorrer por fibras contínuas ou curtas (descontínuas). 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, técnicas usualmente utilizadas para os compostos poliméricos. As fibras curtas, são geralmente inferiores a 6 mm de comprimento, sendo adicionadas aleatoriamente na matriz cimentícia. As fibras normalmente adicionadas, são curtas e aleatoriamente distribuídas na matriz cimentícia.

A figura 2.1 representa os sistemas de reforços com fibras.

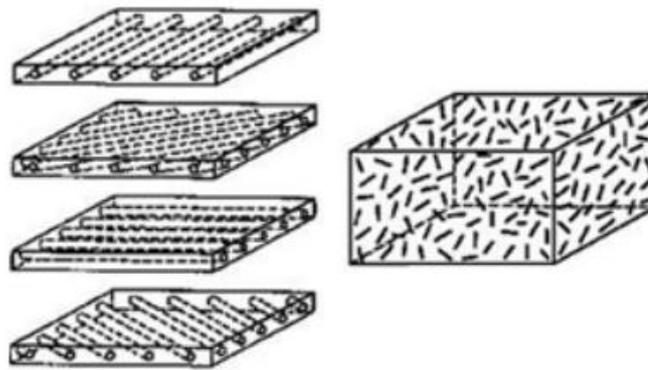


Figura 2.1: Sistemas de reforço com fibras contínuas (esquerda) e fibras curtas (direita) (Rosado, Guise, Rebelo, & Fangueiro, 2011).

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 especialmente da dispersão de fibras dentro da matriz cimentícia (Rosado, Guise, Rebelo, & Fangueiro, 2011). O teor em fibras tem um papel determinante nas propriedades finais que a matriz cimentícia reforçada apresenta (Oliveira, 2013). Portanto, as fibras quando solicitadas têm a capacidade de agir como uma “ponte de transferência” de tensões entre os constituintes que compõem a sua matriz, que atuam transversalmente às fissuras. Assim, obtém-se uma elevada redução da velocidade de propagação das fissuras no betão, que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil (Silva, 2005).

A Figura 2.2 apresenta o comportamento de tensões numa fissura com e sem fibras.

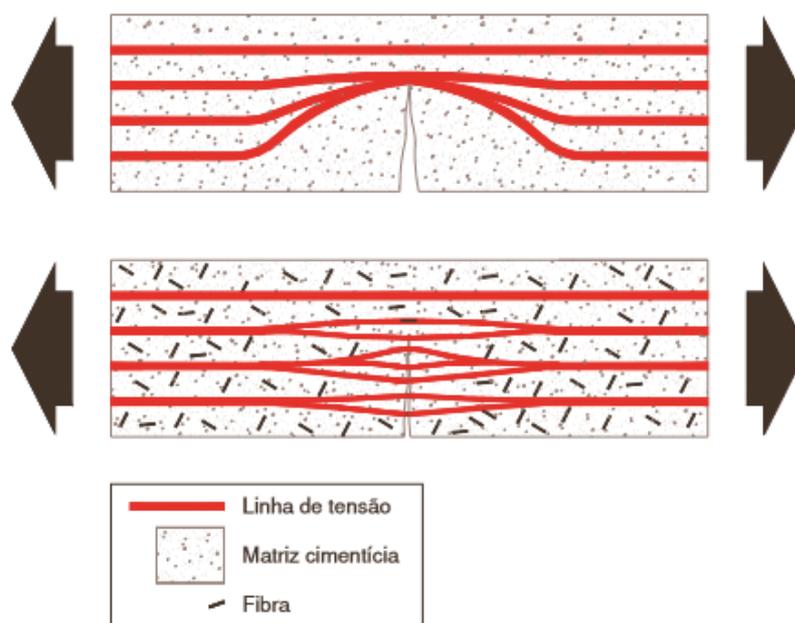


Figura 2.2: Comportamento de tensões sem (matriz superior) e com fibras (matriz inferior) (Figueiredo, 2011).

Os atributos que as fibras introduzem no betão dependem fundamentalmente das propriedades geométricas e dos materiais constituintes das próprias fibras, e da qualidade do próprio 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 utilizar fibras curtas, de forma a impedir a rotura das fibras na secção da fenda. Num betão de resistência baixa e com agregados de maior dimensão deve-se utilizar fibras longas com o intuito de haver maior probabilidade de existirem fibras a diminuir os vazios e microfendas que ocorrem em maior número neste betão (Barros, 2000).

As fibras são já aplicadas em vários tipos de obras, sendo que, em alguns casos, estas substituem, na íntegra, a armadura convencional, sendo muito frequente o seu uso em pavimentos, por exemplo. As fibras podem igualmente ser utilizadas no exterior do elemento de betão para reparação e reabilitação (Mateus, 2013).

#### 2.1.1 Tipo de fibras

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. As fibras são caracterizadas por serem elementos filiformes que apresentam um elevado comprimento em relação à dimensão transversal máxima, sendo caracterizadas pelas suas flexibilidade e finura.

As fibras podem classificar-se quanto à sua natureza, natural ou sintética, quanto à maneira como se apresentam disseminadas na matriz, dispersas aleatoriamente ou alinhadas em padrão estabelecido e ainda quanto à forma do seu conjunto, isoladas ou em rede de diversas geometrias ou ainda entrelaçadas formando um tecido (Gonzalez, 2007). Podem também ser classificadas de acordo com o seu comprimento, podendo ser classificadas como descontínuas ou contínuas, e muitas vezes divididas ainda em fibras longas e curtas. As fibras longas são aquelas que apresentam comprimento igual ou superior a 6mm, sendo que, muitas vezes, a escolha entre as fibras longas ou curtas depende do produto final que se pretende obter ou da tecnologia de fabrico. No que diz respeito às fibras contínuas, estas apresentam um comprimento bastante elevado, apresentando maior anisotropia de propriedades. As fibras, apresentam normalmente uma secção transversal circular, embora os diversos estudos científicos levados a cabo, tenham

vindo a revelar que a utilização de outras formas pode ser vantajosa nas condições de aderência entre as fibras e a matriz (Burgoyne, et al., 2007).

Independentemente da sua natureza, as fibras podem afetar significativamente as propriedades finais do material compósito consoante a sua orientação, comprimento, formas comerciais e origem (Latzke, et al., 2006).

Ao longo dos anos foram desenvolvidas uma grande variedade de fibras, e a tendência é continuar a aumentar. A classificação das fibras pode ser feita em duas grandes classes, fibras naturais ou não naturais. Dentro do último grupo, encontram-se as artificiais, as sintéticas e as inorgânicas. As fibras naturais existem, tal como são, na natureza e podem ser de origem animal, vegetal e mineral. Apesar de existir uma grande variedade de fibras, com múltiplas e diferentes características, as mais usuais em materiais compósitos são as fibras de carbono, vidro, aramida e, mais recentemente, as fibras de basalto (Bunsell, 2009). Enquanto as fibras de vidro são o reforço mais utilizado, ou seja, tem a sua aplicação mais generalizada, as fibras de carbono e aramida são utilizadas para obter produtos para aplicações com um grau de exigência das propriedades mecânicas superiores, envolvendo maiores custos. O teor em fibras de um compósito tem um papel determinante nas propriedades mecânicas finais que o material apresenta. Quanto maior for a percentagem de fibras no material compósito resultante, visto terem propriedades mecânicas superiores às da matriz, maior será, à partida, a resistência mecânica do compósito.

Atualmente existem fibras de muitos tipos, sendo que normalmente estas se agrupam da seguinte forma:

- Fibras Naturais, podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Das fibras de origem animal destacam-se a seda e a lã. Em relação às fibras minerais destacam-se o amianto e lã mineral. Aqui ganham destaque as fibras de amianto, que foram durante muitos anos usadas, no entanto hoje em dia o uso foi erradicado devido ao efeito nefasto na saúde humana. As fibras naturais de origem vegetais não são indicadas para estruturas de elevado desempenho, no entanto podem ser aplicadas no betão comum. As fibras naturais são ótimas alternativas para inserção em betões, podendo substituir a altura outros materiais, como o aço e os polímeros, com vista a promover a sustentabilidade e o uso consciente de materiais na construção civil (Mazzoli, Monosi, & Plescia, 2015). Porém, como são provenientes de processos naturais, ou seja, sem nenhum controle tecnológico, as

fibras naturais possuem grandes variabilidades nas propriedades (Silva F. , 2004). Além deste fator, a baixa durabilidade em meio alcalino, quando utilizadas como reforço, é algo que limita a aplicação destes filamentos em matrizes à base de cimento (Swamy, 1988).

- Fibras não-naturais, são fibras desenvolvidas pelo Homem com o intuito de melhorar várias propriedades, relativamente às fibras naturais. Estas podem-se dividir em fibras artificiais e fibras sintéticas. As fibras artificiais são obtidas a partir da transformação de polímeros naturais, através da ação de agentes químicos, em processos de extrusão. Na sua grande maioria, o polímero precursor de muitas das fibras artificiais é a celulose, extraída de linters de algodão, folhas de árvores, como o eucalipto, bambu, soja, milho, entre outras. As fibras sintéticas são normalmente produzidas quimicamente através de precursores provenientes do petróleo, originando uma vasta gama de materiais com propriedades diversas. O aparecimento das fibras sintéticas contribui fortemente para o alargamento da gama de aplicações dos materiais à base de fibras, considerando as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas (Mateus, 2013).
- Fibras Inorgânicas, são essencialmente constituídas, por compostos químicos inorgânicos, com base em elementos naturais, que em geral, após receberem um tratamento a elevadas temperaturas, dão origem às fibras. Devido às suas excelentes propriedades, também são denominadas de fibras de alto desempenho. Neste grupo, destacam-se as fibras de carbono, vidro, boro, metálicas, de silicato de alumínio, de carboneto de silício e de lã de rocha, entre outras (Mateus, 2013).

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 (Barros J. A., 2000).

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

### 2.1.2 Fibra de aço

As fibras de aço são atualmente as fibras mais utilizadas no mundo da construção civil, originando o betão reforçado com fibras de aço, BRFA. São usadas com frequência em pavimentos e em estruturas de suporte de túneis (Barros, 2000). As fibras de aço que se encontram disponíveis no mercado, são fabricadas a partir de fio de aço laminado, a partir de chapa de aço cortada ou pelo processo de fusão e extração que produz fibras com uma secção transversal de forma crescente (Barros, 2000). É possível encontrar no mercado diversos tipos de fibras de aço, com diferentes formas geométricas e aços de diferente resistência.

As fibras de aço são elementos descontínuos fabricados com variadas geometrias e tipo de aço, e preparadas para ser adicionadas de modo aleatório ao betão fresco (Figueiredo, 2011).

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



Figura 2.3: Diversos tipos de fibras de aço, secções longitudinais (Gonzalez, 2007).

Um dos principais benefícios do compósito com fibra de aço é o aumento da ductilidade, melhorando também o desempenho da resistência à flexão (Gonzalez, 2007). Este comportamento deve-se ao elevado módulo de elasticidade das fibras de aço, tendo também uma elevada resistência à tração. A adição de fibras tem que ser cuidadosa, pois quando a sua percentagem no volume da matriz, for superior a 2% geralmente resulta numa má trabalhabilidade e má distribuição de fibras (Barros, 2000). Contudo, a fibra de aço pode ter uma grande desvantagem devido à sua falta de resistência à corrosão, se as

fibras não forem corretamente introduzidas na matriz a corrosão pode levar à degradação do BRFA, ou na aplicação deste tipo de reforço em estruturas em que se exige uma capacidade de carga significativa, o reforço pode ser usado apenas como complementar à armadura convencional.

### 2.1.3 Fibra de vidro

Atualmente, a fibra de vidro é a fibra mais utilizada e mais bem aceita para a produção de materiais compósitos de matriz polimérica. O vidro fundido pode ser produzido em filamentos contínuos integrados em mechas (“rovings”). No processo de fabricação a superfície de fibra é revestida quimicamente para melhorar a impregnação da matriz e proporcionar uma melhor adesão entre os constituintes do compósito (Marques, 2009).

A fibra de vidro é também utilizada no reforço do betão, fibras essas que podem ser dispersas (curtas) ou orientadas (longas), sendo excelentes nos sistemas de reforço devido à elevada resistência à tração e ao elevado módulo de Young. Além das propriedades mecânicas excepcionais, as fibras de vidro também apresentam uma estabilidade dimensional e uma relação das características/custo interessante. A fibra de vidro poderá ser agrupada em diferentes grupos (Marques, 2009):

- “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;
- “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.

Na figura 2.4 são apresentadas as fibras de vidro sob a forma de strand, mergulhadas na pasta de cimento.

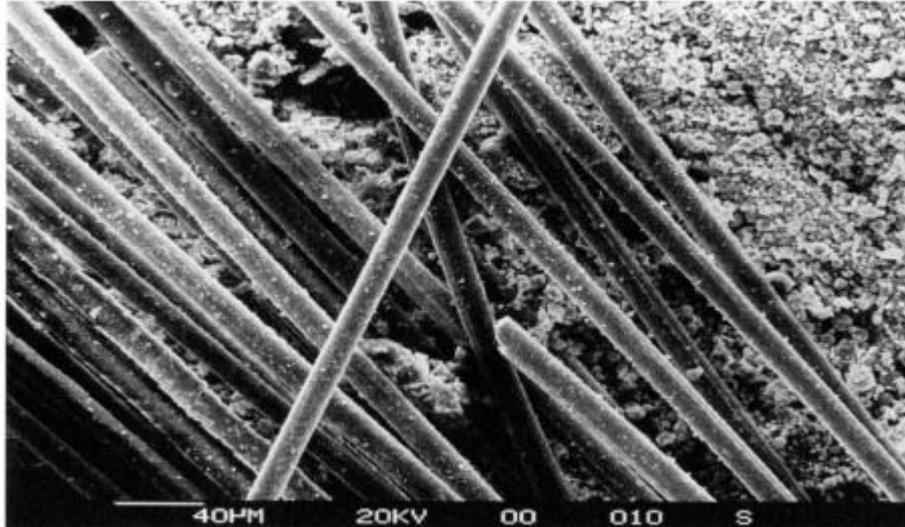


Figura 2.4: Fibras de vidro sob a forma de strand, mergulhadas na pasta de cimento (Gonzalez, 2007).

#### 2.1.4 Fibra de polipropileno

As fibras de polipropileno são constituídas por um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma a que possam deslizar umas sobre as outras (Domone & Illston, 2010).

As fibras de polipropileno provêm de um polímero de hidrocarbonetos sintéticos, sendo produzidas através de processos de extrusão por estiragem a quente do material a partir de uma matriz. Estas fibras são produzidas em monofilamentos contínuos com seção circular, ou em fitas fibriladas de seção transversal retangular. O comprimento desta fibra não deve ser muito elevado, uma vez que esta, devido à sua flexibilidade, tem tendência a embrulhar-se em torno dos bordos da pá misturadora o que pode tornar a mistura difícil. Na figura seguinte são representadas redes de polipropileno.

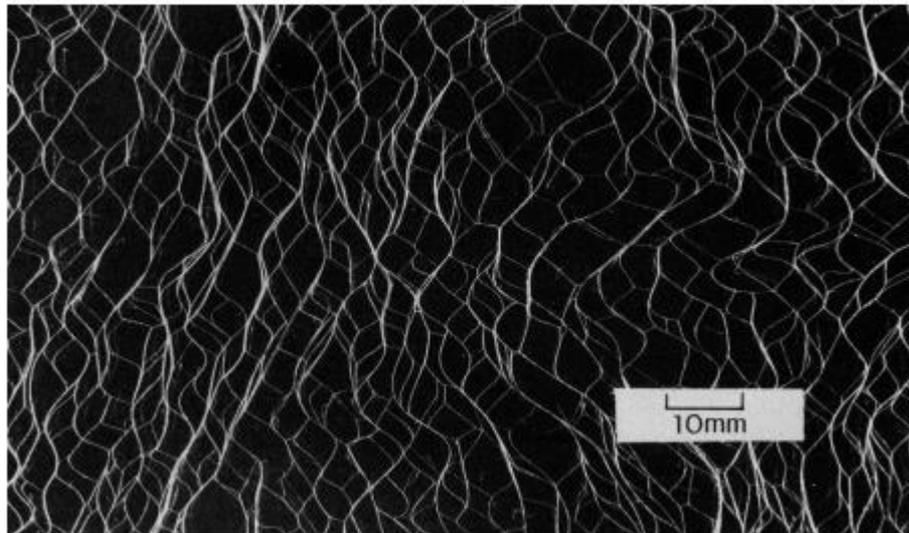


Figura 2.5: Redes de polipropileno (Gonzalez, 2007).

As fibras de polipropileno possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função da sua constituição e possuem ainda uma elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos alcalis (Taylor, 1994). Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma resistência ao impacto substancial (Casagrande, 2001).

#### 2.1.5 Fibra de carbono

Thomas Edison foi o primeiro a produzir intencionalmente filamentos de carbono pela pirólise do algodão para filamentos de lâmpadas incandescentes, em 1878. Mais de 80 anos depois, o excelente desempenho de suas propriedades mecânicas foi demonstrado pelo aparecimento de filamentos de grafite com resistência à tração de 2,0 GPa e módulo de elasticidade de 800 GPa (Lubin, 1982). A primeira fibra contínua comercial foi produzida nos anos de 1950 pela carbonização de rayon sintético para aplicações em mísseis, sujeitos a temperaturas elevadas. Em meados da década de 1960, no Japão e na Inglaterra, foi desenvolvido um processo mais eficiente de produção de fibras de carbono utilizando-se poliacrilo-nitrila (PAN). Este processo é utilizado hoje em dia por mais de 90% da produção de fibras de carbono comercial. Durante as últimas décadas, o processo tem sido melhorado na sua eficiência para aumentar a resistência das fibras, o seu módulo de elasticidade, a resistência à manipulação e diminuir deformações e falhas (Wiebeck & Harada, 2005). Durante os anos de 1970, os esforços visavam a redução do custo das fibras com o uso do precursor piche, menos dispendioso. Pesquisas recentes, para se desenvolverem fibras de carbono de baixo custo, incluem o crescimento dos filamentos

de carbono pela deposição de carbono a partir de gases, tais como monóxido de carbono, metano ou benzeno, sobre um metal catalisador (Lebrão, 2008).

A fibra de carbono é um material altamente promissor, baseado na força das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono (Taylor, 1994). As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez (Beber, 2003). Estas fibras são também caracterizadas pela composição de produtos filamentosos com mais de 90% de carbono e filamentos de 5 a 15  $\mu\text{m}$  de diâmetro, produzidos em geral através de uma fibra precursora, isto é, de um material semi-elaborado como a poliacrilonitrila (PAN), piche ou rayon (Lebrão, 2008). Quando se utilizam materiais compósitos de fibras de carbono, a sua resistência e módulo de elasticidade podem ser orientados de modo otimizado para minimizar a massa final. Além da resistência e da rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional. As fibras de carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (Callister, 2007).

O comprimento da fibra individual pode variar entre os 3 mm até aos 10-13 mm, com diâmetros da ordem dos 10-18  $\mu\text{m}$ , sendo já denominada de microfibra devido à baixa gama de variação (Gonzalez, 2007). As fibras curtas de carbono, são dispersas aleatoriamente na matriz proporcionando pontes de transferência das tensões de corte entre o betão e as fibras curtas de carbono, enquanto que as fibras longas (contínuas) são dispostas unidireccionalmente dentro das matrizes e absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes.

Na figura 2.6 são representadas fibras curtas de carbono com cerca de 5mm de comprimento.



Figura 2.6: Fibras curtas de carbono (Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics).

As mais importantes propriedades físicas e mecânicas presentes nas fibras de carbono passam por módulo de elasticidade elevado, baixa massa volúmica, tensão de rotura elevado, baixo coeficiente de expansão térmica e elétrica, inerte e não inflamáveis. A resistência à fadiga e à vibração são também 2 grandes vantagens. Este comportamento obtém-se devido ao facto de este tipo de fibra ser quebradiça e permitir uma grande resistência com pouco alongamento (Magalhães, 2015).

#### 2.1.6 Técnicas de produção de fibras de carbono

O processo de fabricação pode variar segundo o precursor utilizado. Geralmente o processo de produção das fibras de carbono é realizado numa fase química e numa fase mecânica. No entanto, de maneira geral, o método envolve uma primeira etapa onde as fibras do material precursor são oxidadas a temperaturas próximas de 200°C de maneira lenta e controlada, para evitar uma excessiva volatilização ou fusão do precursor. Posteriormente, a temperatura é elevada a valores próximos de 1600°C para a carbonização do material em atmosfera inerte. Em alguns casos, o material pode ser ainda aquecido a temperaturas acima de 2000°C, sendo que nesta última condição, o material resultante possui características semelhantes às encontradas na grafite (Donnet & Ehrburger, 1977), (Edmonds, 1985).

As principais fases da formação das fibras são as seguintes (Silva B. J., 2005), (Donnet, Rebouillat, Wang, & Peng, 1998):

- Preparação: inicialmente, é feita a preparação do PAN ou do rayon, ou é efectuada a modificação prévia da composição química do pitch;
- Produção de filamentos (fiação): o precursor é transformado em fibra com diâmetro de 100µm à saída da fieira, diminuindo até 10µm depois de ser esticada durante a bobinagem, e com as moléculas alinhadas paralelas à direção da fibra;
- Estabilização térmica das fibras: nesta fase as fibras são sujeitas a um processo de oxidação parcial com o propósito de as endurecer. De seguida, a temperatura de fusão é aumentada para um valor superior à temperatura de decomposição, e a orientação das moléculas do precursor fica fixa;
- Carbonização das fibras: O precursor é convertido em carbono, com estrutura baseada naquela da grafite por aquecimento numa atmosfera inerte a temperaturas na gama dos 1600°C a 1800°C;

- Grafitação das fibras: a temperatura é elevada ente 2400°C e 3000°C, com o objetivo de melhorar a orientação e aperfeiçoar a estrutura gráfica. Nesta fase consegue-se material com um módulo de Young ainda maior e o produto apresenta um teor de carbono que ronda os 98%;
- Oxidação superficial: As fibras são sujeitas a tratamento oxidativo para aumentar a rugosidade e polaridade superficial.

As fases de formação da fibra de carbono podem ser resumidas da seguinte forma:

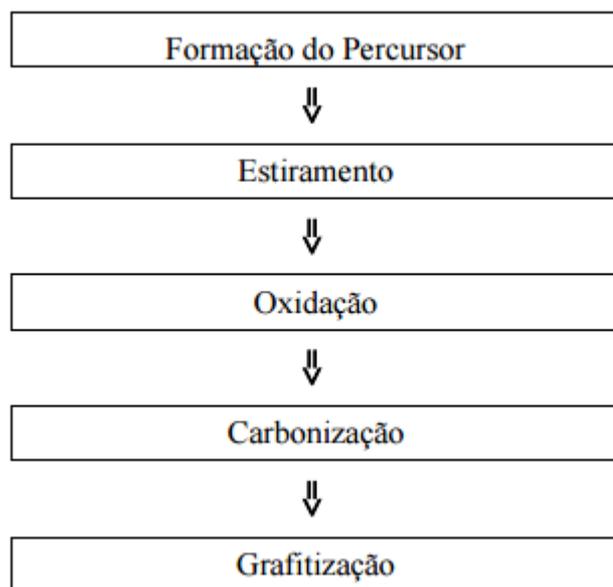


Figura 2.7: Fases de formação das fibras de carbono (Gonzalez, 2007).

### 2.1.7 Técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono em matrizes cimentícias

As fibras curtas de carbono (SCF) são dispersadas aleatoriamente na matriz cimentícia. No entanto a sua mistura no cimento não pode ser feita de forma direta, uma vez que pode conduzir a um reforço não eficaz da matriz cimentícia. Deste modo são utilizadas técnicas de dispersão de fibras curtas de carbono que se podem dividir em métodos químicos, físicos e a combinação dos dois métodos.

