



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Miguel Tomás Pinto e Silva

Estudo de Novas Aplicações da Fibra de Carbono nos Materiais de Construção

Julho de 2007



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Miguel Tomás Pinto e Silva

Estudo de Novas Aplicações da Fibra de Carbono nos Materiais de Construção

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização em Materiais de Construção

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Ricardo Said Jalali

Julho de 2007

Agradecimentos

As nossas realizações pessoais, para além do árduo trabalho próprio, apoiam-se sempre num elevado número de contribuições, sejam elas de que natureza forem, vindas de inúmeras pessoas que deram uma mais valia tão preciosa, que sem elas, o caminho percorrido para chegar até aqui teria sido mais difícil senão mesmo impossível.

Mencionar aqui estas pessoas constitui portanto um sinal de agradecimento e de homenagem sentida por parte do autor deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Said Jalali, pela sua paciência e pelo seu apoio, nos momentos mais difíceis deste trabalho, sempre disposto a arranjar uma solução mesmo que o caminho as vezes se tenha vislumbrado como quase que impossível. A sua forma de estar e de viver, enquanto ser humano, que sabe ouvir e percorrer com interesse e orientação todas as questões que lhe são colocadas, assim como pela confiança depositada. Fica aqui o meu agradecimento sincero.

A todos os colegas do Laboratório de Eng.^a Civil da Universidade do nomeadamente ao Sr. Matos, ao Paulo Caetano ao Marco e ao Palha, aqui fica a manifestação da minha gratidão por toda a ajuda, dedicação e paciência.

À Rute Eires, por todo o apoio e incentivo mas também pela paciência. Ao Alexandre Peyroteo, que no decorrer deste trabalho me mostrou novos caminhos e soluções nos problemas que iam surgindo. Um agradecimento muito especial do “Cientista”.

Por último, mas sempre no meu pensamento, à minha cara metade, Ana Filipa Gonçalves, a quem devo a realização desta tese, pelo seu apoio permanente, expresso ou silencioso, que se traduziu em dois anos de paciência e resiliência, por todos os momentos de ausência da minha parte, pelo tempo que dedicou para não me deixar sozinho, pelas más disposições e fora de horas e pelo carinho e paciência com que sempre se prestou. Por tudo o que esse apoio representou e ainda representa para mim, e que não se consegue expressar nestas palavras.

Mais uma vez a todos, aqui fica o meu humilde agradecimento e aos quais dedico este trabalho.

“.. Pensar dá trabalho. Fazer juízos de valor é difícil. Coloca-te na criação pura, pois haverá muitas vezes em que terás de dizer “Não sei. Não sei mesmo. Contudo, mesmo assim terás de decidir. E terás de optar. Terás de fazer uma opção arbitrária.

Tal opção – uma decisão que não provém de nenhum conhecimento prévio – chama-se criação pura. E o indivíduo tem conhecimento, perfeito conhecimento, de que é na tomada de tais decisões que se está a criar o Eu...

Estás a pensar por ti mesmo? Estás a decidir sozinho? Estás a aplicar as tuas próprias bitolas, os teus próprios juízos, os teus próprios valores? Mas quem é que tu pensas que és?

E essa é, de facto, precisamente a pergunta a que tu estás a responder.

Mas a tarefa deve ser feita em grande isolamento. Praticamente sem recompensas, sem aprovações, talvez sem ninguém dar por isso.

E fazes-me então uma pergunta muito acertada: para quê continuar? Para quê enveredar sequer por tal caminho? Que há a ganhar em seguir essa via? Onde está o incentivo? Qual é a razão?

A razão é ridículamente simples:

NÃO HÁ MAIS NADA PARA FAZER.”

Neale Donald Walsch *in Conversas com Deus* – livro 1

Resumo

O crescente desenvolvimento e aplicação de novos materiais nas últimas décadas permitiram melhorar a qualidade de vida para o ser humano e consequentemente a sociedade em que está inserido. As fibras de carbono têm merecido uma atenção especial devido às suas características particulares, as quais se destacam a sua baixa densidade associada a uma elevada resistência mecânica assim com as suas propriedades eléctricas.

Este trabalho apresenta um estudo sobre as propriedades eléctricas e piezoelectricas das fibras de carbono. Estudou-se a aplicação de uma nova base de suporte, o silicone, para o fabrico de um compósito com incorporação de fibras de carbono com vista a avaliar as suas propriedades piezoresistivas para funcionar como sensor.

De modo a se poder avaliar adequadamente a capacidade sensitiva de cada um dos sensores, realizaram-se ensaios cíclicos e estáticos de deformação. O primeiro, visou o estudo da reversibilidade dos valores lidos assim como a extracção das curvas de calibração que permitam efectuar uma relação com a deformação que se encontra aplicada no sensor. Já o ensaio em condições estáticas permitiu avaliar a evolução das leituras em condições de deformação constante e assim verificar a sua estabilidade ao longo do tempo. O estudo ficou concluído com a avaliação da sua aplicabilidade prática em que se sujeitou os sensores às condições reais de obra, onde foram colocados nos solos das fundações das estruturas a construir, devidamente escolhidas para o efeito.

Estudou-se igualmente as propriedades termoeléctricas das fibras de carbono quando incorporadas num material base de suporte com a finalidade de este poder actuar como um elemento capaz de produzir radiação térmica quando sujeito a uma corrente eléctrica. Foram desenvolvidas placas com incorporação de fibras de carbono em diferentes quantidades, que simularam um pavimento radiante. Estas placas serviram para quantificar o consumo energético e determinar poder calorífico radiante máximo. Por ultimo, foi realizada uma comparação quantitativa das placas desenvolvidas neste trabalho com as placas comercialmente disponíveis no mercado.

Abstract

The rapid development of new materials in the last few decades has allowed a significant improvement of the quality of life. Special attention has been given to carbon fibbers due to its unique properties; which combines the low density with high mechanical properties and interesting electrical properties.

In this research work, a study was carried out to assess the electrical and piezoelectric properties of the carbon fibbers. A new composite, using a silicone rubber as binder, reinforced with carbon fibbers was developed that can act as a sensor.

In order to properly evaluate the sensor sensitivity, a set of experimental tests was carried out in the laboratory. The sensors were submitted to compressive cyclic loading and to a prolonged constant deformation test. The first one aimed at studying the reversibility of the measurements under cycling loading in order to estimate the calibration curves, and establish a relationship between electrical resistance and the applied deformation.

The constant deformation test allowed the evaluation of electrical resistance readings when submitted to constant deformation for a long period of time. Polymers are known to be sensitive to creep and as such this test was important for evaluating the practical application of the sensor.

Furthermore, the sensors were applied in the real environment conditions on a construction site and their performance was monitored. Sensors were placed under the foundation and hence registered the real movements of the soil.

Also in this research work, the thermoelectric properties of carbon string were studied when placed within gypsum and polymeric boards, so that the resulting composite could act as an element capable of thermal radiation, when plugged into an electric current. Boards were developed with deferent amounts of carbon strings simulating thermal radiation pavement and electrical consumptions were estimated.

The results obtained indicate that it is possible to manufacture sensors using carbon fibre reinforced polymers for general application in construction industry. Furthermore, the gypsum and polymer reinforced with carbon strings can be used for thermal radiation pavements with lower energy consumption.

Índice

1	<u>FIBRAS DE CARBONO</u>	<u>1-2</u>
1.1	INTRODUÇÃO	1-3
1.2	PRODUÇÃO DAS FIBRAS DE CARBONO	1-4
1.3	ARRANJO ESTRUTURAL E QUÍMICO	1-7
1.4	PROPRIEDADES	1-10
2	<u>EDIFÍCIOS INTELIGENTES.....</u>	<u>2-1</u>
2.1	EDIFÍCIOS INTELIGENTES	2-2
2.2	SUSTENTABILIDADE	2-5
2.3	ESTRUTURAS INTELIGENTES	2-7
2.4	MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	2-7
2.4.1	CORROSÃO DAS ARMADURAS	2-9
2.4.2	TEMPERATURA	2-15
2.4.3	DEFORMAÇÃO	2-19
2.5	MONITORIZAÇÃO NÃO ESTRUTURAL	2-24
2.5.1	QUALIDADE DO AR INTERIOR	2-26
2.5.2	ILUMINAÇÃO	2-28
2.5.3	O CONFORTO TÉRMICO	2-30
2.5.4	PAVIMENTOS RADIANTES	2-32
3	<u>MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....</u>	<u>3-1</u>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	3-2
3.1.1	SILICONE POLIMÉRICO	3-2
3.1.2	FIBRAS DE CARBONO	3-3
3.1.3	GESSO ESTUQUE	3-4
4	<u>SENSORES PIEZORESISTIVOS.....</u>	<u>4-1</u>
4.1	INTRODUÇÃO.....	4-2
4.2	CONSTRUÇÃO DO SENSOR	4-3

4.3 ENSAIOS REALIZADOS	4-4
4.3.1 ENSAIOS CÍCLICOS DE CARGA/DESCARGA	4-5
4.3.2 ENSAIOS ESTÁTICOS DE DEFORMAÇÃO CONSTANTE	4-6
4.4 AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA NOS SENSORES	4-8
4.5 AVALIAÇÃO DO RELAXAMENTO DE TENSÕES NOS SENSORES.....	4-9
4.5.1 SENSORES COM FIBRAS DE CARBONO LONGAS (1,5 MM)	4-10
4.5.1.1 DEFORMAÇÃO CONSTANTE A 1MM.....	4-10
4.5.1.2 DEFORMAÇÃO CONSTANTE A 2MM.....	4-13
4.5.1.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	4-16
SENSORES COM FIBRAS DE CARBONO CURTAS (0,3 MM)	4-17
4.5.1.4 DEFORMAÇÃO CONSTANTE A 1MM.....	4-17
4.5.1.5 DEFORMAÇÃO CONSTANTE A 2MM.....	4-19
4.5.1.6 ANÁLISE DE RESULTADOS	4-21
4.5.2 CONCLUSÕES	4-22
4.6 AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DOS SENSORES	4-23
4.6.1 SENSORES COM FIBRAS DE CARBONO LONGAS (1,5 MM)	4-24
FC15-5	4-24
FC15-10.....	4-25
FC15-13.....	4-27
4.6.2 ANALISE DE RESULTADOS	4-28
4.6.3 SENSORES COM FIBRAS DE CARBONO CURTAS (0,3 MM).....	4-31
4.6.4 ANALISE DE RESULTADOS	4-34
4.7 SENSIBILIDADE	4-37
4.8 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	4-39
4.8.1 SENSORES COM FIBRAS DE CARBONO DO TIPO FC15.....	4-40
FC15-5	4-40
FC15-10.....	4-41
FC15-13.....	4-42
4.8.2 SENSORES COM FIBRAS DE CARBONO DO TIPO FC03.....	4-43
FC03-40.....	4-43
FC03-50.....	4-44
4.9 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	4-46
4.10 AVALIAÇÃO DOS SENSORES "IN SITU"	4-47
4.10.1 APLICAÇÃO DOS SENSORES NUMA ESCOLA BÁSICA	4-48
4.10.2 APLICAÇÃO DOS SENSORES NUMA MORADIA UNIFAMILIAR	4-50

4.10.3	ANÁLISE DE RESULTADOS	4-53
4.11	CONCLUSÕES	4-54
<u>5</u>	<u>PLACAS DE AQUECIMENTO</u>	<u>5-1</u>
5.1	INTRODUÇÃO	5-2
5.2	CONSTRUÇÃO.....	5-3
5.3	ENSAIO EXPERIMENTAL	5-4
5.3.1	PLACAS DE PCL	5-6
5.3.2	PLACAS DE GESSO ESTUQUE	5-8
5.4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	5-10
5.5	CONCLUSÕES	5-11
<u>6</u>	<u>CONCLUSÕES GERAIS.....</u>	<u>6-1</u>
<u>7</u>	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>7-1</u>
<u>8</u>	<u>ANEXOS.....</u>	<u>8-1</u>
8.1	ANEXO A	8-2
8.2	ANEXO B	8-1
8.3	ANEXO C	8-6
8.4	ANEXO D	8-7

Índice Figuras

Figura 1 – Exemplo da orientação das fibras na elaboração de um material compósito.....	1-4
Figura 2 – Reacção de amonoxidação do propano e da amónia	1-4
Figura 3 – Poliacrilonitrila	1-5
Figura 4 – Fase de Estabilização no processo de produção das Fibras de Carbono	1-6
Figura 5 – esquema de produção das fibras de carbono	1-6
Figura 6 – Processo de carbonização	1-7
Figura 7 – Arranjo estrutural das fibras de carbono	1-8
Figura 8 – Modelo de estrutura de fibra de carbono proposto por Johnson e Tyson [1].....	1-8
Figura 9 – Modelo da estrutura de fibras de carbono proposto por Ruland [1]	1-9
Figura 10 – Modelos de estruturas transversais de fibras de material tipo PAN e pitch [4]	1-9
Figura 11 – Conceito de Edifício Sustentável segundo Kohler [16]	2-6
Figura 12 – Exemplo de corrosão numa estrutura de betão armado.....	2-10
Figura 13 – Carbonatação do betão armado	2-10
Figura 14 – Esquema de corrosão por difusão de iões de cloro	2-11
Figura 15 – Sensores electroquímicos.....	2-12
Figura 16 – Funcionamento esquemático dos sensores electroquímicos.....	2-13
Figura 17 – Funcionamento esquemático dos sensores electroquímicos.....	2-14
Figura 18 – Exemplo esquemático do funcionamento dos termopares	2-15
Figura 19 – Exemplos de termopares	2-15
Figura 20 – Termístor do tipo NTC	2-18
Figura 21 – Exemplo de um sensor RTD	2-18
Figura 22 – Esquema de funcionamento de um extensómetro.....	2-19
Figura 23 – Exemplo de um extensómetro aplicado num varão de armadura	2-19
Figura 24 – Componentes de um extensómetro	2-20
Figura 25 – Esquema de funcionamento de um LVDT	2-21
Figura 26-Variação da deformação imposta num SFO e o comprimento de onda da luz reflectida	2-22
Figura 27 – Resultados obtidos para um compósito com 0,19% (vol) de FC [62] ..	2-23
Figura 28 – Evolução da temperatura num edifício passivo durante o ano (hemisfério norte) [22].....	2-24
Figura 29 – Ambiente térmico assimétrico.....	2-31
Figura 30 – Distribuição da temperatura do pavimento radiante.....	2-32

Figura 31 – Distribuição da temperatura dos painéis radiantes	2-33
Figura 32 – Pavimento radiante típico	2-33
Figura 33 – Polímero “Silastic”	3-2
Figura 34 – Fibras de carbono	3-3
Figura 35 – Imagem das fibras de carbono utilizadas obtidas por microscopia óptica	3-4
Figura 36 – Gesso estuque utilizado na construção das placas de aquecimento ...	3-4
Figura 37 – Compósito moldado	4-3
Figura 38 – Equipamento de ensaio utilizado	4-5
Figura 39 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio de fluência	4-6
Figura 40 – Equipamento do ensaio de fluência	4-7
Figura 41 – equipamentos utilizados para efectuar as leituras.....	4-7
Figura 42 – Sensores aplicados “in situ” numa sapata	4-7
Figura 43 – Influência da temperatura na realização dos ensaios	4-8
Figura 44 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC15-5.....	4-11
Figura 45 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC15-10	4-12
Figura 46 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC15-13	4-13
Figura 47 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC15-5.....	4-14
Figura 48 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC15-10	4-15
Figura 49 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC15-13	4-15
Figura 50 – Evolução do desempenho nos sensores do tipo FC15	4-16
Figura 51 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC03-40	4-18
Figura 52 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC03-50	4-19
Figura 53 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC03-40	4-20
Figura 54 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC03-50	4-21
Figura 55 – Evolução do desempenho nos sensores do tipo FC03	4-21
Figura 56 – Ensaio do sensor FC15-51.....	4-24
Figura 57 – Ensaio do sensor FC15-52.....	4-24
Figura 58 – Ensaio do sensor FC15-53.....	4-25
Figura 59 – Ensaio do sensor FC15-101	4-25
Figura 60 – Ensaio do sensor FC15-102	4-26
Figura 61 – Ensaio do sensor FC15-103	4-26
Figura 62 – Ensaio do sensor FC15-131	4-27
Figura 63 – Ensaio do sensor FC15-132	4-27
Figura 64 – Ensaio do sensor FC15-133	4-28
Figura 65 – Reversibilidade dos sensores do tipo FC15 para uma deformação nula 4-	
29	
Figura 66 – Variação da reversibilidade nos sensores FC15.....	4-30

Figura 67 – Reversibilidade nos sensores do tipo FC15 para a deformação máxima	4-30
Figura 68 – Variação da reversibilidade nos sensores FC15.....	4-31
Figura 69 – Ensaio do sensor FC03-401	4-31
Figura 70 – Ensaio do sensor FC03-402	4-32
Figura 71 – Ensaio do sensor FC03-403	4-32
Figura 72 – Ensaio do sensor FC03-501	4-33
Figura 73 – Ensaio do sensor FC03-502	4-33
Figura 74 – Ensaio do sensor FC03-503	4-34
Figura 75 – Reversibilidade dos sensores do tipo FC03 para uma deformação nula 4-35	
Figura 76 – Variação da reversibilidade nos sensores FC03.....	4-35
Figura 77 – Reversibilidade nos sensores do tipo FC15 para a deformação máxima	4-36
Figura 78 – Variação da reversibilidade nos sensores FC15.....	4-36
Figura 79 – Deformação versus Resistência eléctrica do sensor FC15-131 (10 ciclos)	4-39
Figura 80 – Curva de calibração do sensor FC15-51	4-40
Figura 81 – Curva de calibração do sensor FC15-52	4-40
Figura 82 – Curva de calibração do sensor FC15-53	4-41
Figura 83 – Curva de calibração do sensor FC15-101.....	4-41
Figura 84 – Curva de calibração do sensor FC15-102.....	4-41
Figura 85 – Curva de calibração do sensor FC15-103.....	4-42
Figura 86 – Curva de calibração do sensor FC15-131.....	4-42
Figura 87 – Curva de calibração do sensor FC15-132.....	4-42
Figura 88 – Curva de calibração do sensor FC15-133.....	4-43
Figura 89 – Curva de calibração do sensor FC03-401.....	4-43
Figura 90 – Curva de calibração do sensor FC03-402.....	4-43
Figura 91 – Curva de calibração do sensor FC03-403.....	4-44
Figura 92 – Curvas de calibração dos sensores FC03-501.....	4-44
Figura 93 – Curvas de calibração dos sensores FC03-502.....	4-44
Figura 94 – Curvas de calibração dos sensores FC03-503.....	4-45
Figura 95 – aspecto final do sensor a colocar em obra	4-47
Figura 96 – As fases de construção	4-47
Figura 97 – Construção da escola	4-48
Figura 98 – evolução da resistência eléctrica com a construção do edifício.....	4-49
Figura 99 – evolução da resistência eléctrica com a construção do edifício.....	4-49
Figura 100 – Construção da moradia unifamiliar	4-50

Figura 101 – Resultados do ensaio in situ dos sensores do tipo FC15-5	4-51
Figura 102 – Resultados do ensaio in situ dos sensores do tipo FC15-10	4-51
Figura 103 – Resultados do ensaio in situ dos sensores do tipo FC15-13	4-52
Figura 104 – Elemento polimérico reforçado com fibras contínuas de carbono	5-3
Figura 105 – Esquema de colocação dos termopares	5-4
Figura 106 – equipamentos utilizados para efectuar as leituras	5-4
Figura 107 – Pormenor dos contactos dos sensores para aplicação da tensão	5-5
Figura 108 – Placa de aquecimento PCL2	5-6
Figura 109 – evolução da temperatura nas placas do tipo PCL	5-7
Figura 110 – Placa de aquecimento GET2.....	5-8
Figura 111 – evolução da temperatura nas placas do tipo GET	5-9
Figura 112 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-51	8-1
Figura 113 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-52	8-1
Figura 114 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-53	8-1
Figura 115 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-101	8-2
Figura 116 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-102	8-2
Figura 117 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-103	8-2
Figura 118 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-131	8-3
Figura 119 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-132	8-3
Figura 120 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-133	8-3
Figura 121 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-401	8-4
Figura 122 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-402	8-4
Figura 123 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-403	8-4
Figura 124 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-501	8-5
Figura 125 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-502	8-5
Figura 126 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-503	8-5
Figura 127 – ensaio de calibração do compósito CLS1	8-7
Figura 128 – ensaio de calibração do compósito CLS2	8-7
Figura 129 – ensaio de calibração do compósito CLS3	8-8
Figura 130 – ensaio de calibração do compósito CLS5	8-8
Figura 131 – ensaio de calibração do compósito CL1	8-9
Figura 132 – ensaio de calibração do compósito CL2	8-9
Figura 133 – ensaio de calibração do compósito CLM.....	8-10

Índice de tabelas

Tabela 1 – Potência anunciada dos fabricantes de cabo de aquecimento [60]....	2-34
Tabela 2 – propriedades das fibras de carbono anunciadas pelo fabricante	3-3
Tabela 3 – valores da RE inicial dos sensores FC15 para 1mm de deformação...	4-10
Tabela 4 – Desempenho para uma deformação de 1mm dos sensores FC15-5 ..	4-10
Tabela 5 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC15-10	4-11
Tabela 6 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC15-13	4-12
Tabela 7 – valores da RE inicial dos sensores FC15 para 2mm de deformação...	4-13
Tabela 8 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC15-5 ..	4-14
Tabela 9 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC15-10	4-14
Tabela 10 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC15-13 .	4-15
Tabela 11 – valores da RE inicial dos sensores FC03 para 1mm de deformação .	4-17
Tabela 12 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC03-40 .	4-18
Tabela 13 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC03-50 .	4-18
Tabela 14 – valores da RE inicial dos sensores FC03 para 1mm de deformação .	4-19
Tabela 15 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC03-40 .	4-20
Tabela 16 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC03-50 .	4-20
Tabela 17 – Sensibilidade dos sensores do Tipo FC15	4-38
Tabela 18 – Sensibilidade dos sensores do Tipo FC03	4-38
Tabela 19 – Cronograma temporal da construção da Escola.....	4-48
Tabela 20 – Evolução da construção da habitação	4-50
Tabela 21 – Temperaturas registadas para as placas de PCL.....	5-6
Tabela 22 – Valores obtidos para as placas de GET	5-8
Tabela 23 – Valores obtidos no ensaio “ <i>in situ</i> ” na construção da habitação unifamiliar	8-1
Tabela 24 – Valores obtidos no ensaio <i>in situ</i> na construção da escola básica.....	8-2
Tabela 25 – valores de sensibilidade em cada ciclo dos sensores FC15.....	8-6
Tabela 26 – Valores de sensibilidade em cada ciclo dos sensores FC03.....	8-6

Símbolos e abreviaturas

σ	Tensão mecânica
E	Módulo de elasticidade (Young)
ε	Extensão de deformação
R	Resistência eléctrica
R_0	Resistência eléctrica inicial
d_d	Taxa de variação da resistência eléctrica
d_p	Perda de resistência eléctrica
R_t	Leitura da resistência eléctrica no instante t
d_r	Parte reversível nas leituras de resistência eléctrica
k	Sensibilidade ou <i>gauge factor</i>
U	Tensão eléctrica (Volt)
I	Intensidade de corrente eléctrica (A)

PAN	Poliacrilonitrila
EI	Edifícios inteligentes
ME	Monitorização Estrutural
EBA	Estruturas de Betão Armado
ER	Elemento Reactivo
SFO	Sensores de Fibra Óptica
RE	Resistência eléctrica

Introdução

A tecnologia tem sido vista e encarada ao longo dos tempos como sendo o fio condutor para o progresso e o futuro. Actualmente a evolução tecnológica está ao ritmo mais acelerado de sempre, está em todo o lado para onde quer que se olhe. Dá a sensação que o mundo começou a encolher devido á cada vez mais rápida forma de comunicar. É a era da sociedade da informação.

O crescente desenvolvimento e aplicação de novos materiais nas últimas décadas permitiram melhorar a qualidade de vida para o ser humano e consequentemente a sociedade em que está inserido.

Entre os demais materiais estudados actualmente, as fibras de carbono têm merecido uma atenção especial devido às suas características particulares, as quais se destacam a sua baixa densidade associado a uma elevada resistência mecânica. As fibras de carbono foram usadas inicialmente para satisfazer as necessidades da indústria aeronáutica e aeroespacial. O sucesso deste material foi tal que conduziu à investigação não só de novas aplicações mas também do melhoramento do processo de obtenção e fabricação das fibras.

Actualmente as fibras de carbono são utilizadas nas demais áreas da indústria como por exemplo na industria automóvel, na medicina, no desporto assim como na construção civil.

Este trabalho visa estudar novas aplicações da fibra de carbono na área da engenharia civil.

Objectivos

Este trabalho pretende estudar as propriedades eléctricas das fibras de carbono no desenvolvimento de novas aplicações e materiais.

O primeiro objectivo consiste no estudo da aplicação de uma nova base de suporte, o silicone, com incorporação de fibras de carbono a fim de estudar as propriedades piezoresistivas do compósito. A caracterização dos sensores só estará concluída após a obtenção das curvas de calibração de cada um dos sensores. Por último e de forma a avaliar a sua aplicabilidade prática, os sensores serão colocados “in situ” nos solos das fundações de uma estrutura escolhida para o efeito.

O segundo objectivo consiste em estudar as propriedades termoeléctricas das fibras de carbono quando incorporadas em elementos compósitos de modo a este poder actuar como um elemento capaz de produzir calor por radiação térmica quando sujeito a uma corrente eléctrica. Assim serão desenvolvidas placas de pavimento radiante com incorporação de fibras de carbono em diferentes quantidades para quantificação e minimização dos consumos energéticos e determinação do poder calorífico radiante máximo.

Metodologia

Numa área nova e com a finalidade de aprofundar o conhecimento específico e em especial, o modo de como as fibras de carbono influenciam o comportamento e o desempenho dos materiais na construção civil, pretende-se avaliar o potencial das fibras de carbono na elaboração de um compósito que apresente propriedades piezoelectricas. Deste modo vai ser estudado um compósito polimérico reforçado com fibras de carbono, em que, variando as percentagens de incorporação de fibras bem como as suas dimensões, otimizar a resposta do sensor.

Pretende-se ainda estudar as propriedades termoeléctricas das fibras de carbono. Para isso, serão realizados ensaios laboratoriais a fim de avaliar a capacidade de produção de calor das fibras de carbono e a possibilidade de serem utilizadas para pisos radiantes.

Este trabalho foi feito de acordo com a seguinte ordem de trabalhos:

1. Pesquisa e análise crítica de bibliográfica relevante;
2. Desenvolvimento de sensores com a quantificação das dosagens óptimas de fibras de carbono no fabrico e obtenção das respectivas curvas de calibração;
3. Aplicação dos sensores "in situ" nas fundações de um edifício;
4. Desenvolvimento de placas de aquecimento para pavimento radiante térmico com a quantificação da dosagem óptima de fibras de carbono;
5. Realização de ensaios em amostras que visam a obtenção da quantidade de calor que o revestimento permite produzir e armazenar assim como será estudado o consumo real de energia das placas aquecidas;
6. Análise e comparação de resultados pelas características dos materiais classificando-os segundo as suas vantagens e limitações, assim como os custos de produção e as possibilidades de aplicação e comercialização.

O presente trabalho tem essencialmente em vista o domínio da engenharia civil e das suas aplicações. O tipo de investigação aqui apresentada apoia-se necessariamente na tecnologia e meios existentes, desenvolvidos para avaliar um conjunto de propriedades e características associadas a utilização das fibras de carbono.

Estrutura do Trabalho

Esta dissertação encontra-se dividida em oito capítulos, os quais se passam a apresentar:

Capítulo 1 – Fibras de carbono – introdução ao conceito das fibras de carbono, como se obtêm e quais as suas propriedades;

Capítulo 2 – Edifícios Inteligentes – Introdução ao conceito de edifício inteligente e a sua relação com a sustentabilidade na construção. São apresentados ainda os tipos de monitorização existentes actualmente;

Capítulo 3 – Materiais utilizados e procedimentos seguidos na realização na realização dos ensaios;

Capítulo 4 – Sensores com Fibra de Carbono – Desenvolvimento e estudo de um compósito com incorporação de fibras de carbono e avaliação da sua capacidade piezoresistiva;

Capítulo 5 – Placas de Aquecimento – Desenvolvimento e estudo de um sistema inovador de aquecimento por radiação térmica de baixo consumo recorrendo às fibras de carbono;

Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros;

Capítulo 7 – Referências Bibliográficas;

Capítulo 8 – Anexos – Apresentação de gráficos, tabelas e resultados obtidos dos ensaios realizados;

1 Fibras de Carbono

Primeiro capítulo

1.1 Introdução

O Fabrico das fibras de carbono (FC) remontam ao fim do século XIX, em 1879, em que Thomas Edison e Joseph Swan empregaram na construção do filamento da lâmpada incandescente, fibras de bambu carbonizado [4]. Contudo, o seu interesse e desenvolvimento só se deu oitenta anos mais tarde, por volta da década de 60, em plena guerra-fria, propulsionado pelos avanços ocorridos nas indústrias aeronáuticas e bélicas em especial, a aeroespacial, com a necessidade de materiais mais leves e ao mesmo tempo mais resistentes. Em 1957, são produzidas as primeiras FC a partir das fibras de Rayon. Cinco anos mais tarde, em Osaka, no Japão, a descoberta conduz à produção de FC de elevado desempenho a partir da poliacrilonitrila (PAN). O interesse comercial deste material, só se deu contudo na década de 70 com a sua produção industrial e a consequente comercialização de produtos como tacos de golfe e indústria comercial aeronáutica[4].

Actualmente, os principais materiais precursores utilizados na produção de fibras de carbono são o rayon, a poliacrilonitrila (PAN) e o pitch de petróleo.

As FC apresentam uma morfologia fibrosa (filamentos) com um teor mínimo de carbono de 92% em massa e com uma estrutura grafitica obtida através da carbonização de fibras orgânicas naturais ou sintéticas ou através de fibras resultantes de precursores orgânicos. O desenvolvimento de compósitos à base de FC advém de se ter compreendido que a associação de fibras sintéticas com uma mistura de resinas se traduzia em materiais leves, fortes e duráveis. Nos dias de hoje as FC são produzidas em rolos "Anilox". Estes rolos de FC são constituídos por milhares de fibras individuais entrelaçadas, misturadas numa resina epoxy e curadas de modo a dar a aparência final. A orientação que se dá às fibras no processo de colagem é fundamental na definição das propriedades físicas e mecânicas do compósito, em especial, a elevada resistência à tracção elevado modulo de elasticidade e boa condutividade eléctrica.

As fibras de carbono estão normalmente associadas a um filamento de carbono ou a uma malha de tecido fabricado a partir dos mesmos. O método mais comum de fabrico dos filamentos de carbono é através da oxidação e da pirólise térmica da PAN [47]. A PAN é utilizada no fabrico de diversos materiais sintéticos e como qualquer polímero, as suas moléculas são cadeias longas que no processo de fabricação vão sendo alinhadas de modo obter filamentos longos e contínuos.

Quando aquecidas sob determinadas condições, estas cadeias formam ligações paralelas entre si (polímero em escada) que, à medida que se vão ligando entre si, vão formando uma folha fina grafitica, resultando eventualmente num único filamento maleável. No entanto, podem ser fabricadas fibras de mais baixa qualidade substituindo-se o precursor por Pitch ou Rayon [47].

As propriedades do carbono resultante podem ser moldadas através de variações no processo de tratamento térmico produzindo fibras com um módulo de elasticidade melhorado ou com uma tensão de cedência melhorada. O carbono aquecido no intervalo de 1500 a 2000 °C (carbonização) exibe uma tensão de cedência melhorada (5650 MPa) enquanto as fibras de carbono aquecidas de 2500 a 3000 °C (grafitização) exibem um módulo de elasticidade melhorado (531GPa).