Através dos métodos químicos, a dispersão das fibras é alcançada pelo incentivo da hidrofília das fibras, uma vez que que a mistura do cimento é baseada em água. A hidrofília pode ser controlada através do tratamento superficial das fibras antes da incorporação das fibras na mistura de cimento. Além disso, a dispersão das fibras pode ser conseguida através da adição de surfactantes juntamente com as fibras, a sua presença ajuda as fibras a se desapegaram umas das outras (Chung, 2005). 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 é determinante impedir a aglomeração durante a realização da argamassa para que o reforço com fibras seja eficaz. Na figura 2.8 é observável a diferença entre uma dispersão deficiente e uma boa dispersão. 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 (Barros J. , 1996).

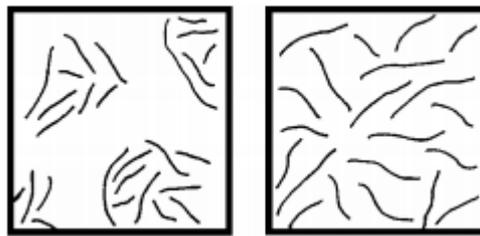


Figura 2.8: Diferença entre uma dispersão deficiente (lado esquerdo) e uma boa dispersão (lado direito) (Chung, 2005).

#### 2.1.8 Propriedades mecânicas e elétricas das fibras de carbono

A sua estrutura anisotrópica associada às ligações carbono-carbono, faz com que as fibras de carbono tenham como principais propriedades mecânicas, elevado módulo de elasticidade, baixa massa volúmica, tensão de rotura elevada, baixo coeficiente de expansão térmica e elétrica, inerte e não inflamáveis (Silva M. , 2007). Por outro lado, 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 (Magalhães, 2015). Uma outra propriedade conhecida das fibras de carbono é a sua condutividade elétrica. A fibra de carbono apresenta como resistência elétrica  $2.3 \times 10^{-4}$  ( $\Omega$ -cm) (Azhari & Banthia, 2012). 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 (Chung,

2002). Devido à sua condutividade, as fibras de carbono possibilitam que um compósito funcione como um sensor do seu próprio estado de fissuração, através da variação da resistência elétrica quando a corrente elétrica percorre um troço pré-determinado (Silva B. J., 2005).

A Tabela 2.1 apresenta as principais propriedades das fibras de carbono em função do precursor utilizado.

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas das fibras de carbono em função do precursor utilizado (Magalhães, 2015).

<b>Fibra</b>	<b>Massa volúmica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Diâmetro equivalente (mm)</b>	<b>Extensão de rotura (%)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (GPa)</b>
PAN	1,75-1,9	0,004-0,008	0,6-2,5	200-350	2,4-6,9
Pitch	1,9-2,15	0,008-0,0011	0,3-0,9	170-800	1,35-3,2
Rayon	1,6	0,008-0,009	2,5	40	1,0

As fibras de carbono do tipo PAN, o tipo com melhores características, encontram-se divididas em 4 grupos, dependendo das suas características: HS (“High Strength”); IM (“Intermediate Modulus”); HM (“High Modulus”); UHM (“Ultra High Modulus”) (Magalhães, 2015). As suas propriedades são descritas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas das fibras de carbono do tipo PAN (Magalhães, 2015).

<b>Fibra de Carbono (PAN)</b>	<b>Massa volúmica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Extensão de rotura (%)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (GPa)</b>
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

#### 2.1.9 Aplicações das fibras de carbono

As propriedades conferidas aos materiais reforçados com fibras de carbono levam à crescente utilização da mesma em diversos ramos da indústria, sendo um componente deveras versátil e de larga aplicação.

Uma aplicação notável da fibra de carbono pode ser observada na construção civil onde a mesma vem sendo utilizada no reforço de estruturas de betão, além de poder ser empregada também no reforço de chaminés, túneis, muros, etc. Porém, é na indústria automobilística que as fibras de carbono são mais utilizadas, sendo bastante utilizadas na fabricação de carros, principalmente nos de alto desempenho que requerem resistência e baixo peso. É importante destacar também a utilização da mesma na indústria aeronáutica, sendo usada na fabricação de peças das asas e turbinas, justamente por resistir a altas temperaturas. A fibra de carbono pode ser considerada um dos materiais mais promissores porque o seu uso pode ainda ser estendido a infinitas áreas além das citadas anteriormente (Silva M. , 2007).

As fibras de carbono apresentam ainda outra grande vantagem que é o fato de ser condutora de eletricidade, fazendo com que um compósito funcione como um sensor do seu próprio estado de fissuração, através da variação da resistência elétrica quando a corrente elétrica percorre um trecho pré-determinado. Deste modo, as fibras de carbono poderão ser usadas como reforço estrutural e, ao mesmo tempo monitorizar a durabilidade da estrutura (Silva B. J., 2005).

#### 2.1.10 Comparação das propriedades das fibras

Pode verificar-se que existem inúmeros tipos de fibras que podem servir como reforço a introduzir num material compósito. Portanto, é interessante comparar os tipos de fibras mais utilizados como reforço de modo a concluir qual a fibra mais benéfica. 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. A fibra de vidro também tem grande utilização no reforço da matriz cimentícia. As fibras de vidro 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 polipropileno tem revelado grande estabilidade em ambientes alcalinos, todavia tem-se observado que a elevação da temperatura provoca uma diminuição das suas propriedades, com perdas significativas acima dos 50°C, o que provoca incertezas quanto ao seu desempenho a longo prazo. 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 fibra de carbono destaca-se pela baixa densidade associada a uma elevada

resistência mecânica, portanto são consideradas fibras de eleição. Nas fibras de carbono não são encontradas imperfeições em relação às outras fibras. Estas não apresentam o problema da oxidação como as fibras de aço e são indiferentes aos ambientes alcalinos o que não acontece com as fibras de vidro. A principal desvantagem a apontar à fibra de carbono em relação às outras é o seu preço que ainda ser demasiado elevado, no entanto a tendência a diminuir nos próximos anos, a utilização desta fibra tende a aumentar cada vez mais. No que diz respeito às propriedades mecânicas verifica-se como principal mais valia o Módulo de Young das fibras de carbono, assim como uma elevada resistência à tração comparativamente com as outras fibras. Na tabela 2.3 são especificadas as principais propriedades mecânicas das fibras abordadas.

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas das fibras de aço, vidro, polipropileno e carbono (PAN) (Adaptado de (Moura, Magalhães, & Morais, 2009), (Barros J. A., 2000), (Bentur & Mindess, 2007), (Fangueiro, 2011), (Magalhães, 2015)).

<b>Fibra</b>	<b>Massa Volúmica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Diâmetro equivalente (mm)</b>	<b>Extensão de rotura (%)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (GPa)</b>
Aço	7,8	0,15-1	20	200	0,5-3
Vidro	2,4-2,49	0,005-0,15	2,4-3,3	69-85,5	3,3-4,58
Polipropileno	0,9-0,95	0,02-1	15-25	3,5	0,45-0,76
Carbono (PAN)	1,75-1,9	0,004-0,008	0,6-2,5	200-350	2,4-6,9

## 2.2 Matrizes cimentícias reforçadas por nanomateriais

Devido aos grandes avanços tecnológicos, nos últimos anos considera-se que a nanotecnologia é umas das tecnologias mais importantes deste século. A nanotecnologia está a mudar a pesquisa básica nos campos da informação, ciência, tecnologia biológica, ciências do ambiente, fontes de energia, ciência dos materiais, engenharia e outros. Esta caracteriza-se por produzir materiais, estruturas, dispositivos e sistemas funcionais utilizando a matéria numa escala molecular e nanométrica (Mateus, 2013).

O betão armado foi uma grande inovação no domínio dos materiais compósitos, pois o aço permitiu compensar a fraca resistência à tração do betão simples, tornando-o adequado para soluções estruturais. Apesar do sucesso destes materiais, estes materiais

apresentam algumas limitações como já temos vindo a referir anteriormente. De modo a ultrapassar estas limitações, existe atualmente a necessidade de reforçar as matrizes cimentícias com recurso a novos materiais de última geração, mais eficientes como os nanomateriais (Tielas, et al., 2014).

Surge no presente trabalho de investigação o estudo das nanofibras como nanomateriais aplicados como reforço e controlo de fissuração no betão a uma escala nanométrica.

### 2.2.1 Nanotecnologia e Nanomateriais

A nanotecnologia descreve a caracterização, fabricação e manipulação de estruturas, dispositivos ou materiais que têm uma ou mais dimensões menores do que 100 nanómetros.

O nanomaterial define-se como um material com qualquer dimensão externa em nanoescala ou com estrutura interna ou estrutura de superfície à escala nanométrica, que poderá apresentar características novas em comparação com o mesmo material sem características de nanoescala. Pode referir-se a um material com apenas uma dimensão de escala nanométrica (como no caso de nanocamadas, películas finas ou revestimentos de superfície), duas dimensões na escala nanométrica (tais como nanofibras, nanofios, nanotubos de carbono, nanotubos inorgânicos ou biopolímeros) e três dimensões na escala nanométrica (tais como nanopartículas, fulerenos, dendrímeros ou pontos quânticos) (Tielas, et al., 2014).

Atualmente, encontram-se no mercado diversos tipos de nanomateriais como componentes ativos em vários produtos, como é o caso dos nanotubos (CNT). A grande motivação para a nanotecnologia reside na verificação das propriedades físicas e químicas nos nanomateriais, comparadas às propriedades do mesmo material em tamanhos micro ou macroscópico. A nanotecnologia aproveita as alterações das propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, óticas, estruturais e da reatividade química dos nanomateriais e nanopartículas para o desenvolvimento de uma enorme gama de aplicações, que reside nos setores de energia, informação e eletrónica, medicina, aeroespacial, têxtil, ambiental, construção civil, agricultura, alimentação e cosméticos, para citar alguns dos principais (Pimenta, 2010).

A nanotecnologia tem sido usada para tornar os materiais mais resistentes e leves, otimizando a relação resistência vs massa volúmica (Sales, 2013).

A produção de nanomateriais pode ser classificada segundo duas abordagens (Rúbio, 2006):

- *Top-down* (de cima para baixo) dedica-se à fabricação de estruturas em nanoescala, a partir de outras de maior tamanho, geralmente, por meio de processos físicos. Tradicionalmente, partículas conhecidas como submícrons são obtidas por processos *Top-down*, em que se moem materiais normais até se obter essas partículas muito pequenas, entretanto, estas possuem baixa homogeneidade granulométrica na escala nanométrica.
- *Bottom-up* (de baixo para cima) o material é sintetizado aglomerando a substância átomo por átomo ou molécula por molécula. Normalmente este é um processo químico, mas pode também ser realizado fisicamente através de potentes microscópios.

### 2.2.2 Nanofibras de carbono

Como consequência do desenvolvimento da nanotecnologia surgem as nanofibras. Por definição são fibras com diâmetros inferiores a 100 nanómetros (nm). Para se ter uma ideia, 1 nanómetro equivale à bilionésima parte de um metro e qualquer medida nessa escala é invisível a olho nu. O diâmetro de uma nanofibra é cerca de 70 vezes menor que um fio de cabelo humano. Pelo fato de as nanofibras serem tão pequenas, estas apresentam elevadas propriedades físicas, químicas e magnéticas (Mateus, 2013). Na figura 2.9 podemos observar a morfologia de nanofibras de carbono (CNF) numa matriz cimentícia.

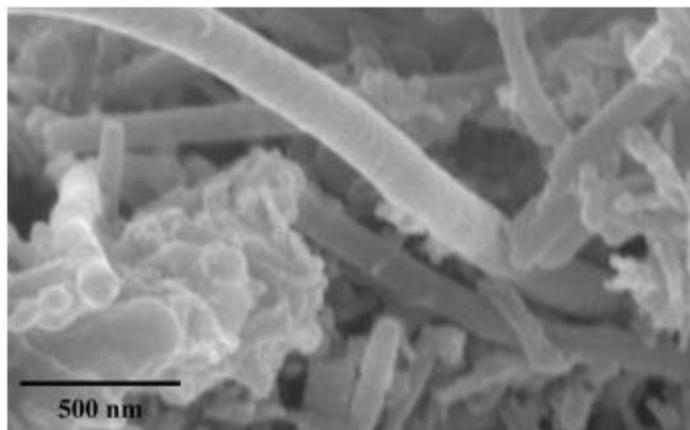


Figura 2.9: Imagem SEM representativa da morfologia de nanofibras de carbono (CNF) numa matriz cimentícia (Shah, 2011).

Com o desenvolvimento das nanofibras e a integração destas no reforço do betão, abre-se um novo campo para o reforço do betão, permitindo assim o controlo da fissuração à escala nanométrica (Konsta-Gdoutos, Metaxa, & Shah, 2010). A introdução de nanofibras no reforço do betão pode levar a um aumento significativo das propriedades mecânicas e da durabilidade do betão, em relação ao betão convencional, permitindo novas aplicações na engenharia civil (Sanchez, Zhang, & Ince, 2009). De um modo particular, a resistência à flexão e a rigidez da matriz cimentícia podem ser significativamente aumentadas com a adição de baixas concentrações de nanofibras (Shah, 2011).

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

### 2.2.3 Síntese de nanofibras de carbono

As nanofibras (CNF) são classificadas como filamentos descontínuos lineares. Análises através da microscopia eletrónica de transmissão (TEM) revelaram que as camadas de planos grafíticos da maioria das nanofibras geralmente não estão alinhadas ao longo do eixo da fibra. Os filamentos em nanoescala, tais como as CNF, foram classificados em investigações anteriores como se segue, dependendo do ângulo das camadas de grafeno que compõem o filamento (Poveda & Gupta, 2016):

- Empilhados (camadas de grafeno empilhadas perpendicularmente ao eixo da fibra);
- “Espinha de Peixe” / “empilhados em copos” (camadas de grafeno empilhadas em um ângulo entre paralelo e perpendicular ao eixo da fibra).

Estas disposições em camadas são possíveis devido ao mecanismo de crescimento utilizado das CNF. Assim serão discutidos os tipos de produção de CNF mais comuns, nomeadamente as CNFs cultivadas a vapor (VGCNFs) e a eletrofiação de CNFs (ECNFs). A estrutura inerente de CNFs é normalmente dependente dos processos de produção empregues, que são a seguir enunciados (Poveda & Gupta, 2016):

- CNFs cultivadas a vapor (VGCNFs): A estrutura de VGCNF assemelha-se a camadas de grafeno helicoidalmente dobradas ao longo do eixo da fibra, proporcionando um núcleo oco. As camadas grafíticas são dobradas num ângulo em relação ao eixo das fibras, dando a aparência de copos que são colocados em

camadas, ou "empilhados" um em cima do outro ao longo de um eixo. Esta estrutura característica, "empilhada em copo", distingue-se dos nanotubos de carbono (CNTs), que têm a aparência de um único cilindro ou múltiplos cilindros concêntricos feitos de camadas de grafeno orientadas paralelamente ao eixo do CNT. A estrutura e as propriedades dos VGCNFs são influenciadas pelo seu processo de fabricação. Os processos que são utilizados para a produção de CNF têm sido utilizados desde a década de 1970 para a produção de outros materiais e foram adaptados para a produção de CNF nos últimos anos. A deposição química de vapor (CVD) está entre os processos mais comuns usados para produzir VGCNFs. Neste processo, as partículas catalíticas de metais de transição, tais como ferro, níquel, cobalto e cobre, são utilizadas em conjunto com um suprimento de carbono, tal como monóxido de carbono ou um gás hidrocarboneto, a temperaturas que variam entre 500 e 1200 ° C. O tamanho da partícula catalisadora determina o tamanho da estrutura gráfica de CNFs. O tamanho das partículas de catalisador está geralmente na gama de 10-100 nm, o que determina o diâmetro exterior dos CNFs produzidos. O ângulo em que os "copos" são orientados afeta fortemente as propriedades de CNFs. Na Figura 2.10 é apresentado um esquema deste processo.

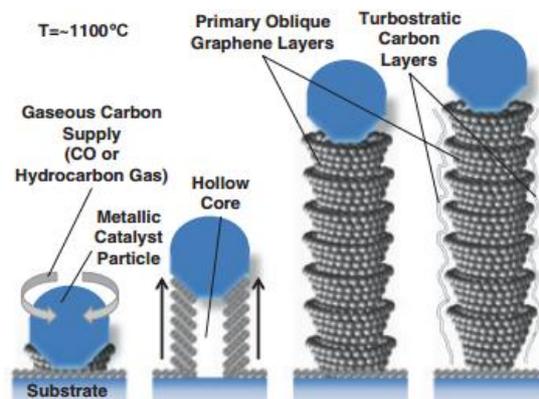


Figura 2.10: Esquema do processo da deposição química em fase de vapor (CVD) com a ilustração das CNFs em camadas (Zhang, Aboagye, Kelkar, Lai, & Fong, 2014).

- Eletrofiação de CNFs (ECNFs): O processo de electrospinning é ilustrado esquematicamente na Figura 2.11. Neste procedimento uma seringa de agulha de ponta fina é usada para o processo sol-gel (dispersão espontânea da substância sólida numa líquida). À gota na ponta da agulha é aplicada uma alta voltagem, o que faz com que a solução seja expelida da agulha para o alvo. Quando a tensão superficial é suficientemente elevada para a solução impedir a quebra em uma

gota fina, desenvolve-se uma estrutura fibrosa e recolhe-se no alvo. Os precursores poliméricos utilizados neste processo incluíram PAN, celulose e *pitch*, sendo o PAN o mais desejável pelas suas propriedades mecânicas, bem como a sua facilidade de fabrico e produção em massa.

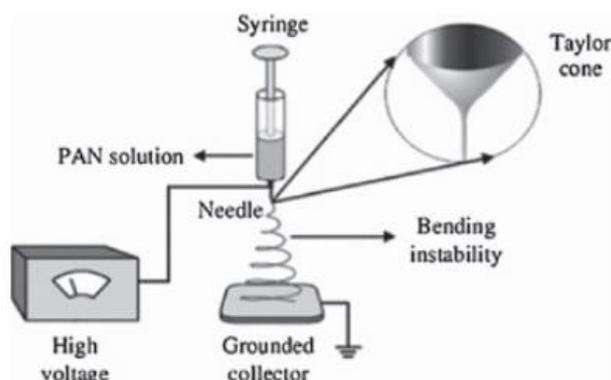


Figura 2.11: Esquema da Eletrofiação de fibras PAN, que geralmente é seguida pela estabilização e carbonatação de forma a criar as CNFs (Zhang, Aboagye, Kelkar, Lai, & Fong, 2014).

#### 2.2.4 Técnicas de dispersão de nanofibras de carbono em matrizes cimentícias

A dispersão de nanomateriais é um dos principais factores que influenciam significativamente as propriedades dos nanocompósitos. Os nanomateriais, como as nanofibras (CNF) e os nanotubos de carbono (CNT), têm uma grande tendência para se aglomerarem devido à presença de forças atrativas (Van der Waals). A infiltração de aglomerados com matrizes é muito difícil e a sua presença é deste modo a fonte de potenciais defeitos nos nanocompósitos. O processo de desaglomeração e consequente distribuição dos nanomateriais nas matrizes ou solventes é chamado de dispersão. A dispersão ocorre devido à separação abrupta dos aglomerados em pequenos fragmentos submetidos a um elevado stress (ruptura) ou devido ao desapego contínuo de pequenos fragmentos a um stress mais baixo (erosão), comparativamente com a situação anterior. O comportamento de dispersão de CNT e CNF depende de alguns factores críticos como o comprimento dos nanomateriais, da sua densidade de emaranhamento, volume de fração, viscosidade da matriz e forças atrativas. Têm sido experimentados diferentes métodos químicos para obter uma dispersão homogénea de materiais de carbono em água e vários polímeros, tais como o uso de solventes, surfactantes, ácidos, aminas, flúores, plasma, micro-ondas, frações de matriz, funcionalidade não covalente, utilizando

polímeros de bloco, envolvendo polímeros conjugados e outras técnicas. Por outro lado, a técnica física básica usada para a dispersão de nanomateriais de carbono é a utilização de ultra-sons, que são usualmente utilizados com outros métodos, como os referenciados anteriormente (Bhattacharyya, Rana, Parveen, & Figueiro, 2013), (Parveen, Rana, & Figueiro, 2013).

De forma análoga ao que ocorre nas matrizes poliméricas, a dispersão de nanomateriais em matrizes cimentícias é um problema crítico que influencia substancialmente as propriedades da matriz. Deste modo, a dispersão de CNF / CNT direta na pasta de cimento durante a mistura não é viável, uma vez que o espessamento da pasta de cimento começa pouco depois da adição de água. O processo de mistura usando a misturadora Hobart, comumente utilizado para preparar pasta de argamassa, não pode assegurar uma correta dispersão nas matrizes cimentícias, resultando em encrustamentos dos nanomateriais na pasta hidratada. Para evitar esta situação, a estratégia geralmente empregada para a mistura das CNF/CNT nas matrizes cimentícias é dispersar estes nanomateriais inicialmente em água, seguidamente esta mistura é misturada com o cimento utilizando uma misturadora comum. No entanto, os métodos de dispersão de nanomateriais em água deve de ser cuidadosamente selecionado de modo a não interferir na hidratação e no processamento dos nanocompósitos de cimento. Muitos surfactantes são utilizados na dispersão dos nanomateriais de carbono com sucesso em matrizes poliméricas reportaram problemas na hidratação do cimento, aprisionaram ar na pasta de cimento e reagiram com a mistura redutora de água. A dispersão das CNF/CNT em matrizes cimentícias é ainda mais difícil que em matrizes poliméricas. Uma das razões para a dispersão pobre pode ser o tamanho dos grãos de cimento. As CNF/CNT são separadas pelos grãos de cimento, a presença de grãos de cimento maiores que a média leva ao desaparecimento dos nanomateriais em algumas áreas, assim como podem estar presentes em grande quantidade em determinadas áreas em que os grãos de cimento são menores que a média. Apesar da redução do tamanho das partículas de cimento através da moagem de grãos proporcionar uma melhoria na dispersão dos nanomateriais, os grãos pequenos têm diversas desvantagens como o elevado consumo de água, rachaduras térmicas, contrações químicas e autógenas, entre outras. Estudos de simulação 3D realizados recentemente sugeriram que uma distribuição homogênea de nanomateriais dentro do cimento só é possível quando as partículas de cimento também são distribuídas homogeneamente sem qualquer aglomeração. Portanto, para melhorar a dispersão de nanomateriais de carbono em matrizes de cimento, diversas abordagens têm sido empregadas até o momento,

considerando cuidadosamente as questões discutidas acima, e podem ser categorizadas em técnicas físicas e químicas, conforme discutido nas seções a seguir. Contudo, deve notar-se que as várias vias químicas (tais como o uso de surfactante, polímeros ou funcionalização) não podem dispersar diretamente nanomateriais na água; em vez disso, ajudam no processo de dispersão molhando os nanomateriais com água e melhorando a estabilidade da dispersão. Por conseguinte, estas vias químicas são sempre utilizadas em combinação com as vias físicas (tais como ultra-sons), que podem dispersar diretamente os nanomateriais (Bhattacharyya, Rana, Parveen, & Figueiro, 2013), (Parveen, Rana, & Figueiro, 2013). Na Figura 2.12 é representada a dispersão individual de CNFs.

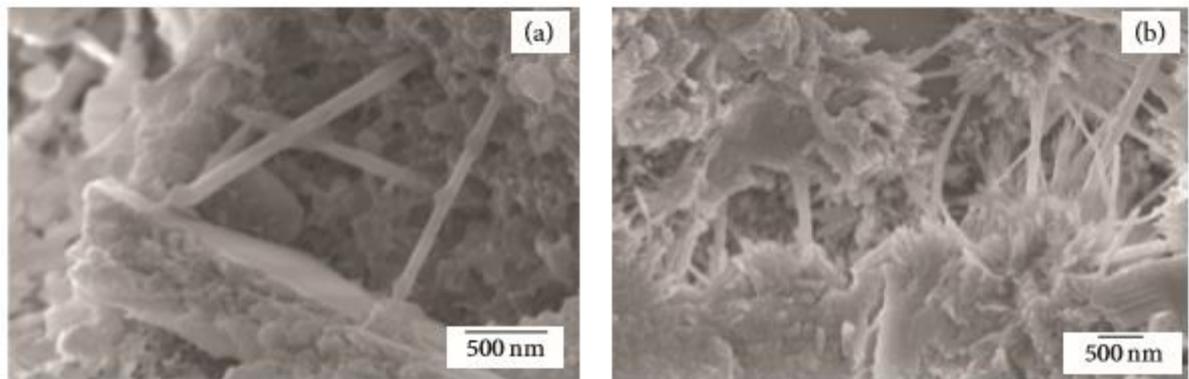


Figura 2.12: Superfície de fratura de nanocompósitos de CNF/cimento, mostrando CNFs individualmente dispersas (Parveen, Rana, & Figueiro, 2013)

#### 2.2.5 Propriedades mecânicas e elétricas das nanofibras de carbono

As nanofibras são caracterizadas pelas suas excelentes propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, pois possuem elevada condutividade térmica, boa resistência mecânica, elevada área superficial e excelente estabilidade química. Além disso, o baixo custo de CNF em comparação com os nanotubos de carbono e sua disponibilidade em grandes quantidades, tornam estes nanomateriais ainda mais interessantes. Geralmente, o tamanho das nanofibras de carbono se encontra entre 60-200 nm de diâmetro. O módulo de Young é de aproximadamente 600 GPa e esta apresenta uma resistência à tração que pode variar de 2,5 a 3,5 GPa. As nanofibras de carbono possuem também a capacidade de lubrificação e de anticorrosão, mesmo quando submetida a temperaturas elevadas (Oliveira J. , 2016). A Tabela 2.4 descreve as principais propriedades mecânicas das CNFs. As propriedades mecânicas tanto das VGCNF como das ECNF são em função dos métodos de processamento, diâmetro da fibra e tipo de carga utilizados para a análise mecânica.

Tabela 2.4: Propriedades das nanofibras de carbono (CNF) em função do processo de produção (Poveda & Gupta, 2016).

<b>Autor</b>	<b>Tipo de Fibra</b>	<b>Diâmetro (nm)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (GPa)</b>
Endo et al.	VGCNF	300-1000	100-300	1,25-3
Ozkan et al.	VGCNF	150	180-245	2,35-2,9
Zhou et al.	ECNF	300	-	0,597-0,969
Arshad et al.	ECNF	150-500	80-191	1,86-3,52

### 2.2.6 Aplicações de nanofibras de carbono

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

Contudo, as nanofibras ainda têm um grande entrave devido ao seu preço demasiado elevado em comparação com as fibras convencionais. Outro aspeto negativo, é que devido ao seu tamanho microscópico, levantam muitas preocupações sobre possíveis riscos para a saúde devido à inalação de fibras que possam ocorrer. Apesar destes dois aspetos negativos, devido às suas qualidades excepcionais, há um esforço contínuo para encontrar um equilíbrio entre as vantagens e os custos (Oliveira J. , 2016).

## 2.3 Monitorização de estruturas a partir de fibras

A Monitorização de Integridade Estrutural (SHM – structural health monitoring) traduz-se pelo acompanhamento contínuo de uma estrutura oferecendo um diagnóstico do "estado" dos materiais constituintes. Esta informação ajuda na deteção oportuna de anomalias no desempenho de estruturas. Graças à dimensão temporal da monitorização, é possível considerar a base de dados de história completa da estrutura, e pode também proporcionar um prognóstico (evolução dos danos, vida residual, etc.). Se considerarmos

apenas a primeira função, o diagnóstico, poderíamos estimar que o SHM é uma nova e melhor maneira de fazer uma avaliação não-destrutiva. 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) (Balageas, 2006).

Dos sistemas de monitorização por fibras destacam-se, a monitorização através de materiais condutores elétricos e por fibras óticas, que são sistemas baseados em sensores.

### 2.3.1 Monitorização através de materiais condutores

As propriedades condutoras elétricas das fibras de carbono quando inseridas em matrizes cimentícias podem funcionar como sensores elétricos na monitorização da integridade estrutural.

Para proceder à monitorização pode recorrer-se à análise do efeito piezoresistivo que ocorre quando as fibras são adicionadas na matriz cimentícia criando uma ligação com a mesma. O efeito piezoresistivo pode ser definido pela mudança da resistência elétrica de um material quando sujeito 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. 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 (Beeby, Ensel, Kraft, & White, 2004).

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

Em que:

$\Delta R$  – 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.

A resistividade acompanha o comportamento da carga aplicada, sendo que a resistividade aumenta linearmente com a carga aplicada sob tração e diminui linearmente com carga aplicada sob compressão. Este fenómeno permite a utilização do sistema estrutural em estudo, como um sensor de deformação, pois a resistência elétrica medida pode ser relacionada com a tensão.

No entanto, há que referir que este sistema de monitorização, apesar de ser uma solução muito interessante, é sempre dependente dos fatores externos para o seu correto funcionamento.

Outra questão a ter em atenção é se forem introduzidos outros materiais ou sistemas condutores em ambientes aquosos ou húmidos. Nestes ambientes é preciso revestir componentes/materiais elétricos com substratos isolantes (Duan, Wang, & Quek, 2010). 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.

### 2.3.2 Monitorização através de fibra ótica

O constante desenvolvimento da tecnologia das fibras óticas, em associação com os avanços nos materiais compósitos, abriu um novo campo para as estruturas inteligentes. O fácil processamento dos materiais compósitos permite o bom embebedimento dos sensores em fibra ótica no material durante o fabrico. As estruturas assim obtidas são capazes de sentir alterações, de as interpretar e de reagir às mesmas.

Os sensores em fibra ótica são classificados de acordo com os parâmetros da luz a ser modulados (intensidade, fase ou comprimentos de onda). Dois tipos de sensores evidenciaram-se ao demonstrarem ser mais apropriados para aplicações em materiais compósitos inteligentes. Um deles é o interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot e o outro as redes de Bragg em fibra ótica, sendo o último mais relevantes pela facilidade de utilização em relação ao primeiro.

A monitorização através de fibra ótica baseado em tecnologia Bragg em Fibra ótica (FBG), foi concebida 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 (Oliveira, Ramos, Frazão, & Marques, 2007).

O FBG pode ser definido como uma microestrutura capaz de provocar uma alteração periódica no índice de refração do núcleo da fibra. Esse fenómeno quando associado 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. A Figura 2.13 ilustra a monitorização em tempo real com uma fonte óptica de banda larga de érbio para iluminar os sensores FBG, um analisador de espectro ótico para

ver as variações do comprimento de onda de Bragg, um sistema AC de interrogação dos sensores de Bragg, e um computador com um sistema de aquisição de dados para poder observar com flexibilidade os dados, processar, e armazenar toda a informação observada. Nesta representação é ainda ilustrado um sensor de deformação elétrico conectado a um sistema de aquisição de dados para a comparação dos valores da deformação medidos pelo sensor FBG (Oliveira, Ramos, Frazão, & Marques, 2007).

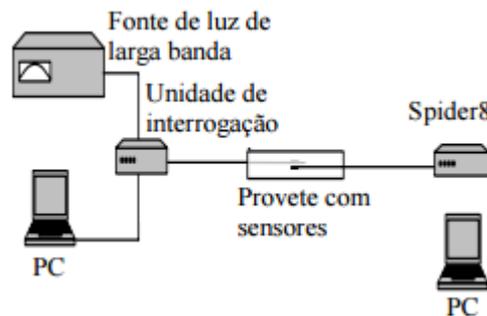


Figura 2.13: Representação esquemática do sistema óptico FBGs (“Spider 8”: sistema de aquisição de dados) (Oliveira, Ramos, Frazão, & Marques, 2007).

Os FBGs utilizam o comprimento de onda como mecanismo de leitura em detrimento da intensidade da luz.

As soluções de controlo de FBG têm se revelado particularmente eficazes quando aplicadas a estruturas de grande escala, permitindo a implantação de centenas de sensores para a medição a longo prazo de diferentes parâmetros físicos (Oliveira, Ramos, Frazão, & Marques, 2007).



## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Introdução e plano experimental**

No presente capítulo são apresentados e descritos os materiais utilizados na concepção do compósito cimentício. Os materiais utilizados foram fornecidos pela *Fibrenamics* e pelo Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, assim como os respetivos ensaios sobre os materiais produzidos.

Neste capítulo são também descritos os procedimentos utilizados para análise do seu comportamento em termos elétricos, sob ação de uma carga uniaxial.

A variação das quantidades e dos tipos de cada componente, permite avaliar as propriedades e o grau de importância que cada constituinte tem no comportamento mecânico final dos varões compósitos híbridos fibra/aço. Um dos objetivos deste trabalho é encontrar uma solução em que as propriedades de cada material sejam utilizadas no seu máximo, obtendo-se uma solução com melhor desempenho.

### **3.2 Materiais**

Os materiais a seguir descritos são os principais intervenientes na preparação do compósito cimentício. O ligante utilizado foi o cimento, ao qual foram adicionadas as nanofibras e fibras curtas de carbono. Também são especificados os materiais utilizados na dispersão dos nanofibras 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 42,5 R produzido pela empresa SECIL, e foi 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 caracterizado pelo seu elevado desempenho, com grande reatividade e rápido desenvolvimento de resistência mecânica. Este tipo de cimento é usualmente utilizado na produção de betão de grande exigência estrutural, prefabricação pré-esforçada ou com elevada rotatividade de moldes. No depósito do cimento certificou-se a viabilidade do

mesmo, uma vez que para obter as diferentes amostras com a melhor qualidade possível é necessário que o cimento não se apresente demasiado seco, inviabilizando a sua utilização.

### 3.2.2 Fibras curtas de carbono

Neste estudo foram utilizadas fibras de carbono com a designação comercial de Tenax-e HTA 40, tendo sido fornecida pela Fibrenamics. Pode observar-se as propriedades mecânicas das fibras de carbono Tenax-HTA 40 na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas das fibras de carbono.

<b>Fibra de Carbono</b>	<b>Massa Volúmica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Diâmetro equivalente (mm)</b>	<b>Extensão de rotura (%)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (GPa)</b>
Tenax-e HTA40	1,77	0,007	1,7	240	4,1

Para a conceção das diferentes amostras foram utilizadas diferentes quantidades de fibras de carbono, sendo que a percentagem de fibras utilizada em cada conjunto de amostras foi calculada em relação ao cimento utilizado em massa. A fibra de carbono foi devidamente cortada num comprimento de 5 mm, como se pode observar na figura 3.1.



Figura 3.1: Fibras curtas de carbono utilizadas no trabalho laboratorial.

### 3.2.3 Nanofibras de carbono

Neste estudo foram utilizadas nanofibras de carbono com a designação de CNF da SIGMA, tendo sido fornecidas pela Fibrenamics. Pode observar-se as propriedades físicas das nanofibras utilizadas na seguinte tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades das CNFs de acordo com o fabricante.

<b>Tipo de CNF</b>	<b>Diâmetro Exterior (nm)</b>	<b>Comprimento (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Superfície específica (<math>\text{m}^2/\text{g}</math>)</b>	<b>Impureza (%)</b>
VGCNF	125-150	50-100	54	0

Para a conceção das diferentes amostras foram utilizadas diferentes quantidades de fibras de carbono, sendo que a percentagem de nanofibras utilizada em cada conjunto de amostras foi calculada em relação ao cimento utilizado em massa. Na figura 3.2 é possível ter uma perceção do aspeto do nanomaterial utilizado.



Figura 3.2: Nanofibras de carbono utilizados no trabalho laboratorial (Laboratório de Nanomateriais da Fibrenamics).

### 3.2.4 Outros materiais

Na realização do trabalho laboratorial, foram também utilizados outros materiais. Para a conceção das amostras, inicialmente realizaram-se soluções aquosas, para facilitar a dispersão das nanofibras e das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia, na qual foi

utilizada água destilada, o químico dispersante Pluronic F-127 e o antiespumante fosfato tribulito (TBP). A figura 3.3 ilustra a sua estrutura química de acordo com o fabricante SIGMA.

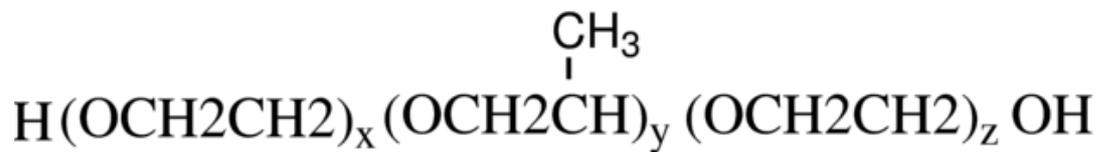


Figura 3.3: Estrutura química do Pluronic F-127.

No compósito de matriz cimentícia com fibras curtas e nanofibras de carbono foram utilizados pedaços de fita de cobre, com ambos os lados da superfície condutores, retangulares cortados nas dimensões 30x15 [mm]. A fita utilizada foi utilizada como superfície condutora para a medição do comportamento da resistência elétrica. A figura 3.4 ilustra uma fita de cobre semelhante à utilizada no trabalho laboratorial. Todos os materiais referenciados foram fornecidos pela Fibrenamics.



Figura 3.4: Fita de cobre utilizada.

### 3.3 Métodos

Com o intuito de analisar a variação da resistência elétrica com a aplicação de cargas de tração axial do compósito de cimento com nanofibras 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.

#### 3.3.1 Resistência elétrica

A resistência elétrica pode ser definida como a capacidade de um material se opor à passagem da corrente elétrica. No presente caso de estudo, a componente da resistência

elétrica foi medida 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.

As medições da resistência elétrica foram realizadas utilizando corrente alternada, uma vez que neste tipo de corrente o fluxo de elétrons através do condutor muda de direção periodicamente, mudança essa provocada por uma mudança de potencial entre as extremidades do condutor, portanto não existe uma perda significativa de corrente como existira na corrente contínua (Campilho, 2014).

A técnica utilizada foi a quatro-sondas, conhecida como “*four-probe*”, em que a corrente flui através de dois elétrodos exteriores enquanto que os dois elétrodos interiores medem a tensão. A figura 3.6 ilustra a posição dos elétrodos no provete.

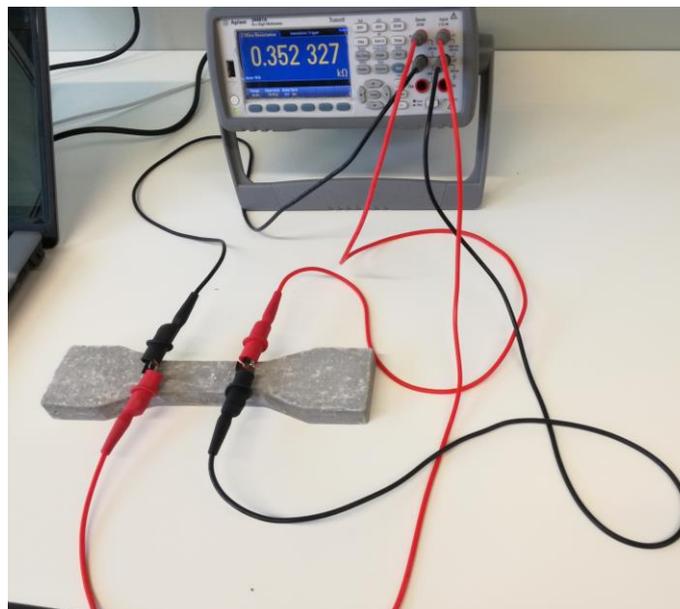


Figura 3.6: Representação da posição dos elétrodos no provete.

Após a obtenção dos valores da resistência elétrica ( $\Omega$ ) 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

No ensaio de tração, o provete é submetido a um esforço (carga de tração uniaxial) que tende a alongá-lo ciclicamente ou até à rutura. Uma vez que se objetivava compreender o efeito provocado pelo reforço de nanofibras e fibras curtas de carbono, recorreu-se a este ensaio para perceber as suas mais valias no comportamento do compósito cimentício. A figura 3.7 representa a aplicação de carga de tração uniaxial no provete utilizado.



Figura 3.7: Representação do Set-up do ensaio.

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

Os provetes foram imobilizados pelas extremidades nas amarras da máquina, uma conectada no atuador e outro fixado na estrutura de reação, distanciados aproximadamente 160 mm. O ensaio realizou-se com uma velocidade de carregamento de 0.5 mm/min. Utilizou-se o software *Dynatest* como *set-up* para obter os valores da carga aplicada e correspondente deslocamento automaticamente convertidos em ficheiros de cálculo *Excel*.



## **4. PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM NANOFIBRAS E FIBRAS CURTAS DE CARBONO**

### **4.1 Introdução**

No Capítulo IV irá descreve-se a produção do compósito de matriz cimentícia com nanofibras e fibras curtas de carbono.

Para a produção deste compósito é importante salientar a relevância de alcançar a melhor combinação possível das fibras de carbono/nanofibras/argamassa através da dispersão das fibras curtas de carbono e das nanofibras adequada em água. Posteriormente é que se utiliza essa solução aquosa na confecção da argamassa.

Como já foi referido, as técnicas de dispersão variam desde métodos químicos a métodos físicos, assim como a combinação destes dois métodos. Para a realização do presente trabalho a técnica utilizada foi a combinação dos dois métodos. Esta é a melhor opção, pois a combinação destes vem anular algumas desvantagens que possam ocorrer quando só é utilizado um dos métodos. Esta combinação de métodos, de uma forma sucinta, consiste numa combinação de químicos dispersantes, agitação magnética e ultrassons.

### **4.2 Combinação matriz cimentícia/SCF**

O material compósito de matriz cimentícia com fibras curtas de carbono resulta da combinação matriz cimentícia/SCF. As fibras curtas de carbono são distribuídas aleatoriamente no cimento, para facilitar a sua dispersão, além disso foi confeccionada uma solução aquosa com adição de agentes químicos, de modo a obter uma boa dispersão com os métodos 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 a dispersão das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia utilizou-se o método químico de adição de surfactantes, que são agentes químicos que têm a capacidade de alterar propriedades superficiais e internas de um líquido. Portanto, 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, sendo estas as quantidades utilizadas ao longo de todo o trabalho laboratorial.

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

$$TBP(ml) = \frac{Plu(g) * 0,97(densidade)}{100} \quad (4.2)$$

Na Tabela 4.1 são apresentadas as quantidades dos químicos utilizados para a solução aquosa de referência.

Tabela 4.1: Quantidades dos químicos utilizados na solução aquosa.

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 inicialmente pesada, numa balança de precisão, e a água destilada e o TBP foram medidos volumetricamente. Seguidamente, adicionaram-se os 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 do Pluronic F-127 e do TBP na água destilada

As soluções aquosas realizadas permaneceram em repouso durante 24 horas e só depois foram utilizadas na conceção 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.

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

A Tabela 4.2 apresenta as quantidades de fibras curtas de carbono utilizadas no trabalho laboratorial.

Tabela 4.2: Quantidades de fibras de carbono utilizadas.

<b>Cimento (g)</b>	<b>SCF (%)</b>	<b>SCF (g)</b>
900	0,25	2,25
	0,5	4,5
	0,75	6,75

No processo da conceção das diferentes pastas cimentícias, para auxiliar a dispersão das fibras curtas de carbono, a maior parte das fibras foram misturadas na solução aquosa, enquanto que as restantes foram manualmente misturadas com o cimento seco. 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 4.2 apresenta a misturadora de eixo vertical.



Figura 4.2: Misturadora de eixo vertical (Mateus, 2013).

### 4.3 Combinação matriz cimentícia/CNF/SCF

O material compósito reforçado à multiescala resulta da combinação matriz cimentícia/CNF/SCF, 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, as nanofibras estão a uma nanoescala (nm).

Para a otimização da combinação matriz cimentícia/SCF recorreu-se à técnica química de adição de surfactantes, para facilitar a dispersão das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia. Para a combinação matriz cimentícia/CNF/SCF é necessário a dispersão das nanofibras de carbono em água, combinando métodos químicos e físicos. O processo experimental foi realizado no Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics e contou a colaboração da Doutora Shama Parveen.

#### 4.3.1 Dispersão de CNF e SCF

Para a dispersão nanofibras 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 novamente o Pluronic F-127, para facilitar a dispersão das fibras e das nanofibras 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, descritas na Tabela 4.1. As nanofibras foram calculados em relação ao cimento utilizado, de acordo com a equação 4.4.

$$CNF(g) = \frac{Cimento(g) * CNF(\%)}{100} \quad (4.4)$$

A Tabela 4.3 apresenta as quantidades de nanofibras de carbono utilizadas no trabalho laboratorial.

Tabela 4.3: Quantidades de CNF utilizadas.

<b>Cimento (g)</b>	<b>CNF (%)</b>	<b>CNF (g)</b>
900	0,1	0,9
	0,15	1,35

Seguidamente, as CNF, previamente pesadas 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 4.3 ilustra a dispersão das CNF na solução aquosa.



Figura 4.3: Dispersão das CNFs na solução aquosa.

Por fim, a solução foi levada ao equipamento de ultrassons com frequência de 45 kHz, durante 60 minutos, de modo a completar a homogeneização. As Figura 4.4 ilustra o equipamento de ultrassons com a solução aquosa com nanofibras.



Figura 4.4: Equipamento de ultrassons com duas soluções.

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 4.5 ilustra a solução aquosa com nanofibras e fibras curtas de carbono.



Figura 4.5: Dispersão das CNFs e SCFs na solução aquosa.

#### 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-boneshaped”, como se apresenta na Figura 4.6.

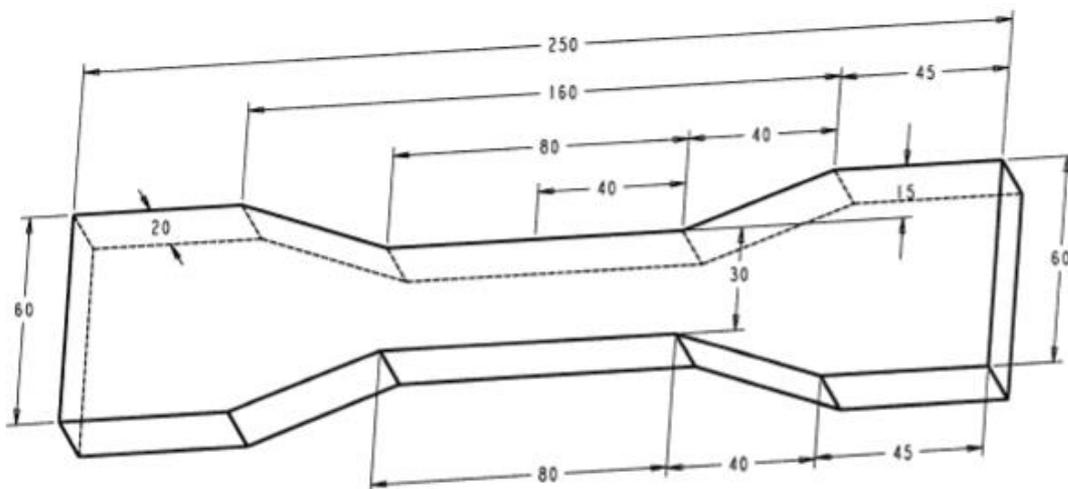


Figura 4.6: Estrutura do molde utilizado (Wen & Chung, 2000).