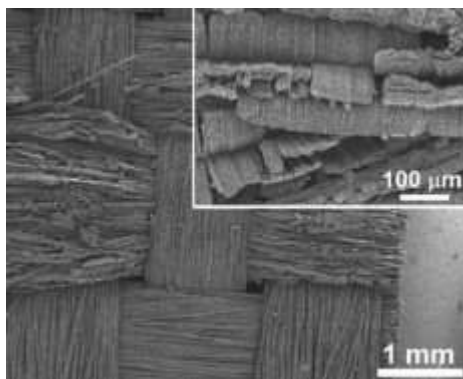


Figura 1 – Exemplo da orientação das fibras na elaboração de um material compósito

1.2 Produção das fibras de carbono

Até meados da década de 60, as fibras de carbono eram preparadas a partir do cianeto de hidrogénio (HCN), um processo muito tóxico e com rendimentos da ordem dos 65% [48].

O processo actual de obtenção das fibras de carbono é denominado por processo Sohio e resulta de uma reacção de amonoxidação do propano e da amónia:

Figura 2 – Reacção de amonoxidação do propano e da amónia

O produto é uma cadeia polimérica longa, a PAN, resultante do processo de polimerização do material acima descrito (fig.3).

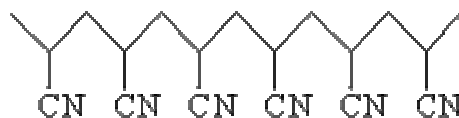


Figura 3 – Poliacrilonitrila

Com o passar do tempo esta técnica foi sujeita a estudos que conduziram a diversos melhoramentos nos mecanismos de obtenção das FC, nomeadamente no que concerne ao aumento substancial do rendimento, diminuição da produção de gases e águas residuais assim como se tornou energética, económica e ambientalmente mais eficiente.

De entre os estudos efectuados, Fitzer *et al* citado por Donnet *et al* [1] estabelece no seu trabalho os mecanismos existentes na produção de fibras de carbono a partir da PAN onde concluiu que o processo envolvia dois estágios de reacção. O primeiro consistia na pré-oxidação entre 200 a 300°C e a eliminação de átomos de outros elementos químicos que não os de carbono. O segundo estágio correspondia à formação das cadeias de grafite entre 300 e 1000°C.

Por outro lado um estudo mais detalhado da pirólise da PAN levado a cabo por Watt e Huron e igualmente citado em Donnet *et al* [1], mostra que existem outras fases de reacção dentro dos dois estágios principais propostos por Fritzer. Edmonds [2] aborda igualmente as diferentes fases de reacção que ocorrem durante a pirólise da PAN na preparação das fibras de carbono. Neste trabalho, além das transformações que este material sofre entre a temperatura de oxidação (próximo de 200°C) e carbonização (próximo de 1600°C) são também discutidas as mudanças ocorridas até a temperatura de grafitação, cerca de 2700°C. Tang e Bacon [3] propuseram no seu trabalho um mecanismo para a pirólise do rayon baseado nos dados obtidos por meio de espectroscopia na região do infravermelho e análises termogravimétricas, associados às propriedades físicas dos materiais intermediários obtidos nas diferentes etapas do processo de fabricação.

Embora o processo de fabricação possa variar de acordo com o precursor que se está a utilizar, no caso da PAN o método consiste, de forma genérica, em dois estágios de temperatura. O primeiro estágio consiste na oxidação do material precursor através da elevação da temperatura até aos 200°C. Este estágio por sua vez subdivide-se em 3 fases [46]:

- **Preparação:** Preparação da PAN ou do Rayon, ou no caso do Pitch, é efectuada a modificação prévia da sua composição química;
- **Fiação:** Nesta fase o precursor é transformado em fibra com diâmetro à saída da fieira de cerca de 100 μ m, onde, e após esticagem durante o processo de bobinagem, diminui até 10 μ m. Este processo de fiação produz um alinhamento das moléculas na direcção paralela à das fibras:
- **Estabilização:** De modo a endurecer as fibras obtidas na fiação procede-se a sua oxidação parcial a uma temperatura não superior aos 200°C. Este processo permite fixar a orientação das moléculas evitando deste modo o relaxamento da cadeia polimérica [2] assim como aumentar a temperatura de fusão para valores superiores a temperatura de decomposição.

A elevação da temperatura deve ser feita de forma gradual e controlada para evitar a fusão ou excessiva volatilização do material.

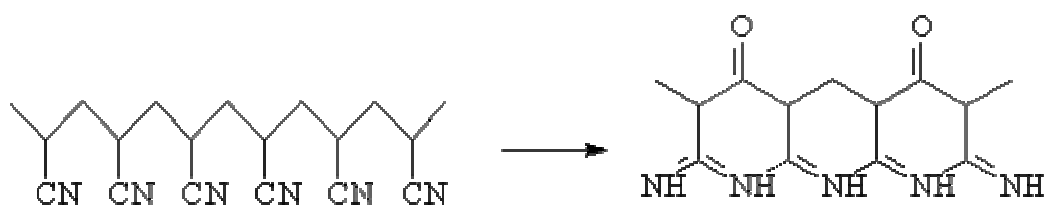


Figura 4 – Fase de Estabilização no processo de produção das Fibras de Carbono

Durante este processo a cadeia molecular assume uma estrutura hexagonal através da remoção dos átomos de hidrogénio e adição de átomos de oxigénio (fig.4) observa-se também uma alteração da cor do polímero que passa de branco a uma cor negra [48].



Figura 5 – esquema de produção das fibras de carbono

O estágio seguinte consiste em refinar e purificar o material resultante do estágio anterior sendo para isso necessário elevar novamente a temperatura, desta vez até aos 1600°C numa atmosfera inerte. Para isso, a primeira fase consiste em aquecer o polímero num ambiente rico em nitrogénio, o que permite expelir as impurezas contidas nas cadeias moleculares como subprodutos voláteis, que são removidos até que o polímero contenha um teor de carbono entre 92 e 100%, dependendo da qualidade que se pretende dar à fibra final. Este estágio é denominado por

carbonização e o precursor é convertido em cadeias de carbono com um arranjo estrutural grafítico.

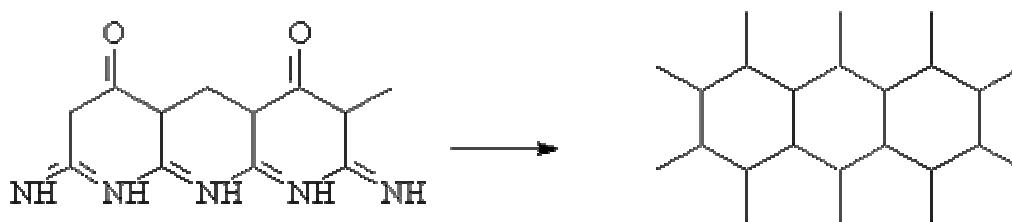


Figura 6 – Processo de carbonização

De acordo com as propriedades que se pretende obter (ver 1.1) pode ainda realizar-se uma segunda fase de temperatura, de onde resulta um material com características semelhantes à grafite [1][2]. Esta fase é denominada por grafitização e permite aumentar o grau da estrutura grafítica, isto é as fibras de carbono obtidas no processo, possuem um melhor ordenamento da cadeia polimérica [4]. Por último procede-se a uma oxidação superficial onde as fibras são sujeitas a tratamento de oxidação de modo a aumentar a sua rugosidade e polaridade superficial.

1.3 Arranjo estrutural e químico

A composição das fibras de carbono depende do tipo material e da temperatura utilizada no processo de fabricação. Basicamente, quando as fibras são preparadas em temperaturas próximas de 1000°C, encontram-se elementos químicos como C, H, N e O. À medida que a temperatura aumenta, as percentagens de H, N e O diminuem, enquanto que a de carbono aumenta[5] . Para valores de temperatura próximos de 2000°C, a fibra é composta essencialmente por átomos de carbono 2 e possuem estruturas muito semelhantes àquelas encontradas no carbono vítreo, com arranjos superficiais similares aos de microfibras entrelaçadas [6].



Figura 7 – Arranjo estrutural das fibras de carbono

De modo a se compreender melhor os fenômenos que envolvem a produção das fibras de carbono, foram realizados diversos estudos que tentam de uma forma ou de outra encontrar uma explicação através do arranjo estrutural e químico. De um modo geral, os resultados obtidos mostram que as principais propriedades das fibras de carbono como a resistência mecânica, estrutura e composição dependem do tipo de precursor e do processo de fabricação.

Sob o ponto de vista estrutural das fibras de carbono, Donnet [1] discute dois modelos que foram propostos, simultânea e independentemente, em 1969 por Johnson e Tyson [1] e por Fourdeux *et al* [1].

O modelo de Johnson e Tyson (fig.8) sugere que as fibras são formadas pelo empilhamento de várias camadas de carbono com uma espessura muito fina (tipo folha). O empilhamento está relacionado com o comprimento axial da fibra de carbono, enquanto que as várias colunas colocadas lado a lado determinam a espessura da fibra ou sua secção transversal.

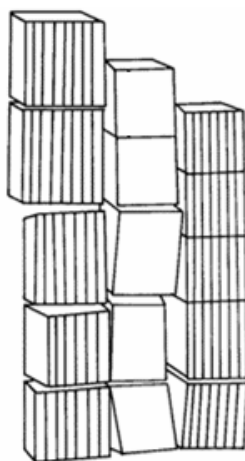


Figura 8 – Modelo de estrutura de fibra de carbono proposto por Johnson e Tyson [1]

Este modelo não teve uma aceitação generalizada já que pressupunha uma certa descontinuidade nas fibras. Mais tarde Ruland [1] (fig.9) no seu modelo desenvolvido, afirma que as fibras são compostas por tiras muito finas, com cerca de 6 ηm de espessura e alguns milhares de ηm de comprimento que por sua vez agregam-se paralelamente estendendo-se axialmente na direcção da fibra de carbono. As superfícies axiais destas microfibras são formadas por diversos planos basais de grafite [1][2].

No esquema mostrado na figura 9, podem ser observadas também lacunas entre as microfibras. Essas lacunas ocorrem em fibras com dimensões de 20 a 30 ηm de comprimento e 1 a 2 ηm de largura, e aparecem durante a formação da fibra de carbono, devido a dobras nas microfibras e imperfeições de acondicionamento.

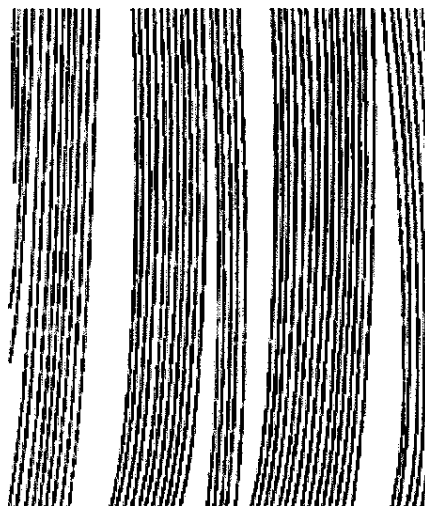


Figura 9 – Modelo da estrutura de fibras de carbono proposto por Ruland [1]

Outros trabalhos têm demonstrado que diferentes tipos de lacunas podem ainda aparecer devido à volatilização de materiais presentes nas fibras durante o aquecimento [2]. Neste caso, estas falhas estruturais possuem dimensões diferentes que aquelas descritas anteriormente, podendo alcançar comprimentos da ordem de 5 a 10 ηm . O resultado deste modelo estrutural revela que as fibras de carbono possuem uma baixa porosidade ao longo do eixo axial, enquanto que ao longo da secção transversal a porosidade é bastante elevada. Alguns modelos estruturais da secção transversal de fibras de carbono são apresentados na figura 10. Existem diversas estruturas, sendo as mais comuns do tipo radial, aleatório e de círculos concêntricos [4].



Círculos concêntricos

Aleatório

radial

Figura 10 – Modelos de estruturas transversais de fibras de material tipo PAN e pitch [4]

1.4 Propriedades

As fibras de carbono são conhecidas por serem um material com excepcionais propriedades mecânicas, com módulo de elasticidade elevado associado a uma elevada resistência à tracção e compressão. A sua estrutura anisotrópica associada a ligações carbono-carbono extremamente fortes contrasta com as fracas ligações dos planos basais. Deste modo as FC apresentam propriedades mecânicas muito boas no plano axial e ao mesmo tempo têm baixa resistência ao impacto devido ao carácter frágil na direcção perpendicular ao eixo das fibras.

Uma outra propriedade conhecida das fibras de carbono é a sua condutividade eléctrica. Trata-se de um material com boa condutividade e apresenta uma variação da sua resistência eléctrica 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 [8]. Além disso, foi observado também que existe uma correlação entre os valores de resistência eléctrica e os diferentes grupos funcionais presentes na superfície das fibras. Observa-se nesses grupos que são basicamente compostos por oxigénio, predominando grupos carboxílicos, hidroxílicos e etílicos. Existe ainda a possibilidade de se encontrar grupos aromáticos como quinonas, hidroxiquinonas e fenóis. O tipo de grupo, bem como a sua densidade na superfície da fibra, depende do tratamento térmico e do tipo de oxidação química e/ou electroquímica ao qual o material é submetido antes da sua utilização [2].

Outras propriedades físicas das fibras de carbono de relevo, são a sua elevada resistência ao fogo uma vez que tem um ponto de fusão bastante alto e resistente à corrosão, por se tratar de um material quimicamente inerte.

De modo a melhor se distinguir os diferentes tipos de FC, estas encontram-se classificadas em cinco categorias de acordo com as suas propriedades mecânicas [48][49]:

- UHM (Ultra High Modulus) – As FC desta categoria possuem um módulo de Elasticidade de pelo menos 50% superior ao modulo de Elasticidade de um monocristal de grafite (1050GPa);
- HM (High Modulus) – As FC desta categoria possuem um módulo de Elasticidade de pelo menos 30% superior ao modulo de Elasticidade de um

monocristal de grafite e têm uma relação de resistência à tracção/modulo de elasticidade inferior a 1%;

- HS (High Stength) – As FC desta categoria apresentam valores de tensão superiores a 3000MPa e relações de Carga/rigidez de $1,5 \times 10^{-2}$. Têm ainda um módulo de Elasticidade de pelo menos 20% superior ao modulo de Elasticidade de um monocristal de grafite;
- IM (Intermediate Modulus) – A FC desta categoria apresentam valores de resistência da mesma ordem de grandeza da categoria anterior. Isto é conseguido através da redução da secção do monofilamentos de carbono para diâmetros da ordem dos 5 μ m. Os valores do módulo de Elasticidade são pelo menos 30% superior ao módulo de Elasticidade de um monocristal de grafite;
- LM (Low Modulus) – Trata-se de fibras de estrutura isotrópica, com valores do módulo de elasticidade inferiores a 10% do módulo E de um monocristal de grafite. Apresentam igualmente resistências à tracção baixas. São comercializadas como fibras curtas.

As fibras de alto módulo (HM) são preparadas a partir de materiais precursores tipo pitch e PAN. Estas fibras têm a particularidade de apresentarem um elevado grau de alinhamento da estrutura molecular carbono-carbono, com ligações paralelas à direcção axial da fibra, de onde resulta a denominação de "árvore de anéis" assim como apresentam um custo mais elevado uma vez que o processo de fabricação necessita de uma etapa de estiramento do material precursor a altas temperaturas [4][7]. Quanto às fibras de baixo módulo (LM) são obtidas a partir de materiais como o rayon e o pitch isotrópico.

2 Edificios Inteligentes

Segundo Capítulo

2.1 Edifícios Inteligentes

Tradicionalmente, a inteligência é tida como sendo uma capacidade cognitiva abstracta e inata que serve de base a todos os processos de raciocínio. Piaget [9] define inteligência não como um atributo, mas como uma hierarquia complexa de capacidades para processar informação a partir de um equilíbrio adaptativo entre o ser individual e o seu meio ambiente. Naturalmente, existem outros pontos de vista, contudo Piaget na sua definição refere algo que pode servir para compreender como as pessoas vivem ou trabalham nos edifícios e interagem com seu microclima, a estrutura do edifício e o ambiente externo.

A partir da definição dada, como é que é possível que se designem certo tipo de equipamentos como inteligentes?

Sem querer embarcar numa discussão sobre a inteligência artificial, é de todo natural que haja quem entenda que algumas destas formas inanimadas inteligentes são incapazes de apresentar a espontaneidade criativa. Por exemplo, considere o acto de tirar uma fotografia: pode-se optar por escolher um conjunto de pré-definições, ao qual a máquina ajusta a melhor exposição à iluminação ambiente, contudo desta forma está-se a descartar a capacidade de julgamento humano que faz com que aquela fotografia seja uma arte; a tecnologia deve realçar a oportunidade de explorar e não de usurpar a criatividade humana.

Embora ainda seja geralmente considerada como fundamental para o nosso bem-estar, é vista actualmente, como sendo um meio para atingir um fim, seja ele qual for e não apenas o fim em si.

Intimamente ligado ao desenvolvimento exponencial das tecnologias e à medida foram aumentando as exigências de conforto das construções e de segurança das estruturas, tornava-se necessário definir um conjunto de acções e processos de modo a darem resposta a essas mesmas exigências. Assim nasce o conceito de edifício inteligente.

Alvo de uma discussão intensa, de onde resultaram as mais variadas definições, em que as primeiras remontam aos anos 80 e caracterizavam-se por ser orientadas na sua totalidade para o aspecto tecnológico não sugerindo qualquer intervenção humana [11]. Cardin, em 1983, citado em [11], define edifício inteligente com “um edifício que possui um sistema de controlo completamente autónomo”. A *Intelligent*

Building institution (E.U.A.) em 1988 (citado em [12][13]) entende um edifício inteligente como “um edifício que integra diferentes sistemas para gerir os recursos de uma forma eficiente e maximizar: o desempenho técnico, flexibilidade e custos de investimento e de manutenção”.

Contudo a definição meramente tecnológica de edifício inteligente provou-se que era notoriamente insatisfatória já que os edifícios que não fossem capazes de interagir com as mudanças de pessoas que o ocupam, ou mesmo com a tecnologia de informação que utilizassem, tornar-se-iam permanentemente obsoletos e consequentemente eram demolidos ou necessitavam de uma reabilitação profunda de modo a torna-los novamente utilizáveis.

Exigia-se, então, que a definição introduzisse o conceito de “exigências dos utilizadores”, já que se provou que os sistemas de serviço e a gestão dos processos inerentes à utilização do edifício apresentam uma afinidade bastante grande com o bem estar e conforto das pessoas que nele habitam e que por sua vez influenciam a sua produtividade, bem estar psicológico e satisfação. Assim tornava-se imperativo acrescentar à definição de edifício inteligente a capacidade de integrar multidisciplinarmente a estrutura do edifício, sistemas, serviços e gestão, de modo a criar-se um ambiente produtivo de baixo custo e ambientalmente satisfatório para os ocupantes do edifício[44][39].

Mais recentemente alguns autores acrescentaram a essa definição de edifício inteligente a capacidade de “auto aprendizagem” [11][45]. É proposto que o edifício não só seja capaz de reagir e mudar de acordo com as exigências individuais, organizacionais e ambientais, mas também seja capaz de aprender e ajustar o desempenho entre os ocupantes e o meio ambiente. Kell [10] afirma que um edifício inteligente está cada vez mais relacionado com o conceito de um edifício que fornece um ambiente com capacidade de resposta, seja de elevado desempenho e seja capaz de dar suporte às pessoas que habitam nele.

Por outro lado, existem diferentes interpretações à medida que se vai rodando a esfera terrestre. Do lado de lá do atlântico, nos Estados Unidos, a *Intelligent Building institution* define, actualmente, um edifício inteligente como “um edifício que providencia um ambiente produtivo e com baixos custos através da optimização de quatro elementos básicos: estruturas, sistemas, serviços e gestão e a sua relação entre eles” [11]. A definição europeia é dada através do *Building Intelligence Group* e define edifício inteligente como “um edifício que desenvolve

um ambiente que maximiza a eficiência dos seus ocupantes e ao mesmo tempo permite uma gestão eficiente dos recursos com o mínimo de custos associados de equipamentos e instalações” [11].

So et al. [14] salientam que os “edifícios inteligentes não possuem inteligência própria, contudo podem dotar as capacidades dos ocupantes com maior inteligência permitindo que eles trabalhem de um modo mais eficiente”. O mesmo autor sugere uma estratégia de dois níveis para definir o conceito de edifício inteligente. O primeiro nível compreende dez “módulos de qualidade ambiental” (MQA) que seguindo a revisão por Chow [15] são:

- Amigo do ambiente: conservação da energia e da saúde;
- Utilização do espaço e flexibilidade;
- Eficácia de custos: operação e manutenção com ênfase na eficácia;
- Conforto humano;
- Eficiência laboral;
- Medidas de segurança: fogo, sísmico, desastres e danos estruturais, etc;
- Cultura;
- Aparência de tecnologia de ponta;
- Estrutura e processos de construção;
- Saúde e condições sanitárias.

O segundo nível inclui três áreas de elementos chave que são:

- Exigências funcionais;
- Espaços funcionais;
- Tecnologias.

A cada um dos dez módulos supra mencionados é então adicionado um certo número de elementos chave ordenados segundo a sua prioridade. Deste modo So et al [14] redefiniram o conceito de edifício inteligente como:

“um edifício projectado e construído baseado na selecção adequada dos *módulos de qualidade ambiental* de forma a ir de encontro as exigências dos ocupantes através da criação de um conjunto de instalações apropriadas de forma a que o edifício possua características e valor de longa duração”

Esta definição permite desdobrar-se em duas vertentes principais: tem em conta os aspectos tecnológicos assim como as necessidades dos ocupantes. Permite ainda

facultar uma orientação específica e detalhada aos projectistas de forma a que estes possam projectar edifícios de elevada qualidade e consistentes com a definição de edifício inteligente, ao mesmo tempo que se vai desenvolvendo uma plataforma equilibrada para o estudo da performance do edifício inteligente ao nível da sua utilização por parte das pessoas.

2.2 Sustentabilidade

O conceito de desenvolvimento sustentável e de edifícios inteligentes apresentam-se em ascensão e a evoluir rapidamente [17][19][20] caminhando lado a lado e frequentemente de mãos dadas.

Apesar deste rápido desenvolvimento, estes conceitos ainda predominam mais do lado académico do que do ponto de vista do mundo prático da construção civil, como facilmente se comprova pela explosão de novos produtos e soluções tecnológicas e a sua aplicação no mercado da construção [18].

Existem vários motivos que explicam este comportamento. O mais óbvio, é sem dúvida, a falta de informação e de conhecimento por parte dos donos de obra e dos construtores, que, tipicamente, baseiam as suas construções tendo em conta a minimização de custos e, como tal, consideram frequentemente os edifícios inteligentes (EI) como soluções demasiadamente dispendiosas não só de construir como de manter. São frequentemente mal informados acerca dos custos de ciclo de vida do projecto em questão, o que resulta no momento de decisão não levar em conta factores como a eficiência e a flexibilidade que os EI podem trazer aos seus ocupantes, assim como o facto de representarem uma mais valia. Por outro lado, não existe uma forma adequada de comunicação que permita a divulgação deste tipo de conceitos por parte dos arquitectos e engenheiros projectistas para as empresas construtoras e donos de obra. Ao mesmo tempo, os empreiteiros sentem-se relutantes em adoptar estes conceitos nas suas construções temendo que este tipo de soluções torne o seu trabalho mais complexo e difícil de executar e que aumente ao mesmo tempo os riscos de projecto e de custos. Isto tudo resulta da falta de conhecimento e de valorização dos EI como valor acrescentado que podem trazer assim como o potencial que advém da diferenciação de produto no mercado.

Tal como a definição de edifício inteligente, o conceito de construção sustentável ainda se apresenta em debate. Kohler [16] define construção sustentável (fig.11)

através dos possíveis papéis que um edifício inteligente possa ter. O mesmo autor propõe os seguintes níveis para definir um edifício sustentável:

Sustentabilidade ambiental é compreendida como a protecção dos recursos e ecossistemas que podem ser analisados de forma quantitativa em relação a massa e energia consumidas por unidade de tempo e espaço;

Sustentabilidade económica pode ser dividida em investimento e custos de utilização. Em vez de minimizar os custos de investimento através de aplicação de materiais e processos construtivos de mais baixo custo, dá-se preferência a opções de investimento que se traduzam numa optimização da durabilidade e da requalificação. Esse tipo de soluções que permitem a reabilitação e a utilização das mais variadas formas, apresentam os valores de produtividade mais elevados a longo prazo. Edifícios com consumos mais reduzidos de energia e com maior facilidade de gerir e manter, regra geral apresentam custos de utilização mais baixos.

Sustentabilidade socio-cultural o quais se incluem o conforto, a saúde e a preservação dos valores, que serão as principais motivações que levam à conservação e reabilitação.

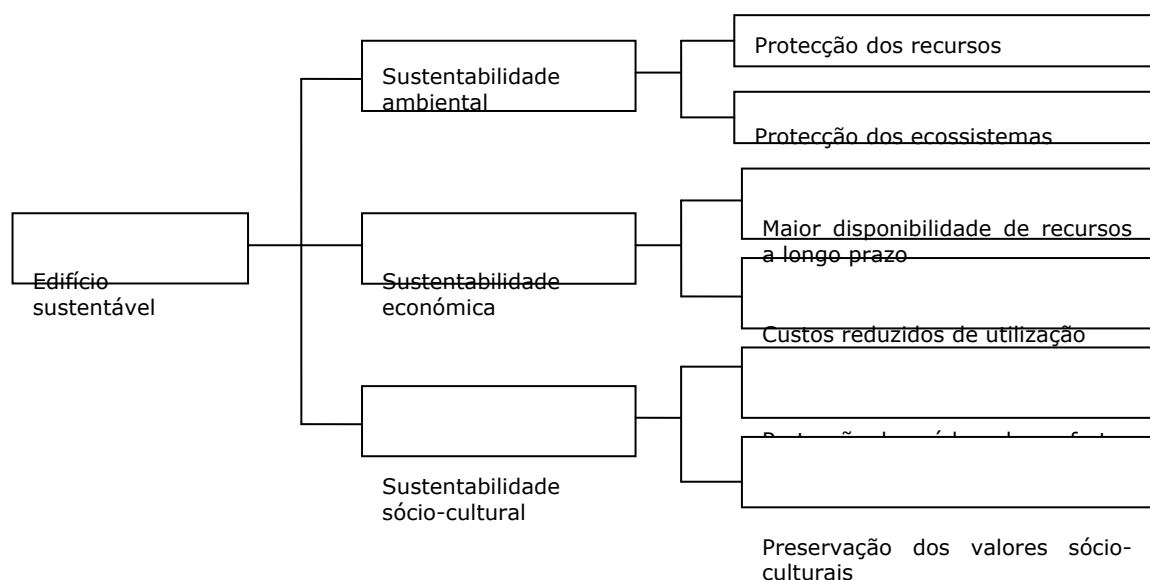


Figura 11 – Conceito de Edifício Sustentável segundo Kohler [16]

Os edifícios inteligentes podem e devem, desempenhar um papel fundamental no avanço e implementação não só de novas tecnologias mas também dos novos

materiais sustentáveis. Assim, a tecnologia “inteligente” que propicie a utilização de energias renováveis, reciclagem de sinergias, aplicação de materiais de construção sustentável ou prolongando a durabilidade dos materiais tradicionais, permite promover de uma forma activa a sustentabilidade sócio-cultural, económica e ambiental na construção edificada.

2.3 Estruturas Inteligentes

As estruturas podem ser dotadas de dois tipos de monitorização: a monitorização estrutural (*structural health monitoring*, SHM) e a monitorização não estrutural. A primeira denota a capacidade de detectar e interpretar "mudanças adversas" numa estrutura a fim reduzir custos de ciclo de vida e melhorar a sua fiabilidade. Por outro lado, a monitorização não estrutural, ou monitorização ambiental ou de conforto, consiste na capacidade de resposta de uma dada estrutura ou edifício às solicitações dos utilizadores do mesmo.

2.4 Monitorização estrutural

O processo de monitorização estrutural (ME) utiliza técnicas integradas de detecção não invasivas que através das leituras periódicas efectuadas por um conjunto de sensores, monitorizam continuamente a estrutura. A obtenção dos parâmetros de dano da estrutura é então possível recorrendo-se a uma análise probabilística de falha que determina o estado actual da estrutura. A longo prazo, os dados lidos vão sendo continuamente actualizados, tendo em conta o seu envelhecimento e degradação resultante das condições externas a que se encontra sujeita sendo realizada uma análise no que concerne ao seu desempenho estrutural. No caso de catástrofes, como por exemplo sismos, a ME permite uma avaliação quase em tempo real da integridade estrutural. Esta metodologia pode resultar em economias significativas no custo total da estrutura assim com obter ganhos significativos na segurança operacional[41].

Os requisitos dos utilizadores são levados em linha de conta de modo a se poder determinar quais os tipos de dano que devem ser monitorizados assim como a fiabilidade mínima que o sistema deve ter, os custos que lhe estão associados ou o grau de importância de monitorização dos diferentes elementos estruturais. Isto

inclui a forma de como os sensores do sistema de ME interagem entre si, assim como, onde devem estar situados.

Um ponto importante de decisão é a escolha entre um sistema de monitorização em tempo real ou descontínuo. Um sistema em tempo real efectua uma monitorização contínua da estrutura e produz informação que pode ser utilizada em qualquer momento por um técnico ou por uma estação de tratamento de dados. Já no caso de um sistema descontínuo, a informação é guardada e acedida apenas para intervenção periódica na estrutura.

No dimensionamento deste tipo de sistemas, o projectista deverá determinar, a disposição, a densidade e o padrão de sensores de modo a maximizar a redundância a ser implementada nos sistemas de monitorização com um nível de confiança elevado, tanto para falsos positivos como para falsos negativos. Quanto maior número de sensores a estrutura tiver melhor será a resolução do dano. Por outro lado, o aumento do número de sensores conduz a um aumento de consumos energéticos do edifício. Assim é fundamental que o projectista tenha um conhecimento dos tipos de dano mais comuns para um dado material e o conhecimento das alterações que esse mesmo material pode vir a estar sujeito devido a uma dada solicitação externa de forma a se poder melhor caracterizar o dano e escolher o sensor mais adequado.

Os sistemas sensitivos de um modo geral podem ser classificados de dois tipos: activos ou passivos. Os sensores passivos são aqueles que actuam apenas quando existe uma perturbação na estrutura que se encontra a monitorizar sem que este consuma qualquer tipo de energia. Os sensores mais simples deste tipo são aqueles que registam um único valor de máximo ou mínimo de tensões, extensões ou deslocamentos, exemplos deste tipo de sensores são as ligas metálicas que variam de fase e tornam-se magnetizadas sempre que ultrapassam uma dada tensão, extensómetros ou mesmo sensores de pressão poliméricos. Já os sensores activos requerem à partida que estejam ligados a um sistema de aquisição de dados para funcionarem adequadamente. Exemplos deste tipo de sensores incluem sistemas de medição de impedâncias eléctricas ou magnéticas, por exemplo, os piezoeléctricos como os do tipo PVDF (*"fluoropolymer polyvinylidene fluoride"*), ou sistemas de aquisição que requerem uma fonte luminosa como é o caso das fibras ópticas [48].

Os sensores do tipo passivo são normalmente mais simples de implementar e de trabalhar num sistema ME e fornecem detecção de falhas de um modo global na

estrutura. Enquanto os sensores do tipo activo são de elevada precisão de onde resulta informação detalhada e localizada sobre a zona afectada.

Os sensores são utilizados para monitorizar variáveis como a fissuração (extensões), acelerações, campos eléctricos ou magnéticos, pressão ou temperatura, entre outros. De seguida será feita uma abordagem aos sensores existentes disponíveis no mercado para monitorização de estruturas em engenharia civil.