Para cada amostra foram realizados dois provetes, uma vez que a quantidade de cimento foi estipulada para utilização em dois moldes. Os cálculos das quantidades de nanofibras e fibras curtas de carbono foram efetuados de acordo com as equações 4.3 e 4.4.

#### 4.4.1 Colocação da pasta cimentícia nos moldes

Após a confecção da 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 4.7 ilustra um molde com a pasta cimentícia confeccionada.



Figura 4.7: Colocação da argamassa nos moldes.

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 exteriores (I1) foram colocadas a uma distância de 80 mm e as fitas interiores (V1) a 70 mm. A figura 4.8 ilustra a posição das fitas no provete.

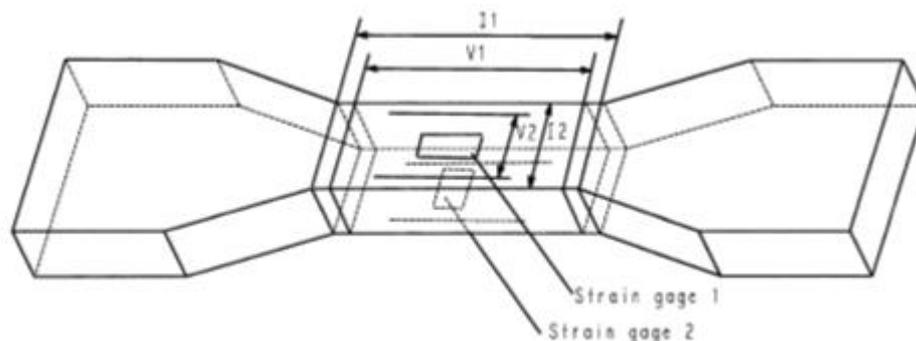


Figura 4.8: Distâncias fitas de cobre no provete (I1: 80 mm; V1:70 mm).

Seguidamente 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 4.8 ilustra o provete depois do processo de compactação.

Os moldes foram colocados na câmara de cura, durante 24 horas. Ao fim desse tempo, foi efetuada a desmoldagem dos moldes.

Os provetes foram imediatamente catalogados e colocados num recipiente em água, durante 28 dias, no Laboratório de Nanotecnologia da Fibrenamics.

## 5. COMPORTAMENTO ELÉTRICO SOB CARGA DE TRACÇÃO UNIAXIAL DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

### 5.1 Introdução

No Capítulo V, serão analisados e discutidos todos os resultados relativos ao comportamento elétrico sob carga de tração uniaxial, monotónica e cíclica, em que foram realizados 3 diferentes ensaios.

O primeiro ensaio a ser realizado foi a medição da resistência elétrica original ( $R_0$ ), permitindo a análise do comportamento da resistência elétrica sem qualquer tipo de carga de tração uniaxial aplicada no provete. Posteriormente, foram executados os ensaios de tração cíclicos e os ensaios de tração monotónicos, de modo a 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.

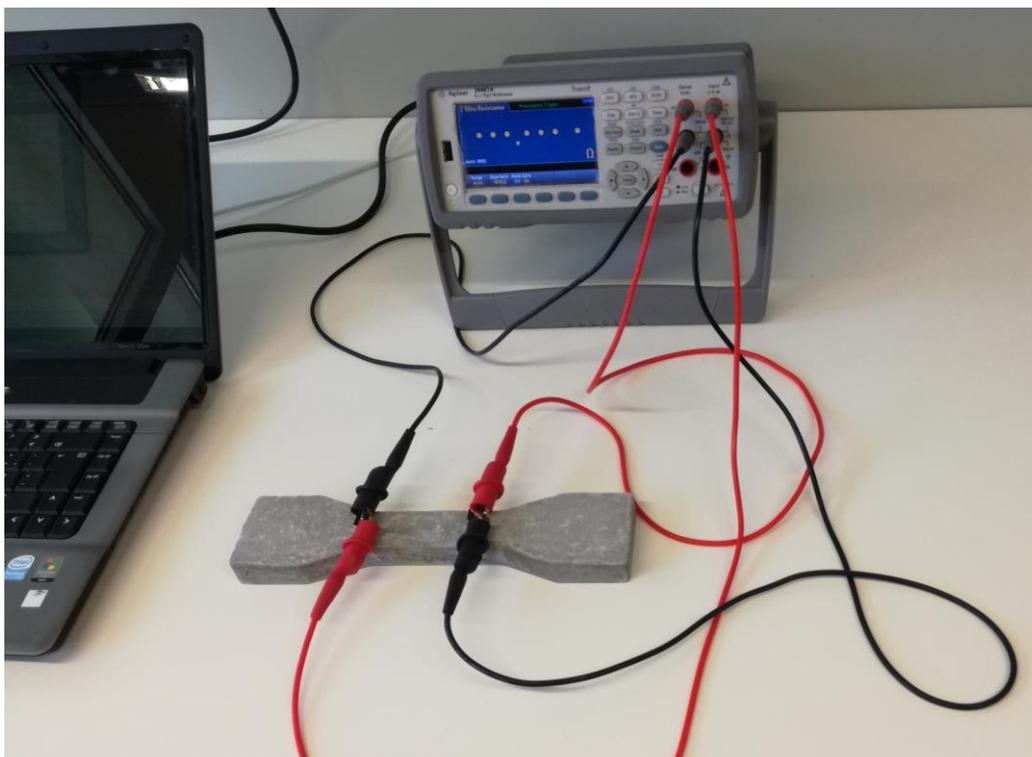


Figura 5.1: Ensaio de resistência elétrica original ( $R_0$ ); PC com software de análise MATLAB; Multímetro digital Agilent 34460A; Provet com elétrodos.

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, sem fibras, foi de  $8540,655 \Omega$ . O provete, sem qualquer tipo de material condutor, e tal como era espectável, resultou num valor bastante elevado de resistência elétrica em comparação com as outras amostras com materiais condutores elétricos.

Na tabela 5.1 são apresentadas as quantidades de SCF e CNF em cada amostra.

Tabela 5.1: Quantidades de SCF e CNF na matriz cimentícia

<b>Amostra</b>	<b>Presença de SCF</b>	<b>Presença de CNF</b>
<b>A1</b>	-	-
<b>A2</b>	-	-
<b>B1</b>	0,75 wt%	-
<b>B2</b>	0,75 wt%	-
<b>C1</b>	0,5 wt%	-
<b>C2</b>	0,5 wt%	-
<b>D1</b>	0,25 wt%	-
<b>D2</b>	0,25 wt%	-
<b>E1</b>	0,75 wt%	0,1 wt%
<b>E2</b>	0,75 wt%	0,1 wt%
<b>F1</b>	0,25 wt%	0,1 wt%
<b>F2</b>	0,25 wt%	0,1 wt%
<b>G1</b>	0,5 wt%	0,1 wt%
<b>G2</b>	0,5 wt%	0,1 wt%
<b>H1</b>	0,75 wt%	0,15 wt%
<b>H2</b>	0,75 wt%	0,15 wt%
<b>I1</b>	0,25 wt%	0,15 wt%
<b>I2</b>	0,25 wt%	0,15 wt%
<b>J1</b>	0,5 wt%	0,15 wt%
<b>J2</b>	0,5 wt%	0,15 wt%

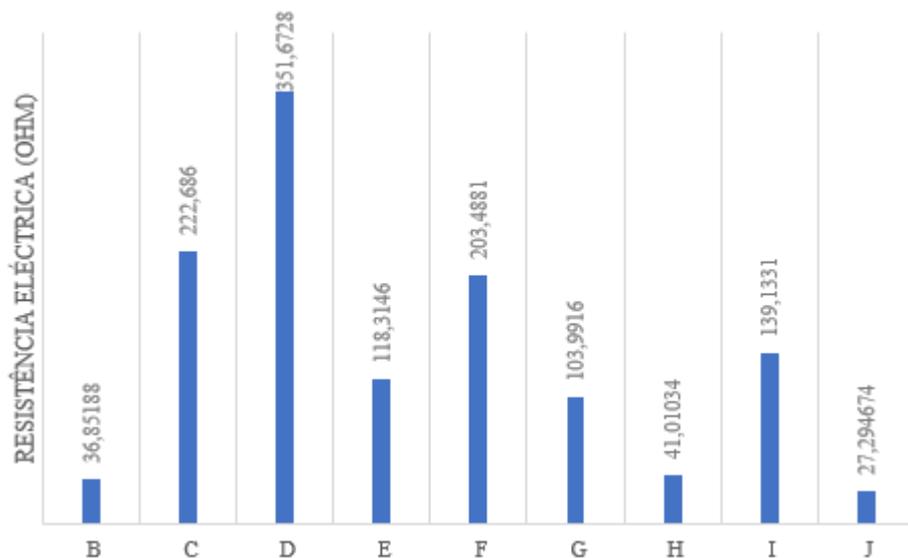


Figura 5.2: Resultados das melhores amostras da resistência elétrica inicial ( $R_0$ ).

Desde logo, foi possível observar que os nanofibras 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 D (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 351,47  $\Omega$ . Nas restantes composições os valores obtidos são relativamente próximos com os dos compósitos híbridos.

No compósito híbrido com SCF e 0.1% CNF, 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 nanofibras de carbono na matriz cimentícia fez com que a resistência elétrica diminuísse, uma vez que nas Amostras F (0.25% SCF + 0.1% CNF), G (0.5%SCF + 0.1% CNF) e E (0,75% SCF + 0,1% CNF) é visível uma clara diminuição em comparação com o compósito com fibras curtas de carbono.

No compósito híbrido com SCF e 0.15% CNF, o aumento da percentagem de fibras curtas de carbono resultou numa diminuição progressiva da resistência elétrica, diminuindo também com o aumento da percentagem de nanofibras de carbono a resistência elétrica em comparação com o observado no compósito híbrido com 0.1% CNF. No entanto o

valor mais baixo da resistência elétrica é quando o compósito é constituído por 0,5 % SCF e 0,15% CNF e não quando tem a maior quantidade de SCF e CNF. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de as nanofibras de carbono terem 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, resulta numa perda circunstancial das suas propriedades enquanto condutores elétricos. A Figura 5.3 ilustra a variação da resistência elétrica do compósito com fibras curtas de carbono, e dos compósitos híbridos com nanofibras e fibras curtas de carbono.

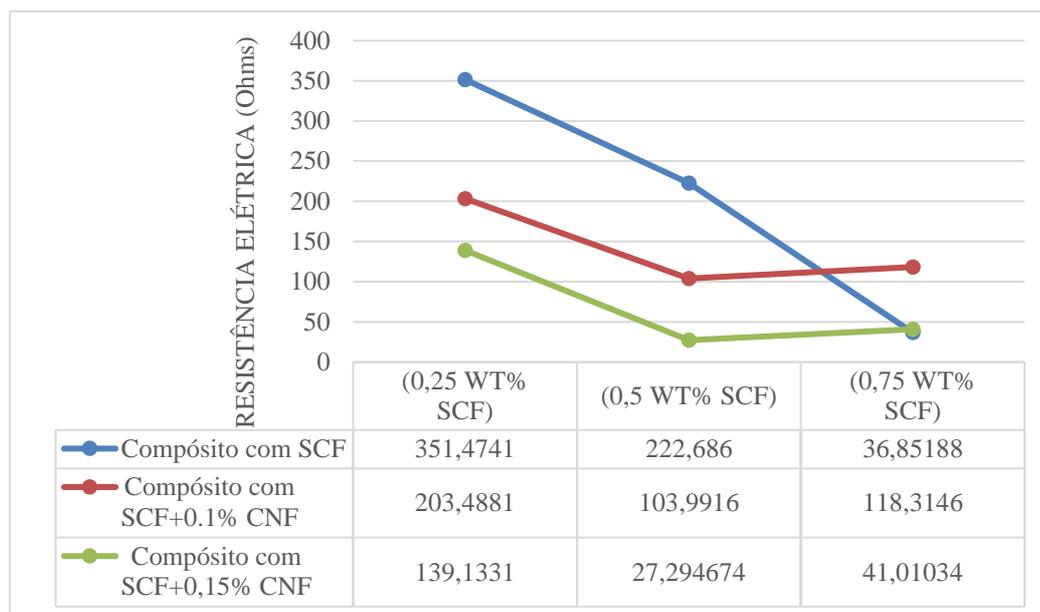


Figura 5.3: Variação da resistência elétrica original (R0).

De uma forma geral, foi possível observar que para o compósito híbrido com SCF e 0.15% CNF, 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, mas não tanto como no compósito com a percentagem de 0.5% SCF, provavelmente devido a alguma aglomeração das fibras. 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 5 ciclos, com uma taxa de carregamento de 20 segundos, para cada ciclo, com uma duração total do ensaio de 100 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.

### 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.

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

De todas as amostras realizadas, não é apresentado qualquer resultado na Amostra A com apenas cimento e na Amostra I (0.25% SCF + 0.15% CNF), uma vez que os provetes quebraram durante o ensaio. No caso da Amostra A deveu-se à fragilidade dos provetes uma vez que não possuíam qualquer reforço; no caso da Amostra I a má colocação dos provetes nas extremidades das amarras é a explicação mais plausível, uma vez que a dispersão dos nanofibras e das fibras curtas de carbono na matriz cimentícia foi conseguida nas restantes composições.

Os resultados obtidos e a sua discussão são respetivos ao provete com melhor desempenho de cada amostra, e as figuras 5.4 a 5.7 ilustram o comportamento da resistência elétrica sob uma carga de tração uniaxial.

- Amostra B (0.75% SCF):

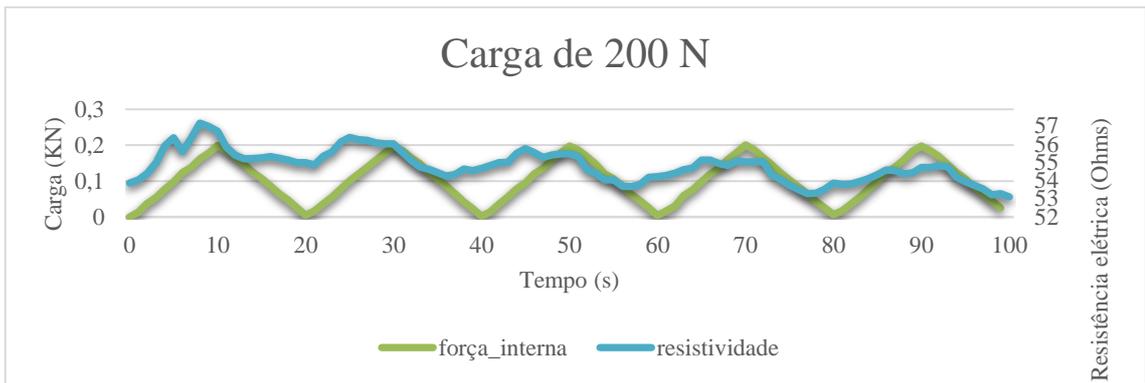


Figura 5.4: Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0,2 KN)

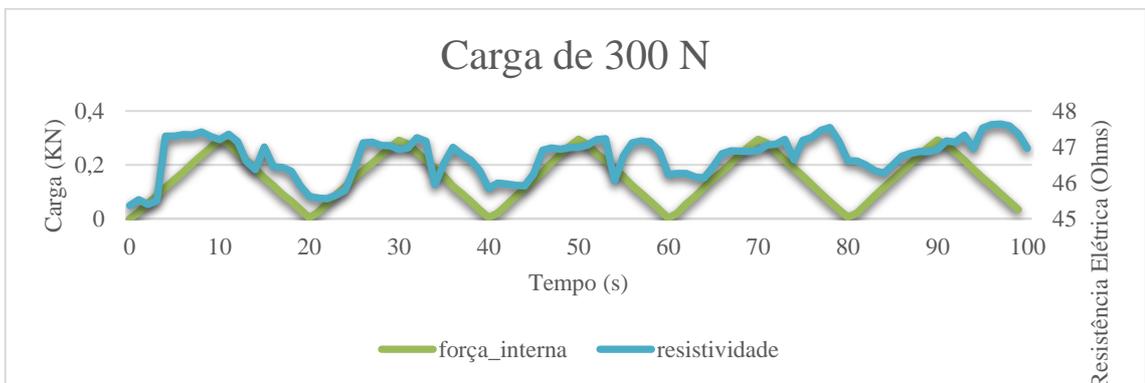


Figura 5.5: Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0.3kN)

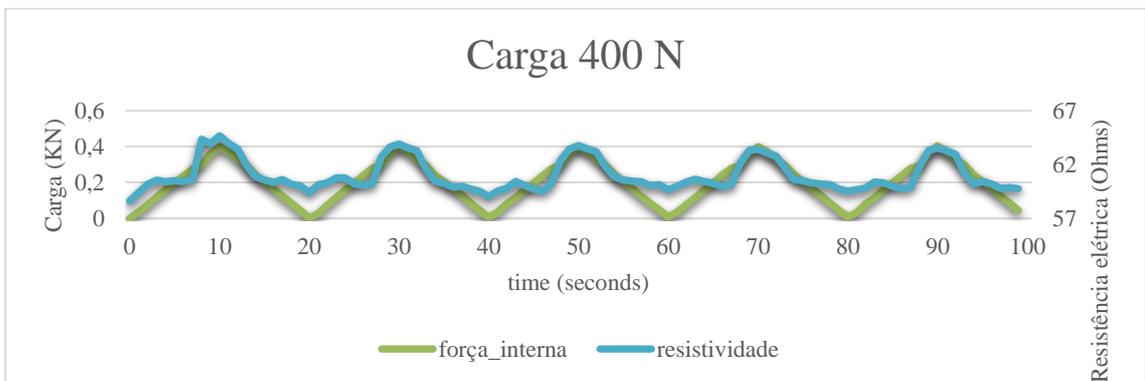


Figura 5.6: Ensaio de tração cíclico na Amostra B (0.4kN)

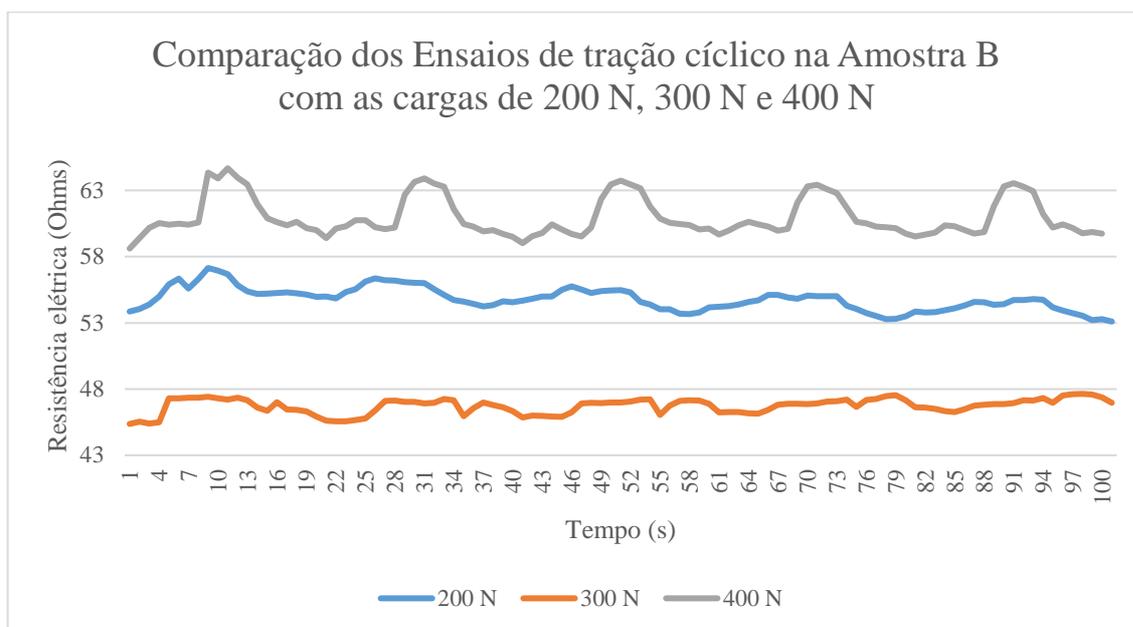


Figura 5.7: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra B com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N.

Tabela 5.2: Mudança fracional da resistência na Amostra B (0.75% SCF).

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	53,86	54,85	54,83	54,28	53,79
	Pico de Resistência	57,15	56,36	55,75	55,12	54,80
	Mudança fracional da resistência	5,75	2,68	1,66	1,53	1,83
0,3	Resistência Inicial	45,37	45,57	45,99	46,26	46,60
	Pico de Resistência	47,42	47,25	47,23	47,54	47,64
	Mudança fracional da resistência	4,32	3,56	2,61	2,70	2,17
0,4	Resistência Inicial	58,61	60,13	59,55	59,99	59,41
	Pico de Resistência	64,67	63,90	63,74	63,41	63,54
	Mudança fracional da resistência	9,37	5,90	6,58	5,41	6,09

Na Amostra B (0.75% 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 5.4 a 5.7.

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 afastamento das fibras, resultando num aumento da resistência elétrica, tal como se pode observar na Tabela 5.2.

- Amostra C (0.5% SCF):

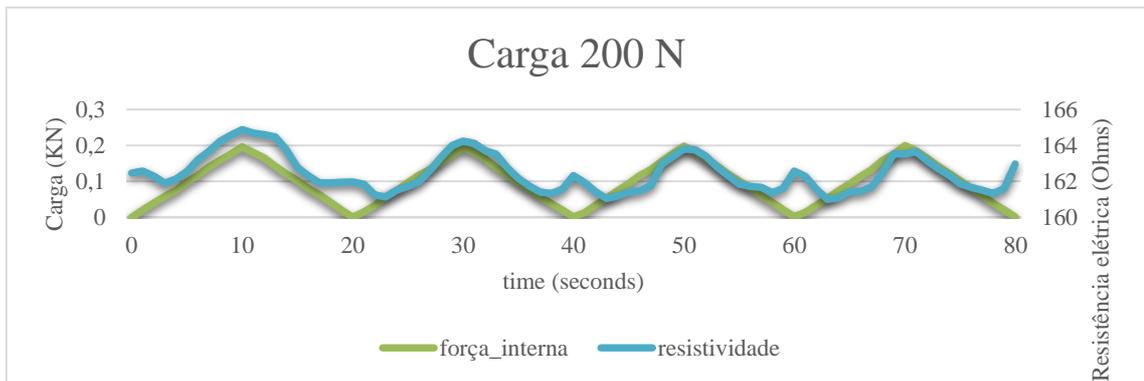


Figura 5.8: Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.2kN).

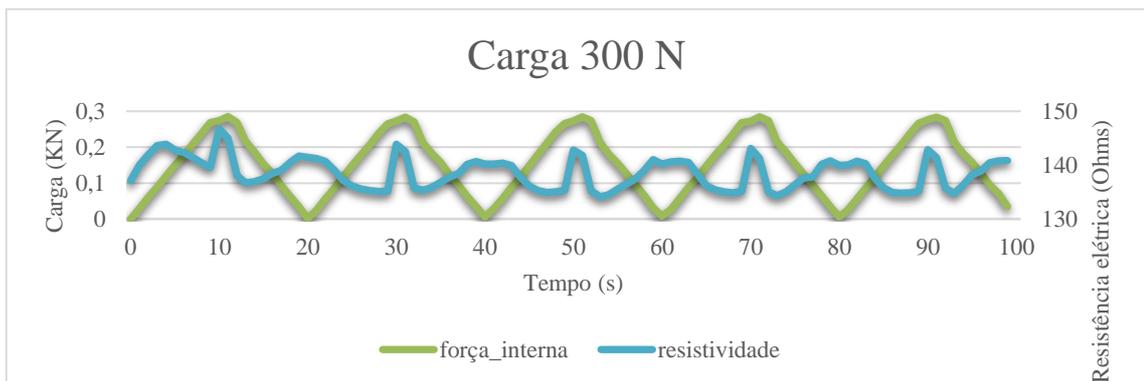


Figura 5.9: Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.3kN).

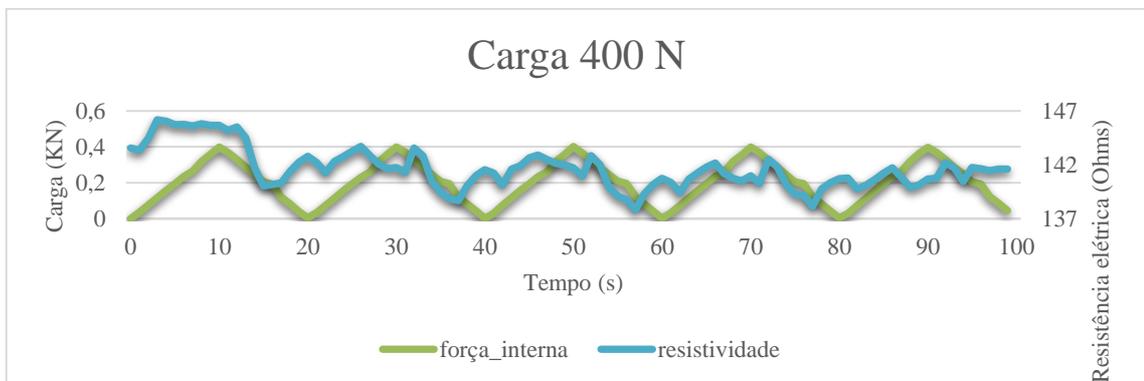


Figura 5.10: Ensaio de tração cíclico na Amostra C (0.4kN).

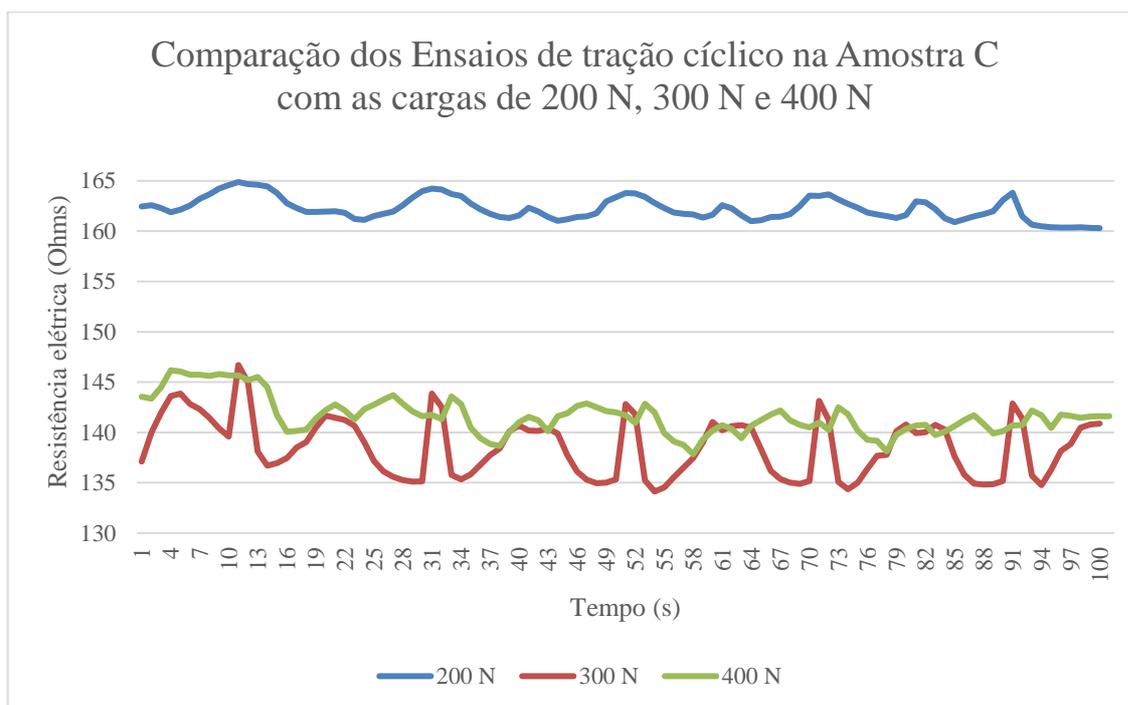


Figura 5.11: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra C com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N

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

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	162,46	161,84	161,94	162,28	162,87
	Pico de Resistência	166,88	164,24	163,79	163,67	163,82
	Mudança fracional da resistência	1,47	1,46	1,13	0,85	0,58
0,3	Resistência Inicial	137,11	141,23	140,17	140,63	140,01
	Pico de Resistência	146,70	143,87	142,82	143,12	142,88
	Mudança fracional da resistência	6,54	1,84	1,86	1,74	2,01
0,4	Resistência Inicial	143,56	142,19	141,21	140,36	140,76
	Pico de Resistência	146,18	143,73	142,89	142,51	142,19
	Mudança fracional da resistência	1,79	1,06	1,18	1,24	1,00

Na Amostra C (0.5% SCF) a resistência elétrica variou consideravelmente sob cargas de tração cíclicas. Tal como se pode observar nas \_\_\_ o comportamento enquanto sensor elétrico foi evidente em todos os ciclos, resultando numa mudança fracional da resistência superior a 1%.

Na carga de 0.2 kN foi observável a variação da resistência elétrica claramente, no entanto nas cargas seguintes, apesar de ser bastante perceptível a variação da resistência elétrica observou-se algumas irregularidades nos ciclos que provavelmente foram provocados pelo facto de o provete já ter vindo a ser esforçado na carga anterior, no entanto o comportamento enquanto sensor verificou-se, como já foi referido.

- Amostra D (0.25% SCF):

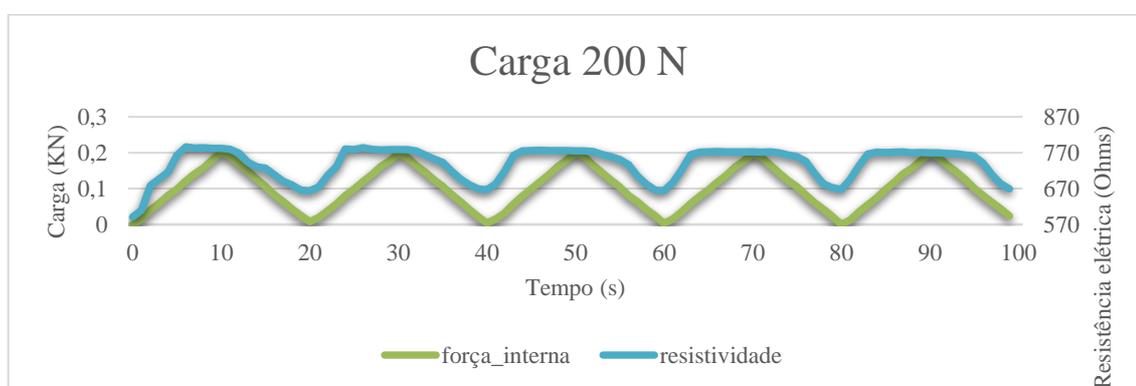


Figura 5.12: Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.2kN)

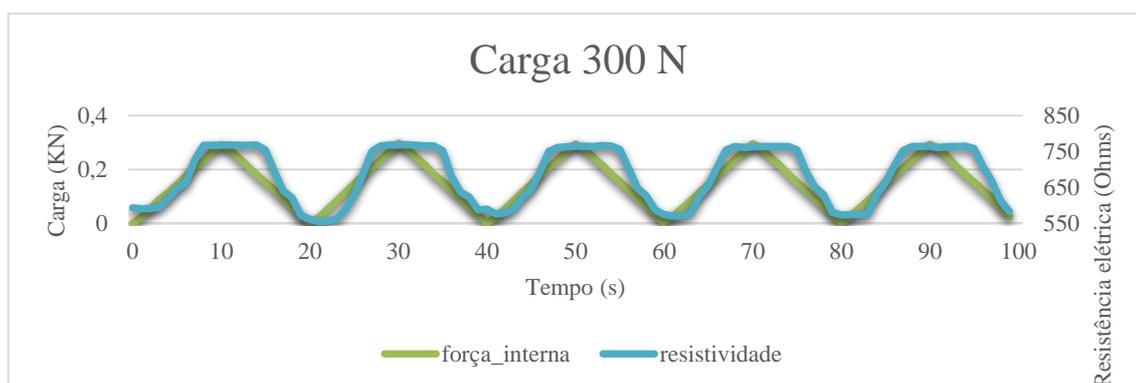


Figura 5.13: Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.3kN)

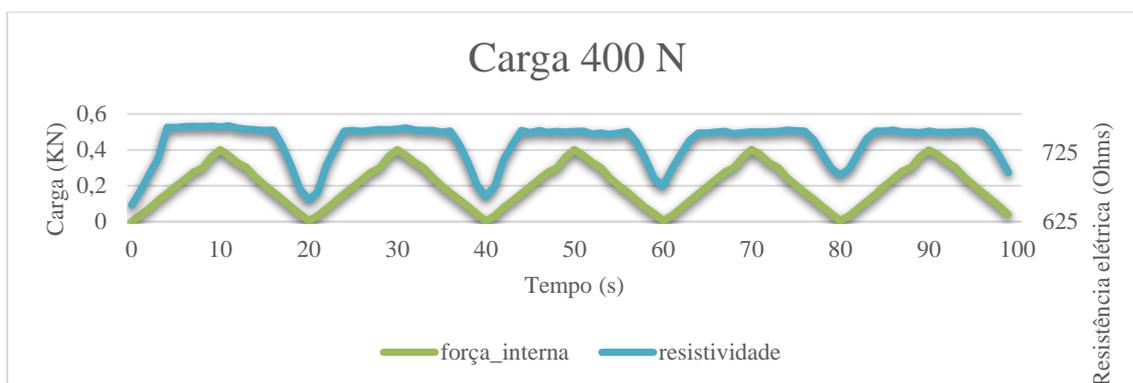


Figura 5.14: Ensaio de tração cíclico na Amostra D (0.4kN)

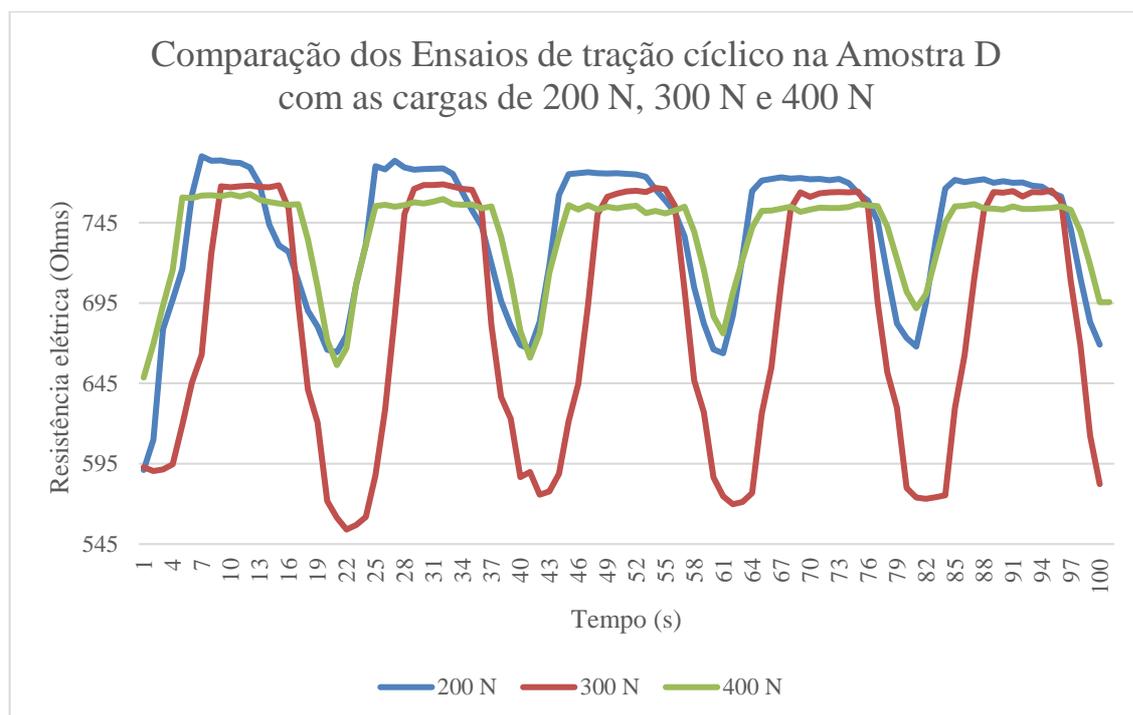


Figura 5.15: Comparação dos Ensaio de tração cíclico na Amostra D com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N

Tabela 5.4: Mudança fracional da resistência na Amostra D (0.25% SCF).

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	591,11	674,83	683,17	687,09	695,43
	Pico de Resistência	786,34	783,58	776,50	773,20	772,06
	Mudança fracional da resistência	24,83	13,88	12,02	11,14	9,93
0,3	Resistência Inicial	592,89	554,05	575,81	569,89	573,09
	Pico de Resistência	768,30	768,89	765,98	764,21	765,03
	Mudança fracional da resistência	22,83	27,94	24,83	25,43	25,09
0,4	Resistência Inicial	648,65	667,04	676,26	701,11	700,60
	Pico de Resistência	762,70	759,74	756,03	756,62	756,47
	Mudança fracional da resistência	14,95	12,20	10,55	7,34	7,38

Na Amostra D (0.25% 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 5.12 A 5.15.

Como se pode observar na Tabela 5.4 para todas as cargas de tração cíclica resultaram valores da mudança fracional da resistência bastante elevados, demonstrando um comportamento positivo enquanto sensor elétrico mais uma vez. 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, 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 reduzisse um pouco a sua eficácia, no entanto os valores continuaram muito bons.

- Amostra E (0.75% SCF + 0.1% CNF):

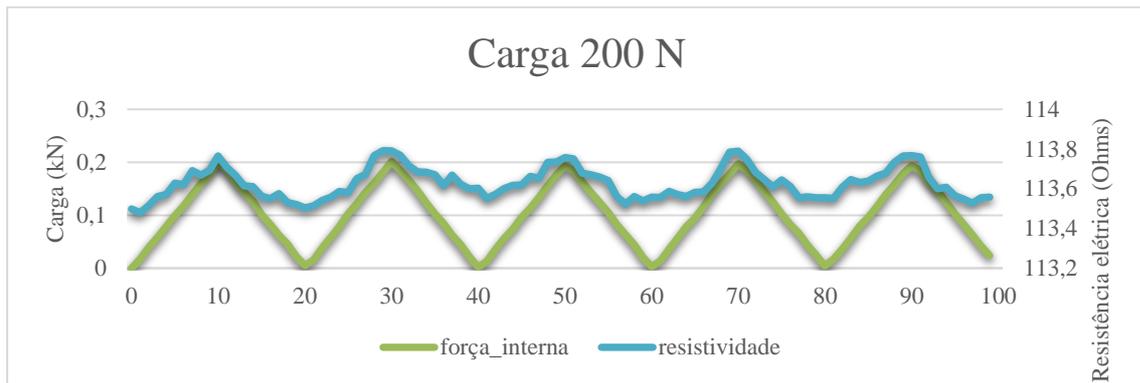


Figura 5.16: Ensaio de tração cíclico na Amostra E (0.2kN)

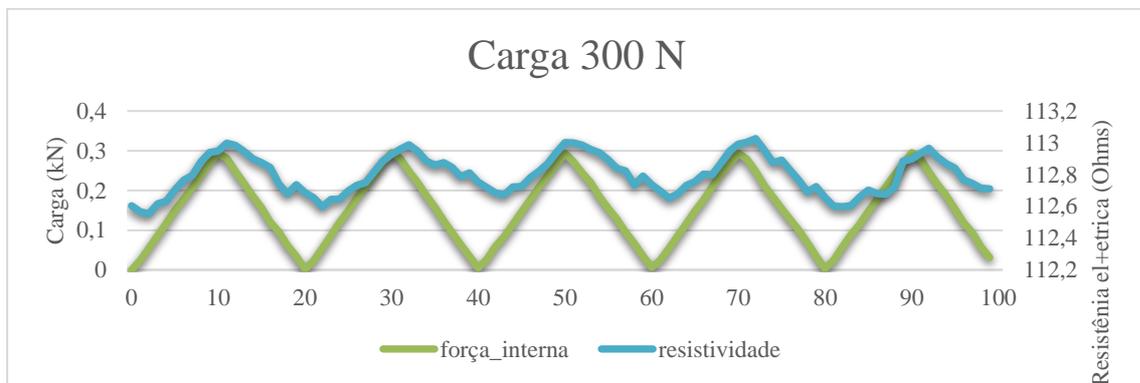


Figura 5.17: Ensaio de tração cíclico na Amostra E (0.3kN)

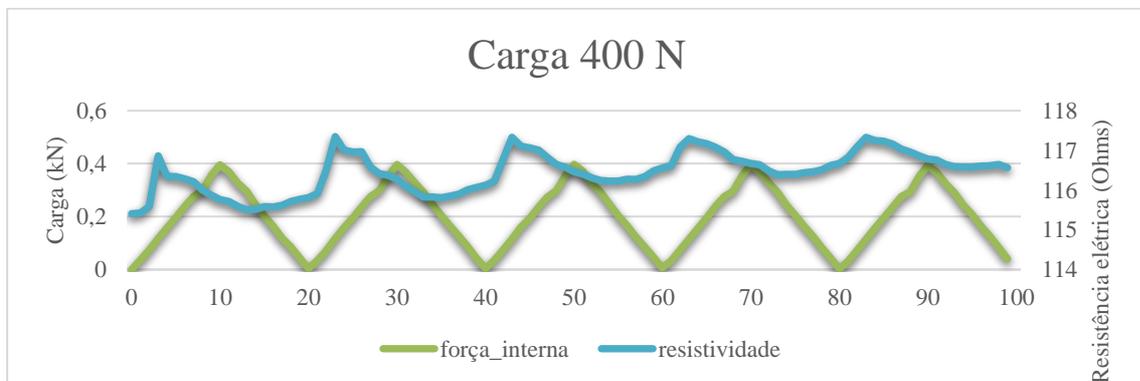


Figura 5.18: Ensaio de tração cíclico na Amostra E (0.4kN)

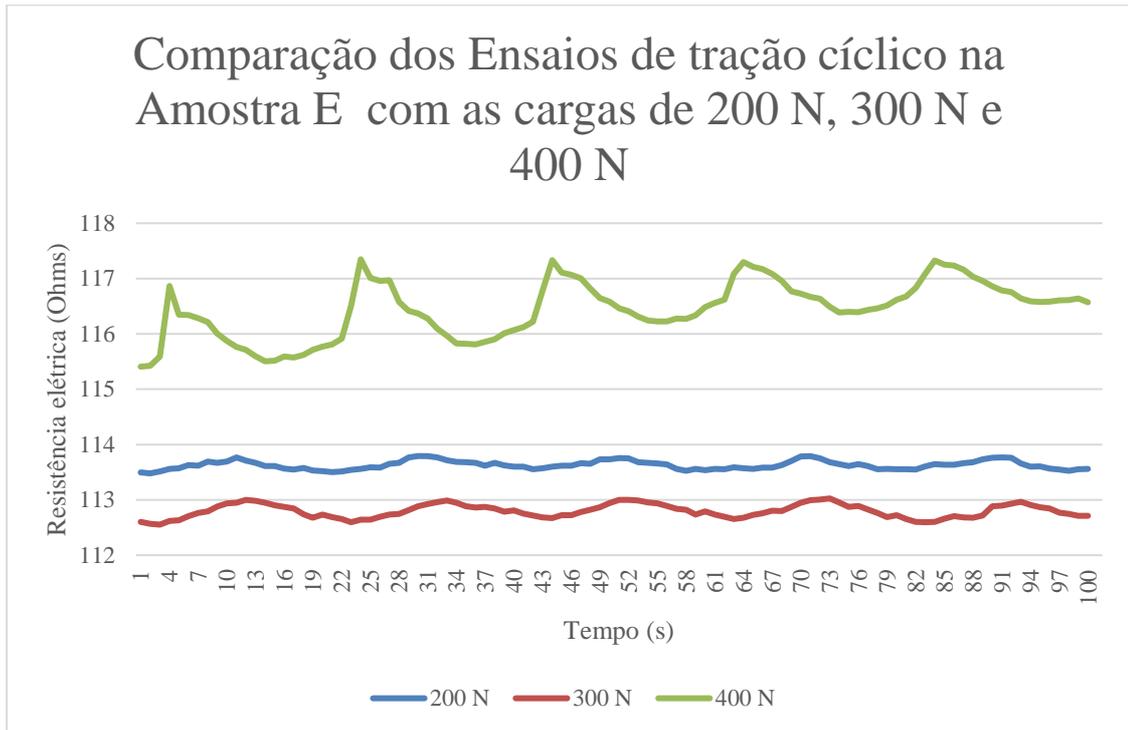


Figura 5.19: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra E com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N

Tabela 5.5: Mudança fracional da resistência na Amostra E (0.75% SCF+0.1% CNF).

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	113,50	113,51	113,55	113,56	113,55
	Pico de Resistência	113,76	113,79	113,76	113,79	113,77
	Mudança fracional da resistência	0,23	0,24	0,18	0,21	0,19
0,3	Resistência Inicial	112,60	112,66	112,71	112,69	112,60
	Pico de Resistência	112,99	112,99	113,00	113,03	112,97
	Mudança fracional da resistência	0,35	0,29	0,25	0,29	0,32
0,4	Resistência Inicial	115,40	115,91	116,21	116,61	116,83
	Pico de Resistência	116,86	117,35	117,33	117,30	117,33
	Mudança fracional da resistência	1,25	1,22	0,95	0,58	0,43

Na Amostra E (0.75% SCF + 0.1% CNF) a resposta da resistência elétrica sob uma carga de tração uniaxial foi bastante baixa, como se pode observar nas figuras 5.16 A 5.19, sendo que a mudança fracional da resistência foi quase sempre inferior 1%, verificando-se um comportamento negativo do provete enquanto sensor.

Tal como já foi referido, 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. No entanto, como expectável, com o aumento da carga de tração cíclica foi possível observar a variação da resistência elétrica, devido ao afastamento das fibras provocado pelo aumento da carga, verificou-se o aumento da mudança fracional de resistência. inferior a 1% em todos os ciclos das diferentes cargas, como se pode observar na Tabela 5.5.