2.4.1 Corrosão das armaduras

A durabilidade das estruturas em betão armado (EBA) e a corrosão que lhe está associada é uma problemática pela qual a comunidade científica se debate actualmente não só por motivos económicos mas também por motivos de sustentabilidade da construção.

A monitorização da corrosão com vista em prolongar a durabilidade das EBA não é efectivamente simples de se processar uma vez que se trata de um material compósito, complexo, cujas propriedades variam com o tempo, não se comportando portanto como um meio aquoso simples. Uma vez que o fenómeno da corrosão não se processa de forma imediata e visível, podem passar-se muitos anos até que se tenha uma noção real do problema. Assim as principais dificuldades que se deparam perante a comunidade científica, para além das já mencionadas são:

- Os sensores de monitorização e inspecção directa nas armaduras sujeitas a corrosão são de aplicação extremamente difícil uma vez que estas se encontram embebidas no betão;
- Dificuldade de adaptação dos sensores de corrosão;
- A fissuração no betão representa um dano bastante grande no que concerne a corrosão;
- A corrosão por difusão iónica tende a ser de natureza localizada.

De uma forma geral os fenómenos associados à corrosão implicam a existência de um ânodo, um cátodo e uma diferença de potencial que permita o livre fluxo de electrões. Sempre que se verificam estas condições, dá-se a formação de uma célula electroquímica, cujo electrólito, ou meio difusor, é a água que se encontra presente de forma permanente no interior do betão. A diferença de potencial, pode

ser obtida apenas pela simples variação da quantidade de água presente no interior do betão ou por uma concentração salina localizada. O oxigénio e os agentes agressivos catalizadores como o cloro aceleram o processo de corrosão completando o ciclo necessário à corrosão.



Figura 12 – Exemplo de corrosão numa estrutura de betão armado

A corrosão nas estruturas de betão armado (fig.12) dá-se fundamentalmente através de dois processos:

- O ataque por difusão iónica de cloretos, que resulta em grande parte dos ciclos de gelo-degelo nos climas mais frios e ou à exposição a condições ambientais marítimas;
- A redução da alcalinidade por carbonatação, que consiste num mecanismo químico de degradação mais nefasto e ao mesmo tempo mais complexo de estudar.

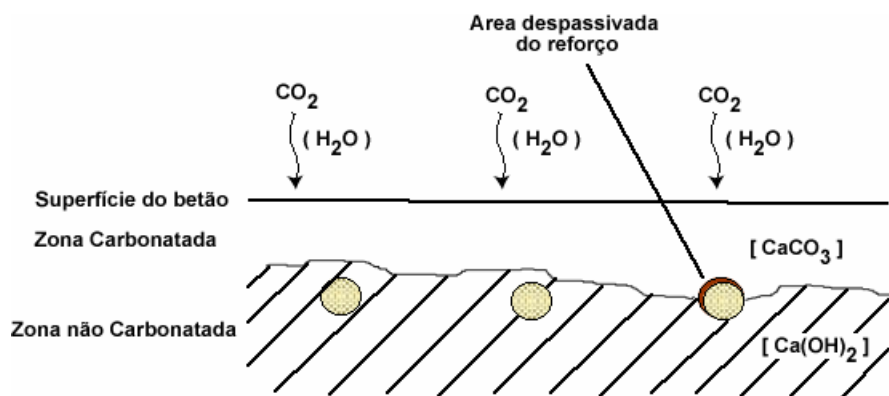


Figura 13 – Carbonatação do betão armado

O fenómeno da carbonatação do betão processa-se através da difusão do dióxido de carbono na superfície de uma estrutura de betão armado (fig.13) é acompanhada de uma reacção com os constituintes do betão particularmente com o hidróxido de cálcio. Com o passar do tempo o betão começa a estratificar-se em camadas distintas com diferentes propriedades químicas e mecânicas. A camada

carbonatada será mais espessa quanto maior for a idade, nível de exposição e quanto menor for a qualidade do betão. Um betão saudável não carbonatado apresenta um PH de cerca de 12.6, o que associado ao oxigénio existente na matriz conduz à formação de uma película fina de óxido de ferro (camada de passivação) que envolve a totalidade do varão de armadura. Com o processo de carbonatação iniciado, o PH do betão desce para valores da ordem de 8.3 anulando a camada de passivação criada anteriormente, ficando deste modo a armadura susceptível à corrosão.

No caso do ataque por difusão iónica por cloretos, e uma vez que apresentam uma elevada solubilidade na água, disseminam-se através de ciclos de molhagem e secagem de elementos de betão armado não saturados (convecção) ou através do mecanismo de difusão (fig.14), isto é, a transferência de massa por movimento aleatório das moléculas livres ou iões, na solução dos poros resultando num fluxo do meio ambiente circundante para uma região de menor concentração da substância difusora, como será inicialmente um qualquer elemento de betão armado.

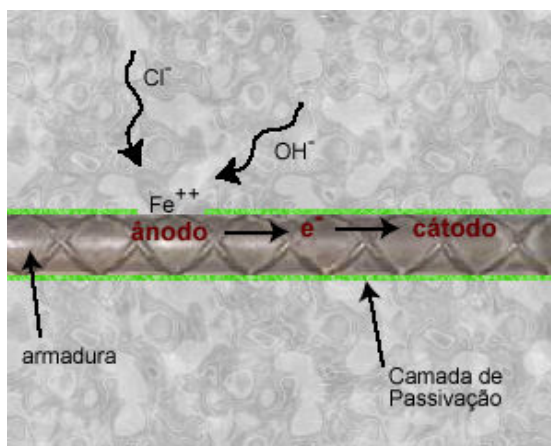


Figura 14 – Esquema de corrosão por difusão de íões de cloro

Tanto um processo como outro conduzem a um aumento de volume da armadura corroída devido aos subprodutos gerados. Este aumento de volume provoca tensões internas de tracção no betão, e no limite, superiores à sua própria resistência, conduzindo inevitavelmente à fissuração ou em último caso, a um destacamento generalizado do recobrimento, promovendo a penetração dos agentes agressivos para zonas cada vez mais interiores da secção do betão armado resultando em última análise no colapso estrutural do elemento de betão armado.

Como facilmente se entende e levando em linha de conta a escala e os elevados custos associados com a deterioração por estes mecanismos de corrosão, a sua

monitorização está a tornar-se cada vez mais importante na programação da manutenção das estruturas assim como na análise de ciclo de vida das mesmas. Deste modo a adequada implementação de uma estratégia de manutenção associado a um procedimento de monitorização traduz-se efectivamente num aumento de durabilidade da estrutura. Os sensores associados a sistemas de monitorização podem disponibilizar uma análise detalhada e realística do tempo de serviço da estrutura, disponibilizando informação sobre as alterações na distribuição espacial e temporal do recobrimento e consequentemente do estado de conservação da armadura.

Os métodos de monitorização já existentes incluem técnicas electroquímicas ou ópticas e sondas de resistência eléctrica.

Sensores de detecção de cloretos electroquímicos

Os sensores electroquímicos são ao mesmo tempo o tipo de sensor mais antigo e com um campo de aplicação mais alargado. Os primeiros sensores desta natureza apareceram nos anos 50 onde eram usados para efectuar monitorização de oxigénio. Por volta dos anos 80, apareceram no mercado sensores para detecção dos limites de exposição permitidos de gases tóxicos que apresentavam uma boa sensibilidade e selectividade no material a detectar. Actualmente existe uma vasta gama de sensores para monitorização (fig.15) capazes de detectar os mais variados elementos químicos. As dimensões físicas, a selecção dos componentes que o compõem e o tipo de construção de um sensor desta natureza variam de acordo com o fim a que se destina, onde é frequentemente obtido um compromisso entre os diversos parâmetros de desempenho do sensor electroquímico.



Figura 15 – Sensores electroquímicos

O princípio de funcionamento deste tipo de sensores é dado pela reacção do sensor na presença do elemento reactivo (molécula, gás, etc.) produzindo uma tensão

eléctrica proporcional a sua concentração. Um sensor típico é constituído por um meio electrolítico um contra eléctrodo e um eléctrodo sensível (fig.16).

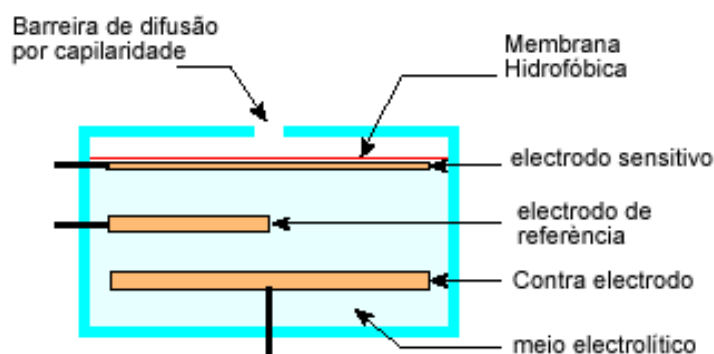


Figura 16 – Funcionamento esquemático dos sensores electroquímicos

De forma a se ter a quantidade mínima necessária do elemento reactivo (ER) para produzir uma tensão eléctrica e ao mesmo tempo prevenindo possíveis fugas do meio electrolítico existente no interior do sensor para o seu exterior, o ER a monitorizar passa primeiro por uma pequena barreira capilar onde depois se dispersa através de uma membrana hidrofóbica até atingir o eléctrodo sensível, onde vai então reagir através de um mecanismo de reacção de oxidação ou de redução no eléctrodo. Essas reacções são catalizadas por os materiais que constituem os eléctrodos especialmente desenvolvidos para aquele tipo de ER. Com uma resistência ligada entre os eléctrodos, gera-se uma corrente do ânodo para o cátodo proporcional à concentração de gás existente. Por gerarem uma corrente eléctrica, este tipo de sensores são muitas vezes designados por sensores amperimétricos ou micro células.

O desempenho de um sensor electroquímico é dado pelo tipo de membranas hidrofóbicas utilizadas, mais ou menos porosas, permitindo obter sensores com maior ou menor sensibilidade. Por exemplo um sensor para detecção da concentração de um ER com elevada sensibilidade usa uma membrana hidrofóbica mais porosa, isto é com um coeficiente de capilaridade mais elevado, de modo a permitir a entrada de uma maior quantidade de ER a fim de se obter a resposta do sensor desejada para uma sensibilidade melhorada. Contudo, este tipo de sensores apresenta o inconveniente de possíveis fugas de moléculas constituintes do meio electrolítico, o que se traduz num encurtamento do seu tempo de vida útil.

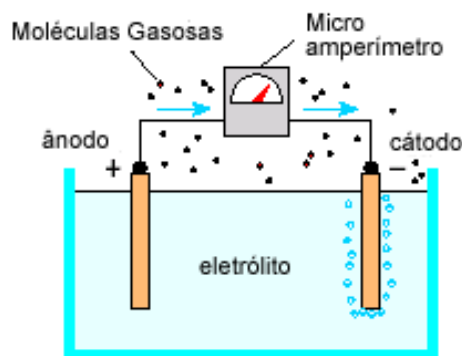


Figura 17 – Funcionamento esquemático dos sensores electroquímicos

Do mesmo modo, a composição electrolítica e os materiais utilizados como eléctrodos são escolhidos de acordo com a reacção química que se pretende obter quando este está na presença do ER a monitorizar. Através de uma selecção criteriosa dos eléctrodos e do meio electrolítico, consegue-se definir rigorosamente o ER a testar.

Este tipo de sensores é particularmente útil para medições quantitativas na análise inorgânica, como por exemplo, na detecção de iões metálicos com Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , entre outros. Os recentes avanços tecnológicos nos sensores baseados em eléctrodos quimicamente modificados ou baseados em microelectrodos como é o caso dos sensores voltimétricos e potenciométricos (sensores adsortivos) vieram permitir um alargamento da gama de iões inorgânicos passíveis de análise.

Estes sensores apresentam uma boa linearidade nas leituras efectuadas assim como uma elevada precisão e reprodutibilidade. O tempo de vida útil em condições normais, depende muito dos contaminantes ambientais assim como da temperatura e da humidade a que está sujeito, deste modo os sensores electroquímicos dependem dos seguintes factores:

- Sensíveis ao teor de humidade;
- Tem um elevado tempo de resposta;
- São sensíveis ao ruído eléctrico;
- Tem um tempo de vida limitado;
- Tem que se ter um manuseamento cuidado uma vez que o meio electrolítico e constituído por um ácido muito forte;
- Degradação da performance a medida que a temperatura aumenta.

2.4.2 Temperatura

No campo da instrumentação para a monitorização da temperatura, é amplamente utilizado o efeito “Seebeck”. Este efeito consiste na produção de tensões eléctricas de baixa intensidade ao longo de um fio condutor quando este se encontra sujeito a variações de temperatura nesse mesmo fio. Este efeito é facilmente observável através da junção de dois fios condutores de ligas metálicas diferentes (fig.18). Cada fio condutor produz um “Seebeck” característico ao longo do seu comprimento o que se traduz numa diferença de potencial (d.d.p.) nas pontas opostas da junção. Praticamente todos os pares de ligas metálicas produzem uma d.d.p. mensurável sempre que se aplica uma variação de temperatura na junção.

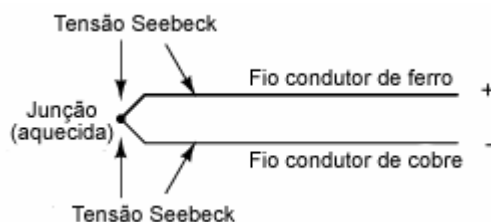


Figura 18 – Exemplo esquemático do funcionamento dos termopares

O efeito “Seebeck” apresenta um comportamento linear, em que a tensão eléctrica produzida pelo aquecimento da junção dos dois fios é directamente proporcional à temperatura a que estão sujeitos. Quanto maior a pureza das ligas metálicas utilizadas maior o grau de linearidade entre a d.d.p. e a temperatura a que se encontra sujeito. Este tipo de sensor é comercialmente designado por termopar (fig.19).



Figura 19 – Exemplos de termopares

Actualmente encontra disponível no mercado diversos tipos de termopares nas mais variadíssimas formas, desde os termopares com a junção a servir de ponta de prova, que apresentam as vantagens de serem de baixo custo e terem tempos de resposta maiores, até aos termopares que se encontram incorporados em sondas,

adequadas para diferentes aplicações (industriais, científicas, investigação médica, entre outras).

Na escolha de um termopar deve-se numa primeira fase determinar qual o intervalo de temperaturas que se pretende monitorizar e a precisão das leituras a obter. Os termopares encontram-se classificados nos seguintes tipos:

- Tipo K (*Cromel / Alumel*) – este tipo de termopar permite a monitorização da temperatura dos -200°C até aos 1200°C . A sua sensibilidade é de aproximadamente $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- Tipo E (*Cromel / Constantan*) – Os termopares deste tipo apresentam elevada sensibilidade ($68\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) que os torna mais adequados para monitorização de baixas temperaturas.
- Tipo J (*Ferro / Constantan*) – O termopar do tipo J apresenta um intervalo de temperaturas dos -40°C aos 750°C , acima deste valor dá-se uma transformação magnética no termopar alterando a sua calibração e inviabilizando a aquisição da temperatura.
- Tipo N (*Nicrosil / Nisil*) – Os termopares do tipo N são adequados para medições a altas temperaturas uma vez que apresentam elevada estabilidade e resistência à oxidação. Dado que não usam a platina na sua construção, este tipo de termopar é mais barato que os do tipo B, R e S.
- Tipo B, R, S – Trata-se de termopares com baixa sensibilidade ($10\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) e elevado custo. Os termopares tipo B (*Platina / Ródio-Platina*) são adequados para medição de temperaturas até aos 1800°C . Este termopar tem a particularidade de originar a mesma tensão na saída a 0 e a 42°C , o que impede a sua utilização abaixo dos 50°C . Os do tipo R (*Platina / Ródio-Platina*) permitem medições até aos 1600°C assim como os do tipo S (*Platina / Ródio-Platina*).
- Tipo T (*Cobre / Constantan*) – Este tipo de termopar é aconselhado para medições de temperaturas que se situem no intervalo dos -270°C aos 400°C .

Termístores

Os termístores são sensores térmicos resistivos semicondutores cujo funcionamento consiste numa variação da sua resistência eléctrica sempre que existe uma variação da temperatura no meio onde se encontra inserido. A gama de temperaturas de operação deste tipo de sensores situa-se entre os -100°C e os 600°C , apresentando uma elevada estabilidade térmica e de resposta nas leituras. Como inconvenientes, este tipo de sensores, requerem que sejam excitados inicialmente para poderem entrar em funcionamento e apresentam uma variação não linear nas leituras efectuadas, necessitando de uma curva característica para a interpretação dos valores lidos.

O processo de fabricação dos termístores é semelhante ao de fabricação da cerâmica. Depois de uma mistura intensiva e do acréscimo de um agregante plástico, a massa é moldada na forma desejada, por extrusão ou por pressão e aquecida a uma temperatura suficientemente alta de modo a iniciar-se ao processo de sintetização dos óxidos constituintes.

Os termístores podem ser de dois tipos:

- NTC (*Negative Temperature Coefficient*) - termístores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é negativo, isto é, a resistência diminui com o aumento da temperatura.
- PTC (*Positive Temperature Coefficient*) - termístores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é positivo, isto é, a resistência aumenta com o aumento da temperatura.

Conforme a curva característica do termístor, o seu valor de resistência pode diminuir ou aumentar em maior ou menor grau em uma determinada faixa de temperatura. Assim alguns podem servir de protecção contra sobreaquecimento, limitando a corrente eléctrica quando determinada temperatura é ultrapassada. Outra aplicação corrente, no caso a nível industrial, visa a obtenção da variação de uma grandeza eléctrica em função da temperatura a que este se encontra (em motores por ex.).

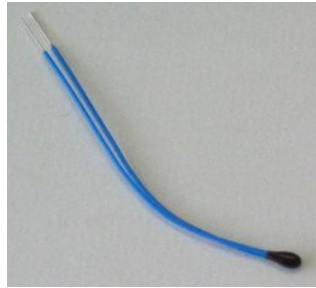


Figura 20 – Termístor do tipo NTC

RTD

Os sensores do tipo RTD ("*Resistive Temperature Device*") tem subjacente o princípio de funcionamento da variação eléctrica em elementos metálicos puros. É usualmente empregue a platina como liga metálica condutora resistiva na construção deste tipo de sensores dado que esta apresenta um intervalo de temperaturas de operação mais alargado, maior precisão e maior estabilidade. Contudo, podem-se também utilizar ligas metálicas como o níquel, cobre ou balco (níquel-ferro).

Os RTD são caracterizados por apresentarem uma variação linear positiva da sua resistência eléctrica em relação à temperatura em que se encontra. Existem dois tipos de RTD, os do tipo bobine, em que a sua construção consiste em bobinar um fio metálico de diâmetro reduzido, sendo posteriormente protegido com substratos de vidro, cerâmico ou resinas epoxídicas de modo a minimizar ou mesmo anular os efeitos de impactos ou vibrações. O segundo tipo de sensor é construído a partir de uma folha metálica extremamente fina depositada num substrato cerâmico sendo posteriormente calibrado o seu valor de resistência através da aplicação de um corte por laser. Este tipo de construção do sensor permite obter maiores valores da resistência eléctrica com menos quantidade de liga metálica o que se traduz numa redução do custo do sensor.



Figura 21 – Exemplo de um sensor RTD

2.4.3 Deformação

Sempre que uma estrutura se encontra sujeita a uma carga aplicada numa dada direcção existe, grosso modo, uma deformação dessa mesma estrutura no plano que contém a linha de carga. A extensão é definida como a variação fracional do comprimento, como se pode observar através da figura 22.

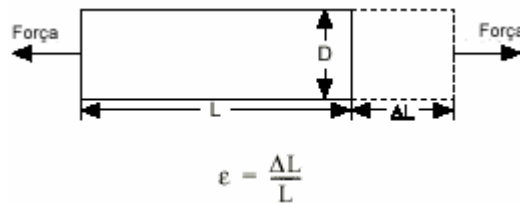


Figura 22 – Esquema de funcionamento de um extensómetro

Se considerarmos um elemento estrutural, o qual se encontra sujeito a uma carga F , a correspondente tensão mecânica (σ) provoca uma variação das dimensões nesse mesmo elemento, isto é, extensões (ϵ). Considerando que o material em causa se encontra em regime linear elástico, pode-se aplicar a lei de Hooke (eq.1).

$$\sigma = E \times \epsilon \quad \text{eq. 1}$$

A eq.1 relaciona o valor da tensão (σ) com o módulo de elasticidade do material (E) e a extensão produzida (ϵ). Conhecendo o módulo de elasticidade do material, a lei de Hooke permite obter o estado de tensão instalado num dado elemento a partir da deformação lida por um extensómetro.

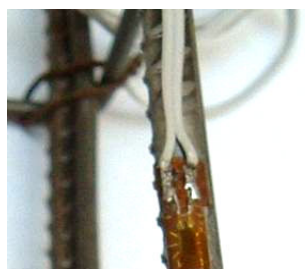


Figura 23 – Exemplo de um extensómetro aplicado num varão de armadura

Extensómetros

Os extensómetros ("*strain gauges*") são os mais usuais para a monitorização de deformações. O extensómetro é baseado numa resistência eléctrica que varia proporcionalmente com a extensão. Os mais vulgarmente utilizados consistem numa matriz metálica condutora muito fina colocada sob um substrato não metálico, maximizando a quantidade de fio metálico condutor sujeito a extensão na direcção paralela (fig.24) e minimizando ao mesmo tempo a secção transversal do sensor de forma a reduzir os efeitos de Poisson e de tensões de corte. O sensor é colado no elemento que se deseja monitorizar ficando solidário com as deformações que serão impostas no elemento a testar. Deste modo a deformação é transmitida directamente para o extensómetro o qual responde de um modo linear na sua variação de resistência eléctrica.

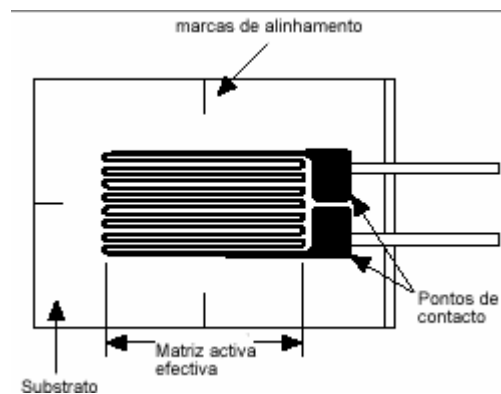


Figura 24 – Componentes de um extensómetro

LVDT

Os LVDT ("*Linear Variable differential transformers*") são denominados de sensores lineares de posição. O princípio de funcionamento do LVDT é o mesmo aplicado num transformador de tensão eléctrica e como tal requer uma tensão de entrada para poder funcionar. O LVDT é composto por um elemento metálico condutor móvel e por três bobinas externas de conversão de corrente, duas de polarização invertida (secundárias).

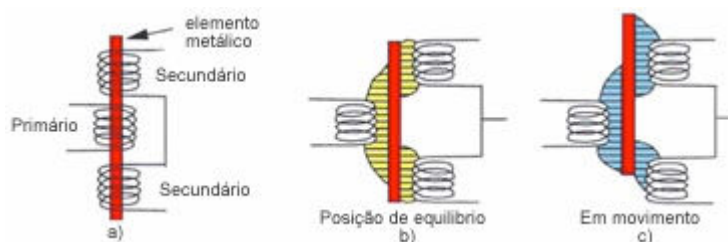


Figura 25 – Esquema de funcionamento de um LVDT

Sempre que o elemento metálico móvel se encontra centrado entre as duas bobinas secundárias (fig.25b), o fluxo do campo magnético gerado é igual em módulo ao fluxo gerado pela bobine primária o que conduz a uma tensão nula de saída. Quando o elemento condutor móvel se desloca de uma posição estacionária para outra (fig.25c), a soma dos fluxos magnéticos produzidos pelas bobines deixa de ser nulo passando então a existir uma tensão de saída. A tensão de saída do LVDT é directamente proporcional do deslocamento do elemento metálico móvel [48].

Fibra óptica

Os sensores de Fibra óptica (SFO) são usados para monitorizar uma grande gama de propriedades físicas e químicas onde se incluem a temperatura, a pressão, o campo acústico, a posição, a rotação, a corrente eléctrica, o nível líquido, a composição bioquímica, e a concentração química. São aplicados em estruturas críticas, tais como os aviões e pontes, monitorizando continuamente a integridade estrutural, e advertindo possíveis falhas.

Este tipo de sensores, são até à data, os que apresentam uma melhor precisão. As principais características que diferenciam os SFO dos outros tipos de sensores são:

- Possuem uma grande largura de banda o que permite a aquisição de elevadas quantidades de informação através de uma única fibra óptica;
- Uma vez que a fibra óptica é um dieléctrico, não está sujeito às interferências das ondas electromagnéticas que possam encontrar-se no ambiente que se pretende monitorizar;
- Os SFO podem funcionar sob condições extremas adversas de temperatura e de pressão assim como a atmosferas tóxicas ou corrosivas. Além disso são extremamente seguros em ambientes explosivos, leves e compactos.

Os sensores de fibra óptica de Bragg, são actualmente os mais utilizados em Eng.^a civil para monitorização estrutural. O que distingue este tipo de sensores dos demais advém da possibilidade de permitirem a desmultiplexação, isto é, permitem a monitorização em simultâneo de centenas de pontos numa mesma fibra óptica e no

mesmo canal de aquisição de dados, permitindo deste modo respostas a variações de temperatura e de deformações com grande precisão.

O princípio de funcionamento de um SFO é o seguinte: quando uma secção da fibra óptica se encontra num estado de tensão (ou compressão), a luz que é transmitida pela fibra sofre uma alteração do seu comprimento de onda (fig.26) sinalizando deste modo o tipo de deformação a que se encontra sujeita.

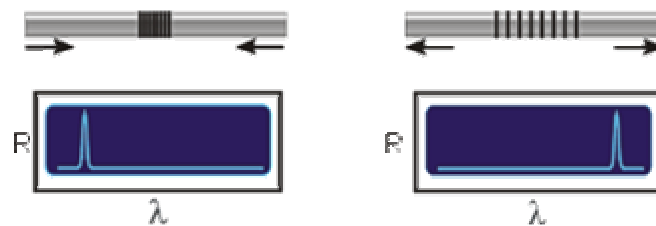


Figura 26-Variação da deformação imposta num SFO e o comprimento de onda da luz reflectida

Fibras de Carbono

Os sensores com fibras de carbono estão a dar os primeiros passos e apresentam um potencial de aplicação nas estruturas de betão armado, em que o próprio betão funciona como auto sensor.

Este tipo de sensores é constituído por um material base de suporte, em que é adicionado uma percentagem de fibras de carbono resultando num compósito que apresenta propriedades piezoelectricas.

Existem já diversos trabalhos nesta área, de entre os quais se destacam os de Gonzalez [29] e de Bruno Silva [40] em que a base de suporte é o betão armado. D.D.L.Chung [31][36] e Pu Woei [50] realizaram trabalhos não só usando betão mas também materiais poliméricos[37][38].

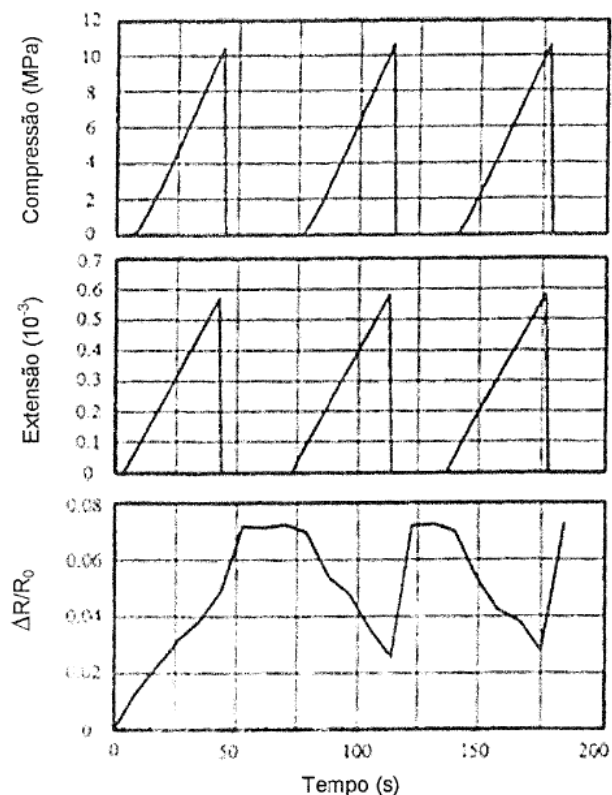


Figura 27 – Resultados obtidos para um compósito com 0,19% (vol) de FC [50]

No caso no betão armado, o mecanismo associado à capacidade sensorial baseia-se no aparecimento de fissuras quando o betão se encontra sujeito a um estado de tensão traduzindo-se em deslocamentos relativos das superfícies de fractura, que por sua vez altera as condições de passagem de corrente.

Pu Woei [50] demonstrou existir uma relação directa entre o estado de tensão e a resistividade do material permitindo estabelecer uma relação de proporcionalidade entre as propriedades eléctricas do compósito e as tensões mecânicas a que este se encontra sujeito.

2.5 Monitorização não estrutural

Quando se está a construir um edifício, está-se a pensar em proteger os seus ocupantes das variações climatéricas do ambiente exterior promovendo um ambiente mais constante e agradável de modo que o ambiente interior num edifício passivo, isto é, sem sistemas de climatização, seja pelo menos tão confortável como o ambiente exterior [21]. Por outro lado a temperatura de conforto de cada um dos ocupantes é variável, devido a diversos tipos de condicionantes (roupa por ex.), de onde resulta que seja necessário diferentes temperaturas para que cada um se encontre confortável no Verão ou no Inverno. Assim, a gama de temperaturas confortáveis ou “zona” de conforto é mais alta de Verão do que de Inverno [22].

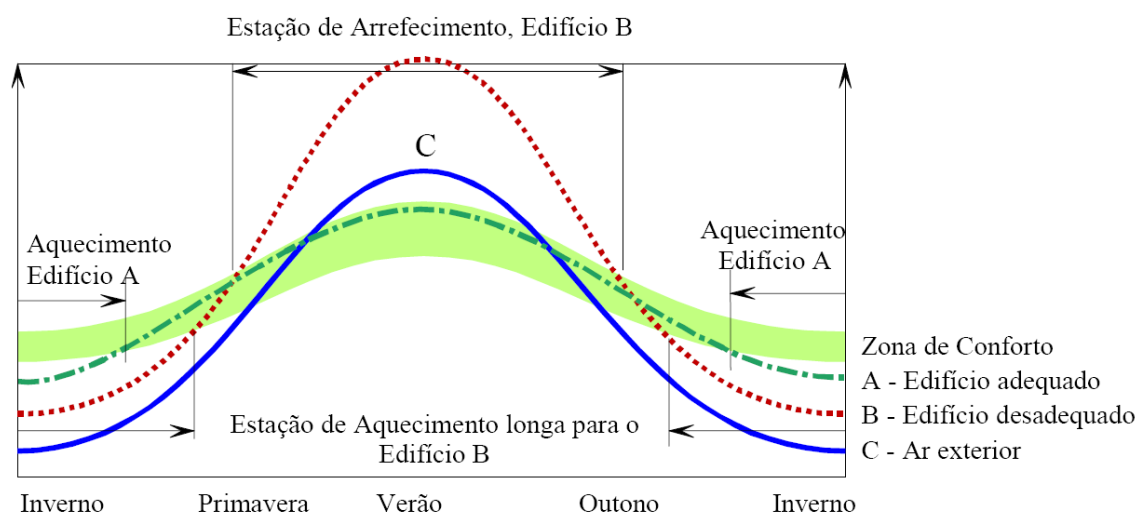


Figura 28 – Evolução da temperatura num edifício passivo durante o ano (hemisfério norte) [22]

Um edifício bem adaptado, representado pela curva A da figura 28, utiliza sistemas de sombreamento móveis e eficientes que se traduz em ganhos solares passivos, assim como sistemas de habitação adaptativos e portanto apresenta um bom isolamento térmico. De verão o edifício encontra-se protegido da excessiva radiação solar e possui sistemas de arrefecimento passivos. De Inverno, a radiação solar é aproveitada ao máximo de modo a poder obter temperaturas interiores mais elevadas. Um edifício desta natureza, na maioria dos climas europeus, apresenta o conforto desejado sem recurso a outra energia que não a do sol durante grande parte do ano.

Por outro lado, um edifício adaptado de forma incorrecta, aqui representado pela curva B da figura 28, não apresenta nem o nível de isolamento correcto nem é protegido adequadamente da radiação solar. A sua construção não foi previamente

sujeita a um estudo da optimização da utilização da energia solar para o seu aquecimento assim como foi negligenciado o arrefecimento passivo. Os gradientes de temperatura são maiores nestes edifícios, com temperaturas no seu interior muito baixas no Inverno e muito altas no verão. Requer, por isso sistemas adicionais de climatização, dispendiosos e com uma elevada factura energética de modo a compensar esses desequilíbrios [22].

A forma como um edifício se comporta termicamente ao longo do ano está directamente relacionado com a qualidade do ambiente no seu interior que por sua vez conduz a um efeito físico e psicológico nos seus ocupantes. Este tipo de considerações que têm que ser feitas na fase de projecto, no sentido de criar nos espaços interiores um microclima tal que, e independentemente das condições climatéricas externas, permita dar a sensação de conforto de acordo com as necessidades físicas dos ocupantes.

A dificuldade levanta-se quando se procura definir o conforto [23]. O que para um ocupante pode ser considerado confortável para outro pode não o ser. É fácil perceber porquê, uma vez que a resultante das sensações humanas assenta fundamentalmente em factores marcadamente subjectivos que variam de momento para momento. Pode, contudo, afirmar-se que o conforto mínimo pode ser definido através da satisfação estrita das condições fisiológicas. Esta definição, por sua vez, não inclui o microclima das áreas interiores nem a capacidade de adaptação dos ocupantes [23]. Assim, e de forma a levar em consideração este dois factores, considera-se que um determinado ocupante se encontra em conforto quando não experimenta qualquer desagrado ou irritação, que o faça provocar qualquer tipo de distracção das actividades em exercício [23]. Para isto acontecer é necessário que o seu organismo se encontre em equilíbrio com o ambiente que o rodeia, isto é, a sensação de bem-estar num dado momento [23].

Como foi dito anteriormente, a monitorização não estrutural, ou monitorização ambiental ou de conforto, consiste na capacidade de resposta de uma dada estrutura ou edifício às solicitações dos utilizadores do mesmo permitindo elevar os níveis de conforto de acordo com as exigências solicitadas.

O conforto num edifício pode ser subdividido em três grandes áreas:

- A qualidade do ar interior (QAI);
- Adequada iluminação (ou sombreamento);
- O conforto térmico (HVAC).

2.5.1 Qualidade do ar interior

É do senso comum e faz parte de hábitos quotidianos adquiridos, a necessidade de abrir janelas para arejar removendo o “ar viciado” e substituindo-o por ar puro. Este hábito advém do acumular de cargas poluentes no ar interior assim como numa diminuição da quantidade de oxigénio disponível e consequente aumento do dióxido de carbono e vapor de água.

À medida que se foram construindo edifícios cada vez mais estanques foram sendo igualmente reduzidas as possibilidades de renovação do ar, propiciando a propagação de fungos, bactérias e microfibras suspensas no ar assim como um aumento dos níveis de dióxido e monóxido de carbono e de vapor de água. Esta diminuição da qualidade do ar interior conduziu ao aparecimento de patologias como dores de cabeça, sinusite e irritações dos olhos, sintomas esses que cedo se passaram a designar por “Síndrome dos Edifícios Doentes” [24][25].

Em países como Portugal as necessidades energéticas anuais de arrefecimento podem ser até duas a três vezes superiores às necessidades de aquecimento [24]. Desta forma é importante a implementação e utilização de formas passivas de arrefecimento, como é o caso da ventilação natural, as quais variam de acordo com o tipo de edifício, dos seus padrões de ocupação mas acima de tudo variam de acordo com as opções tomadas na fase de projecto (forma do edifício e localização, tipo e formas das janelas, localização e dispositivos de sombreamento). A sua implementação consiste num processo iterativo, e interligado intrinsecamente com o ambiente e arquitectura do edifício [24].

A ventilação natural pode produzir um efeito de arrefecimento significativo sempre que se maximiza a configuração do edifício e o seu posicionamento em relação aos espaços circundantes, maximizando igualmente a ventilação através do vento para uma determinada hora do dia. Contudo, mesmo estando o edifício maximizado a este nível, a sua ventilação natural pode ser alterada significativamente sempre que haja uma abertura total ou parcial das janelas e uma abertura ou não das portas de um compartimento. Este tipo de situações conduzem a renovações diferenciais de ar dentro do edifício.

A ventilação tem três funções que requerem diferentes níveis de circulação de ar através do edifício:

- Manter a qualidade do ar interior que se encontra viciado pela ocupação dos espaços, por ar novo vindo do exterior;
- Criar conforto térmico em ambientes quentes, aumentando as perdas de calor do corpo humano por convecção e prevenir o desconforto da pele suada através da circulação do ar sobre o corpo;
- Arrefecer a massa dos elementos do edifício durante a noite, sendo depois aquecida durante as horas de calor do dia seguinte, de forma a manter a temperatura interior inferior à temperatura exterior.

O primeiro objectivo da ventilação consiste em manter o ambiente saudável no interior de um edifício, através de trocas de ar fresco por ar viciado e poluído. Ao mesmo tempo permite evitar o aparecimento de condensações e o crescimento de fungos e bolores nos edifícios, pois existe uma relação entre a humidade do ar e a taxa de ventilação, isto é, a maior parte da humidade produzida nos edifícios normalmente tem que ser evacuada através de ventilação permanente ou, ocasionalmente, tem que ser evacuada pela ventilação intensiva, como nos casos de grande produção de vapor (por exemplo tomar banho, cozinhar).

Os dispositivos de monitorização de conforto da qualidade do ar consistem na possibilidade de indução do ar, quer por meios naturais, (vento e efeito de chaminé) ou através de meios mecânicos.

2.5.2 Iluminação

A luz é a manifestação visual da energia e intimamente ligada às sensações do ser humano particularmente a visão. A sua presença, ao longo da história tem sido considerada sinónimo de limpeza, pureza e sabedoria. A luz enquanto iluminação natural, ajuda a criar melhores condições de trabalho fazendo realçar os contrastes e as cores naturais dos objectos e, em simultâneo, aberturas, como janelas por ex., permitem um contacto directo com o meio ambiente exterior, proporcionando momentos de repouso e descontração numa situação de trabalho contínuo [26].

A luz possui benefícios não só para o ser humano, mas para toda a vida no planeta. Dentro de todas as características da luz, destaca-se a comunicação visual com o meio exterior, a conservação dos recursos naturais e a redução do consumo de energia, assim como a capacidade de mudança, propiciando um ambiente dinâmico ao longo do ano.

Por outro lado a luz natural apresenta como inconvenientes a sua aleatoriedade e variabilidade, o que não permite manter um nível de iluminação constante. Deve-se então, complementar a iluminação natural com iluminação artificial, minimizando os níveis de contraste e luminosidades em excesso assim como as situações de ofuscamento [26]. Compreende-se então que uma das principais exigências num projecto de iluminação deverá ser o conforto visual, tendo sempre em mente o nível global de iluminação e a distribuição da iluminação nos espaços a projectar.

No que concerne a consumos energéticos, os edifícios são dos maiores consumidores na União Europeia, consumindo em média cerca de 40% da energia total. Em Portugal esse valor é um pouco mais baixo e representa cerca de um quarto dos consumos energéticos [27]. Contudo, nos dias de hoje, conceitos como energias renováveis, sustentabilidade ou mesmo o tratado de Quioto estão na ordem do dia, e como tal deve pensar-se em eficiência energética quando se está a projectar um novo edifício, maximizando o aproveitamento da iluminação natural, em especial os de ocupação predominantemente diurna. Neste sentido, deverá ser preocupação fundamental dos projectistas a implementação das estratégias tenham em consideração os potenciais ganhos térmicos e sua conservação, a diminuição dos consumos energéticos através da minimização da climatização mecânica e da luz artificial ou ainda ter em consideração benefícios que embora sejam mais subjectivos para os ocupantes, são seguramente igualmente importantes, como a maximização da utilização da luz natural associado à maximização os espaços de ligação do interior para o exterior como são os envidraçados [28].

Os principais objectivos na iluminação natural dos edifícios, e tendo por enquadramento geral as exigências de conforto, sustentabilidade e eficiência energética, deverão ser os seguintes:

- Garantir as iluminâncias necessárias ao desempenho das tarefas visuais;
- Assegurar as condições de conforto visual (ausência de encandeamento);
- Garantir que o aproveitamento da iluminação natural não se reflectirá negativamente noutros aspectos do ambiente interior (desconforto térmico, por ex.) ou no consumo energético (em energia para aquecimento durante os períodos frios ou de arrefecimento durante os períodos de Verão);
- Implementar medidas de articulação eficazes entre os sistemas de iluminação natural e de iluminação artificial de modo a que estes últimos complementem as necessidades de iluminação quando estas não podem ser satisfeitas apenas à custa da iluminação natural.

Para se poder ter as quantidades de iluminação natural desejáveis, o projectista pode actuar a dois níveis. Ao nível da envolvente do edifício e ao nível dos espaços interiores. A actuação ao nível da envolvente, é particularmente eficaz nos aspectos quantitativos da iluminação, ou seja, os níveis de iluminação necessários para a execução das tarefas visuais ou na quantidade de iluminação que é possível proporcionar aos ocupantes de um edifício. A estratégia de modo a se melhorar ou maximizar os níveis de iluminação natural, consiste em minimizar os ganhos solares de verão mantendo os níveis de iluminação natural aceitáveis. Para isso é usual recorrer-se às seguintes soluções: Utilização de envidraçados com baixo factor solar e elevada transmitância no espectro visível da luz. A dispositivos de sombreamento exteriores ajustáveis para o controlo dos ganhos solares e do encandeamento, e ainda à alteração das dimensões, forma ou localização dos vãos envidraçados.

As potencialidades de uma actuação ao nível dos espaços interiores, são essencialmente de ordem qualitativa, isto é, ao nível da distribuição espacial e do encandeamento. A estratégia neste caso consiste num arranjo dos espaços interiores de forma a aumentar as reflectâncias interiores, bastando para isso actuar ao nível:

- Da geometria e dimensões dos compartimentos;
- Da redistribuição espacial das tarefas visuais;
- Dos dispositivos de sombreamento interiores ajustáveis;
- Dos sistemas de iluminação artificial;
- Do tecto, rebaixado, para maior aproveitamento da luz reflectida;
- Da iluminação artificial com lâmpadas fluorescentes compactas e luminárias de elevando rendimento;
- Das cores de tecto e paredes, preferencialmente cores claras e mate;

2.5.3 O conforto térmico

O ser humano procura naturalmente um equilíbrio térmico entre o seu corpo e o meio envolvente de forma a conseguir manter a todo o momento uma temperatura interna dentro de determinados limites. A mais pequena variação poderá causar graves problemas de saúde ou no limite a sua morte. Nestas situações pode-se falar de stress térmico, por calor ou por frio.

O conforto térmico de um indivíduo advém da percepção psicológica desse equilíbrio e dá-se sempre que existe um equilíbrio nas trocas de calor a que o seu corpo se encontra submetido ao mesmo tempo que se mantém dentro de determinados limites a temperatura da pele e a transpiração natural do corpo. O conforto térmico encontra-se definido pela *American Society of Heating Refrigeration and Air Conditions* (ASHRAE), e pela norma ISO 7730 como:

“um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa (nem quente nem frio)”

Este estado de espírito é encontrado sempre que um indivíduo está numa condição de equilíbrio com o ambiente envolvente, ou seja, é possível a manutenção da temperatura corporal sem que haja um esforço sensível, desde que se mantenha dentro de determinados limites.

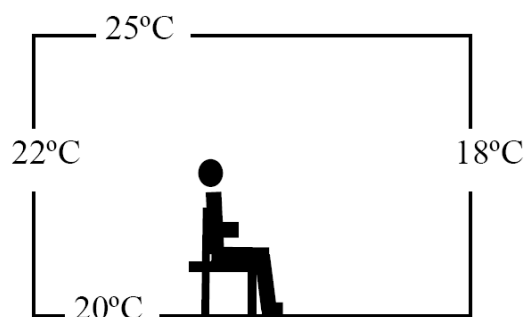


Figura 29 – Ambiente térmico assimétrico

Mas a neutralidade térmica não assegura necessariamente o conforto. Por exemplo, uma pessoa sujeita a um ambiente radiante assimétrico (figura 29), pode estar em neutralidade térmica, e não se encontrar confortável. O conforto é, portanto, uma sensação subjectiva que depende de aspectos biológicos, físicos e emocionais dos ocupantes, aspectos esses pessoais e que variam de pessoa para pessoa, tornando mais difícil de satisfazer ao mesmo tempo, todos os indivíduos que ocupam um dado compartimento, com apenas uma condição térmica [23].

A construção de um edifício deve então ser pensada de forma a maximizar o seu conforto térmico dando especial atenção a todos os factores que influenciam o seu desempenho térmico de entre os quais destacam-se os seguintes:

- A forma do edifício;
- A sua orientação;
- O tipo de inércia térmica do edifício;
- O nível de isolamento de: Paredes, Coberturas e Pavimentos.
- O tipo de envidraçados e de dispositivos de sombreamento;
- O tipo de correcção de pontes térmicas;
- A região climática.

Deve também ter-se o cuidado de evitar que a maior fachada fique orientada a oeste, e sempre que isso não é possível deve reduzir-se ao mínimo as aberturas nessa fachada.

No que concerne a soluções de conforto térmico já existentes no mercado, estas são das mais variadas naturezas e formas, dependendo do tipo de perda térmica que se pretende tratar. As soluções podem ser de dois tipos: soluções activas ou soluções passivas. Dentro das soluções passivas encontram-se o isolamento

térmico em paredes (tipo *wallmate* por ex.), caixilharias para portas e envidraçados (vidro duplo com ruptura térmica por ex.), e ainda sistemas de ventilação passivos como é o caso das paredes de trombe. As soluções activas, devem ser utilizadas só depois de esgotadas todas as soluções do tipo passivo, uma vez que a sua utilização irá traduzir-se num aumento da factura energética do próprio edifício. Dentro deste tipo de soluções encontram-se os sistemas de climatização (tipo ar condicionado) e os sistemas centrais de aquecimento.

A monitorização do conforto permite monitorizar variáveis como a temperatura interior de um edifício assim com os níveis de iluminação ou qualidade do ar.

2.5.4 Pavimentos radiantes

As transferências de calor, dentro de um espaço fechado, ocorrem por convecção e por radiação térmica. Nos sistemas convencionais de aquecimento, o calor transmitido por radiação é muito pequeno quando comparado ao calor transmitido por convecção (fig. 30 e 31).

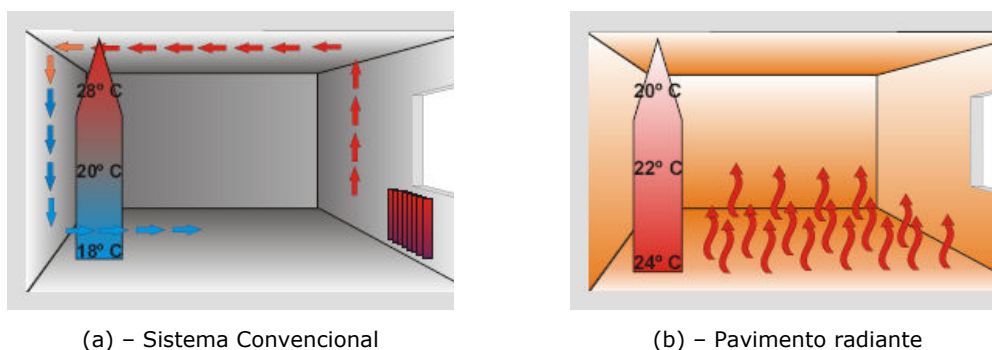
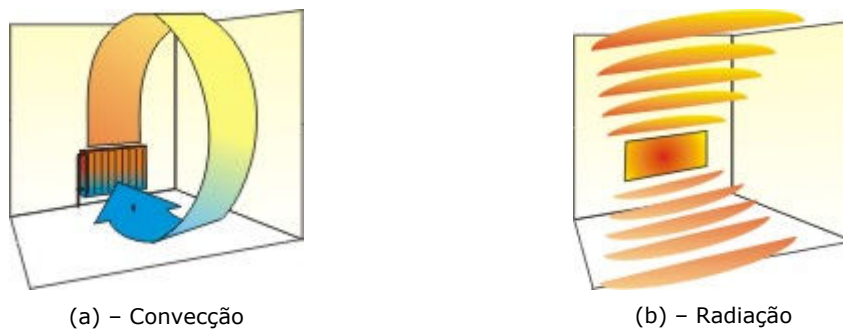


Figura 30 – Distribuição da temperatura do pavimento radiante

O processo de dissipação de calor por convecção implica a circulação de ar no compartimento que se está a aquecer de onde resulta o inconveniente de a temperatura não ser uniforme. Alguns sistemas deste tipo, como é o caso de aquecedores de filamento, ainda provocam a deterioração do ar, com queima de oxigénio.



(a) – Convecção

(b) – Radiação

Figura 31 – Distribuição da temperatura dos painéis radiantes

No caso dos sistemas por radiação, o calor dissipado para o ambiente origina uma distribuição de calor uniforme e moderada, de onde resulta uma sensação de conforto melhorada.

O pavimento radiante, independentemente da origem da fonte de energia, consiste no aquecimento de um dado compartimento, por radiação térmica a baixa temperatura, tipicamente 24 °C.

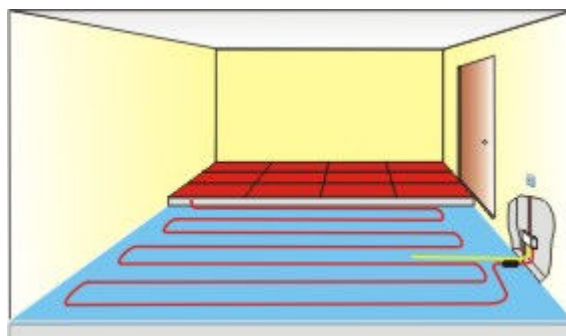


Figura 32 – Pavimento radiante típico

O pavimento radiante eléctrico consiste num cabo térmico duplamente isolado, com protecção mecânica, terra e campo magnético nulo. São constituídos por dois fios condutores em que um consiste numa resistência em aço inoxidável ou em bronze (6% Sn) com elevada resistência à tracção, de baixa potência (17 a 20 W/m). O outro consiste num fio de cobre típico (ligação fria) em que as extremidades fazem ligação aos termostátos de ambiente colocados no compartimento ou zona a aquecer.

A aplicação deste sistema de aquecimento é bastante simples, onde após a colocação de um isolante térmico em toda a área a aquecer, é colocado o cabo térmico em zig-zag até se preencher toda a área que se pretende. A protecção do cabo é feita pela colocação de uma betonilha que o vai embeber, podendo aplicar-se o revestimento final desejado por cima desta. Para se poder efectuar o controlo

adequado da temperatura, é colocado um termóstato e uma sonda térmica no pavimento.

As soluções comercializadas encontram-se disponíveis para aplicação em pavimentos e em painéis radiantes. O seu modo de funcionamento, requer que estejam ligados ao sistema eléctrico da casa, ou seja, a 220Volt de tensão.

Em condições de funcionamento, a temperatura produzida por estes sistemas, à superfície do cabo situa-se dentro do intervalo de 30 a 38°C para se poder obter à superfície do pavimento uma temperatura média de 24°C.

Estes sistemas em funcionamento apresentam um consumo médio de 19W/m.

Tabela 1 – Potência anunciada dos fabricantes de cabo de aquecimento [48]

	P (W/m)
Eco	20
DeviFlex	19
Warmup	17

Os cabos possuem uma gama alargada de potências, de forma a melhor satisfazer as necessidades em aquecimento dos locais onde é instalado. O comprimento mínimo é de 3m e o máximo encontra-se limitado à capacidade de fornecimento de energia por parte da rede eléctrica. Em termos práticos, gama de potências varia de cerca de 100W até aos 3000 W permitindo a satisfação das necessidades térmicas de um qualquer espaço através da combinação de cabos com potências distintas.

3 Materiais Utilizados e Procedimentos de Ensaio

Terceiro Capítulo

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Silicone polimérico

Na construção dos sensores foi utilizado um polímero marca “*Silastic*” (fig.33). Sendo a base e o catalizador misturados na proporção de 10:1 respectivamente. O processo de cura fica concluído ao fim de 24 horas à temperatura ambiente.

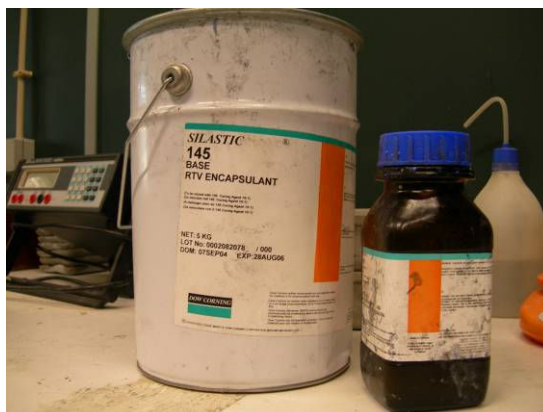


Figura 33 – Polímero “Silastic”

O *Silastic* é um elastómero produzido através da mistura de sílica com um polímero resultando após a cura, numa borracha inerte com elevada resistência química e eléctrica. De salientar ainda a boa estabilidade térmica e a sua capacidade de funcionar como vedante.

Quanto às propriedades mecânicas o *Silastic* apresenta uma tensão de ruptura de 2.40 MPa e uma dureza de 40 (*shore A*).

3.1.2 Fibras de carbono

As fibras de carbono utilizadas são da variedade “*pitch*” com um teor de carbono mínimo de 95% e foram produzidas pela Kureha Chemicals (Ref. KFC-100).



Figura 34 – Fibras de carbono

Para se poder aferir as propriedades físicas das fibras de carbono recorreu-se à observação através de um microscópio óptico, e por software determinaram-se os comprimentos médios das fibras de carbono assim como o seu diâmetro médio.

Assim, verificou-se que o comprimento médio das fibras adquiridas era de 1554,50 μm , diferente do valor anunciado pelo fabricante que é de 3190 μm . No que concerne ao diâmetro, a média das leituras efectuadas foi de 20,7 μm enquanto o valor referido pelo fabricante é de $18 \pm 1.8 \mu\text{m}$. Outras propriedades como o módulo de elasticidade ou a densidade são apresentados na tabela Tabela 2.

Tabela 2 – propriedades das fibras de carbono anunciadas pelo fabricante

Módulo de Elasticidade (MPa)	30-37
Extensão de ruptura (%)	2,0
Resistividade volumétrica ($\mu\Omega.\text{m}$)	150
Densidade	1,63
Temperatura de oxidação ($^{\circ}\text{C}$)	310
PH	6-8

Foi ainda obtido um segundo tipo de fibras de carbono através do seu esmagamento a 6000 PSI de pressão durante 1 minuto, de onde resultaram comprimentos da ordem dos de 311,46 μm .

As nomenclaturas utilizadas para distinguir o tipo de fibras de carbono empregues foram as seguintes:

FC03 – Fibras de carbono KFC-100 com 311,46 μm de comprimento;

FC15 – Fibras de carbono KFC-100 com 1554,50 μm de comprimento;

FCL – Fio de carbono com comprimento mínimo de 10cm;

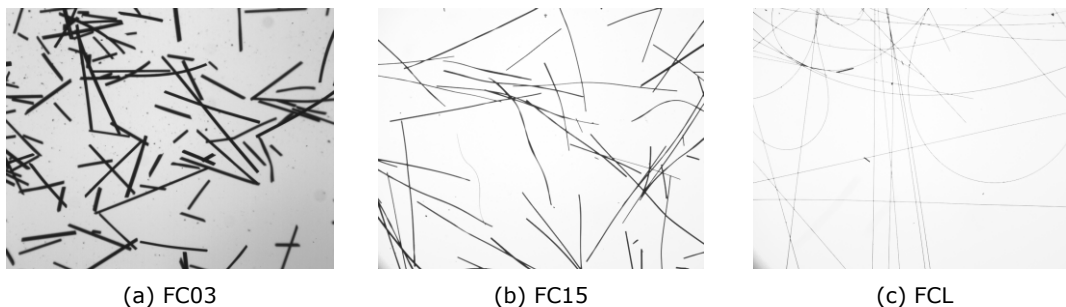


Figura 35 – Imagem das fibras de carbono utilizadas obtidas por microscopia óptica

3.1.3 Gesso estuque

Para a elaboração das placas de aquecimento térmico radiante, utilizou-se um gesso estuque fabricado pela empresa Sival comercializado sob a designação PROJECT 2000.

Este gesso estuque é constituído por gesso sob a forma de sulfato de cálcio hemi-hidratado, cal, cargas minerais de carbonato de cálcio e por diversos adjuvantes.

Os acabamentos realizados com este produto são aplicados com uma espessura máxima de 20mm.



Figura 36 – Gesso estuque utilizado na construção das placas de aquecimento

No que concerne às propriedades físicas do gesso este apresenta uma resistência à compressão média aos 28 dias de 3.9MPa e possui uma massa volúmica aparente de 1200 Kg/m³.

4 Sensores Piezoresistivos

Quarto Capítulo

4.1 Introdução

Uma parte das patologias e defeitos estruturais ocorrem devido a erros de concepção e projectos dos elementos de fundação de uma estrutura, devido a uma caracterização insuficiente do solo de fundação onde se pretende construir.

A monitorização activa do comportamento do solo de fundação quando sujeita às solicitações de um elemento estrutural de fundação, permite em tempo real e desde a fase inicial de construção um adequado acompanhamento das solicitações existentes nos elementos de fundação, e corrigir, quando necessário eventuais anomalias que possam surgir e que não foram contempladas na fase de projecto.

Actualmente a monitorização estrutural apresenta elevados custos associados aos materiais e equipamentos utilizados na monitorização, assim como, devido à mão-de-obra especializada requerida. Com este estudo, pretende-se desenvolver sensores para medição de deformações, que apresentem ao mesmo tempo um baixo custo e sejam de fácil aplicação em obra sem recurso a mão-de-obra especializada.

Para isso, pensou-se na construção de um compósito a partir de um material elástico inerte, que combinado com as fibras de carbono e fazendo uso das suas propriedades eléctricas, apresenta propriedades piezoresistivas, isto é, com capacidade de variação da sua condutividade em função da deformação imposta.

4.2 Construção do Sensor

Com já foi referido, o compósito é constituído por uma base polimérica onde é misturada uma predeterminada dosagem de fibras de carbono.



Figura 37 – Compósito moldado

Foram testadas diversas dosagens de fibras de carbono que variaram de apenas 1% da massa total do polímero base até teores de 50%.

Para efectuar a moldagem dos sensores, foram utilizados tubos metálicos de aço inox com 44mm de diâmetro interno. O enchimento do molde foi feito até uma altura de 70mm (fig.37).

Foram ainda colocados 2 contactos metálicos constituídos por fibras de aço entrelaçadas em cada um dos topos do sensor e a aproximadamente de 5mm de profundidade. Os contactos foram soldados com solda de estanho a um fio condutor de cobre com 0.5mm de espessura.

O processo de cura dos sensores foi realizado, com controlo de temperatura, numa estufa, a $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24h.

As nomenclaturas utilizadas para os sensores seguiram as nomenclaturas já referenciadas em 3.1.2 para a definição do tipo de fibras de carbono empregues:

- FC03 – Fibras de carbono curtas com 311,46 μm de comprimento;
- FC15 – Fibras de carbono longas com 1554,50 μm de comprimento;

A estas denominações foram adicionadas o teor de carbono em % da massa do material inerte de base, presente no compósito e o número da amostra. A título de exemplo, para a amostra nº 1 com 5% de teor de fibras de carbono do tipo FC15, a designação utilizada foi FC15-51. No caso da amostra nº2 a designação foi de FC15-52 e assim sucessivamente. Assim, o último dígito representa o nº da

amostra e os dígitos entre o traço e o último dígito representam o teor de fibras de carbono empregue.

Neste trabalho são apresentados os resultados dos sensores com os seguintes teores de fibras de carbono:

- FC15-5 – com 5% de fibras de carbono;
- FC15-10 – com 10% de fibras de carbono;
- FC15-13 – com 13% de fibras de carbono;
- FC03-40 – com 40% de fibras de carbono;
- FC03-50 – com 50% de fibras de carbono;

Foram realizadas outras composições, mas por não apresentarem um comportamento piezoelectrico, não se encontram incluídas neste trabalho.

4.3 Ensaios realizados

O potencial campo de aplicação deste tipo de sensores consiste na monitorização não destrutiva das estruturas, para detecção da iminência de fenómenos de fissuração ou qualquer dano permanente.

Para se poder estudar o comportamento dos sensores neste campo de aplicação, foi estudado a estabilidade, variabilidade e linearidade dos valores piezoelectricos de cada um dos sensores, assim como, a sua aplicação em condições reais de obra.

A execução experimental consistiu na realização dos seguintes tipos de ensaios:

- Ensaios cíclicos de carga/descarga;
- Ensaios estáticos de deformação constante;
- Aplicação “In Situ”.

4.3.1 Ensaios cíclicos de carga/descarga

Neste ensaio, os sensores foram sujeitos a um carregamento dinâmico com controlo de deslocamento a uma velocidade de 1,2mm/min. Foram utilizadas as amostras sem qualquer historial de carregamento axial, isto é, após a sua desmoldagem, o primeiro carregamento que tiveram foi o relativo a realização deste ensaio.

O equipamento utilizado foi uma prensa da marca Lloyd LR30K com uma célula de carga de 30kN com controlo de deslocamento e de força. O ensaio consistiu em dez ciclos consecutivos de carga/descarga em que a deformação máxima imposta aos sensores foi de 5mm.



Figura 38 – Equipamento de ensaio utilizado

Na colocação do sensor a ensaiar, e dado o equipamento de deformação ser metálico (e portanto condutor), os topos do sensor foram isolados com um material isolante para evitar que as cargas estáticas do equipamento introduzissem erros nos resultados. O registo dos valores da resistência eléctrica, foram efectuadas com um multímetro de marca Fluke modelo 189 programado para efectuar leituras ao segundo (fig.41a).

Com a realização deste ensaio, foi possível obter as curvas de calibração de cada um dos sensores ensaiados assim como aferir a variabilidade dos valores obtidos entre ciclos de carga-descarga.

4.3.2 Ensaios estáticos de deformação constante

No ensaio seguinte, em condições estáticas, requeria que fosse realizado após o ensaio de carga dinâmico, de modo a evitar a influência do rearranjo interno das fibras de carbono nos primeiros carregamentos.

Os sensores foram submetidos a uma deformação imposta onde permaneceram durante sete dias sem qualquer variação de força ou deformação.

Este ensaio foi dividido em duas fases:

1. Deformação axial constante do sensor a 1 mm;
2. Deformação axial constante do sensor a 2 mm;

A divisão deste ensaio em duas fases, permitiu comparar a variabilidade dos valores lidos a diferentes deformações para o mesmo sensor e comparar a estabilidade das leituras ao longo do tempo. Para a realização deste ensaio, recorreu-se, ao equipamento de realização do ensaio edométrico (fig.39).