- Amostra F (0.25% SCF + 0.1% CNF):

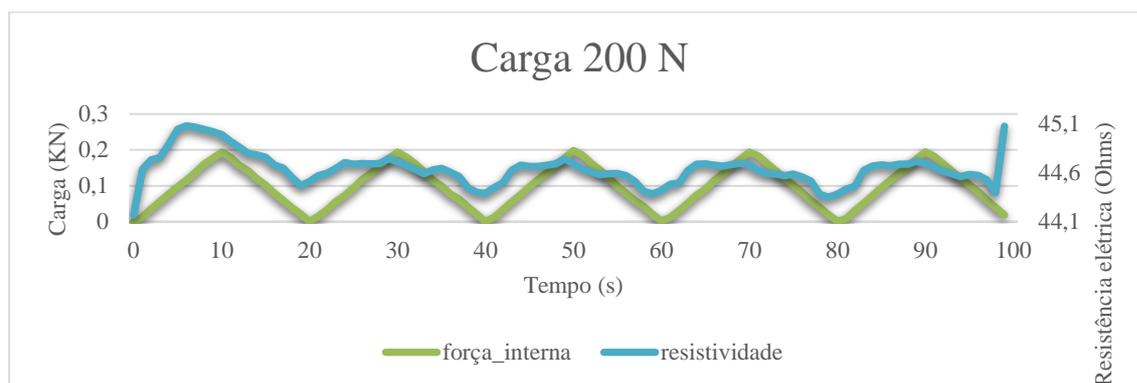


Figura 5.20: Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.2 kN)

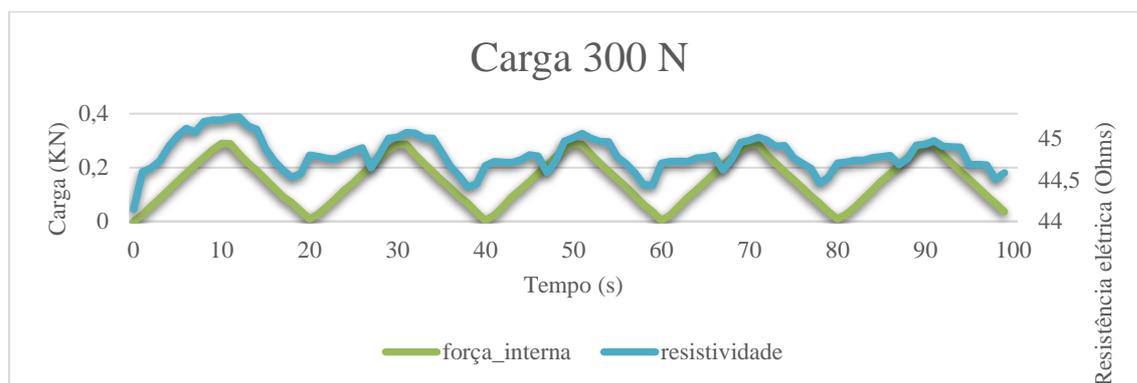


Figura 5.21: Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.3 kN)

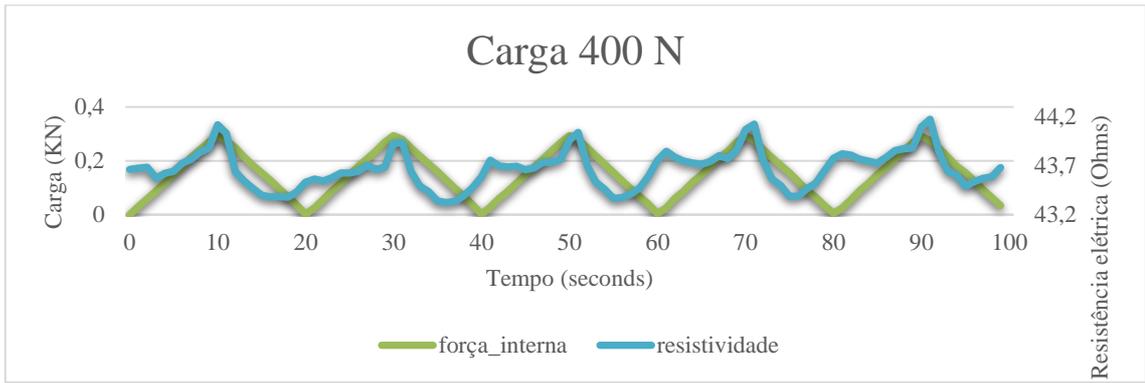


Figura 5.22: Ensaio de tração cíclico na Amostra F (0.4 kN)

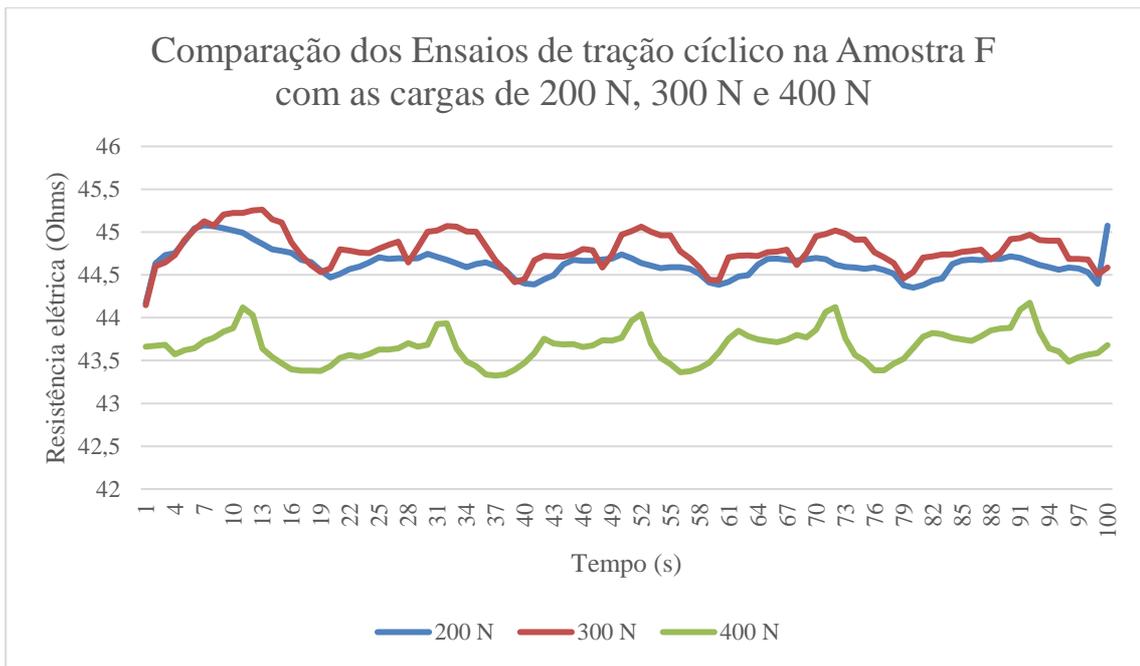


Figura 5.23 Comparação dos Ensaio de tração cíclico na Amostra F com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N

Tabela 5.6: Mudança fracional da resistência na Amostra F (0.25% SCF+0.1% CNF).

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	44,17	44,57	44,45	44,48	44,33
	Pico de Resistência	45,07	44,74	44,74	44,69	44,72
	Mudança fracional da resistência	2,02	0,39	0,65	0,48	0,63
0,3	Resistência Inicial	44,15	44,78	44,72	44,72	44,72
	Pico de Resistência	45,26	45,07	45,06	45,01	44,97
	Mudança fracional da resistência	2,46	0,63	0,75	0,65	0,57
0,4	Resistência Inicial	43,66	43,56	43,76	43,85	43,82
	Pico de Resistência	44,12	43,93	44,04	44,12	44,17
	Mudança fracional da resistência	1,03	0,84	0,65	0,63	0,79

Na Amostra F (0.25% SCF + 0.1% CNF) a resistência elétrica variou pouco sob cargas de tração cíclicas como se pode observar nas Figuras 5.20 a 5.24 apenas no primeiro ciclo de cada carga, sendo superior a 1%. No entanto nos restantes ciclos a variação da mudança fracional da resistência é inferior e nem chega a 1 %, portanto de um modo geral este provete não tem um comportamento positivo enquanto provete sensor.

- Amostra G (0.5% SCF + 0.1% CNF):

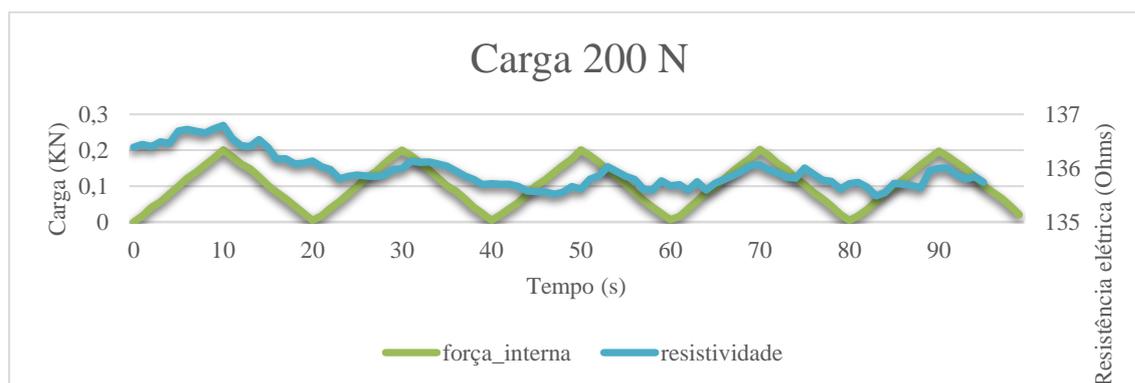


Figura 5.24: Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.2 kN)

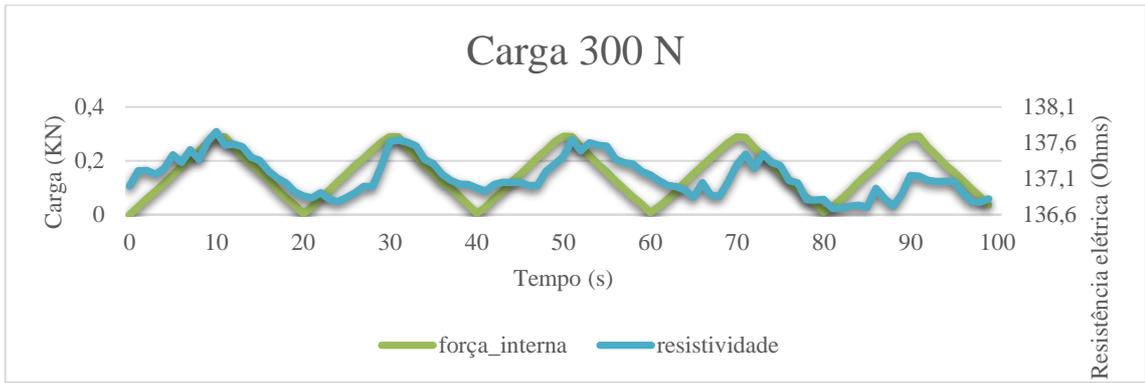


Figura 5.25: Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.3 kN)

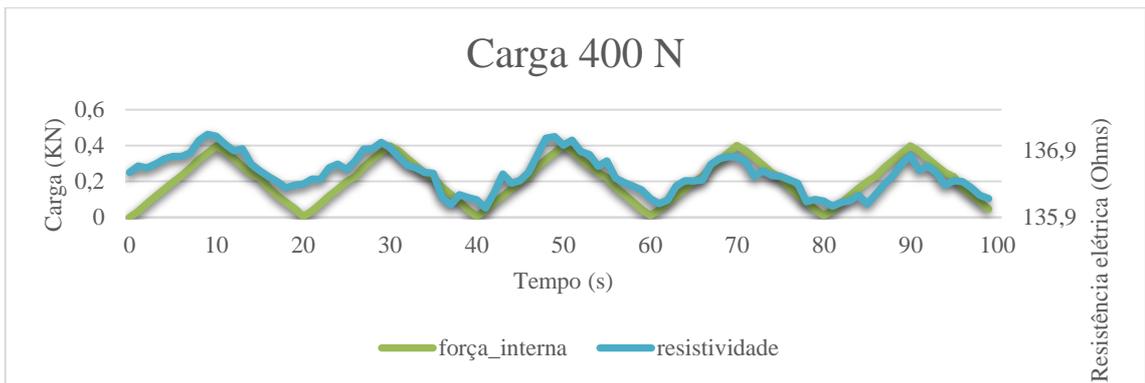


Figura 5.26: Ensaio de tração cíclico na Amostra G (0.4 kN)

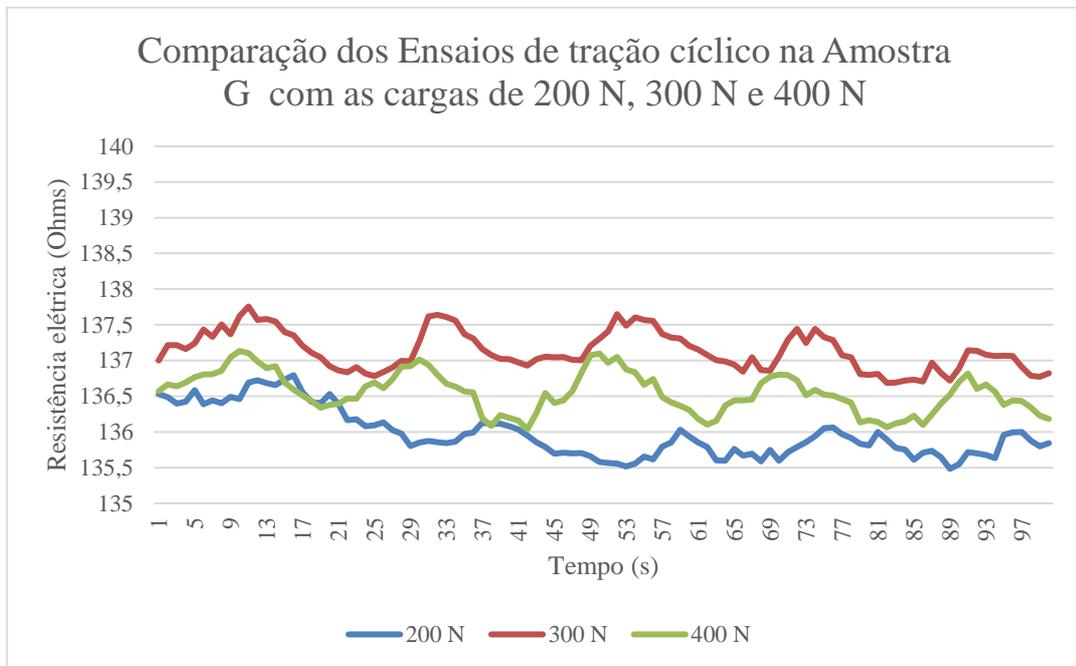


Figura 5.27: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra G com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N

Tabela 5.7: Mudança fracional da resistência na Amostra G (0.5% SCF+0.1% CNF).

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	136,53	136,17	135,95	135,79	135,89
	Pico de Resistência	136,79	136,18	135,94	136,06	136,00
	Mudança fracional da resistência	0,19	0,01	0,01	0,2	0,08
0,3	Resistência Inicial	137,00	136,84	136,93	137,08	136,69
	Pico de Resistência	137,76	137,64	137,65	137,44	137,14
	Mudança fracional da resistência	0,55	0,58	0,53	0,27	0,33
0,4	Resistência Inicial	136,57	136,47	136,04	136,10	136,07
	Pico de Resistência	137,13	137,01	137,07	136,8	136,82
	Mudança fracional da resistência	0,41	0,40	0,78	0,51	0,55

Na Amostra G (0.5% SCF + 0.1% CNF) a resposta da resistência elétrica sob uma carga de tração uniaxial foi muito baixa.

Apesar do comportamento do provete enquanto senso elétrico ser precário, de um modo geral a mudança fracional da resistência vai aumento gradualmente com o aumento da carga da tração cíclica, mostrando um comportamento previsível do provete no que diz respeito ao afastamento das fibras com o aumento da carga.

- Amostra H (0.75% SCF + 0.15% CNF):

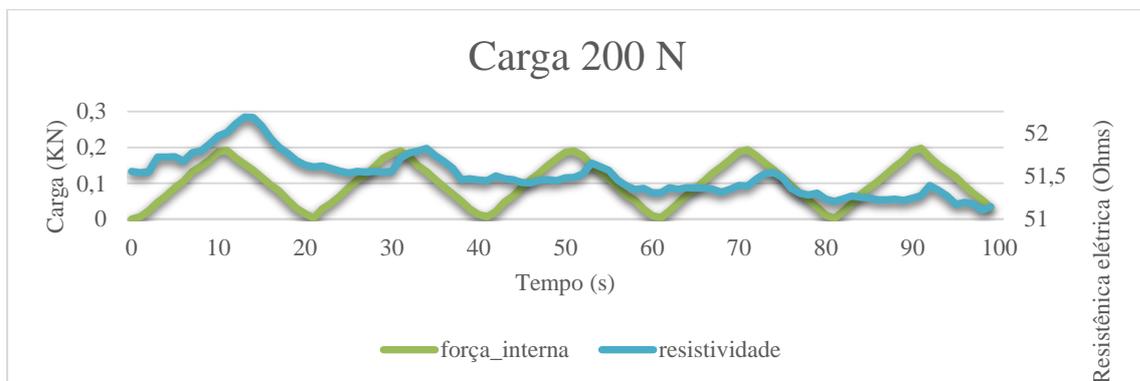


Figura 5.28: Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.2 kN)

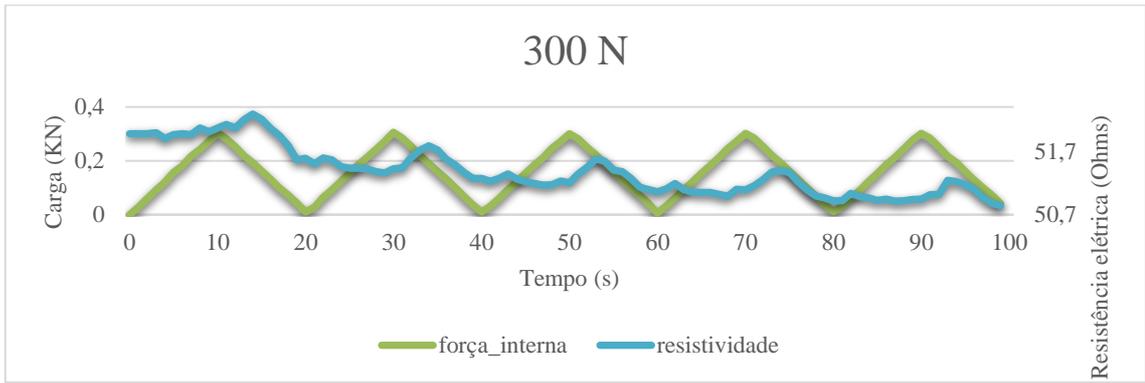


Figura 5.29: Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.3 kN)

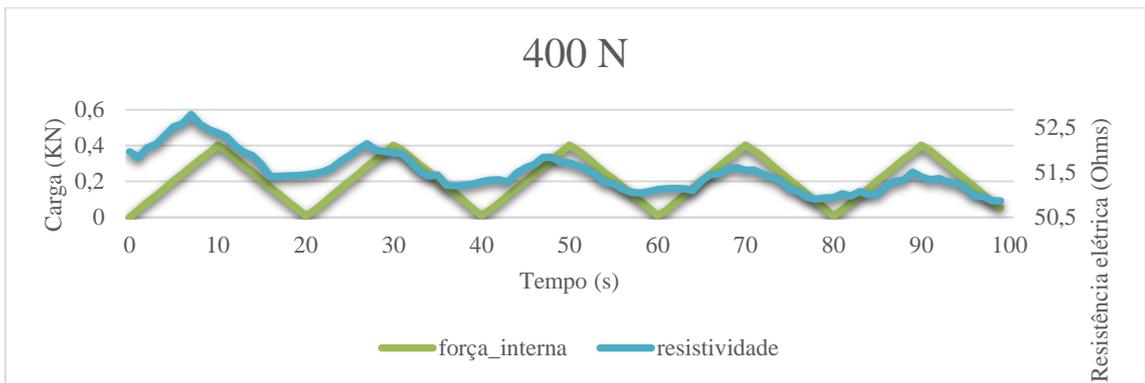


Figura 5.30: Ensaio de tração cíclico na Amostra H (0.4 kN)

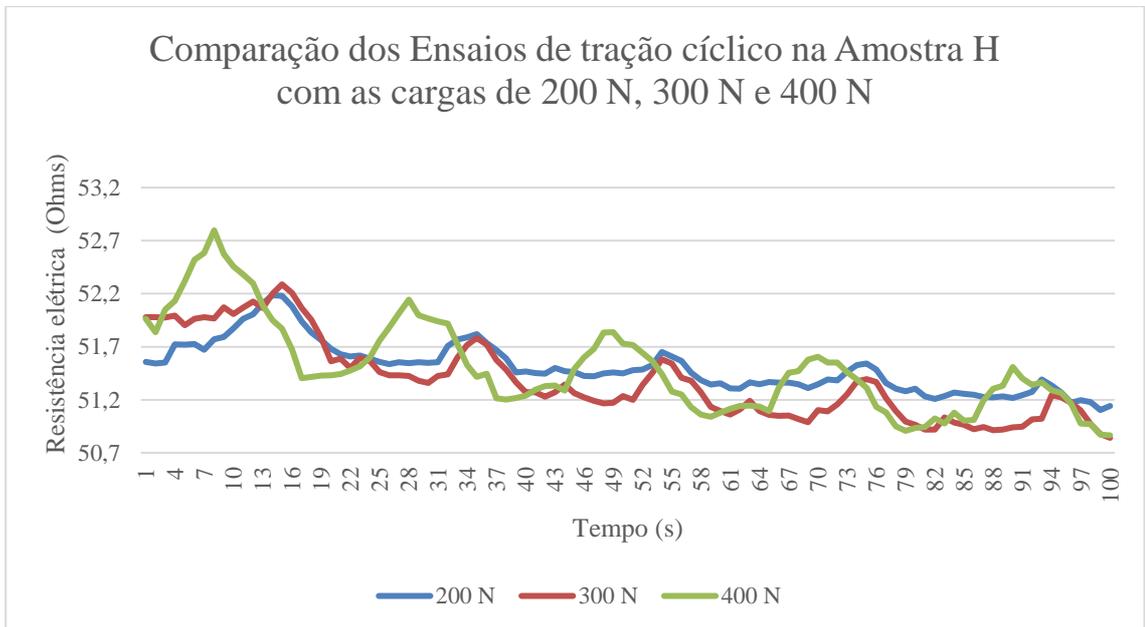


Figura 5.31: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra H com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N

Tabela 5.8: Mudança fracional da resistência na Amostra H (0.75% SCF+ 0.15% CNF).

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	51,56	51,61	51,45	51,30	51,21
	Pico de Resistência	52,18	51,80	51,65	51,54	51,39
	Mudança fracional da resistência	1,21	0,41	0,40	0,46	0,36
0,3	Resistência Inicial	51,98	51,50	51,23	51,11	50,92
	Pico de Resistência	52,28	51,78	51,58	51,39	51,24
	Mudança fracional da resistência	0,59	0,55	0,68	0,56	0,63
0,4	Resistência Inicial	51,96	51,48	51,33	51,14	51,03
	Pico de Resistência	52,79	52,14	51,84	51,61	51,51
	Mudança fracional da resistência	1,58	1,28	0,98	0,90	0,94

Na Amostra H (0.75% SCF + 0.15% CNF) a variação da resistência elétrica sob cargas de tração cíclicas foi bastante reduzida, como se ilustra nas Figuras 5.28 a 5.31.

Como foi referido no ensaio da resistência elétrica original ( $R_0$ ), com o aumento da percentagem de CNF no compósito híbrido, as nanofibras provavelmente aglomeraram-se, o que desde logo poderá ter alterado as suas propriedades enquanto condutores elétricos na matriz cimentícia. Como se pode observar na Tabela 5.8, nas diferentes cargas há alguma variação da resistência elétrica, mas a mudança fracional da resistência é inferior a 1%, na maioria dos ciclos das cargas cíclicas 0.2 kN e em todos os ciclos 0.3 kN, enquanto que na carga 0.4 kN, é possível observar ainda em dois dos ciclos uma mudança fracional da resistência superior a 1%. De um modo geral verifica-se subtilmente a previsão do aumento da mudança fracional da resistência.

Para além de na composição com 0.15% CNF, pode ter ocorrido a aglomeração das nanofibras 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, numa mudança fracional da resistência inferior a 1% em alguns ciclos, como se pode observar na Tabela x.