Figura 39 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio de fluência

Este equipamento permite o acoplamento de um manómetro com resolução à centésima de milímetro, o que permite um controlo exacto da deformação do sensor (fig.40). Por outro lado a deformação é conseguida através de um sistema do tipo alavanca em que na ponta do seu braço permite a colocação de pesos em aço. O controlo do deslocamento é conseguido através de um batente de rosca colocado por baixo do braço da alavanca que impede que esta desça livremente.

A realização deste ensaio permitiu avaliar a máxima variação nas leituras efectuadas da resistência eléctrica dos sensores quando estes se encontravam sujeitos a uma deformação constante.



Figura 40 – Equipamento do ensaio de fluência

À semelhança do ensaio anterior, na colocação dos sensores a ensaiar, procedeu-se ao isolamento dos topos do sensor para evitar que introduzissem erros nas leituras (fig.40). O registo dos valores da resistência eléctrica, ficou a cargo de um sistema de aquisição de dados da Agilent modelo 3970A (fig.41b), que registou os valores de minuto a minuto durante sete dias.



(a)



(b)

Figura 41 – equipamentos utilizados para efectuar as leituras

Por ultimo foram realizados ensaios “in situ”, onde se pretendeu estudar e verificar a sua aplicabilidade prática. Para isso os sensores em estudo foram aplicados no solo de fundação na base das sapatas das estruturas a construir (fig.42).



Figura 42 – Sensores aplicados “in situ” numa sapata

4.4 Avaliação do efeito da temperatura nos sensores

Após a realização dos primeiros ensaios, observou-se que as amostras no decorrer do ensaio apresentavam uma variação da sua resistência eléctrica que acompanhava as variações de temperatura no decorrer do dia.

Uma vez que a temperatura ambiente é uma variável que não se podia controlar, torna-se necessário avaliar o seu efeito nas leituras efectuadas dos sensores ensaiados.

Tendo em atenção à variação da temperatura esperada, decidiu-se efectuar o seu registo a par da resistência eléctrica do sensor quando este foi sujeito a uma deformação de 1mm durante sete dias.

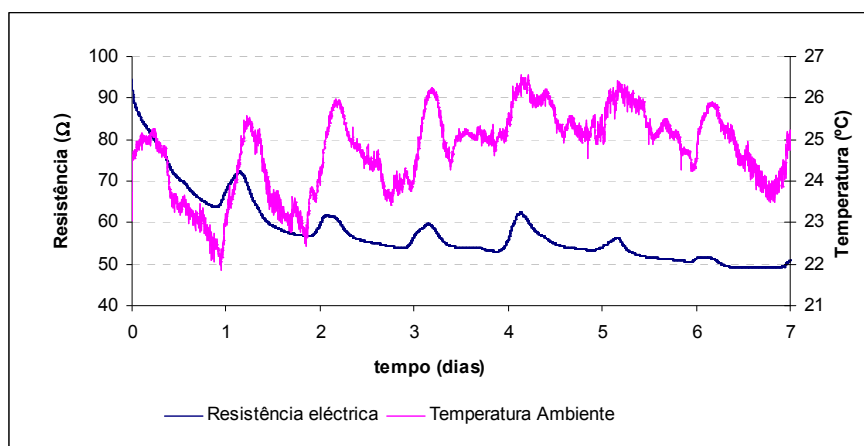


Figura 43 – Influência da temperatura na realização dos ensaios

Na figura 43, encontram-se representados os valores da resistência eléctrica (RE) de um compósito piezoresistivo ou sensor, e os valores da temperatura registados no mesmo instante. Note-se que os picos máximos diários ao longo do ensaio são sentidos por volta das 19H e os mínimos por volta das 12H. Verifica-se que existe uma correspondência clara entre os picos máximos e mínimos da temperatura e as leituras da RE, isto é, o aumento da temperatura faz corresponder um aumento da RE no sensor. Contudo este efeito vai diminuindo à medida que o tempo passa e o relaxamento do sensor vai sendo cada vez menor.

Este fenómeno foi observado de um modo geral nos compósitos, com maior ou menor grau de influência e deve-se possivelmente a alterações estruturais na interface fibra-polímero que conduz a uma diminuição da sensibilidade do sensor à temperatura.

4.5 Avaliação do relaxamento de tensões nos sensores

É conhecido que os materiais poliméricos são sensíveis à fluência e ao relaxamento de tensões, isto é, deformam-se ao com o passar do tempo quando sujeitos a uma carga. Esta propriedade é uma limitação dos polímeros em muitas utilizações na engenharia. Assim torna-se necessário avaliar o efeito do relaxamento de tensões nas leituras do sensor de forma a se poder determinar a sua variabilidade.

Tendo em conta que os sensores desenvolvidos terão um campo de aplicação específico, as fundações, onde as deformações são constantes, decidiu-se simular esse efeito e registar a variação da RE produzida no sensor devido apenas ao relaxamento de tensões. Deste modo foram realizados ensaios com deformação constante de acordo com o procedimento descrito em 4.3.2.

O desempenho do sensor foi medido através da taxa de variação das leituras efectuadas dado pela eq.2:

$$d_d = R_t / R_0 \quad \text{eq. 2}$$

Em que R_t corresponde à leitura da RE no instante t (em dias) e R_0 corresponde à leitura inicial da RE quando se deu início ao ensaio, ou seja $t=0$; a razão R_t / R_0 corresponde portanto à taxa de variação, d_d , para a idade t dos valores da RE.

Valores de d_r iguais à unidade significam que as leituras efectuadas apresentam um comportamento constante ao longo do tempo e portanto previsíveis de estimar. Valores de d_r próximos de zero ou mesmo nulos, significa que existe uma grande variação nas leituras entre intervalos de tempo distintos e como tal existe uma maior dificuldade em estimar a deformação.

Pode ainda avaliar-se o desempenho do sensor em termos de perda de RE (eq.3), dando destaque desta forma à parte que se perde nas medições da RE efectuadas:

$$\text{eq. 3}$$

Ambas medem, a variação das leituras da RE ao longo do tempo em condições de deformação e carga constantes.

4.5.1 Sensores com fibras de carbono longas (1,5 mm)

Como já foi referido anteriormente, foram moldados três compósitos com percentagens distintas de fibras de carbono, referenciadas neste trabalho por FC15 e correspondem às fibras comercializadas pela Kureha Chemicals, as quais apresentam um comprimento médio de 1554,50 μm .

Os compósitos moldados corresponderam a sensores com percentagens de fibra de carbono de 5%, 10% e 13% referenciados neste trabalho por FC15-5, FC15-10 e FC15-13 respectivamente. De seguida apresenta-se os resultados obtidos para deformações constantes a 1mm e a 2mm.

4.5.1.1 Deformação constante a 1mm

A primeira tarefa realizada consistiu na extracção da RE inicial, R_0 , de cada um dos sensores, registada no momento em que se deu início ao ensaio, para $t=0$. Na tabela 3 apresentam-se as leituras iniciais que corresponderam em todos os sensores aos máximos registados durante cada um dos ensaios.

Tabela 3 – valores da RE inicial dos sensores FC15 para 1mm de deformação

nº amostra	FC15-5 (Ω)	FC15-10 (Ω)	FC15-13 (Ω)
1	103	21	18
2	66	44	22
3	65	18	21

Seguidamente foram determinados, a partir da eq.2, os valores do desempenho, d_d para cada dia de ensaio decorrido. No caso dos sensores com 5% de fibras de carbono, encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Desempenho para uma deformação de 1mm dos sensores FC15-5

	Dia						
	1	2	3	4	5	6	7
FC15-51	0.71	0.66	0.62	0.64	0.65	0.61	0.56
FC15-52	0.82	0.76	0.73	0.77	0.77	0.73	0.67
FC15-53	0.74	0.73	0.71	0.74	0.74	0.72	0.70

Como se pode observar através da Tabela 4 o desempenho para os sete dias de ensaio dos sensores FC15-5 situou-se entre os 82% no primeiro dia e os 56% no último.

Analisando agora os dados em termos de perda de RE (eq.3), ao fim do primeiro dia registava-se 24% valor esse que foi aumentando no decorrer do ensaio, para no fim, aos sete dias, ser de 36%.

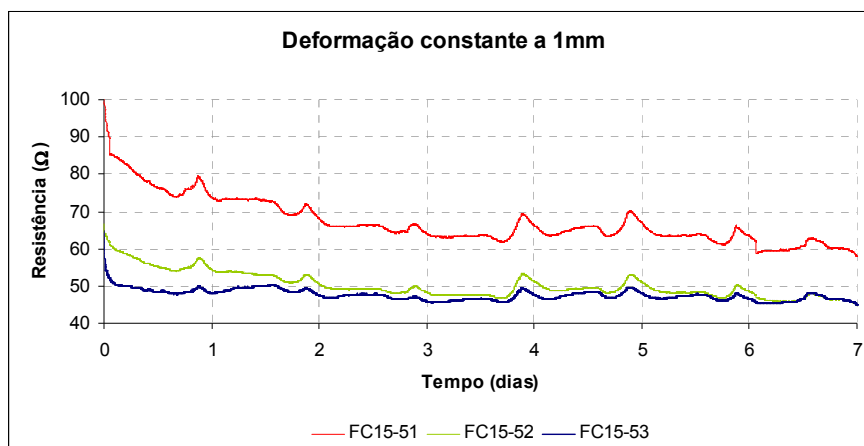


Figura 44 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC15-5

Não tendo sido possível manter a temperatura constante no durante o ensaio, os picos observados a partir da figura 44, correspondem às oscilações de temperatura ao longo do dia registadas no laboratório, onde os máximos diários das RE registadas para cada um dos sensores, coincidem com os máximos da temperatura obtidos a cada dia de ensaio (ver 4.4).

Relativamente aos valores de RE registados para os sensores com 10% de fibras, o desempenho diário encontra-se na Tabela 5. Analogamente aos sensores do tipo FC15-5, também estes apresentaram uma diminuição da resistência eléctrica com o passar do tempo.

Tabela 5 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC15-10

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC15-101	0.70	0.66	0.65	0.63	0.56	0.55	0.59
FC15-102	0.92	0.85	0.85	0.85	0.83	0.81	0.84
FC15-103	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95

Verificou-se nestes sensores que os valores do desempenho se situaram entre os 94% no primeiro dia e os 59% no fim do ensaio, o que correspondeu, em termos de perda de RE (eq.3) e ao fim do primeiro dia, de 15% que foi aumentando, ainda que ligeiramente, até aos 21% no fim do ensaio.

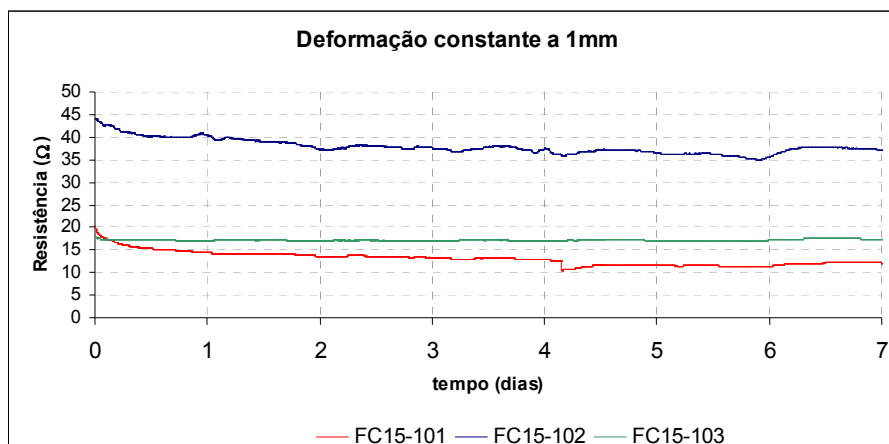


Figura 45 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC15-10

No que concerne ao efeito da temperatura no ensaio destes sensores (fig.45), este é negligenciável não se verificando os picos máximos diários, como observado nos sensores do tipo FC15-5.

Por ultimo apresenta-se o desempenho diário na Tabela 6, relativo aos sensores FC15-13, com 13% de fibras.

Tabela 6 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC15-13

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC15-131	0.76	0.72	0.70	0.68	0.62	0.62	0.64
FC15-132	0.74	0.70	0.68	0.66	0.60	0.60	0.63
FC15-133	0.70	0.66	0.65	0.63	0.56	0.55	0.59

Para estes sensores o desempenho variou durante o ensaio, entre os 76% no fim do primeiro dia e os 59% após a finalização do ensaio. Para essas datas as perdas verificadas foram inicialmente de 27%, valor esse que foi aumentando sucessivamente para no fim do ensaio ser de 38%.

À semelhança dos sensores FC15-10, constatou-se que o efeito da temperatura é negligenciável já que não se notaram os picos diários nas leituras da resistência eléctrica (fig.46).

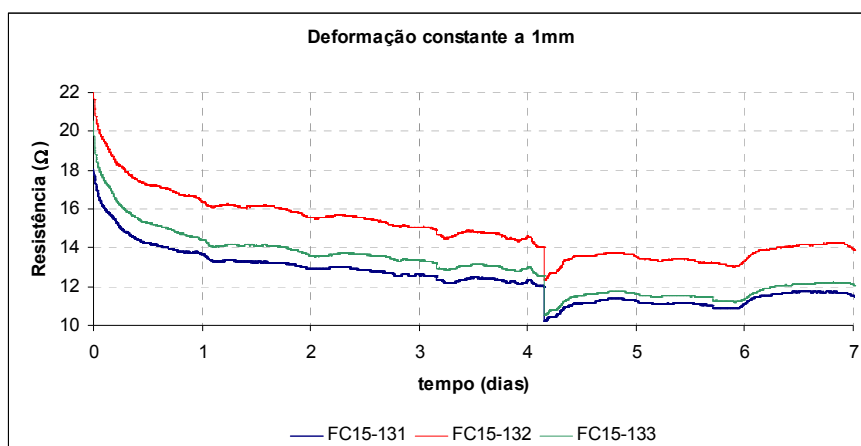


Figura 46 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC15-13

A partir da figura 46, e no início do quarto dia de ensaio, observou-se uma quebra nos valores da resistência eléctrica em todos os sensores. Uma vez que a quebra foi sentida de igual modo, e como a temperatura não sofreu uma oscilação semelhante, este efeito pode ser explicado por uma vibração pontual que tenha ocorrido no laboratório de ensaio.

4.5.1.2 Deformação constante a 2mm

Após a realização do ensaio com uma deformação de 1mm, impôs-se uma deformação de 2mm, sem que houvesse um relaxamento de tensões, aplicando uma deformação adicional de 1mm à já existente no sensor.

Tabela 7 – valores da RE inicial dos sensores FC15 para 2mm de deformação

nº amostra	FC15-5 (Ω)	FC15-10 (Ω)	FC15-13 (Ω)
1	99	22	18
2	69	39	17
3	47	77	12

Findo a realização dos ensaios, procedeu-se à extracção da RE inicial, R_0 , de cada um dos sensores, no momento em que se deu início ao ensaio, para $t=0$. Na tabela 9 são apresentadas as leituras iniciais as quais corresponderam em todos os sensores aos máximos registados durante cada um dos ensaios.

Seguidamente foram determinados, a partir da eq.2, os valores do desempenho, d_d para cada dia de ensaio decorrido. No caso dos sensores com 5% de fibras de carbono, encontram-se na tabela 7.

Tabela 8 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC15-5

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC15-51	0.58	0.58	0.56	0.54	0.51	0.48	0.51
FC15-52	0.65	0.63	0.62	0.60	0.57	0.54	0.56
FC15-53	0.78	0.79	0.78	0.76	0.74	0.72	0.76

A gama de valores obtidos do desempenho foi de 78% no primeiro dia de ensaio, decrescendo até aos 51% no fim do ensaio. A estes valores de desempenho estão associadas perdas de 33% a 39% respectivamente.

O efeito da temperatura, não é pronunciado (fig.47), mas ainda observável através de pequenos picos diários das RE registadas para cada um dos sensores.

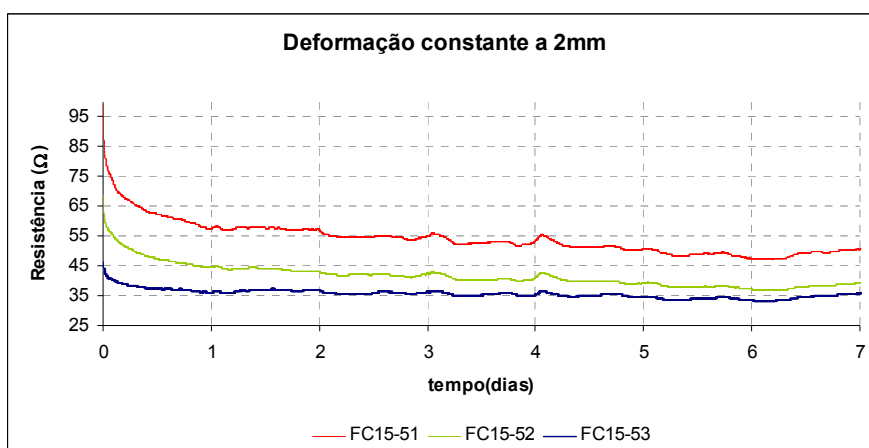


Figura 47 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC15-5

Novamente e para os sensores com 10% de fibras, FC15-10, os resultados do desempenho são apresentados na tabela 8. Neste caso, o desempenho situou-se no intervalo entre os 89% e os 60%, em que o primeiro valor foi determinado ao fim do primeiro dia e o segundo no fim do ensaio.

Tabela 9 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC15-10

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC15-101	0.71	0.69	0.68	0.63	0.58	0.57	0.60
FC15-102	0.75	0.72	0.70	0.66	0.62	0.59	0.62
FC15-103	0.89	0.88	0.81	0.80	0.74	0.72	0.74

As perdas registaram um valor de 22% no primeiro dia, valor esse que subiu até aos 35% aos sete dias de ensaio.

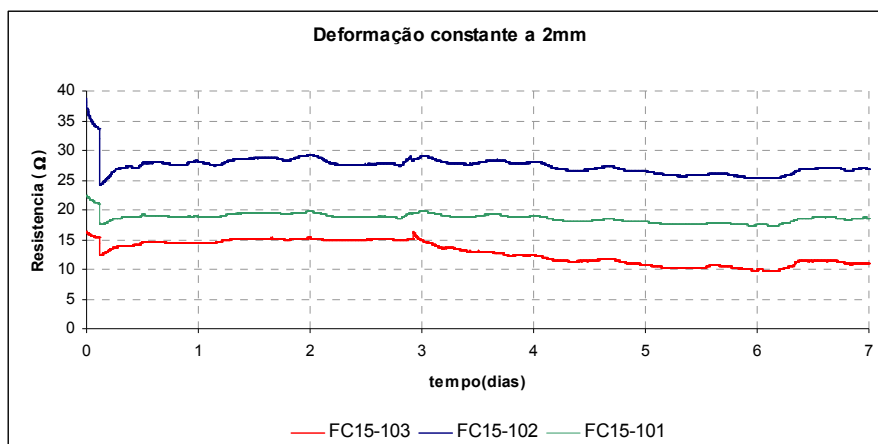


Figura 48 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC15-10

A tendência já verificada para uma deformação de 1mm, manteve-se, não tendo sido observados picos dignos de registro (fig.48).

Por último, apresenta-se os valores do desempenho obtidos para os sensores com 13% de fibras, FC1513.

Tabela 10 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC15-13

	Rt/R₀						
	1	2	3	4	5	6	7
FC15-131	0.84	0.88	0.88	0.84	0.80	0.78	0.83
FC15-132	0.73	0.76	0.75	0.73	0.69	0.65	0.69
FC15-133	0.88	0.93	0.90	0.75	0.66	0.60	0.66

Verificou-se neste ensaio que o desempenho variou entre os 88% e os 66%, aos quais corresponderam perdas de 18% no fim do primeiro dia, que aumentaram para 27% no fim do ensaio.

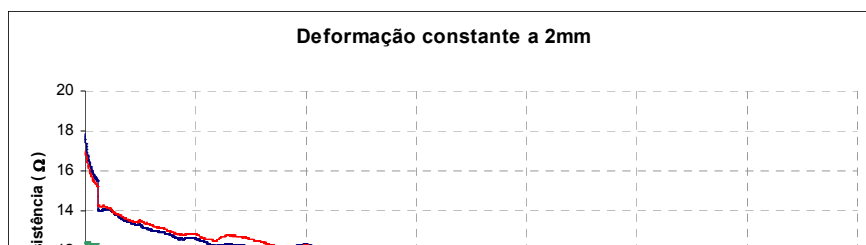


Figura 49 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC15-13

Na sequência do dito para os sensores anteriores, relativamente ao efeito da temperatura, estes sensores apresentaram o mesmo comportamento observado para uma deformação de 1mm, o qual é negligenciável, dado que não se observa os picos diários caracterizadores desse mesmo efeito (fig.49).

4.5.1.3 Análise de resultados

No que concerne aos resultados obtidos nos sensores do tipo FC15, conclui-se que, e para uma deformação de 1mm, aqueles que apresentaram menores valores de perda foram os sensores com 10% de incorporação de fibras, FC15-10, com 21% de perda (fig.50).

Analogamente, mas para uma deformação de 2mm, os sensores que apresentaram valores de perda mais baixos foram os FC15-13, com 13% de incorporação de fibras, cujo valor foi de com 27% (fig.50).

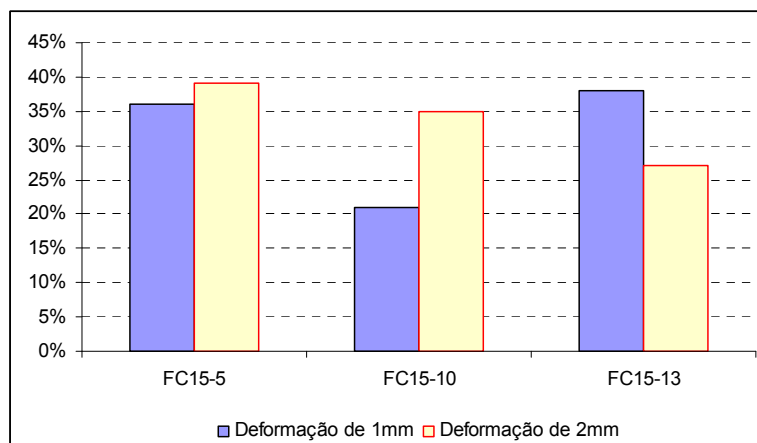


Figura 50 – Evolução do desempenho nos sensores do tipo FC15

As perdas na RE são efectivamente consideráveis, contudo trata-se de um efeito negativo que tende a desvanecer com o tempo, assim se o sensor for utilizado num ambiente em que a variação da sua deformação acontece de forma muito lenta e gradual é possível obter leituras da RE com perdas nulas.

Devido a uma maior proximidade das fibras de carbono nos ensaios efectuados com deformação de 2mm, o efeito da temperatura na oscilação da RE nos sensores foi menos sentido. No caso dos sensores do tipo FC15-5, em que este efeito é evidente, verifica-se que foi sendo cada vez menos sentido com o passar do tempo tanto mais que no fim do ensaio com deformação de 2mm era praticamente negligenciável.

Sensores com fibras de carbono curtas (0,3 mm)

Foi produzido um novo tipo de fibras de carbono, a partir das fibras comercializadas pela Kureha Chemicals, obtidas por esmagamento a 6000 PSI. As fibras resultantes apresentaram um comprimento médio de 311,46 μm , ficando conhecidas no laboratório por “*pó de carbono*” dada a sua finura, as quais se atribuiu neste trabalho a designação de FC03.

Foram moldados igualmente três compósitos com diferentes percentagens de fibras de carbono, com 20%, 40% e 50% aos quais corresponderam os sensores FC03-20, FC03-40 e FC03-50 respectivamente.

Uma vez que o compósito com 20% de fibras, FC03-20¹, não apresentou qualquer comportamento piezoelectrico, serão apenas apresentados os resultados obtidos, para deformações constantes a 1mm e a 2mm, dos sensores FC03-40 e FC03-50.

4.5.1.4 Deformação constante a 1mm

A primeira tarefa realizada consistiu na extracção da RE inicial, R_0 , de cada um dos sensores. Na tabela 11 apresentam-se as leituras iniciais que corresponderam em todos os sensores aos máximos registados durante cada um dos ensaios.

Tabela 11 – valores da RE inicial dos sensores FC03 para 1mm de deformação

nº amostra	FC03-40 (Ω)	FC03-50 (Ω)
1	123	37
2	120	24
3	95	24

O passo seguinte consistiu na determinação, a partir da eq.2, dos valores do desempenho, d_d para cada dia de ensaio decorrido. No caso dos sensores com 40% de fibras de carbono os valores obtidos encontram-se na tabela 12.

¹ Os resultados obtidos para o compósito FC03-20 encontram-se em anexo

Tabela 12 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC03-40

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC03-401	0.65	0.59	0.57	0.57	0.55	0.52	0.52
FC03-402	0.69	0.60	0.57	0.56	0.55	0.52	0.51
FC03-403	0.72	0.63	0.60	0.59	0.57	0.54	0.54

Os valores do desempenho situaram-se, para estes sensores, no intervalo entre os 72% e os 51%, registando-se ao fim do primeiro dia uma perda de 31% que foi aumentando ao longo do tempo, para no fim do ensaio ser de 48%.

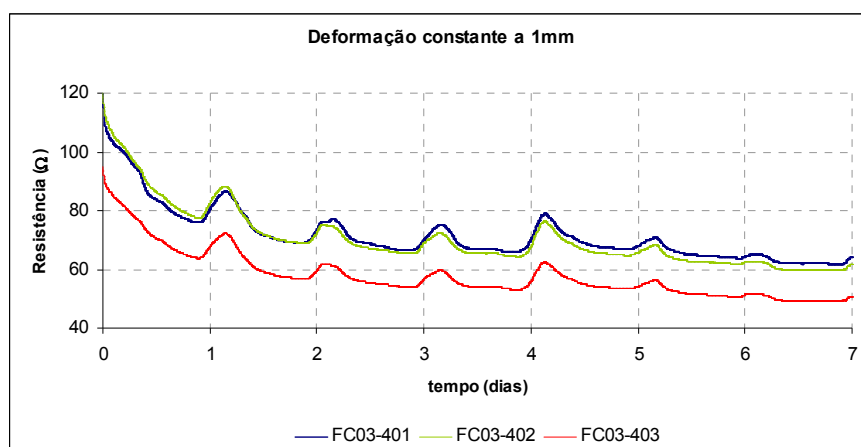


Figura 51 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC03-40

A partir da figura 51 observa-se o efeito pronunciado da temperatura nas leituras da RE obtidas ao longo do dia, onde os máximos diários registados em cada um dos sensores coincidem com os máximos da temperatura.

Por último, apresenta-se o desempenho diário na tabela 13, dos sensores FC03-50, com 50% de fibras.

Tabela 13 – Desempenho para uma deformação de 1mm do compósito FC03-50

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC03-501	0.79	0.72	0.68	0.68	0.66	0.63	0.65
FC03-502	0.84	0.77	0.74	0.73	0.72	0.70	0.68
FC03-503	0.90	0.85	0.83	0.82	0.81	0.79	0.75

Os valores do desempenho situaram-se, para estes sensores, no intervalo entre os 90% e os 68%, registando-se ao fim do primeiro dia uma perda de 16% que foi aumentando ao longo do tempo, para no fim do ensaio ser 31%.

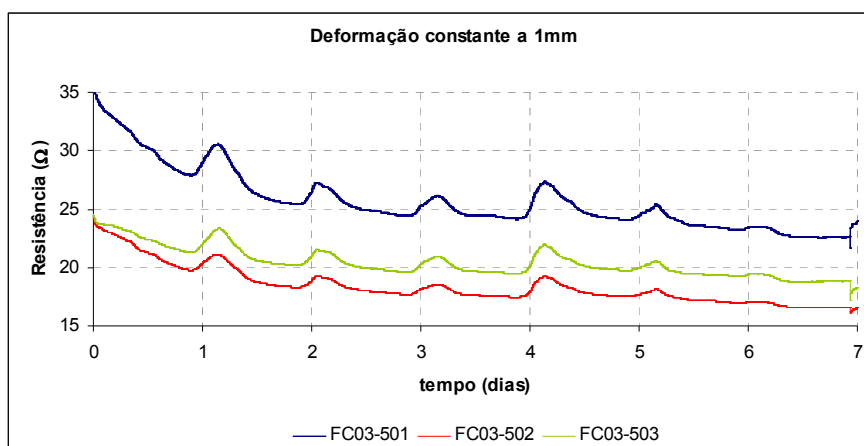


Figura 52 – Ensaio com 1mm deformação dos sensores FC03-50

Relativamente à influência da temperatura, observou-se o mesmo efeito de temperatura já verificado nos sensores do tipo FC03-40, em que as leituras da RE obtidas ao longo do dia apresentaram o mesmo padrão de variação verificado para o registo das temperaturas, ou seja, os máximos diários das resistências eléctricas lidas para cada um dos sensores, coincidem com os máximos diários das temperaturas obtidas a cada dia de ensaio (fig.52).

4.5.1.5 Deformação constante a 2mm

Após a realização do ensaio com uma deformação de 1mm, impôs-se uma deformação de 2mm, sem que houvesse um relaxamento de tensões, aplicando uma deformação adicional de 1mm à já existente no sensor.

Tabela 14 – valores da RE inicial dos sensores FC03 para 1mm de deformação

nº amostra	FC03-40 (Ω)	FC03-50 (Ω)
1	274	56
2	212	33
3	227	47

Foram extraídos os valores da RE inicial, R_0 , a partir dos ficheiros de registo de cada um dos sensores os quais se apresentam na tabela 14 e corresponderam em todos os sensores aos máximos registados durante cada um dos ensaios.

Foi calculado o desempenho dos sensores a partir da eq.2 para cada dia decorrido durante o ensaio, que para o caso seguinte que se apresenta na tabela 15, correspondem aos sensores FC03-40.

Tabela 15 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC03-40

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC03-402	0.56	0.49	0.46	0.42	0.41	0.42	0.40
FC03-403	0.54	0.48	0.45	0.41	0.40	0.41	0.40
FC03-403	0.48	0.43	0.39	0.36	0.35	0.36	0.35

Verificou-se neste ensaio que os valores do desempenho oscilaram entre os 56% e os 35%, registrando-se ao fim do primeiro dia uma perda de 47% que foi aumentando ao longo do tempo, para no fim do ensaio ser de 62%.

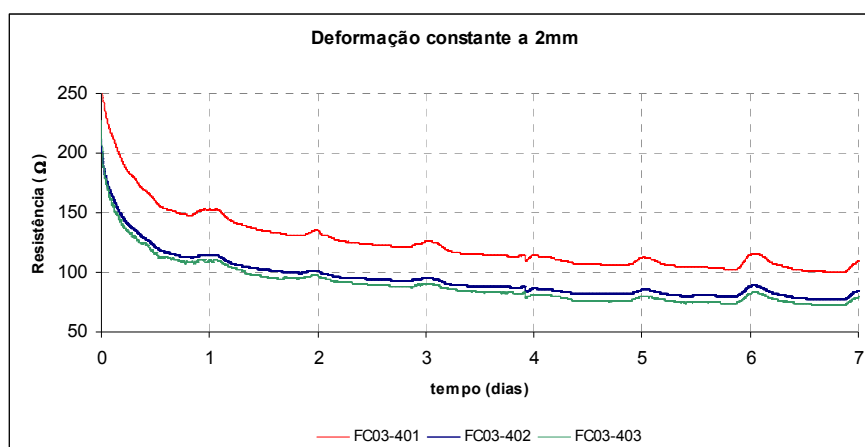


Figura 53 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC03-40

O efeito da temperatura, neste ensaio não é tão pronunciado, mas ainda observável através dos picos diários registrados das resistências eléctricas lidas para cada um dos sensores (fig.53).