- Amostra J (0.5%SCF + 0.15%CNF):

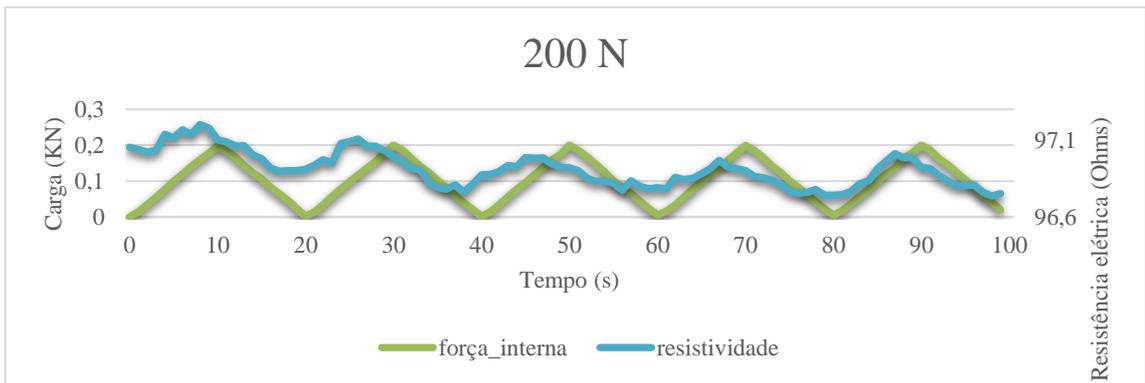


Figura 5.32: Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.2 kN)

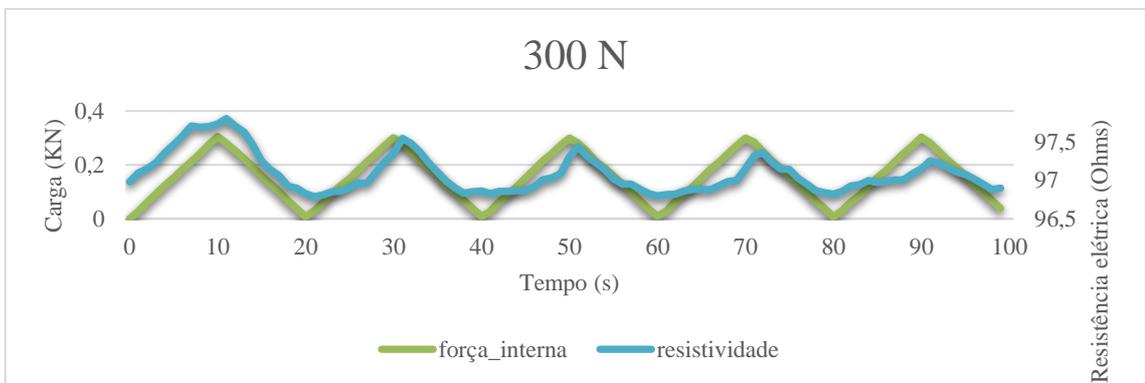


Figura 5.33 Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.3 kN)

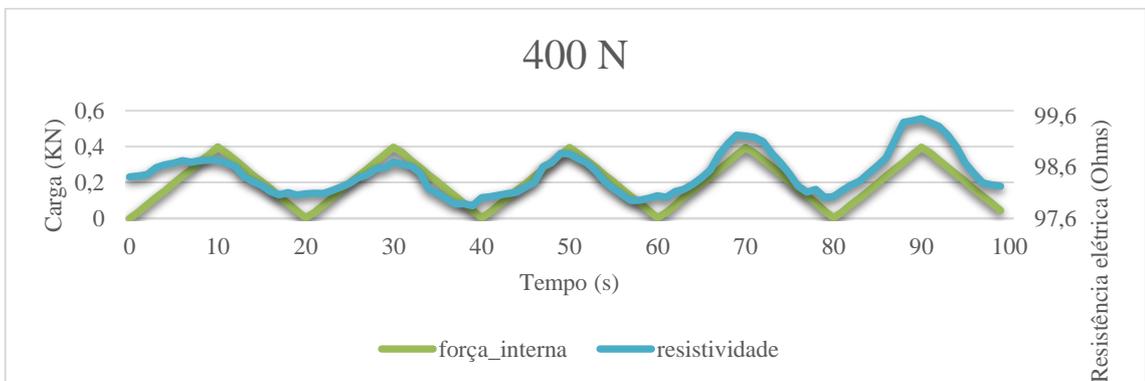


Figura 5.34: Ensaio de tração cíclico na Amostra J (0.4 kN)

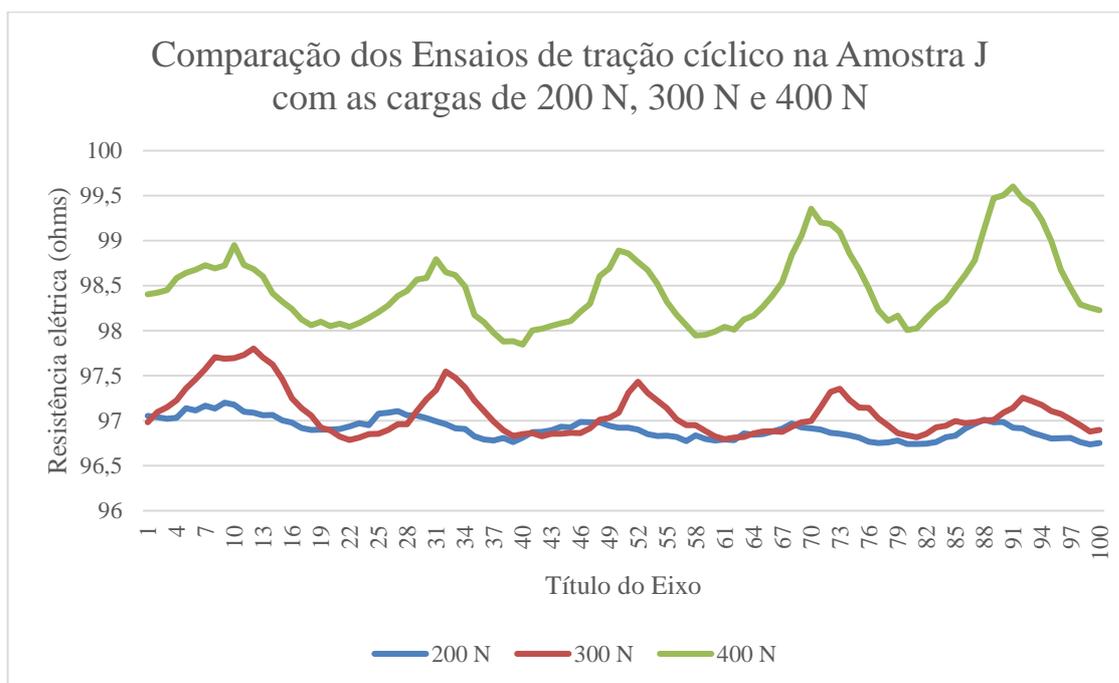


Figura 5.35: Comparação dos Ensaios de tração cíclico na Amostra J com as cargas de 200 N, 300 N e 400 N

Tabela 5.9: Mudança fracional da resistência na Amostra J (0.5% SCF+ 0.15% CNF).

Carga (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de Resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	Ciclos				
		1	2	3	4	5
0,2	Resistência Inicial	97,05	96,91	96,88	96,78	96,74
	Pico de Resistência	97,20	97,11	96,99	96,97	97,01
	Mudança fracional da resistência	0,15	0,18	0,11	0,19	0,27
0,3	Resistência Inicial	96,98	96,79	96,83	96,81	96,86
	Pico de Resistência	97,80	97,55	97,43	97,36	97,26
	Mudança fracional da resistência	0,84	0,77	0,62	0,56	0,41
0,4	Resistência Inicial	98,41	98,04	98,02	98,01	98,14
	Pico de Resistência	98,95	98,79	98,89	99,36	99,60
	Mudança fracional da resistência	0,55	0,76	0,88	1,35	1,47

Na Amostra J (0.5%SCF + 0.15%CNF), a variação da resistência elétrica sob uma ação de carga de tração uniaxial foi praticamente nula no primeiro carregamento, como se

ilustra nas Figuras 30 a 34, aumentando previsivelmente nos carregamentos seguintes, chegando a ser superior a 1% na carga de 0,4 kN.

Como foi anteriormente referido, com a percentagem de 0.15% CNF poderá ter ocorrido a aglomeração das nanofibras na matriz cimentícia, o que resultou numa redução das propriedades das nanofibras enquanto materiais condutores na matriz cimentícia.

Na Tabela 5.9 é possível observar todos os resultados da mudança fracional de resistência durante o ensaio de tração cíclico.

Tabela 5.10: Compilação de todos dos resultados relativos à mudança fracional de resistência durante o ensaio cíclico.

Amostra	Presença de SCF	Presença de CNF	Carga	Resistência elétrica inicial	MFR (%)
<b>B</b>	<b>0,75 wt%</b>	-	200 N	53,59	2,68
<b>B</b>	<b>0,75 wt%</b>	-	300 N	45,37	2,69
<b>B</b>	<b>0,75 wt%</b>	-	400 N	58,61	6,67
<b>C</b>	<b>0,5 wt%</b>	-	200 N	162,45	1,13
<b>C</b>	<b>0,5 wt%</b>	-	300 N	137,11	2,79
<b>C</b>	<b>0,5 wt%</b>	-	400 N	143,55	1,25
<b>D</b>	<b>0,25 wt%</b>	-	200 N	591,11	14,35
<b>D</b>	<b>0,25 wt%</b>	-	300 N	592,89	25,22
<b>D</b>	<b>0,25 wt%</b>	-	400 N	648,65	10,48
<b>E</b>	<b>0,75 wt%</b>	0,1 wt%	200 N	113,49	0,21
<b>E</b>	<b>0,75 wt%</b>	0,1 wt%	300 N	112,60	0,30
<b>E</b>	<b>0,75 wt%</b>	0,1 wt%	400 N	115,40	0,88
<b>F</b>	<b>0,25 wt%</b>	0,1 wt%	200 N	44,16	0,83
<b>F</b>	<b>0,25 wt%</b>	0,1 wt%	300 N	44,14	1,01
<b>F</b>	<b>0,25 wt%</b>	0,1 wt%	400 N	43,66	0,78
<b>G</b>	<b>0,5 wt%</b>	0,1 wt%	200 N	136,53	0,09
<b>G</b>	<b>0,5 wt%</b>	0,1 wt%	300 N	137,00	0,45
<b>G</b>	<b>0,5 wt%</b>	0,1 wt%	400 N	136,05	0,52
<b>H</b>	<b>0,75 wt%</b>	0,15 wt%	200 N	51,55	0,56
<b>H</b>	<b>0,75 wt%</b>	0,15 wt%	300 N	51,97	0,60
<b>H</b>	<b>0,75 wt%</b>	0,15 wt%	400 N	51,96	1,13
<b>J</b>	<b>0,5 wt%</b>	0,15 wt%	200 N	97,05	0,18
<b>J</b>	<b>0,5 wt%</b>	0,15 wt%	300 N	96,98	0,64
<b>J</b>	<b>0,5 wt%</b>	0,15 wt%	400 N	98,41	1,00

#### 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 B (0.75% SCF):

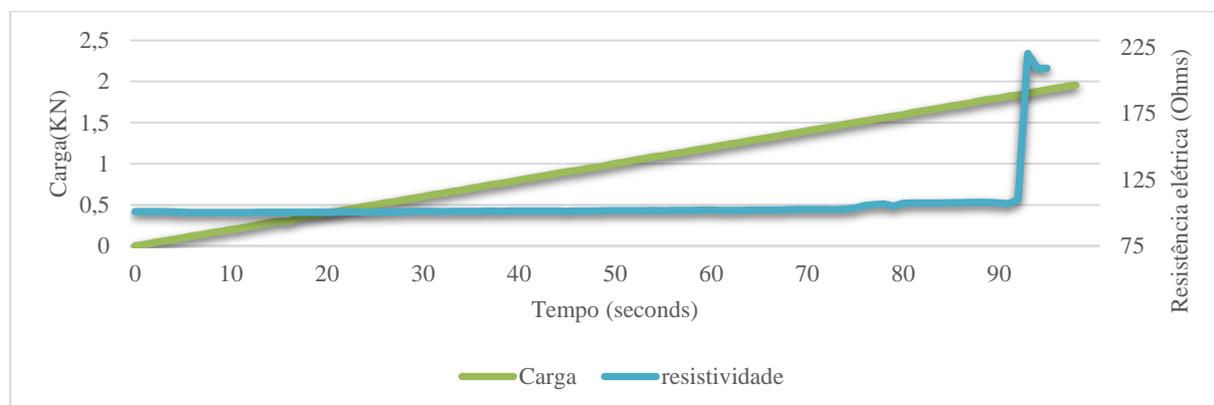


Figura 5.36: Ensaio de tração monotónico na Amostra B.

Tabela 5.11: Mudança fracional da resistência na Amostra B (0.75% SCF).

Carga Máxima (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	
1,99	Resistência Inicial	100,76
	Pico de resistência	220,22
	Mudança fracional da resistência	54,25

Na Amostra B (0.75% SCF), a carga máxima de tração uniaxial foi de 1,99 kN. A resistência elétrica aumenta bruscamente ao longo do aumento carga, o que resultou numa mudança fracional da resistência elevada, como se pode observar na Tabela 5.11. No entanto não é observado a proporcionalidade da resistência elétrica com a aplicação da carga, como era expectável.

Como se pode observar na Figura 5.35, a variação da resistência elétrica foi praticamente linear constante, tendo-se verificado algumas irregularidades da resistência elétrica, pelos 75 segundos na carga 1,5 kN, onde é provável a existência de uma microfissura. De seguida, aos 92 segundos verifica-se uma subida brusca da resistência elétrica, 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 C (0.5% SCF):

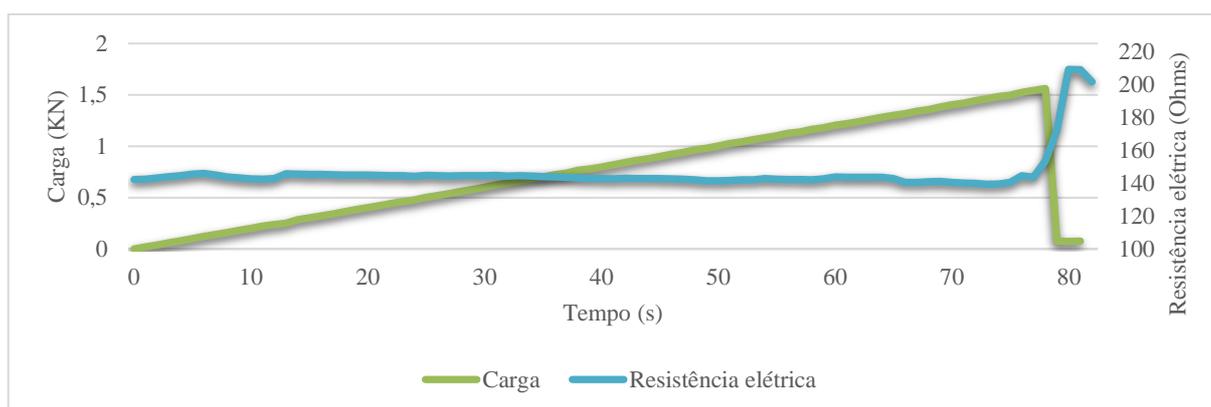


Figura 5.37: Ensaio de tração monotónico na Amostra C.

Tabela 5.12: Mudança fracional da resistência na Amostra C (0.5% SCF).

Carga Máxima (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	
1,56	Resistência Inicial	142,32
	Pico de resistência	209,27
	Mudança fracional da resistência	31,99

Na Amostra C (0.5% SCF), a carga de tração uniaxial máxima foi de 1,56 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 5.36, a variação da resistência elétrica é praticamente nula até aos 75 segundos, onde existe um acréscimo da resistência elétrica com a carga de 1,5 kN, o que mostra que provavelmente o provete sofreu uma fissura que alterou desde logo o comportamento da resistência elétrica.

- Amostra E (0.75% SCF + 0.1% CNF):

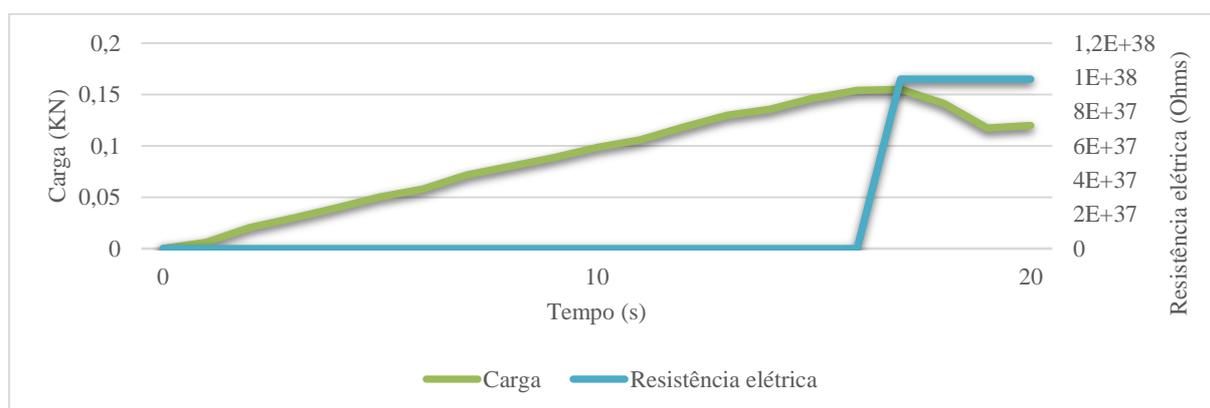


Figura 5.38: Ensaio de tração monotónico na Amostra E

Tabela 5.13: Mudança fracional da resistência na Amostra E (0.75% SCF+0.1% CNF).

Carga Máxima (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	
0,155	Resistência Inicial	149,38
	Pico de resistência	$9,89 \times 10^{37}$
	Mudança fracional da resistência	100

Na Amostra E (0.75% SCF + 0.1% CNF), a carga de tração uniaxial máxima foi de 0,155 kN. A resistência elétrica aumenta ao longo do aumento carga abruptamente, o que resultou numa elevada mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.13.

Como se pode observar na Figura 5.37, o comportamento da resistência elétrica ter sido linear até cerca dos 16 segundos quando ultrapassada a carga 0.15 kN, a resistência elétrica sofreu um acréscimo abrupto, provocada pela possível existência de uma fissura no provete. Devido à elevada percentagem de SCF conjugadas com as CNF e 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 F (0.25% SCF e 0.1% CNF):

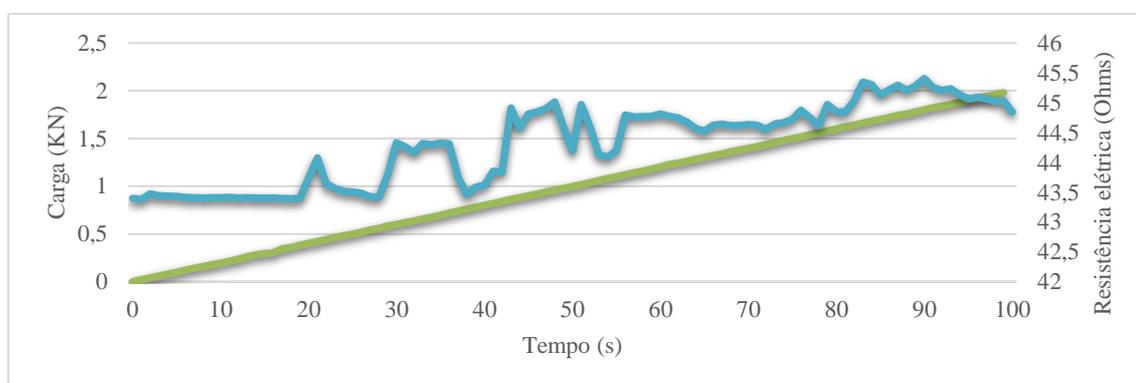


Figura 5.39: Ensaio de tração monotônico na Amostra F.

Tabela 5.14: Mudança fracional da resistência na Amostra F (0.25% SCF+0.1% CNF).

Carga Máxima (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	
2,20	Resistência Inicial	43,40
	Pico de resistência	45,40
	Mudança fracional da resistência	4,43

Na Amostra F (0.25% SCF e 0.1% CNF) a carga de tração uniaxial máxima foi de 2,2 kN. A resistência elétrica aumenta ao longo do aumento carga de forma gradual, o que resultou numa baixa mudança fracional da resistência, como se pode observar na Tabela 5.14.

É possível observar o aumento gradual da resistência elétrica com o aumento da carga de tração. Os acréscimos de resistência elétrica foram observados ao longo do ensaio, mas foram bastante subtis. Quando observado este tipo de comportamento, o provete está a reagir como um sensor elétrico, pois a leitura da resistência elétrica acompanha o comportamento mecânico do provete.

- Amostra G (0.5% SCF + 0.1% CNF):

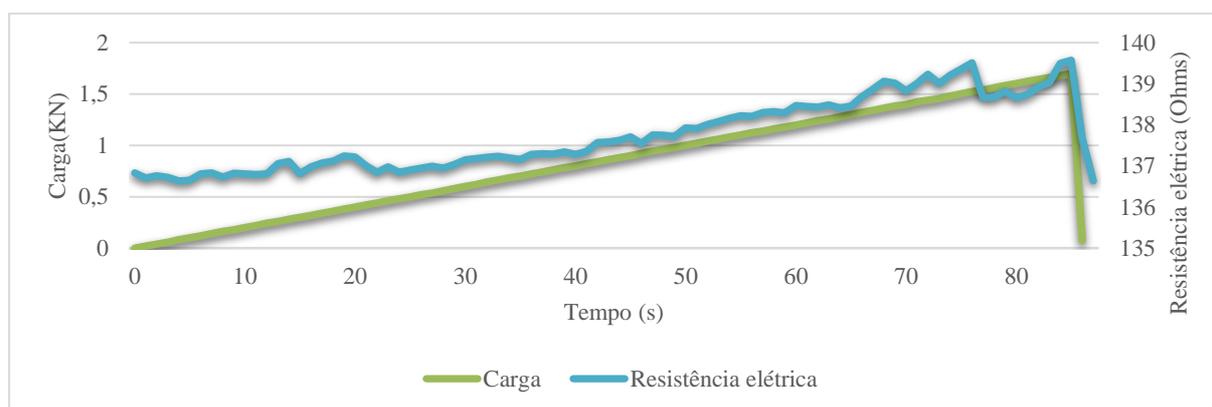


Figura 5.40: Ensaio de tração monotónico na Amostra G.

Tabela 5.15: Mudança fracional da resistência na Amostra G (0.5% SCF+0.1% CNF).

Carga Máxima (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	
1,70	Resistência Inicial	136,83
	Pico de resistência	139,57
	Mudança fracional da resistência	1,97

Na Amostra G (0.5% SCF + 0.1% CNF), a carga de tração uniaxial máxima foi de 1.7 kN. A resistência elétrica aumentou ao longo do aumento carga, de uma forma linear, o que resultou numa mudança fracional da resistência bastante reduzida, como se pode observar na Tabela 5.15. Neste caso constata-se a proporcionalidade entre a resistência elétrica e a carga aplicada, traduzindo a capacidade do compósito sensorizar continuamente a aplicação da carga.

Mais uma vez o provete está a reagir como um sensor elétrico, pois a leitura da resistência elétrica acompanha o comportamento mecânico do provete.