Por último, e após a determinação da RE inicial, foi calculado o desempenho dos sensores FC03-50 para cada dia decorrido durante o ensaio. Os resultados obtidos são os apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Desempenho para uma deformação de 2mm do compósito FC03-50

	R_t/R_0						
	1	2	3	4	5	6	7
FC03-501	0.66	0.60	0.58	0.56	0.54	0.55	0.53
FC03-502	0.68	0.63	0.60	0.59	0.57	0.58	0.57
FC03-503	0.62	0.57	0.54	0.53	0.51	0.52	0.50

Verificou-se neste ensaio que os valores do desempenho situaram-se entre os 68% e os 50%, registrando-se ao fim do primeiro dia uma perda de 35% que foi aumentando ao longo do tempo, para no fim do ensaio ser de 47%.

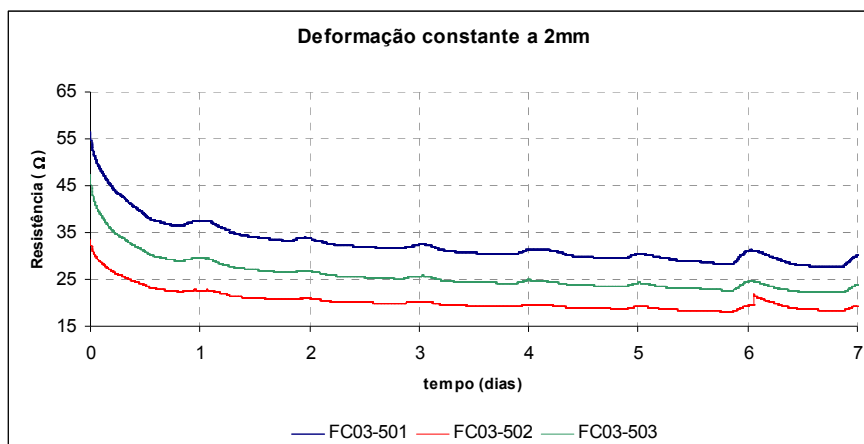


Figura 54 – Ensaio com 2mm deformação dos sensores FC03-50

O efeito da temperatura seguiu o mesmo padrão já verificado nos sensores do tipo FC03-40 para a mesma deformação. Contudo a esta deformação apresentaram uma atenuação do efeito, com picos pouco pronunciados (fig.54).

4.5.1.6 Análise de resultados

No que concerne aos resultados obtidos nos sensores do tipo FC03, conclui-se que, e para uma deformação constante de 1mm, os que apresentaram mais alto desempenho foram os sensores com 50% de incorporação de fibras de carbono, FC03-50, com 31% de perda. A tendência manteve-se para uma deformação constante de 2mm, contudo verificou-se um aumento da perda para os 47% (fig.55).

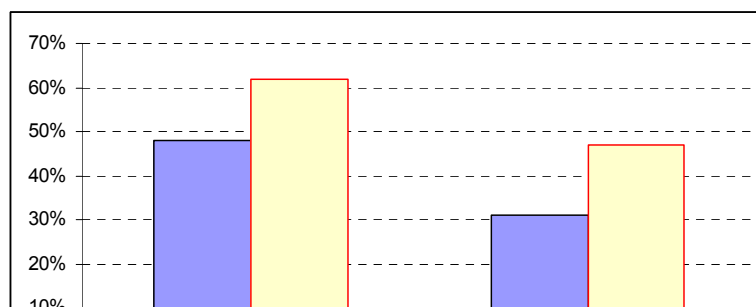


Figura 55 – Evolução do desempenho nos sensores do tipo FC03

Nos sensores deste tipo, observou-se claramente o efeito da temperatura, não sendo atenuado com o relaxamento de tensões, em que se pode observar picos distintos de RE que acompanharam a variação térmica observada diariamente. Esse efeito foi atenuado significativamente, quando se passou de uma deformação constante de 1mm para 2mm.

4.5.2 Conclusões

Os sensores que apresentaram melhor desempenho nas leituras realizadas ao fim de sete dias de ensaio e para uma deformação constante de 1mm foram os do tipo FC15-50 com um mínimo de 68% de desempenho.

Relativamente ao ensaio de deformação constante a 2mm os sensores com melhor desempenho foram os do tipo FC15-13 com um mínimo de 66%.

O facto de estes sensores apresentarem valores de irreversibilidade nas leituras efectuadas, exclui-os, à partida, de ambientes que requerem respostas rápidas, sendo preferenciais para situações em que as variações de deformação são extremamente prolongadas no tempo, como é o caso das sapatas de edifícios.

4.6 Avaliação da sensibilidade dos sensores

De modo a poder caracterizar-se um sensor, é necessário primeiro caracterizar o seu comportamento mecânico e eléctrico de forma se estabelecer uma relação de comparação entre a deformação do sensor e a sua RE. Esta relação quando ajustada a uma curva de calibração permite à posteriori estimar uma grandeza em função da outra.

Para se poder avaliar a sensibilidade, e à semelhança do ensaio anterior, foi primeiro estudado o seu desempenho, através da determinação da reversibilidade das leituras efectuadas dado pela eq.4:

$$d_r = \frac{R_t - R_0}{R_0} \quad \text{eq. 4}$$

Neste caso, R_t corresponde à leitura da RE no instante t , em segundos, e R_0 corresponde à leitura inicial da RE quando se deu início ao ensaio, para $t=0$; a razão dada na eq.4 traduz a parte reversível, d_r , para a idade t dos valores da RE.

Valores de reversibilidade iguais a zero significam que as leituras efectuadas apresentam um comportamento constante ao longo do tempo e portanto previsíveis de estimar. Valores de reversibilidade que se afastem do valor zero, quer por valores negativos quer por valores positivos, significa que existe uma variação nas leituras entre intervalos de tempo distintos e como tal existe uma maior dificuldade em estimar a deformação.

São apresentados de seguida os resultados obtidos neste ensaio para os sensores em estudo.

4.6.1 Sensores com fibras de carbono longas (1,5 mm)

FC15-5

Os resultados do ensaio dos sensores do tipo FC15-5 são apresentados nas figuras 56 a 58.

As RE iniciais, no tempo $t=0$, dos sensores FC15-51, FC15-52 e FC15-53 foram de 131Ω , 84Ω e 147Ω respectivamente.

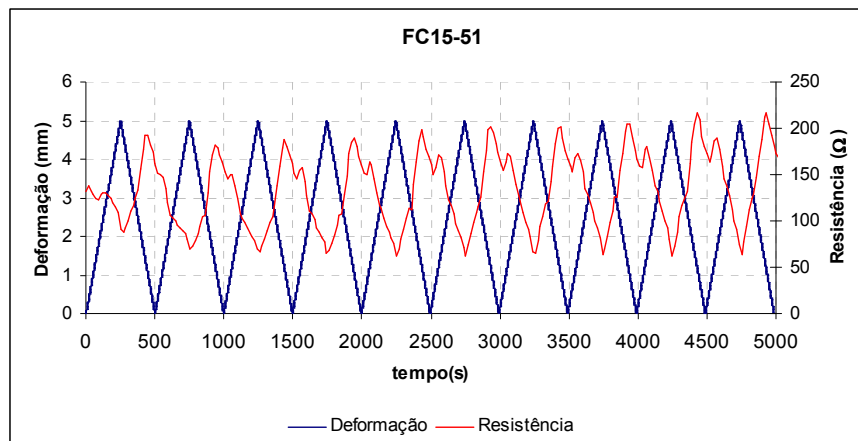


Figura 56 – Ensaio do sensor FC15-51

Quando o sensor se encontra sujeito à mínima deformação, verificou-se que os valores da reversibilidade foram de -52%, -26% e de -60% para os sensores FC15-51, FC15-52 e FC15-53, em que nos últimos três ciclos as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 1%, 4% e 8% respectivamente.

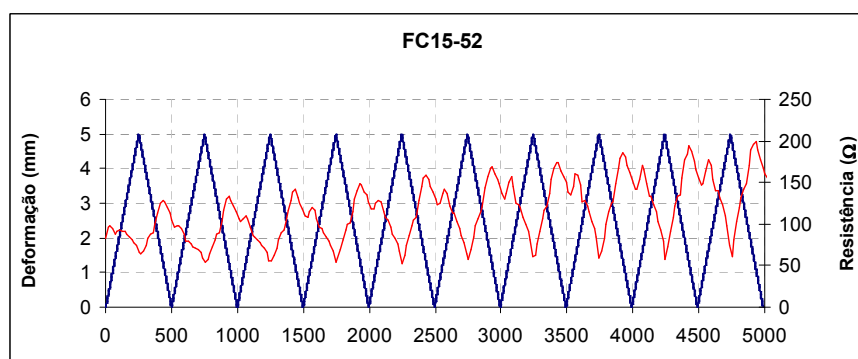


Figura 57 – Ensaio do sensor FC15-52

Por outro lado, e no outro extremo, ou seja para a deformação máxima dos sensores, os valores da RE apresentaram reversibilidades de 64%, 140% e de 60% para os sensores FC15-51, FC15-52 e FC15-53, em que nos últimos três ciclos as

variações nessas mesmas reversibilidades foram de 5%, 8% e 14% respectivamente.

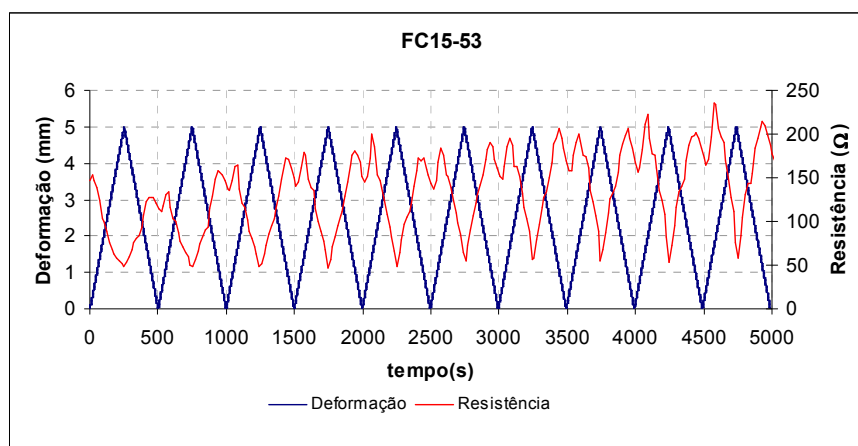


Figura 58 – Ensaio do sensor FC15-53

FC15-10

Os resultados dos sensores do tipo FC15-10 são apresentados nas figuras 59 a 61. Analogamente ao efectuado nos sensores anteriores, o primeiro passo, consistiu na medição da RE inicial do sensor ao qual se ia dar início ao ensaio. No conjunto dos três sensores, FC15-101, FC15-102 e FC15-103, os valores obtidos foram de 47Ω, 59 Ω e 58Ω respectivamente.

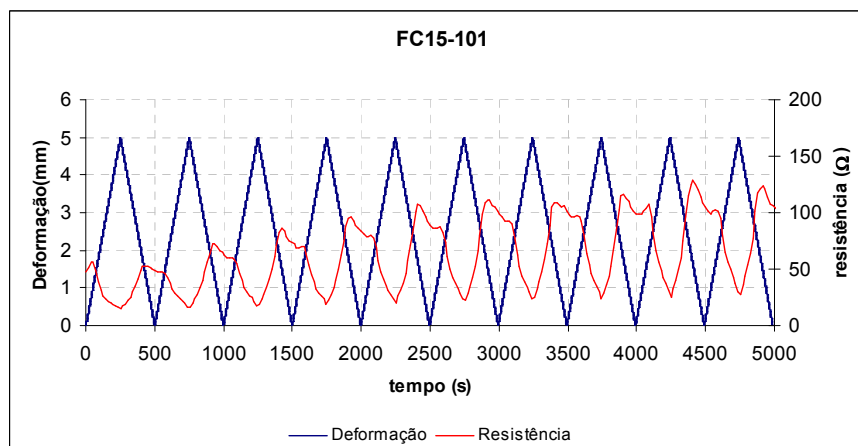


Figura 59 – Ensaio do sensor FC15-101

Quando o sensor se encontra sujeito à mínima deformação, verificou-se que os valores da reversibilidade foram de -42%, -53% e de -37% para os sensores FC15-101, FC15-102 e FC15-103, em que nos últimos três ciclos as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 15%, 25% e 30% respectivamente.

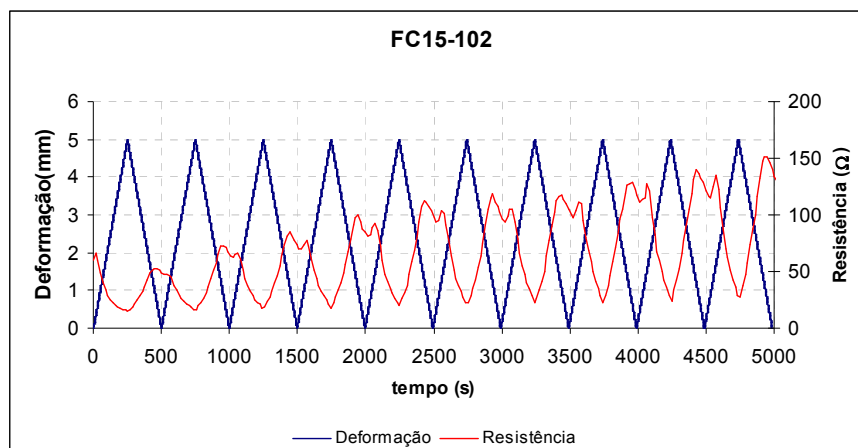


Figura 60 – Ensaio do sensor FC15-102

Para a situação de máxima deformação, no que concerne à reversibilidade das leituras, estas apresentaram valores de 162%, 154% e de 232% para os sensores FC15-101, FC15-102 e FC15-103, em que nos últimos três ciclos as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 6%, 17% e 16% respectivamente.

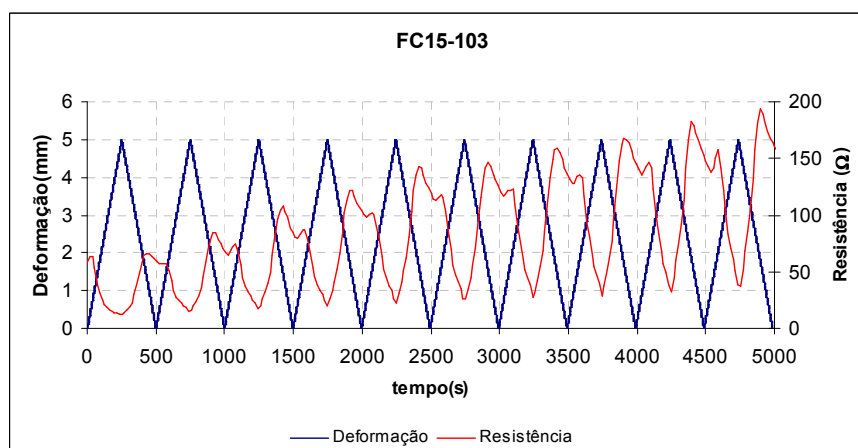


Figura 61 – Ensaio do sensor FC15-103

Analogamente, entre ciclos de deformação, a resistência eléctrica sofreu uma quebra nos seus valores, visível através dos picos invertidos a deformações próximas de zero, embora não sendo tão pronunciados como no compósito anterior. Este fenómeno poderá ser explicado, igualmente, devido ao relaxamento das fibras de carbono produzindo um efeito piezoresistivo no sentido de um aumento da condutividade do sensor.

FC15-13

Os resultados do ensaio dos sensores do tipo FC15-13 são apresentados nas figuras 62 a 64.

Os valores iniciais RE inicial dos sensores FC15-131, FC15-132 e FC15-133 foram de 7 Ω , 72 Ω e 6 Ω respectivamente.

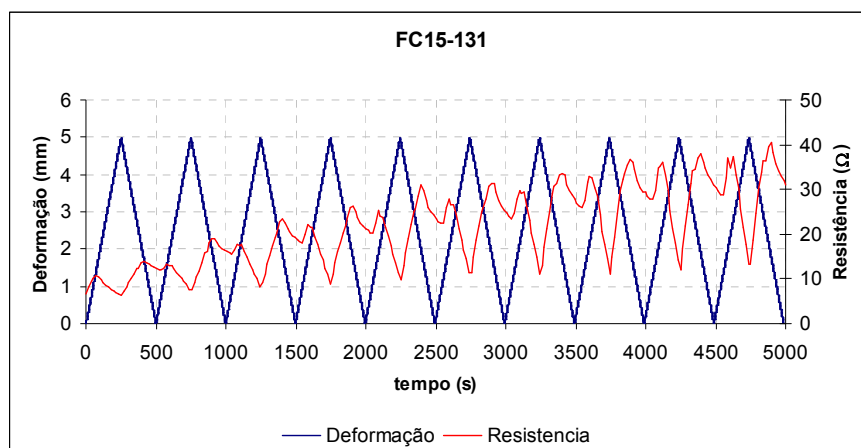


Figura 62 – Ensaio do sensor FC15-131

No que concerne à reversibilidade das leituras da RE para valores máximos de deformação, estas apresentaram valores de 508%, 163% e de 436% para os sensores FC15-131, FC15-132 e FC15-133, em que nos últimos três ciclos as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 10%, 6% e 18% respectivamente.

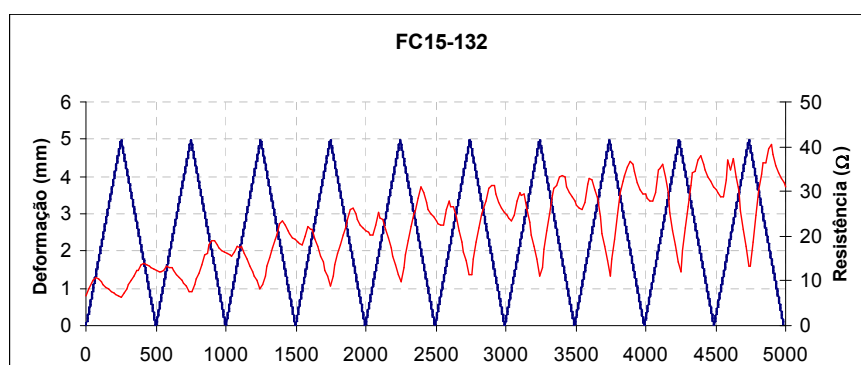


Figura 63 – Ensaio do sensor FC15-132

Relativamente aos valores de reversibilidade para o mínimo de deformação, estas apresentaram valores de 100%, -12% e de 213% para os sensores FC15-131, FC15-132 e FC15-133, respectivamente.

FC15-132 e FC15-133, em que nos últimos três ciclos as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 19%, 9% e 11% respectivamente.

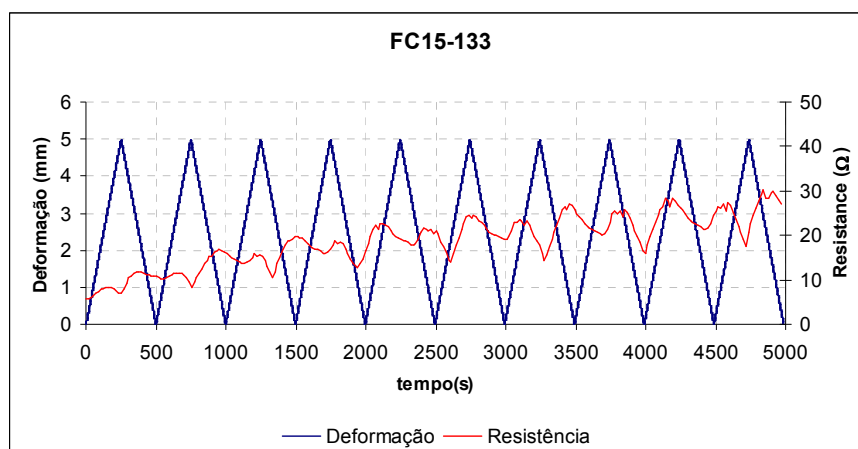


Figura 64 – Ensaio do sensor FC15-133

4.6.2 Análise de resultados

Como se pode observar através dos gráficos de deformação (fig.56 a 64), os sensores exibiram uma queda na RE sempre que o carregamento aumentava, ou seja, a sua condutividade aumentava. Este facto deve-se à compressão volumétrica elástica que resulta numa diminuição da altura do sensor que associado à baixa percentagem de fibras de carbono existentes na matriz, conduz a um aumento efectivo do número de contactos condutores das fibras devido à sua maior proximidade umas das outras.

A irreversibilidade observada nestes sensores, foi verificado inicialmente por X. Wang & D.D.L. Chung (1995) [37] e deve-se a possíveis fenómenos de micro fissuração, que à medida que se vão desenvolvendo, as fibras vão sendo deslocadas da sua posição inicial, alterando a sua organização espacial no interior do sensor.

Entre ciclos de deformação, para deformações próximas de zero, a resistência eléctrica sofreu uma quebra nos seus valores, como é facilmente visível através dos picos invertidos. Este fenómeno poderá ser explicado devido ao relaxamento das fibras de carbono produzindo um efeito piezoresistivo que se traduz no aumento da condutividade da amostra.

A amostra FC15-133 apresenta grandes variações da RE de ciclo para ciclo, em que tanto os valores máximos como mínimos variam tanto em amplitude como em fase (fig.64) de onde resulta uma fraca representação em termos de RE da variação da sua deformação.

Estes sensores, para deformações próximas de zero, foram os que apresentaram a maior variação no sentido do aumento da condutividade do compósito. Este aumento é justificado devido ao relaxamento de tensões no sensor produzindo um efeito piezoresistivo.

De referir ainda que esse efeito foi aumentando à medida que a % de fibras de carbono também aumentou nos sensores, como comprovam os picos invertidos a deformações próximas de zero marcadamente presentes nas figuras apresentadas.

No que concerne aos resultados obtidos nos sensores do tipo FC15, conclui-se que, e para uma deformação nula do sensor, aqueles que apresentaram valores de reversibilidade mais próximos da unidade (100%) foram os sensores com 10% de incorporação de fibras de carbono, FC15-5, com 46% de valor médio (fig.65) embora os sensores do tipo FC15-10 também apresentaram um valor bastante próximo de 44%.

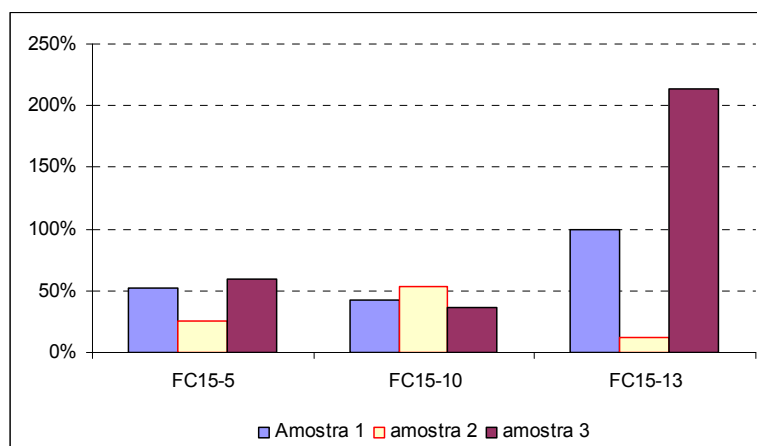


Figura 65 – Reversibilidade dos sensores do tipo FC15 para uma deformação nula

Em termos de variação da reversibilidade nos últimos três ciclos de carga observa-se através da figura 66 que os sensores que apresentaram maior estabilidade foram os sensores FC15-5 uma vez que apresentaram valores mais baixos de variação.

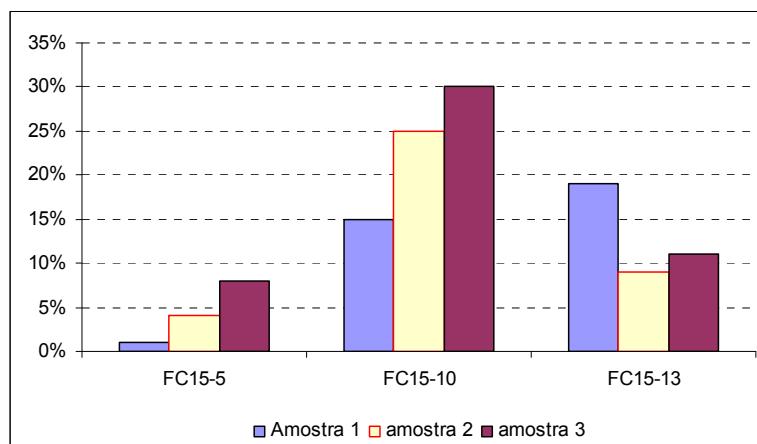


Figura 66 – Variação da reversibilidade nos sensores FC15

Relativamente aos valores da reversibilidade para a deformação máxima (5mm), conclui-se que os sensores que apresentaram valores de reversibilidade mais próximos da unidade foram os sensores com 5% de incorporação de fibras de carbono, FC15-5, com 88% de valor médio.

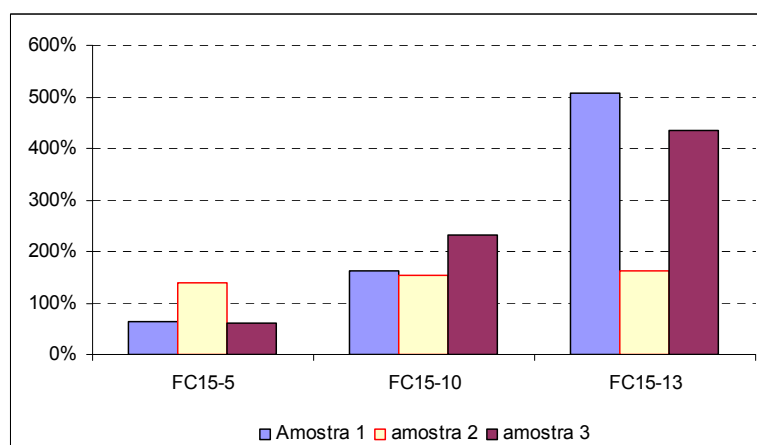


Figura 67 – Reversibilidade nos sensores do tipo FC15 para a deformação máxima

Em termos de variação da reversibilidade nos últimos três ciclos de carga observa-se através da figura 68 que os sensores que apresentaram maior estabilidade foram os sensores FC15-5 uma vez que apresentaram valores mais baixos de variação.

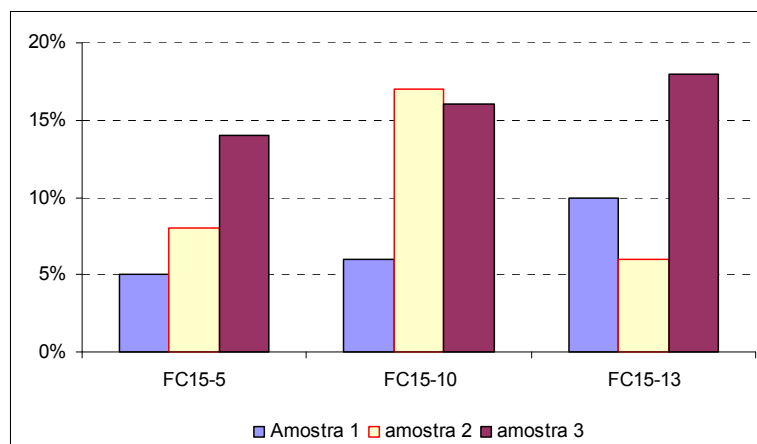


Figura 68 – Variação da reversibilidade nos sensores FC15

4.6.3 Sensores com fibras de carbono curtas (0,3 mm)

As leituras iniciais da RE dos sensores FC03-401, FC03-402 e FC03-403 foram de 88 Ω , 1154 Ω e 189 Ω respectivamente. Em contraste aos sensores que utilizaram as fibras 1,5mm, este tipo de sensores apresentaram uma variação da RE proporcional à deformação.

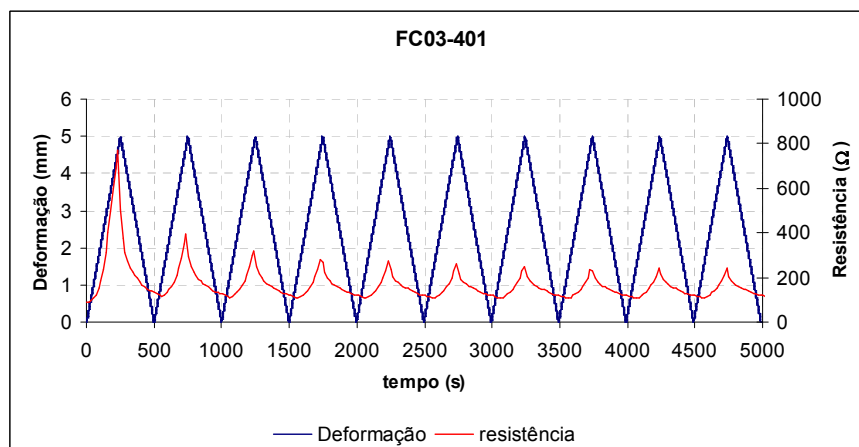


Figura 69 – Ensaio do sensor FC03-401

No que concerne à reversibilidade para a máxima deformação, estas apresentaram valores de 174%, -42% e de 272% para os sensores FC03-401, FC03-402 e FC03-403, em que nos últimos três ciclos as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 3%, 1% e 0% respectivamente.

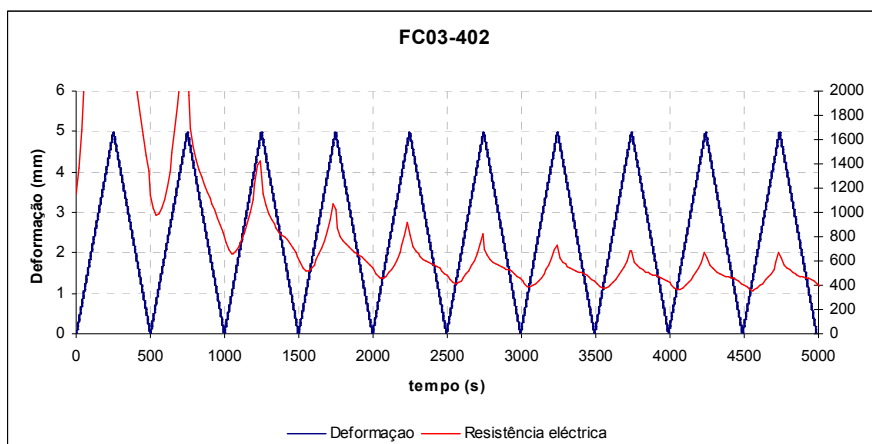


Figura 70 – Ensaio do sensor FC03-402

Relativamente à reversibilidade para a mínima deformação, estas apresentaram valores de 21%, -69% e de 20% para os sensores FC03-401, FC03-402 e FC03-403, em que nos últimos três ciclos de deformação as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 1%, 5% e 0% respectivamente.

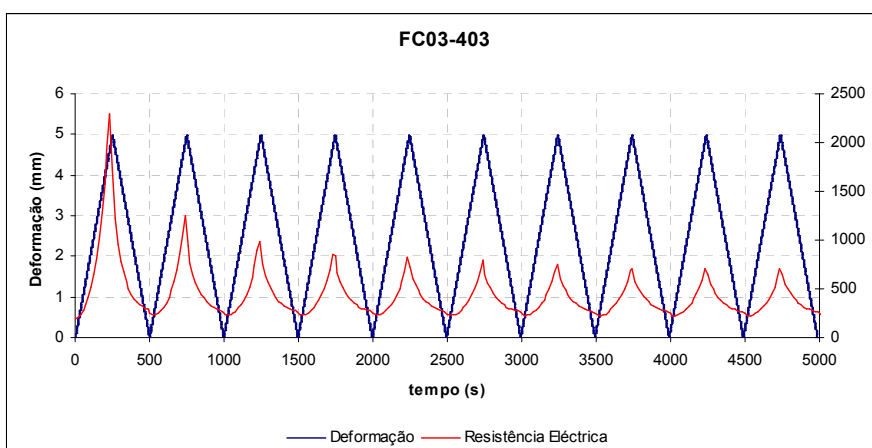


Figura 71 – Ensaio do sensor FC03-403

Por último, apresentam-se os resultados do Ensaio dos sensores do tipo FC03-50 nas figuras 72 a 74.

Antes de se dar início ao ensaio, foi efectuada a leitura da RE inicial dos sensores. No conjunto das três amostras os valores obtidos foram de 113 Ω , 144 Ω e 69 Ω para os sensores FC03-501, FC03-502 e FC03-503 respectivamente.

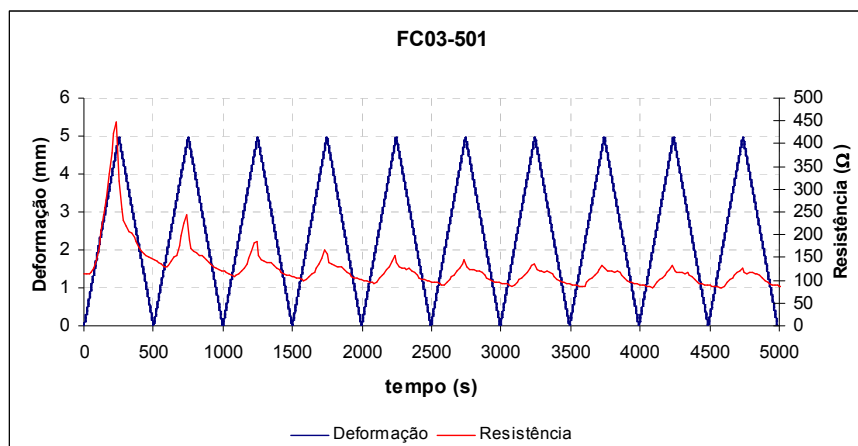


Figura 72 – Ensaio do sensor FC03-501

Relativamente à reversibilidade para a máxima deformação dos sensores, apresentaram valores de 13%, 89% e de 77% para os sensores FC03-501, FC03-502 e FC03-503, em que nos últimos três ciclos as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 4%, 0% e 1% respectivamente.

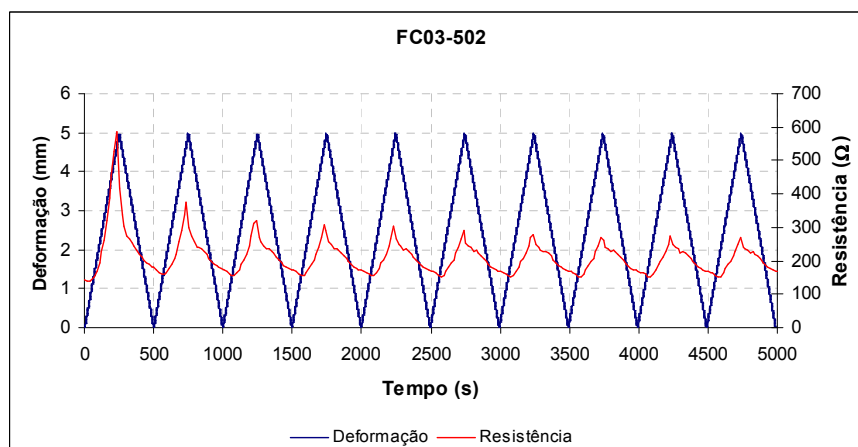


Figura 73 – Ensaio do sensor FC03-502

Para a situação da deformação mínima aplicada nos sensores, os valores da RE registaram, relativamente à reversibilidade, valores de -27%, 5% e de -2% para os sensores FC03-501, FC03-502 e FC03-503, em que nos últimos três ciclos de deformação as variações nessas mesmas reversibilidades foram de 3%, 1% e 5% respectivamente, o que se traduz, e à semelhança dos sensores anteriores, FC03-40, num compósito bastante estável e passível de uma calibração mais precisa.

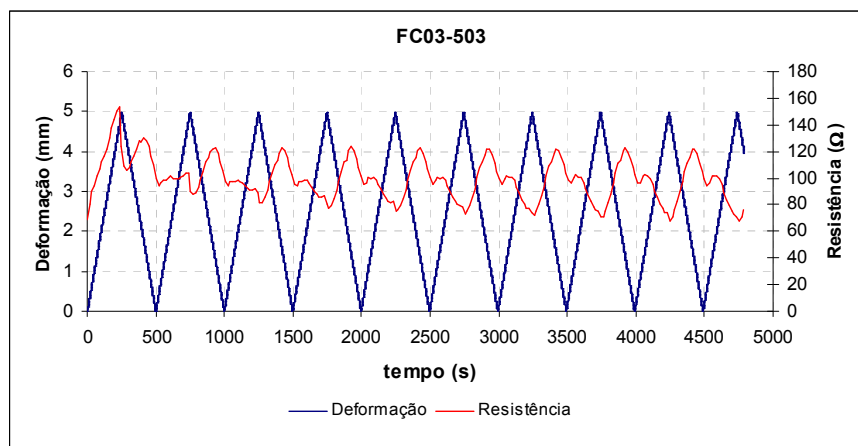


Figura 74 – Ensaio do sensor FC03-503

4.6.4 Análise de resultados

Dada a maior rigidez dos sensores com fibras curtas, faz com que as fibras de aço colocadas nos topos dos sensores apresentem uma maior estabilidade eléctrica. Isto pode ser devido a ausência da microfissuração e do deslizamento das fibras na interface de fibras de aço com as fibras no interior do compósito.

Como resultado dessa estabilidade eléctrica, as curvas obtidas da RE encontram-se bem definidas e alinhadas com as curvas da deformação. Estes sensores apresentam uma variação da RE proporcional à deformação.

Nos ciclos de carga iniciais, os sensores apresentaram deformação residual o que conduziu a uma variação da RE no sentido decrescente. A excepção verificou-se nos sensores do tipo FC03-50, em que após o primeiro ciclo houve uma variação no sentido crescente. Este fenómeno poderá ser explicado devido a uma maior alteração do compósito devido à microfissuração.

Para os sensores FC03-50, de uma forma global, observou-se uma ligeira degradação dos valores da RE com picos menos pronunciados e não tão bem definidos quando comparado com o compósito FC03-40.

No que concerne aos resultados obtidos nos sensores do tipo FC03 e para uma deformação nula do sensor, conclui-se que, aqueles que apresentaram valores de reversibilidade mais próximos de 100%, ou seja, uma reversibilidade total, foram os sensores com 40% de incorporação de fibras, FC15-40. A reversibilidade obtida foi de 37% (fig.75).

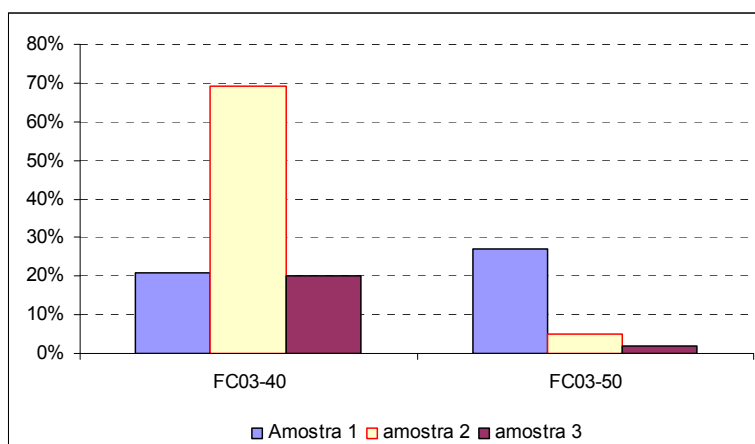


Figura 75 – Reversibilidade dos sensores do tipo FC03 para uma deformação nula

Em termos de variação da reversibilidade nos últimos três ciclos de carga observa-se através da figura 76 que os sensores que apresentaram maior estabilidade foram os sensores FC03-40.

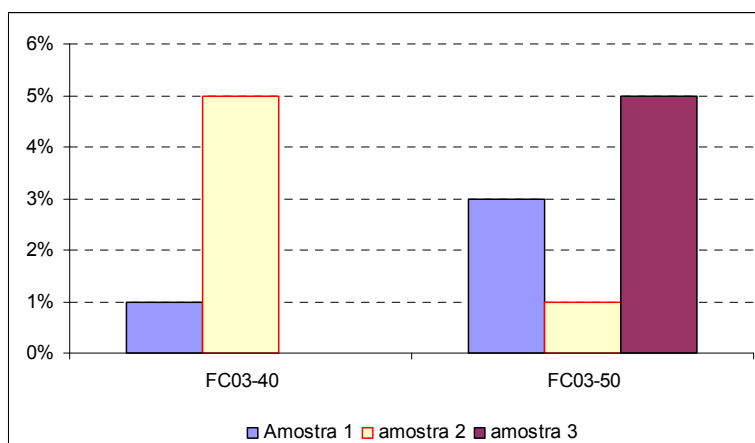


Figura 76 – Variação da reversibilidade nos sensores FC03

Relativamente aos valores da reversibilidade para a deformação máxima (5mm), conclui-se que os sensores que apresentaram valores de reversibilidade mais próximos da unidade foram os sensores com 50% de incorporação de fibras de carbono, FC03-50, com 60% de valor médio.

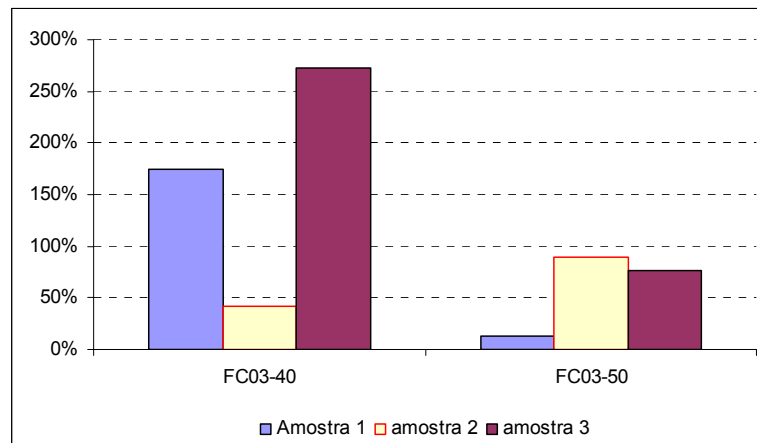


Figura 77 – Reversibilidade nos sensores do tipo FC15 para a deformação máxima

Em termos de variação da reversibilidade nos últimos três ciclos de carga observa-se através da figura 78 que os sensores que apresentaram maior estabilidade foram os sensores FC03-40.

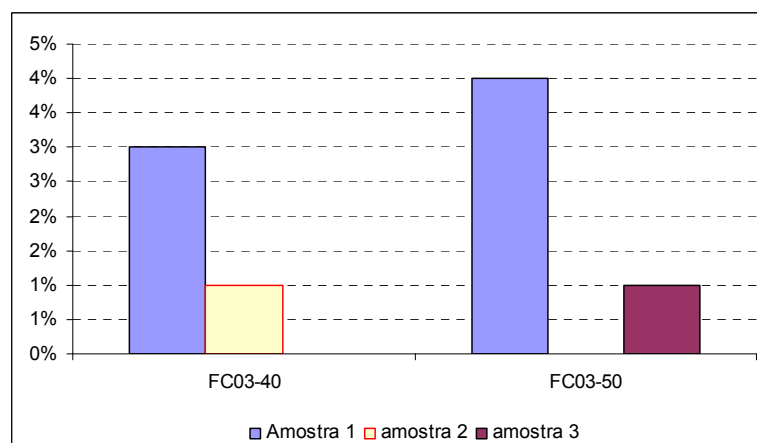


Figura 78 – Variação da reversibilidade nos sensores FC15

4.7 Sensibilidade

Os sensores de deformação eléctricos podem ser de natureza resistiva, capacitiva ou indutiva. O princípio de um sensor resistivo pode ser ilustrado através de um fio condutor cuja resistividade, ρ , é mantida constante para uma dada gama de deformações a que possa ser sujeito. À medida que o fio condutor vai alongando devido a uma força de tracção aplicada, o seu comprimento, L , aumenta e consequentemente a sua secção, A , diminui. Uma vez que a resistência eléctrica, R de um condutor varia directamente com o seu comprimento e inversamente com a secção de acordo com a seguinte relação:

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad \text{eq. 5}$$

o alongamento do fio condutor, traduz um aumento da sua resistência eléctrica. Se pensarmos agora que a variação da resistência eléctrica, ΔR , é dado pela diferença entre a resistência eléctrica, R_i , para a deformação ΔL , e a resistência eléctrica inicial, R_0 :

$$\Delta R = R_i - R_0 \quad \text{eq. 6}$$

a razão de variação de resistência eléctrica, $\Delta R/R_0$, está relacionada com a variação de comprimento, $\Delta L/L$, através da seguinte equação:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \kappa \times \frac{\Delta L}{L} \quad \text{eq. 7}$$

Em que κ é a sensibilidade ou factor de medida ("*gauge factor*").

Este tipo de materiais, como o fio condutor aqui utilizado para definir o conceito de sensibilidade, que apresentam variações na RE devido à deformação (ou carga) são materiais dito piezoresistivos.

A título de exemplo considerando os resultados obtidos para o sensor FC15-51 e considerando o último ciclo e uma deformação de 4.96mm, o valor registado da RE foi de 216.12Ω de onde resulta que a sensibilidade do sensor é de $9.04\Omega^{-1}$.

A sensibilidade dos sensores das várias combinações aqui em estudo encontram-se patentes nas tabelas Tabela 17 e Tabela 18.

Os valores apresentados têm como base os valores registados no último ciclo, dado que são estes que se encontram estabilizados.

Tabela 17 – Sensibilidade dos sensores do Tipo FC15

	FC15-05			FC15-10			FC15-13		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sensibilidade (Ω^{-1})	9,04	19,82	8,46	23,06	21,84	32,79	71,61	23,01	61,38

Verificou-se que a sensibilidade diminuía sempre que a resistência eléctrica inicial apresentava valores mais elevados. Para estes casos, os sensores apresentaram maiores variações de $\Delta R/R_0$ e deformações residuais significativas. Esta dependência com a RE inicial, pode ser atribuída à forma como a ligação entre as fibras de carbono e a malha de aço utilizada como contacto é realizada, no qual representa uma parte significativa da RE medida no conjunto. Assim sendo, é de todo preferível, amostras que apresentem valores da RE inicial baixos já que estes são os que apresentam um melhor coeficiente de sensibilidade.

Tabela 18 – Sensibilidade dos sensores do Tipo FC03

	FC03-40			FC03-50		
	1	2	3	1	2	3
Sensibilidade (Ω^{-1})	24,71	5,93	38,54	1,85	12,66	10,91

4.8 Calibração dos sensores

Um sensor, por definição, relaciona pelo menos duas grandezas de medida de modo a poder obter-se uma a partir da outra e vice-versa. Os sensores desenvolvidos neste trabalho permitem relacionar a deformação com a resistência eléctrica própria do sensor.

De seguida são apresentadas as curvas de calibração “*deformação versus resistência eléctrica*” a cada um dos sensores em estudo. (fig.79)².

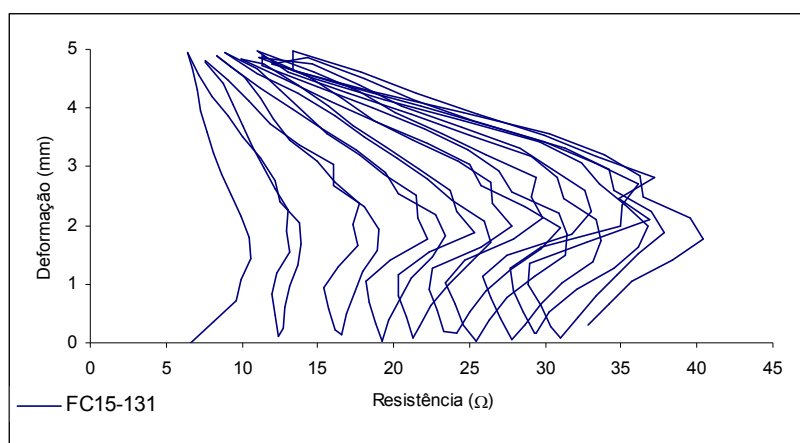


Figura 79 – Deformação versus Resistência eléctrica do sensor FC15-131 (10 ciclos)

De modo a reproduzir as relações deformação – resistência eléctrica para cada sensor, recorreu-se a uma equação do tipo linear para fazer as aproximações das curvas e obter as respectivas curvas de calibração:

$$D(R) = mR + b \quad \text{eq. 8}$$

Com:

D: Deformação em mm

R: Resistência eléctrica lida nas pontas do sensor em ohm.

m, b: Constantes determinadas por aproximação.

²As restantes curvas são apresentadas em anexo.

Dado que a deformação residual dos sensores em estudo estabilizou antes de se ter completado os 10 ciclos de carga-descarga no ensaio, os dados utilizados para obter as curvas de calibração foram os relativos ao último ciclo para cada sensor.

4.8.1 Sensores com fibras de carbono do tipo FC15

FC15-5

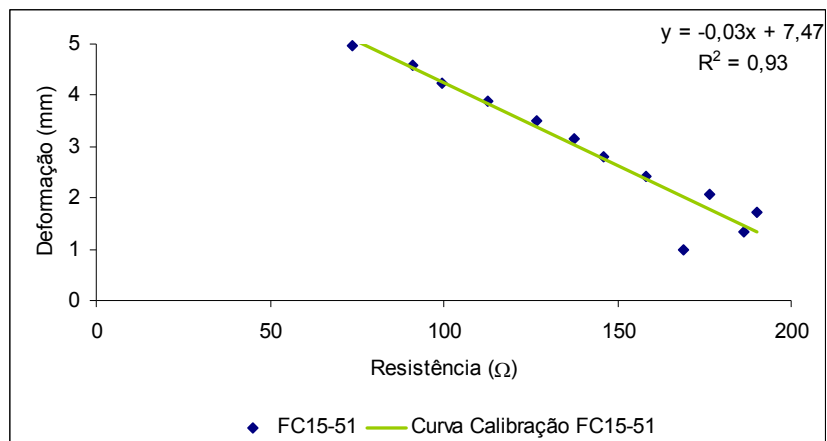


Figura 80 – Curva de calibração do sensor FC15-51

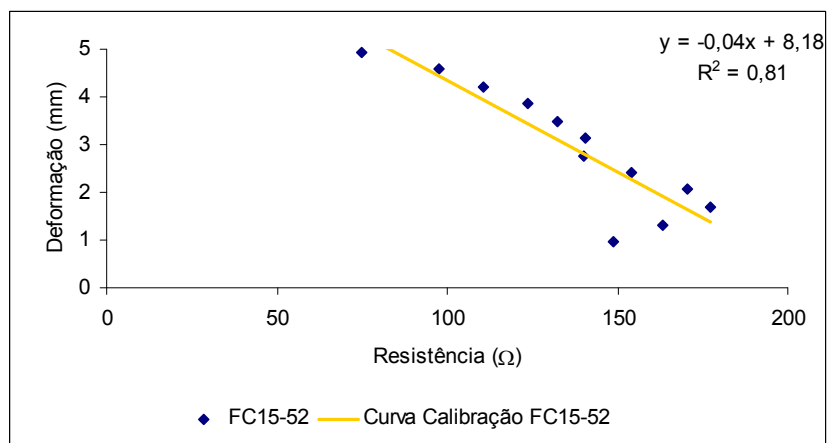


Figura 81 – Curva de calibração do sensor FC15-52

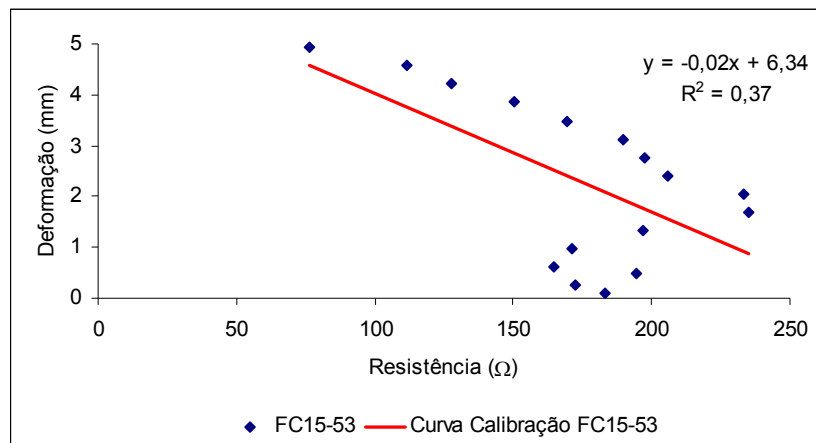


Figura 82 – Curva de calibração do sensor FC15-53

FC15-10

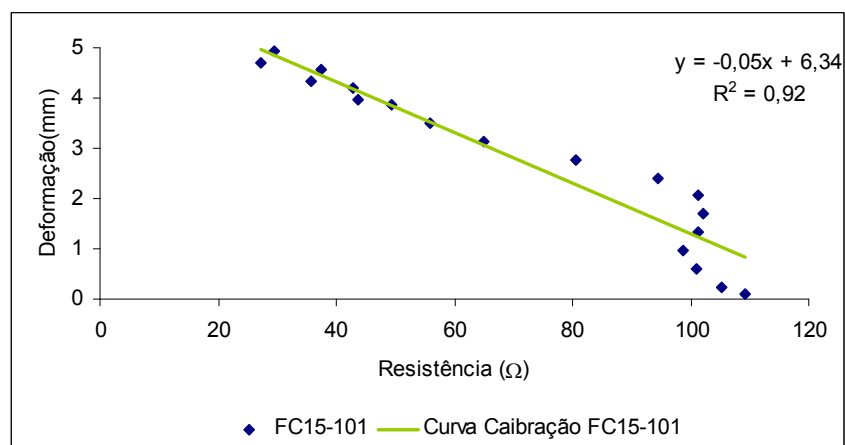


Figura 83 – Curva de calibração do sensor FC15-101

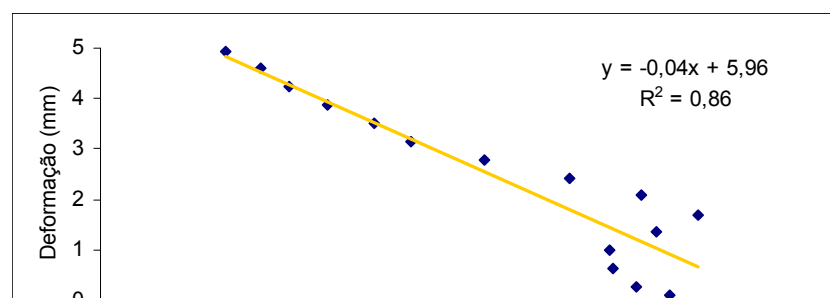


Figura 84 – Curva de calibração do sensor FC15-102

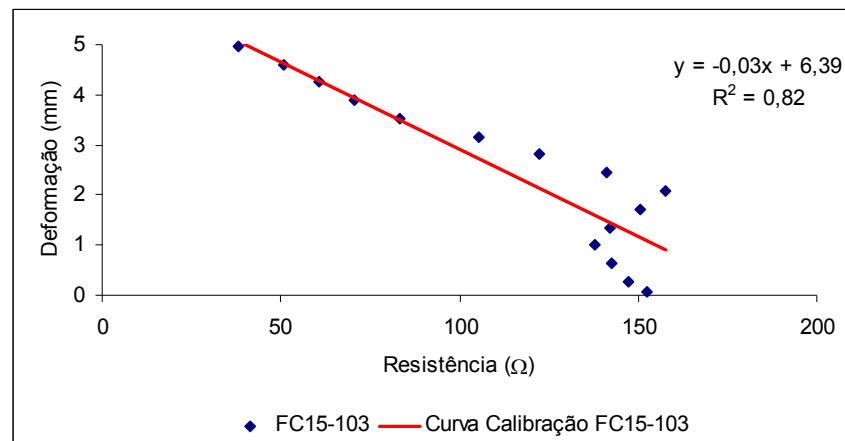


Figura 85 – Curva de calibração do sensor FC15-103

FC15-13

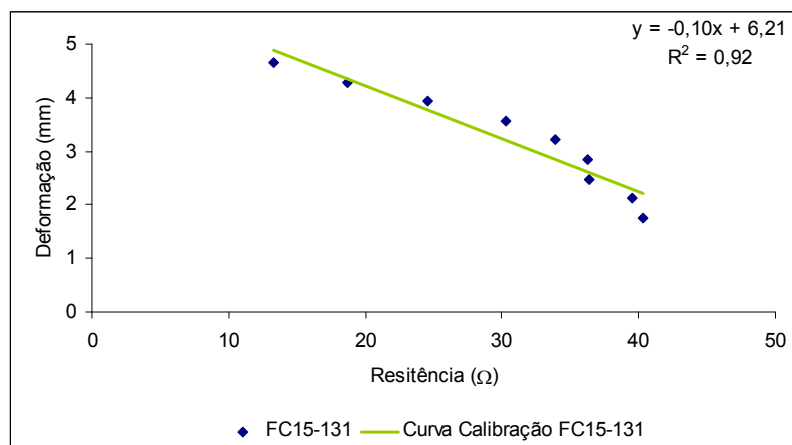


Figura 86 – Curva de calibração do sensor FC15-131

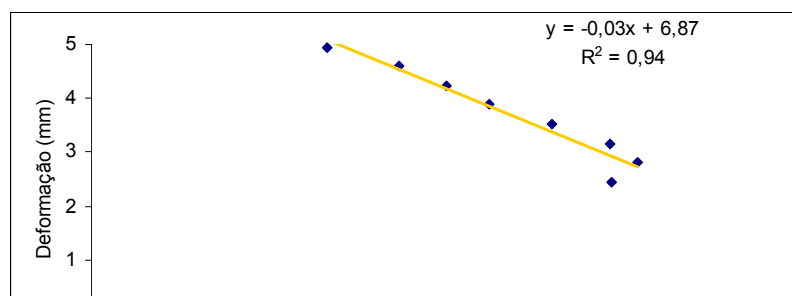


Figura 87 – Curva de calibração do sensor FC15-132

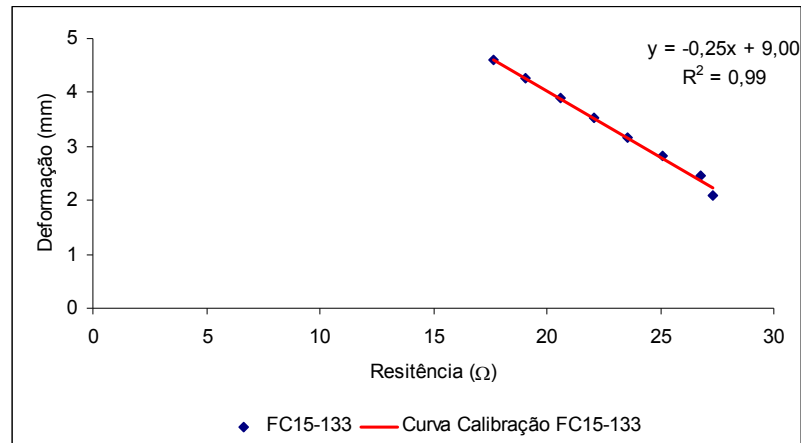


Figura 88 – Curva de calibração do sensor FC15-133

4.8.2 Sensores com fibras de carbono do tipo FC03

FC03-40

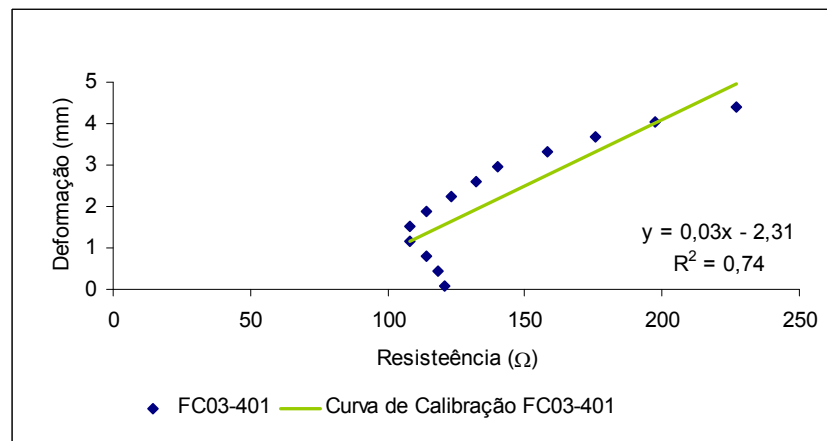


Figura 89 – Curva de calibração do sensor FC03-401

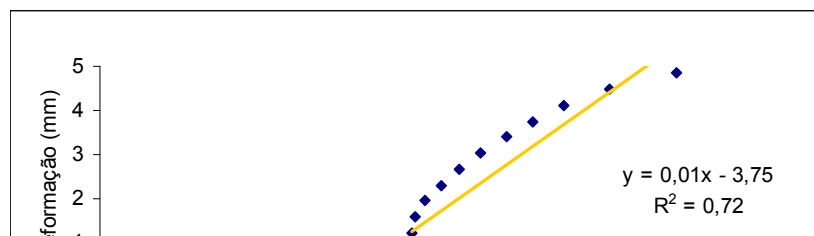


Figura 90 – Curva de calibração do sensor FC03-402

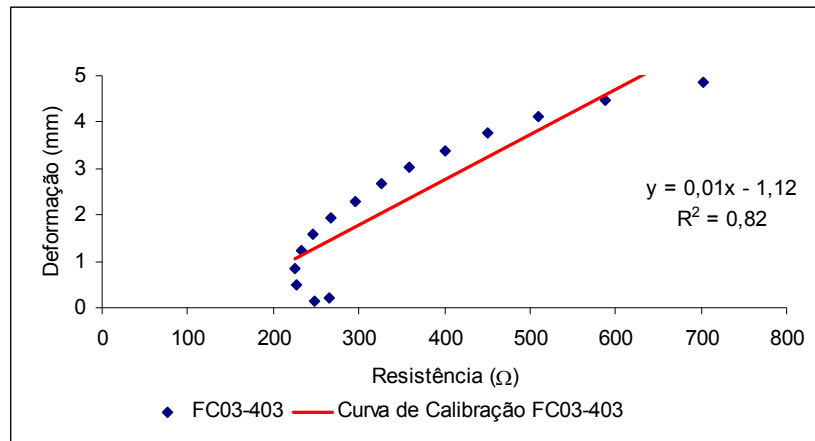


Figura 91 – Curva de calibração do sensor FC03-403

FC03-50

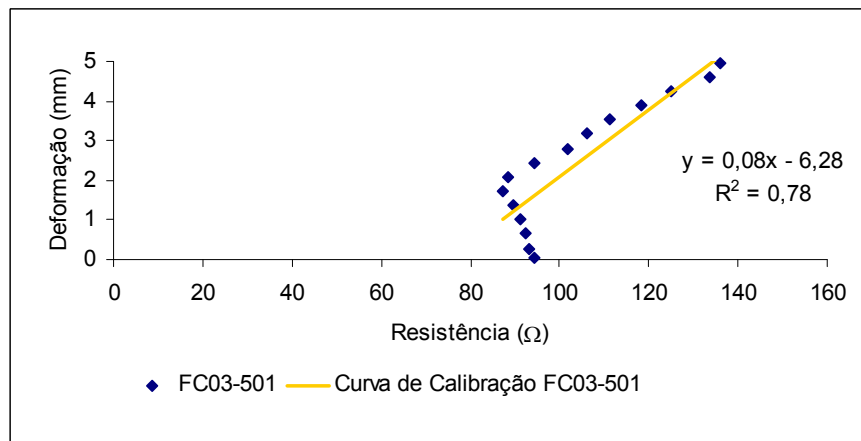


Figura 92 – Curvas de calibração dos sensores FC03-501

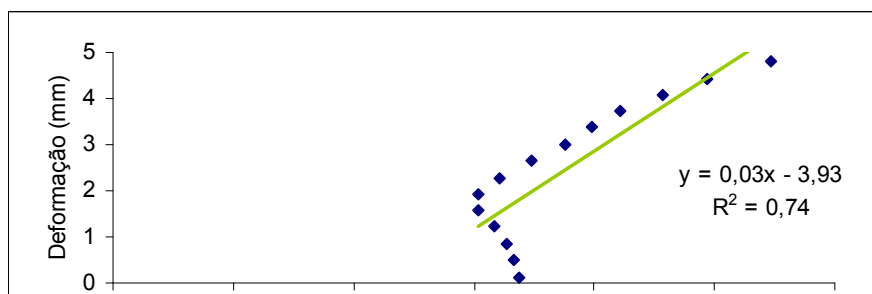


Figura 93 – Curvas de calibração dos sensores FC03-502

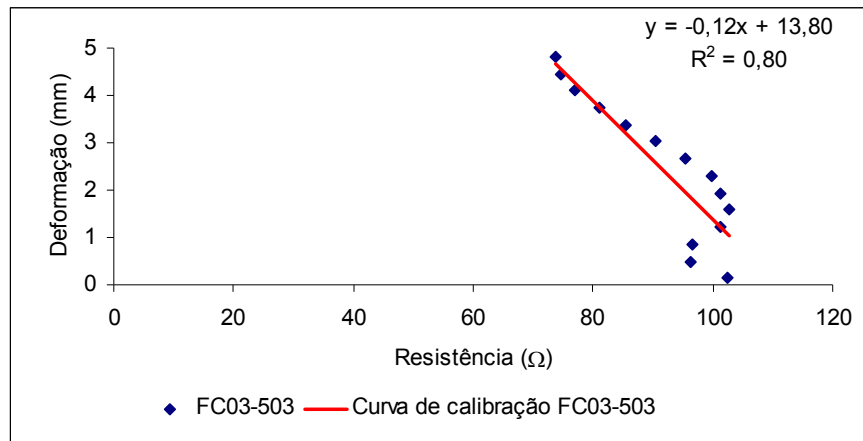


Figura 94 – Curvas de calibração dos sensores FC03-503

4.9 *Análise de Resultados*

Os trabalhos desenvolvidos sobre compósitos com incorporação de fibras de carbono com propriedades piezoresistivas, estudaram apenas o seu comportamento em condições de carga ou descarga sem que considerar patamares de carregamento (ou deformação), nestas condições, os resultados aqui obtidos estão de acordo com trabalhos já desenvolvidos na área como é o caso de Gonzalez [29], Farhad Reza et al [30] e DDL Chung et all [31].