É possível verificar o aumento linear da resistência elétrica até aos 85 segundos, onde é atingido o pico da resistência, seguido de uma queda íngreme quando sujeita a uma carga de 1.7 kN. Este fenómeno pode ser explicado pela ocorrência de uma fissura.

- Amostra H (0.25% SCF + 0.15% CNF):

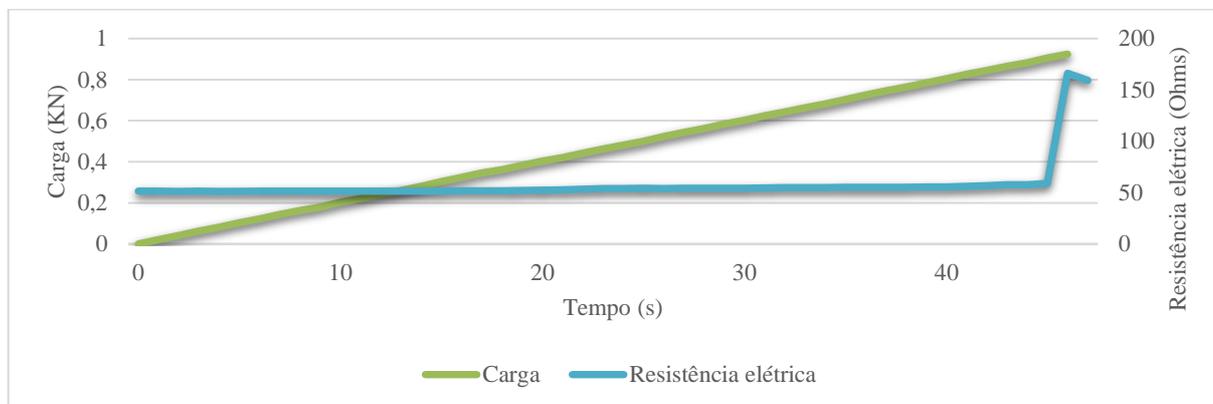


Figura 5.41: Ensaio de tração monotónico na Amostra H.

Tabela 5.16: Mudança fracional da resistência na Amostra B (0.25% SCF+0.15% CNF).

Carga Máxima (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	
0,92	Resistência Inicial	51,35
	Pico de resistência	166,16
	Mudança fracional da resistência	69,10

Na Amostra H (0.25% SCF + 0.15% CNF), a carga de tração uniaxial máxima foi de 0.92 kN. A resistência elétrica é praticamente linear com o aumento da carga, havendo um acréscimo significativo o que resultou numa mudança fracional da resistência considerável, como se pode observar na Tabela 5.16.

Como se pode observar na Figura 5.40, apesar do comportamento da resistência elétrica ter sido linear até cerca dos 45 segundos quando ultrapassada a carga 0.85 kN, a resistência elétrica sofreu um acréscimo abrupto, provocada pela possível existência de uma fissura no provete.

- Amostra J (0.75% SCF + 0.15% CNF):

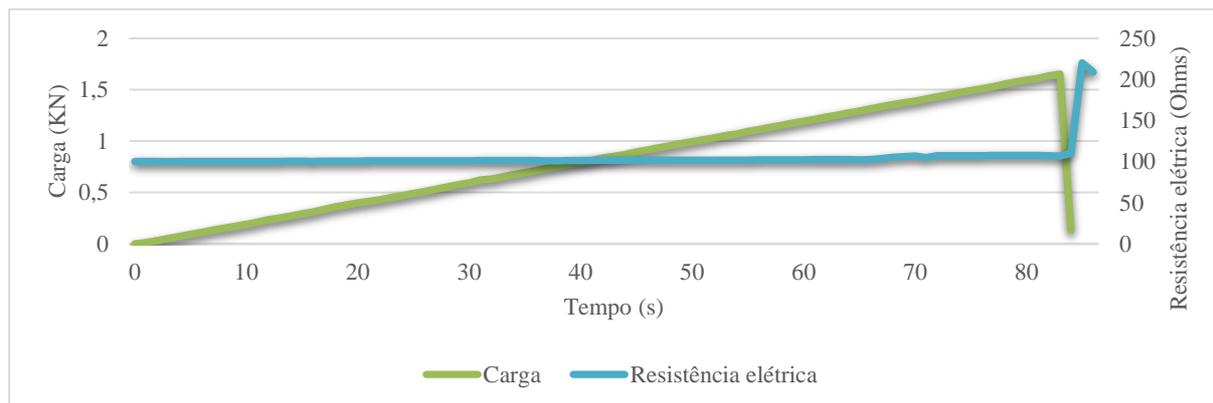


Figura 5.42: Ensaio de tração monotônico na Amostra J.

Tabela 5.17: Mudança fracional da resistência na Amostra J (0.75% SCF+0.15% CNF).

Carga Máxima (kN)	Resistência inicial ( $\Omega$ ) / Pico de resistência ( $\Omega$ ) / Mudança fracional da resistência (%)	
1,65	Resistência Inicial	100,21
	Pico de resistência	220,22
	Mudança fracional da resistência	54,50

Na Amostra J (0.75% SCF + 0.15% CNF), a carga de tração uniaxial máxima foi de 1.65 kN. A resistência elétrica aumentou ao longo do aumento carga, de uma forma repentina, 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% CNF 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 85 segundos, onde sofre um aumento quando sujeita a uma carga de 1.65 kN. Como o acréscimo foi muito elevado, é provável, a existência de uma fissura, como se pode observar na Figura 5.41.

A Figura 5.42 ilustra a variação da mudança fracional da resistência e da resistência à tração no ensaio de tração monotônico, e a Tabela x apresenta os respectivos valores.

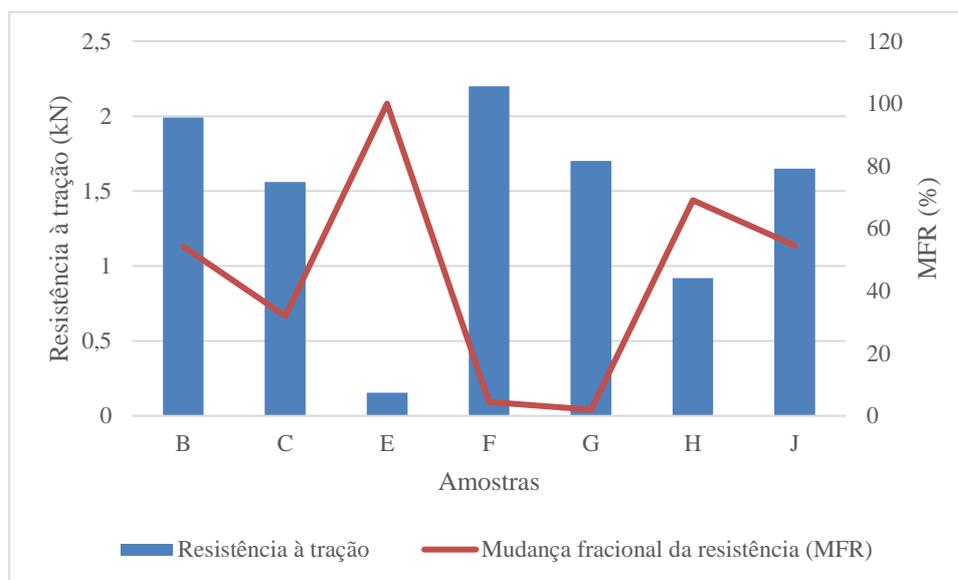


Figura 5.43: Variação de mudança fracional da resistência e resistência à tração no ensaio de tração monotônico.

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 (%)
B (0,75% SCF)	1,99	54,25
C (0,5% SCF)	1,56	31,99
E (0,75% SCF + 0,1% CNF)	0,155	100
F (0,25% SCF + 0,1% CNF)	2,2	4,43
G (0,5% SCF + 0,1% CNF)	1,7	1,97
H (0,75% SCF + 0,15 CNF)	0,92	69,1
J (0,5% SCF + 0,15% CNF)	1,65	54,5

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 B (0.75% SCF) foi onde se observou uma maior resistência à tração e uma maior mudança fracional da resistência, apesar de não ter existido proporcionalidade entre a resistência elétrica e a carga aplicada.

Nos compósitos híbridos com SCF e 0.1% CNF verificou-se de um modo geral novamente o aumento da resistência à tração 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 foi bastante inferior no caso das Amostras com menor quantidade de fibras curtas de carbono, no entanto a resistência à tração foi mais elevada, o que se justifica pelas propriedades mecânicas que as nanofibras oferecem na matriz cimentícia. No que diz respeito à Amostra com maior quantidade de fibras curtas de carbono, ocorreu o inverso das outras Amostras, sendo que as nanofibras oferecem apenas propriedades elétricas, verificadas na elevada mudança fracional da resistência. Tendo sido na Amostra E (0.75% SCF + 0.1% CNF) onde se verificou a maior mudança fracional da resistência, no entanto foi Amostra F (0,25% SCF + 0,1% CNF) que teve maior resistência à tração. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de a Amostra E, ter tido alguma aglomeração da elevada percentagem de SCF em conjunto com as CNF, ou pelo facto de os provetes já terem sido esforçados.

Nos compósitos híbridos com SCF e 0.15% CNF 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 híbrido com 0.1% CNF, a variação da resistência elétrica é bastante mais elevada e a resistência à tração foi um pouco inferior, o que se justifica pelas propriedades elétricas que os nanofibras oferecem na matriz cimentícia enquanto sensor elétrico, no entanto a resistência à tração poderá ter sido afetada pelo facto de os provetes já terem sido anteriormente esforçados. Tendo sido na Amostra H (0.75% SCF + 0.15% CNF) onde se verificou maior mudança fracional da resistência e na Amostra J (0,5% SCF + 0,15% CNF) a maior resistência à tração.

Pode-se observar que a resistência elétrica dos compósitos cimentícios diminuiu significativamente com o aumento da quantidade de fibra curta de carbono (SCF). Esse fenómeno é atribuído ao facto de que em maior quantidade, as SCFs podem formar uma melhor rede eletricamente condutora em todo o compósito.

No entanto, pode verificar-se uma tendência decrescente na MFR com o aumento da percentagem de SCF, sendo que o MFR mais elevado foi obtido com 0,25% de SCF. À medida que a quantidade de SCF aumentou, o número de ligações elétricas em toda a matriz também aumentou devido ao maior contacto das fibras de carbono. Consequentemente, a probabilidade de alteração nas ligações elétricas com a carga aplicada diminuiu com o aumento de SCF% em peso, resultando numa diminuição da

MFR. A adição de CNF também influenciou a condutividade elétrica e a piezoresistividade de compósitos cimentícios. Pode-se observar que os compósitos de cimento multi-escala contendo SCF e CNF exibiram resistência elétrica significativamente menor em comparação com amostras de cimento simples. As CNFs têm condutividade elétrica elevada e sua dispersão dentro de compostos de cimento pode conectar os SCFs condutores em nano escala e formar uma rede 3D eletricamente condutora. Como resultado, a resistência elétrica da matriz de cimento diminuiu consideravelmente. No entanto, é também perceptível que o comportamento piezoresistivo do cimento reforçado com fibra de carbono diminuiu fortemente devido à adição de CNF. Globalmente, os compósitos multi-escala mostraram um MFR abaixo de apenas 1%. Provavelmente, a formação de uma rede condutora bem conectada na presença de CNFs não permitiu muita mudança nas conexões elétricas, levando a baixa MFR.

A resistência elétrica de compósitos multi-escala aumentou abruptamente durante a carga de tensão monotônica (como mostrado na Tabela 5.43) apenas quando fissuras excessivas foram introduzidas nas amostras com elevada carga, resultando em quebra desta rede eletricamente condutora. Portanto, os compósitos multi-escala fabricados usando menor quantidade de SCF (menor do que 0,25%) podem apresentar melhor comportamento piezoresistivo devido à presença de menos conexões elétricas e menor condutividade elétrica. Alternativamente, os compósitos multi-escala também podem mostrar melhor piezoresistividade em relação às amostras de cimento SCF quando testados com carga e deformações muito menores, que permitem a mudança apenas em redes elétricas de nano/micro-escala formadas por CNFs.

## 6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusão

A busca de formas de melhorar o betão é um tema que vem sendo bastante estudado devido à importância que este tem na construção civil. Este projeto de investigação seguiu esse propósito e teve como objetivo o estudo das propriedades mecânicas e especialmente das propriedades elétricas de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de carbono e nanofibras de modo a conseguir evidenciar a utilização destes compósitos como sensores elétricos.

A realização da dissertação de investigação permitiu obter um conjunto de resultados, que são apresentados resumidamente de seguida.

- A conjugação de uma matriz cimentícia com as nanofibras e fibras de carbono resultou num material compósito com elevada aptidão para utilização como sensor. O comportamento elástico do sensor é assegurado pela parte da matriz que permite aproximar/afastar as fibras de carbono, a fase condutora, conforme o seu estado de deformação/tensão fazendo desta forma variar o valor da sua resistência elétrica.
- A piezoresistividade dos materiais cimentícios pela adição de materiais condutores é um parâmetro promissor que pode ter uma grande utilidade no desenvolvimento de meios não destrutivos para diagnosticar e caracterizar o estado de serviço dos materiais, de forma a tornar as construções cada vez mais “inteligentes”.
- 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. De modo que os valores mais baixos foram obtidos nos compósitos com maior quantidade de fibras curtas de carbono e nanofibras.
- A variação da resistência elétrica quando sujeita a uma carga de tração cíclica foi visível na maioria das amostras. No compósito com fibra curtas de carbono, os melhores resultados foram na Amostra D (0.25 % de SCF), onde a mudança fracional da resistência foi de 25,22% na carga de 0,3 kN; com a percentagem de 0.75% SCF, os resultados não foram tão positivos, uma vez que, devido à elevada

percentagem de fibras curtas de carbono, estas ficaram demasiado próximas, o que provocou uma menor resposta das fibras enquanto sensores elétricos na matriz cimentícia. No compósito híbrido, os melhores resultados foram obtidos para a combinação (0.75% SCF + 0.15% CNF) onde a mudança fracional da resistência foi de 1,13 % na carga de 0,4 kN.

- No ensaio à tração monotónico a resistência elétrica aumentou com a carga de tração uniaxial. Na maioria 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 B (0.75% SCF), onde a mudança fracional da resistência foi de 54,25%. No compósito híbrido, o melhor resultado foi na Amostra E (0.75% SCF + 0.1% CNF) onde a mudança fracional da resistência foi de 100%. A carga de tração máxima foi obtida na Amostra F (0.25% SCF + 0.1% CNF), o que demonstrou as propriedades mecânicas das nanofibras e das fibras curtas de carbono. No entanto, é importante referir que apesar da amostra B, E e F apresentarem os valores da mudança fracional elevados, a relação de proporcionalidade entre a resistência elétrica e a carga aplicada apenas foi verificada na amostra F. Como já foi referido, esta relação é de extrema importância no que diz respeito à utilização do compósito enquanto sensor.
- 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 piezoresistive sensors”. Os compósitos neste artigo foram testados com uma carga à compressão o que faz com que seja impossível comparar os resultados da mudança fracional da resistência obtida da presente dissertação.
- A adição de nanofibras e fibra de carbono fizeram aumentar consideravelmente a condutividade elétrica de compósitos cimentícios. Estes materiais são também condutores piezoresistivos e podem, assim, produzir sensores excelentes. O fator chave passa por uma correta dispersão dos materiais na matriz cimentícia, uma vez que, uma ineficaz dispersão, resulta num compósito que não responde da mesma forma enquanto sensor elétrico. O compósito cimentício com nanofibras 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 à sua rutura.

## 6.2 Trabalhos Futuros

A realização deste trabalho de pesquisa certamente deverá ter continuidade num futuro próximo. Os nanomateriais têm vindo a ganhar destaque na engenharia civil e, cada vez mais, estão a ser alvo de trabalhos experimentais. A presente dissertação poderá levar a outros trabalhos de investigação, tendo em vista o uso de nanofibras e fibras curtas de carbono como material de reforço e como condutores elétricos. Os trabalhos a ser desenvolvidos são apresentados de seguida.

- Estudo de matrizes cimentícias, em diferentes escalas, com diferentes percentagens de nanofibras e fibras de carbono de modo a encontrar a quantidade ideal para reforço mecânico e para avaliação do comportamento elétrico.
- Desenvolvimento do material à multiescala com nanofibras e fibras curtas de carbono, mas para avaliação do comportamento elétrico em compressão.
- Desenvolvimento de sensores cimentícios de escala múltipla com outro tipo de nanomateriais condutores para avaliação do comportamento elétrico sob carga de tração uniaxial, e em modo compressivo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azhari, F., & Banthia, N. (2012). Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement & Concrete Composites*, 8.
- Balageas, D. (2006). Chapter 1. Introduction to Structural Health Monitoring. Em D. Balageas, C.-P. Fritzen, & A. Guemes, *Structural Health Monitoring*. London: ISTE.
- Barros, J. (1996). Caracterização do Comportamento do betão reforçado com Fibras de aço por Intermédio de Ensaio Experimentais. *ISISE- Capítulos/Artigos em Livros Nacionais*, 21.
- Barros, J. A. (2000). Betão Reforçado com Fibras de Aço - Conceitos fundamentais. *ISISE - Artigos em Revistas Nacionais*.
- Beber, J. (2003). *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Beeby, S., Ensel, G., Kraft, M., & White, N. (2004). Mechanical Transduction Techniques. Em S. Beeby, G. Ensel, M. Kraft, & N. White, *MEMS Mechanical Sensors* (p. 29). London: Beck.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Modern Concrete Technology Series.
- Bhattacharyya, A., Rana, S., Parveen, S., & Fanguero, R. (2013). Mechanical and Thermal Transmission Properties of Carbon Nanofibre Dispersed Carbon/Phenolic Multi-Scale Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 16.
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Elsevier*, 7.
- Bunsell, A. (2009). *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*. Woodhead Publishing.
- Burgoyne, C., Byars, E., Guadagnini, M., Gaetano, M., Neocleous, K., Pilakoutas, K., . . . Weber, A. (2007). *FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib).
- Callister, W. (2007). *Materials Science and Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons.

- Campilho, A. (2014). *Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição*. Porto: FEUP Edições.
- Casagrande, M. (2001). *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Chung, D. D. (2002). Electrical Conduction Behavior of Cement-Matrix Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11.
- Chung, D. D. (2005). Dispersion of Carbon Fibers in Cement. *Journal of Materials on Civil Engineering*, 5.
- Domone, P., & Illston, J. (2010). *Construction Materials: Their nature and behaviour*. New York: Spon Press.
- Donnet, J., & Ehrburger, P. (1977). Carbon fibre in polymer reinforcement. *Carbon*, 143-152.
- Donnet, J.-B., Rebouillat, S., Wang, T. K., & Peng, J. (1998). *Carbon Fibers*. United States of America: Marcel Dekker.
- Duan, W., Wang, Q., & Quek, S. (2010). Applications of Piezoelectric Materials in Structural Health Monitoring and Repair: Selected Research Examples. *Materials*, 26.
- Edmonds, T. E. (1985). Electroanalytical applications of carbon fibre electrodes. *Analytica Chimica Acta*, 22.
- Fangueiro, R. (2011). *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*. Woodhead Publishing.
- Figueiredo, A. (2011). *Concreto reforçado com fibras*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Gonzalez, J. (2007). *Betões reforçados com fibras de carbono: estudo de propriedades mecânicas e físicas*. Universidade do Minho: BUM - Teses de Doutoramento.
- Konsta-Gdoutos, M., Metaxa, Z., & Shah, S. (2010). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cement and Concrete Research*, 8.
- Latzke, P., Krieger, A., Gomes da Silva, A., John, O., Lapersonne, Pliete, U., . . . Whineray, A. (2006). *Terminology of man-made fibres*. Brussels, Belgium: Bisfa.
- Lebrão, G. (2008). Fibra de Carbono. *Revista Plástico Sul*, 3.
- Lubin, G. (1982). *Handbook of composites*. United Kingdom: Van Nostrand Reinhold.
- Magalhães, R. (2015). *Desenvolvimento de Materiais auxéticos para Aplicações Estruturais*. Guimarães: Universidade do Minho.

- Marques, P. (2009). *Design of Fibrous Structures for Civil Engineering Applications*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Mateus, P. (2013). *Betão Reforçado por Nanotubos de Carbono*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Mazzoli, A., Monosi, S., & Plescia, E. (2015). Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC). *Construction and Building Materials*.
- Moura, M., Magalhães, A., & Morais, A. (2009). *Materiais compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Portugal: Publindústria.
- Oliveira, F. J. (2013). Varões Compósitos Híbridos Fibra/Aço. *Tese de Mestrado*.
- Oliveira, J. (2016). *Obtenção de Nanofibras de Carbono a partir do Processo de Eletrofição*. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista.
- Oliveira, R., Ramos, C., Frazão, O., & Marques, A. (2007). Aplicação de sensores em fibra ótica embebidos para monitorização da saúde de estruturas compósitas. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, 9.
- Parveen, S., Rana, S., & Figueiro, R. (2013). A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Nanomaterials*, 20.
- Pimenta, M. (2010). *INCT Nanocarbono*. Brasil: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Nanomateriais de Carbono.
- Poveda, R., & Gupta, N. (2016). Carbon Nanofibers: Structure and Fabrication. Em R. Poveda, & N. Gupta, *Carbon Nanofiber Reinforced Polymer Composites* (p. 12). Springer International Publishing.
- Rana, S., Parveen, S., & Figueiro, R. (2012). Carbon nanomaterial based multi-scale composites. *DET/2C2T - Comunicações em congressos internacionais com arbitragem científica*, (p. 2). Guimarães.
- Rosado, K., Guise, C., Rebelo, R., & Figueiro, R. (2011). Fibrous based materials in sustainable civil and architectural applications - a review. *International Conference on Engineering UBI2011*, (p. 8). University of Beira Interior - Covilhã, Portugal.
- Rúbio, M. (2006). Nanotecnologia: A última Fronteira Tecnológica. *8º Congresso de Tecnologia* (p. 50). São Paulo: FATEC.
- Sales, R. (2013). *Materiais compósitos reforçados com Nanotubos de Carbono*. Lisboa: Instituto Superior Técnico de Lisboa.

- Sanchez, F., Zhang, L., & Ince, C. (2009). Multi-scale Performance and Durability of Carbon Nanofiber/Cement Composites. *Nanotechnology in Construction* 3, 6.
- Shah, S. (2011). Crack Free Concrete Made with Nanofiber Reinforcement. *Relatório final apresentado à Infraestrutura Instituto de Tecnologia*.
- Silva, B. J. (2005). Estruturas Inteligentes utilizando Betão e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono. *Tese de Mestrado*.
- Silva, F. (2004). *Tenacidade de materiais compósitos não convencionais*. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Silva, M. (2007). *Estudo de Novas aplicações da Fibra de Carbono nos Materiais de Construção*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Swamy, R. (1988). *Natural fibre reinforced cement and concrete*. Glasgow: Blackie.
- Taylor, G. (1994). *Materials in Construction*. Essex, England: Longman, Scientific & Technical.
- Tielas, A., Gabriel, B., Santos, C., Gracia, D., Alcorta, J., Blanchy, M., . . . Neto, V. (2014). *Nanomateriais: Guia para o Espaço Industrial SUDOE*. Portugal: Carbon Inspired 2.0.
- Wen, S., & Chung, D. (2000). Uniaxial tension in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions. *Cement and Concrete Research*, 6.
- Wiebeck, H., & Harada, J. (2005). *Plásticos de Engenharia: Tecnologias e Aplicações*. São Paulo: Artliber.
- Zhang, L., Aboagye, A., Kelkar, A., Lai, C., & Fong, H. (2014). A review: carbon nanofibers from electrospun polyacrylonitrile and their applications. *Journal of Materials Science*, 17.