Os compósitos do tipo FC15 com teores de carbono em peso de 5% 10% e 13% mostraram comportarem-se como sensores piezoresistivos de deslocamento com as sensibilidades a variarem entre $8.46 \Omega^{-1}$ para o compósito com 5% de fibras de carbono e os $71.61 \Omega^{-1}$ para o compósito com 13% de fibras.

O mesmo se verificou para os compósitos do tipo FC03 com teores de carbono em peso de 40% e 50%. Para estes, as sensibilidades variaram entre $1.85 \Omega^{-1}$ e os $38.54 \Omega^{-1}$ para os compósitos com 50% e 40% de fibras de carbono respectivamente.

No que concerne à avaliação do relaxamento de tensões, verificou-se que os compósitos que apresentaram menores valores de desempenho foram os do tipo FC15-10 e assim como do tipo FC03-50 em que os valores obtidos para 1mm de deformação foram de 21% e 31% respectivamente. Para 2mm de deformação de os compósitos que apresentaram menores valores de desempenho foram os do tipo FC15-13 e assim como do tipo FC03-50 em que os valores obtidos foram de 27% e 47% respectivamente. Observou-se igualmente que o desempenho aumentou em todos os sensores sempre que a deformação de ensaio também aumentava.

4.10 Avaliação dos sensores “in situ”

Após se terem realizados os ensaios laboratoriais aos sensores. Pretendia-se agora estudar a sua aplicabilidade prática em condições reais de obra.



Figura 95 – aspecto final do sensor a colocar em obra

Para se poder melhor testar este tipo de sensores o mais adequado seria testa-los em edifícios com vários pisos, contudo e dado que não foi possível encontrar construções de tal envergadura em tempo útil, estes foram colocados no solo de fundação das sapatas de uma habitação unifamiliar com 2 andares e numa escola básica do primeiro ciclo (piso térreo) no concelho de braga, para avaliar os possíveis assentamentos das sapatas durante a fase de construção.



Figura 96 – As fases de construção

A fase crítica para o sensor é portanto, durante a fase de betonagem dos elementos em betão armado. Após se ter retirado as cofragens torna-se mais fácil a sua protecção, não só porque já se encontra enterrado no solo, mas também porque é possível sinalizar adequadamente o fio condutor de forma a que os trabalhadores na obra possam ter algumas precauções sempre que se encontram a trabalhar nas imediações do sensor.

4.10.1 Aplicação dos sensores numa Escola Básica

A totalidade dos resultados obtidos, da colocação dos sensores FC03-40 e FC03-50 em duas sapatas de uma escola básica, pode ser consultada no anexo A e nas figuras 98 e 99.



Figura 97 – Construção da escola

Na tabelaTabela 19, apresenta-se o cronograma temporal das leituras efectuadas em obra e uma breve descrição do estado de construção do prédio à altura da medição.

Tabela 19 – Cronograma temporal da construção da Escola

Data	Descrição
05-09-2006	Colocação dos sensores
06-09-2006	Sapatas e lintéis betonados
16-09-2006	Preparação para a betonagem do pavimento térreo e pilares
27-09-2006	Pavimento térreo betonado + pilares
30-10-2006	Arranjos da envolvente exterior
09-11-2006	Laje da cobertura betonada
17-11-2006	Paredes interiores e exteriores prontas

Os valores iniciais da resistência eléctrica em cada um dos sensores do tipo FC03-40, após a sua colocação no solo de fundação, foram de 123.70 Ω , 432.40 Ω e 290.60 Ω para os sensores FC03-401, FC03-402 e FC03-403, as quais corresponderam, recorrendo às curvas de calibração apresentadas anteriormente, a deformações de 1.45mm, 1.68mm e 1.55mm respectivamente.

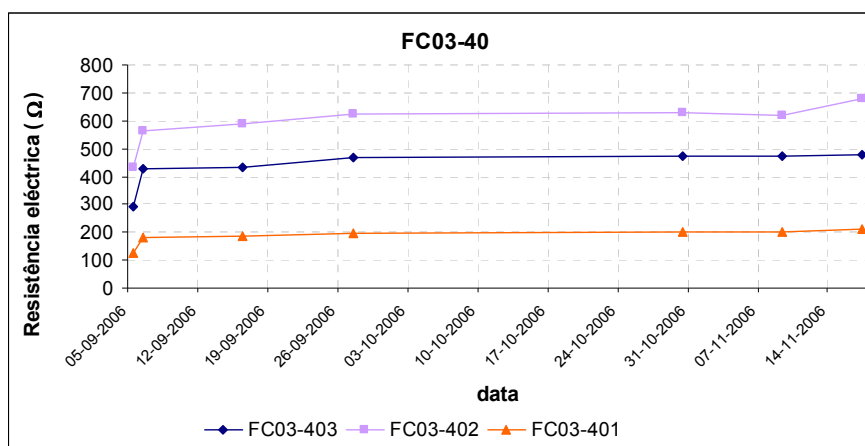


Figura 98 – evolução da resistência eléctrica com a construção do edifício

Os valores iniciais da resistência eléctrica em cada um dos sensores do tipo FC03-50, após a sua colocação no solo de fundação, foram de 87,30 Ω , 187.10 Ω e 99.70 Ω para os sensores FC03-501, FC03-502 e FC03-503, as quais corresponderam, recorrendo às curvas de calibração apresentadas anteriormente, a deformações de 0.91mm, 2.02mm e 2.20mm respectivamente.

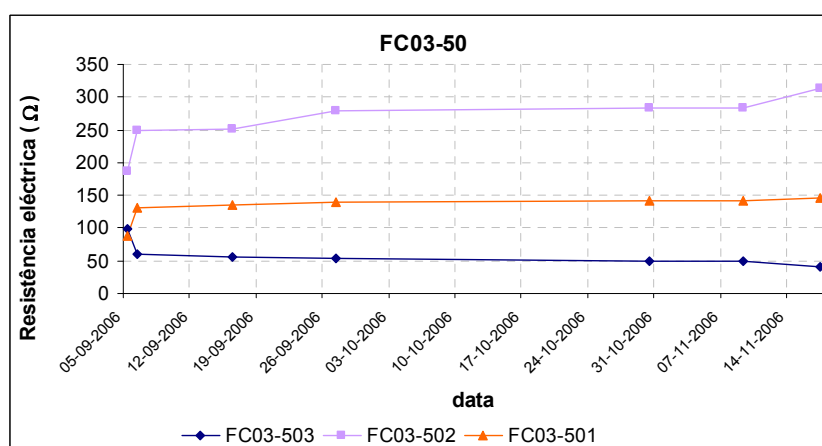


Figura 99 – evolução da resistência eléctrica com a construção do edifício

Através das figuras 98 e 99 observa-se que todos os sensores reagiram ao carregamento inicial com a colocação do betão para as sapatas. A partir dessa data a variação foi bastante menor até a conclusão das alvenarias em que a variação mais significativa correspondeu à betonagem da laje de cobertura, que como facilmente se entende, corresponde a um incremento substancial na carga aplicada nas sapatas monitorizadas.

4.10.2 Aplicação dos sensores numa Moradia Unifamiliar

A totalidade dos resultados obtidos, da colocação dos sensores FC15-5, FC15-10 e FC15-13 em três sapatas de uma moradia unifamiliar, pode ser consultada no anexo A e nas figuras 101 e 102.



Figura 100 – Construção da moradia unifamiliar

Na Tabela 20, apresenta-se o cronograma temporal das leituras efectuadas em obra e uma breve descrição do estado de construção do prédio à altura da medição.

Tabela 20 – Evolução da construção da habitação

Data	Descrição – elementos construídos
28-09-2006	Colocação dos sensores
06-10-2006	Sapatas betonadas + 1m de parede resistente em betão armado
10-10-2006	Sem alterações
12-10-2006	Parede resistente em betão armado com 2m
24-10-2006	Laje de piso betonada + pilares
30-10-2006	Laje de cobertura betonada
02-11-2006	Sem alterações
11-12-2006	Paredes interiores e exteriores prontas

Os valores iniciais da resistência eléctrica em cada um dos sensores do tipo FC15-5, após a sua colocação no solo de fundação, foram de 139,0 Ω , 128,0 Ω e 116,1 Ω . A estes valores corresponderam, e recorrendo às curvas de calibração apresentadas anteriormente, a deformações 2.91mm, 3.22mm e 3.76mm respectivamente.

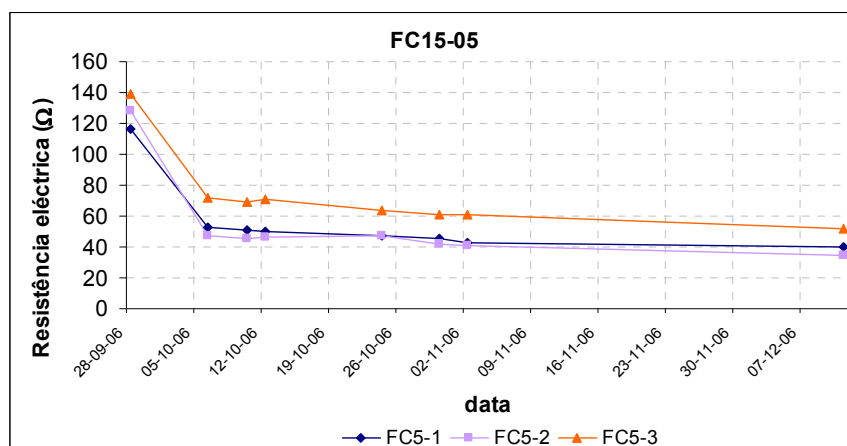


Figura 101 – Resultados do ensaio in situ dos sensores do tipo FC15-5

Os valores iniciais da resistência eléctrica em cada um dos sensores do tipo FC15-10, após a sua colocação no solo de fundação, foram de 61,7 Ω , 90,6 Ω e 117,6 Ω . A partir das curvas de calibração apresentadas anteriormente, os valores respectivos da deformação foram de 3.39mm, 2.76mm e 2.96mm.

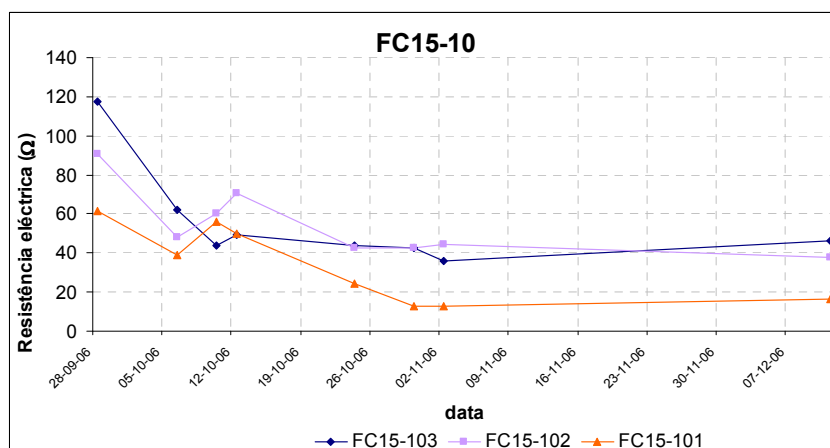


Figura 102 – Resultados do ensaio in situ dos sensores do tipo FC15-10

Os valores iniciais da resistência eléctrica em cada um dos sensores do tipo FC15-13, após a sua colocação no solo de fundação, foram de 11,3 Ω , 69,2 Ω e 8,8 Ω . A partir das curvas de calibração apresentadas anteriormente, os valores respectivos da deformação foram de 5.15mm, 4,81mm e 6.30mm.

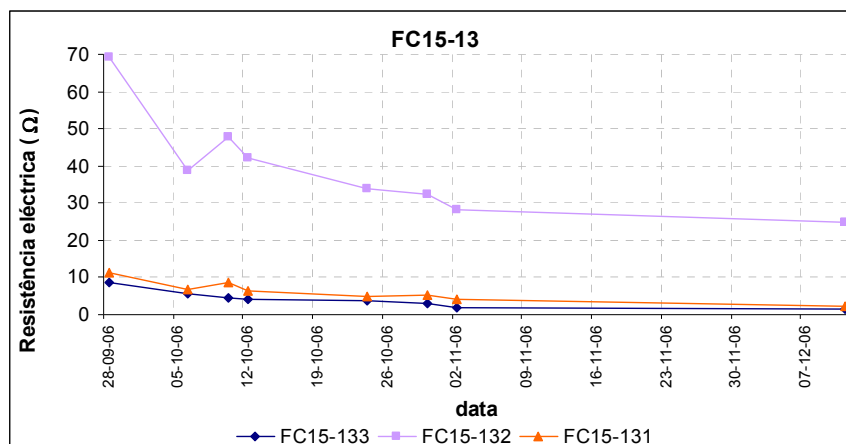


Figura 103 – Resultados do ensaio in situ dos sensores do tipo FC15-13

Como já foi observado na escola básica, observa-se aqui que a maior reacção foi a relativa ao carregamento inicial com a colocação do betão para as sapatas (fig.102 e 103). Como já seria de esperar as variações mais significativas subsequentes correspondes aos momentos após a betonagem da laje de piso e da laje de cobertura, embora as variações em questão sejam bastante menores a variação inicialmente observada.

Os sensores do tipo FC15-10 e FC15-13, apresentaram alguma instabilidade nas leituras ao longo do tempo com oscilações no sentido crescente, aparentando uma possível descarga. Dado que na data em questão encontrava-se em fase de construção das paredes resistentes em betão armado é possível que tenha ocorrido um reajuste das cargas distribuídas por cada sapata.

4.10.3 Análise de Resultados

Constatou-se na sua aplicação que o facto do sensor ter um fio condutor ligado apresenta-se como uma desvantagem, uma vez que, com todo o movimento da obra, a probabilidade do fio romper e inutilizar por completo o sensor é bastante elevada.

Os ensaios in situ serviram para comprovar a aplicabilidade práticas deste tipo de sensores em condições de reais de obra. Verificou-se em todos os sensores que a colocação do betão inicial das sapatas produzir a maior variação observada ao longo da construção da totalidade da obra. De um modo geral todos os sensores apresentaram variações semelhantes quando solicitados com um carregamento adicional.

4.11 Conclusões

Para cada um dos compósitos a variação de valores observada consiste, provavelmente, numa tendência das fibras de carbono para alterarem o grau de rectidão em cada ciclo de carregamento. Este efeito é contrário e ocorre em simultâneo com a piezoresistividade, que é o mecanismo dominante da sensibilidade do sensor. Ao fim de 10 ciclos de carregamento os valores da resistência eléctrica estabilizam. Este efeito deve-se ao facto de o sensor apresentar uma deformação residual devido a junção filamento-filamento à medida que os ciclos de carregamento se sucedem.

Contudo, este trabalho demonstrou que sempre que se aplica uma deformação constante a este tipo de compósitos a sua condutividade apresenta uma variabilidade de valores que não podem ser negligenciados nas medições efectuadas.

Devido a este efeito observado, este tipo de sensores não é indicado para situações em que existem uma alternância da sua deformação em intervalos relativamente curtos. É preferível situações em que a sua deformação se mantém constante durante longos períodos de tempo como será o caso da monitorização de fundações ou então situações em que a deformação apresente variações sucessivas sem a possibilidade da existência de patamares de deformação constante alternados com frequências de deformação rápidas.

No que concerne ao ensaio *in situ*, a partir da colocação do betão inicial nas sapatas, a variação foi bastante menor até a conclusão das alvenarias. Numa primeira análise, seria de esperar variações semelhantes à medida que o carregamento na sapata aumentava, nomeadamente após a betonagem da laje de cobertura. O facto de isso não se verificar tem a ver com a acção solo-sapata. O processo de escavação dos caboucos para a colocação das sapatas fez com que se tenha alterado o índice de compacidade do solo tornando-o mais deformável, de tal modo que, as deformações do primeiro carregamento correspondente, originaram uma deformação maior. Como é evidente, o assentamento maior é o inicial seguido por assentamentos menores devido ao incremento das cargas na sapata.

5 Placas de Aquecimento

Quinto Capítulo

5.1 Introdução

O conforto térmico do interior dos edifícios passa muitas vezes pela instalação de sistemas de aquecimento que permitam aos seus ocupantes habitar num dado compartimento sem sensação de desconforto. Uma das soluções de aquecimento no interior das habitações é o pavimento térmico radiante, o qual apresenta a grande vantagem de não ter recirculação de ar devido a variações de temperatura dentro de um dado compartimento de onde resulta uma temperatura mais uniforme.

O pavimento radiante eléctrico é constituído por um cabo térmico constituído por dois fios condutores em que um consiste numa resistência em aço inoxidável ou em bronze. O outro consiste num fio de cobre, e serve de ligação fria.

Dado que as fibras de carbono são condutoras considera-se útil avaliar a sua utilização como elementos em substituição das fibras metálicas nos pavimentos radiantes e avaliar o seu desempenho térmico.

Actualmente as soluções que se encontram disponíveis para comercialização no mercado requerem que estejam ligados ao sistema eléctrico da casa, ou seja, a 220Volt de tensão e possuem um consumo médio de 19W/m.

Em condições normais de funcionamento, a temperatura que estes sistemas atingem, à superfície do cabo aquecedor, situa-se dentro do intervalo de 30 a 38°C, o que equivale dizer que à superfície do pavimento estará uma temperatura média de 24°C, salvo má concepção do piso.

De modo a estudar os fios de carbono como alternativa de aquecimento aos fios metálicos utilizados actualmente, construíram-se placas em que se embebeu um fio de carbono no seu interior, que após o tempo de cura da placa, foram ensaiadas e registados os valores de temperatura superficial.

5.2 Construção

De modo a efectuar um estudo preliminar sobre os fios de carbono enquanto elementos de aquecimento, recorreu-se a um termoplástico do tipo “PES”. A utilização inicial deste material deve-se ao facto de este ser translúcido, e como tal permitiu visualizar com nitidez o percurso descrito do fio de carbono inserido (fig.104).



Figura 104 – Elemento polimérico reforçado com fibras contínuas de carbono

Foram moldadas quatro placas quadradas com 200mm de aresta e 12mm de espessura, nas quais foi embebido um fio de carbono com 885 mm de comprimento.

Foram igualmente construídas placas, à semelhança das anteriores, mas em gesso estuque. A razão da escolha deste material prende-se com o facto de apresentar actualmente em franco crescimento a sua utilização na construção civil, nomeadamente em acabamentos finais de paredes e tectos. Foram moldadas três placas quadradas com 200mm de aresta e 23mm de espessura. A moldagem foi realizada em duas fases de modo a garantir a localização do fio de carbono exactamente a meio da espessura da placa.

As nomenclaturas utilizadas para as placas de aquecimento a ensaio foram as seguintes:

- PCL – Placa de aquecimento moldada num termoplástico do tipo “PES”.
- GET – Placa de aquecimento moldada em gesso estuque.

5.3 Ensaio Experimental

Para se poder caracterizar o desempenho das fibras de carbono no aquecimento de pavimentos, utilizou-se as placas poliméricas reforçadas com fio de carbono.

De modo a avaliar o desempenho das placas de aquecimento, estas foram instrumentadas com cinco termopares, numerados de 1 a 5 na figura 105, colados à superfície da placa um em cada canto a 25mm de distância de cada lado e um termopar colocado no centro geométrico da placa.

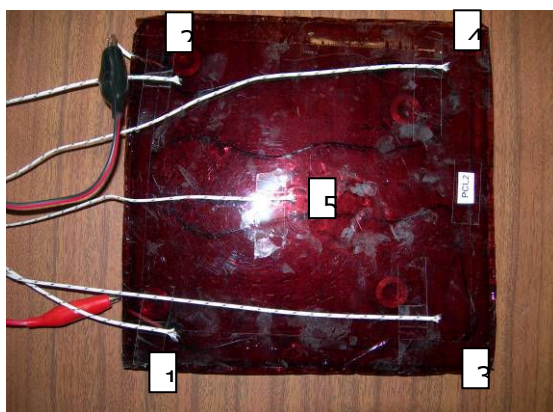


Figura 105 – Esquema de colocação dos termopares

A leitura das temperaturas de cada um dos termopares foi levada a cabo por um sistema de aquisição de dados da Agilent modelo 3970A (fig.106a). Os valores da resistência eléctrica, tensão e corrente foram efectuados com um multímetro de marca Fluke modelo 189 (fig.106b).

A alimentação do elemento condutor de carbono foi feita por um transformador de corrente AC-DC de marca Idec Izumi modelo PSR-S30 (fig.106c).



(a)



(b)



(c)

Figura 106 – equipamentos utilizados para efectuar as leituras

A execução experimental consistiu na realização de um conjunto de ensaios efectuados sobre a totalidade das amostras de modo a obter as curvas de temperatura superficial em função do tempo.

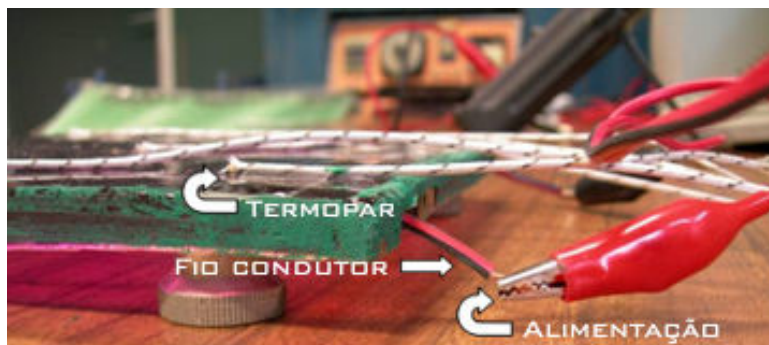


Figura 107 – Pormenor dos contactos dos sensores para aplicação da tensão

Após a finalização da montagem dos sistemas de monitorização e de alimentação (fig.107), com a colocação dos termopares em contacto com a superfície da placa, foi aplicada uma diferença de potencial nas pontas do elemento condutor de carbono dando início ao ensaio.

De modo a poder caracterizar a placas de aquecimento é necessário conhecer o seu desempenho térmico e os seus consumos energéticos. Para isso registaram-se os valores da RE de cada uma das placas, assim como a tensão de saída do transformador de corrente. O passo seguinte consistiu em calcular a intensidade de corrente através da lei de Ohm:

$$U = R \times I \quad (\text{eq. 9})$$

U é a tensão de alimentação das placas em Volt, R a sua resistência eléctrica em Ohm e I a intensidade de corrente em Ampere.

A partir do conhecimento destas variáveis, foi possível então calcular o consumo em Watt das placas de aquecimento a partir da potência, P, dada através da seguinte relação:

$$P = R \times I^2 \quad (\text{eq. 10})$$

A título de exemplo vamos considerar os valores obtidos para a placa PCL1 em que a tensão de alimentação foi de 23,9V e a resistência eléctrica do elemento de carbono condutor nela inserido de 87.2Ω. Para este caso, e através da eq.1, o valor da intensidade de corrente eléctrica é de 0.29A. A potência da placa e a partir da eq.2 é de 7.3W.

Os resultados obtidos das placas de aquecimento ensaiadas são apresentados de seguida.

5.3.1 Placas de PCL

Como se pode observar a partir da tabela 2, a resistência eléctrica do elemento condutor de carbono variou entre $87,2\Omega$ para a placa PCL1 e os $43,0\Omega$ para a placa PCL4.

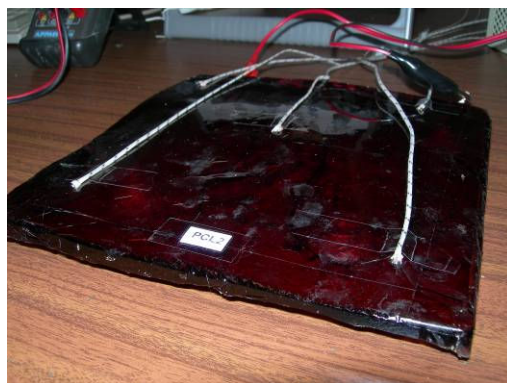


Figura 108 – Placa de aquecimento PCL2

Como seria de esperar, à medida que diminui a resistência eléctrica do fio condutor, aumenta a sua potência e consequentemente existe um aumento da temperatura máxima verificada na superfície da placa em estudo.

Tabela 21 – Temperaturas registadas para as placas de PCL

Amostra	Tensão (V)	I (A)	R (Ω)	P (W)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		Δ
					média	ambiente	
PCL1	23,9	0,29	87,2	7,3	28,65	20,1	8,9
PCL2	23,9	0,35	71,5	8,8	32,8	20,6	13,7
PCL3	23,9	0,45	55,5	11,2	35,6	20,0	19,5
PCL4	23,9	0,58	43,0	14,5	38,1	19,6	20,3

Ao fim de 1h de ensaio, as temperaturas máximas obtidas para as placas em estudo foram as seguintes:

- $34,43^{\circ}\text{C}$ no termopar nº3 para a placa PCL1;
- $40,89^{\circ}\text{C}$ no termopar nº4 para a placa PCL2;
- $44,32^{\circ}\text{C}$ no termopar nº1 para a placa PCL3;
- $52,43^{\circ}\text{C}$ no termopar nº2 para a placa PCL4;

As temperaturas médias obtidas encontram-se representadas na tabela 22, e representam a média das temperaturas obtidas dos cinco termopares.

Ao fim de uma hora de ensaio, e para uma temperatura ambiente média de 20,1°C observaram-se aumentos nos valores da temperatura que variaram inversamente com a resistência eléctrica das fibras de carbono, situando-se entre os 8,9°C e os 20,3°C de mínimo e máximo obtidos respectivamente (valores médios) nas placas.

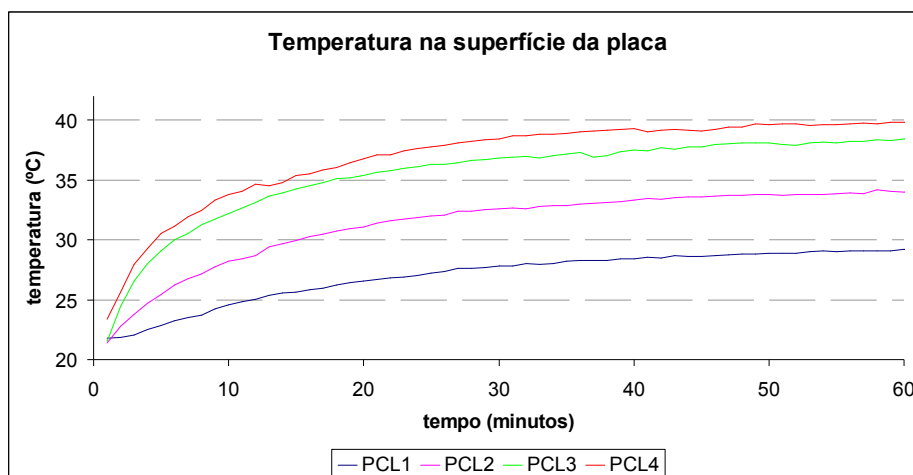


Figura 109 – evolução da temperatura nas placas do tipo PCL

Observou-se ainda que as placas precisavam de apenas uma hora para atingirem a sua temperatura máxima (fig.109) e ao fim de 20 minutos já tinham atingido cerca de 70% da temperatura máxima.

5.3.2 Placas de Gesso Estuque

Para a realização do ensaio, utilizando o gesso estuque como material base de suporte, moldaram-se três placas do tipo GET de acordo com o indicado no ponto 5.3.

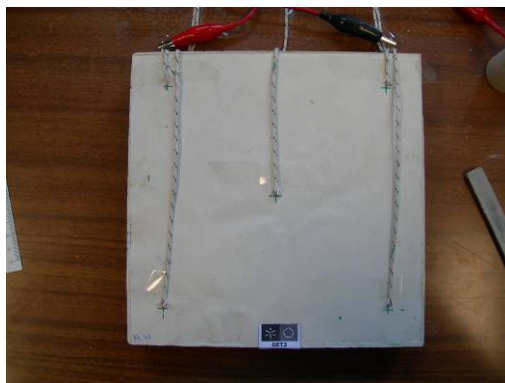


Figura 110 – Placa de aquecimento GET2

Para estas placas, e uma vez que o gesso estuque apresenta uma inércia térmica mais elevada, e associado ao facto de este ter água intersticial, decidiu-se aplicar elementos de carbono com resistências mais baixas de modo a se poder ter maior capacidade de aquecimento. Como se pode observar a partir da tabela 23, a resistência eléctrica do elemento condutor de carbono variou entre $43,3\Omega$ para a placa GET1 e $20,5\Omega$ para a placa GET3.

Tabela 22 – Valores obtidos para as placas de GET

Amostra	Tensão (V)	I (A)	R (Ω)	P (W)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		Δ
					média	ambiente	
GET1	24,1	0,6	43,3	14,1	36,8	21,6	15,1
GET2	23,9	0,7	33,9	17,4	37,1	21,4	15,7
GET3	23,9	1,2	20,5	29,7	49,8	22,4	27,4

As temperaturas máximas obtidas para as placas em estudo foram as seguintes:

- $42,96^{\circ}\text{C}$ para a placa GET1;
- $41,49^{\circ}\text{C}$ para a placa GET2;
- $56,56^{\circ}\text{C}$ para a placa GET3;

As temperaturas médias obtidas encontram-se representadas na tabela 23, e representam a média das temperaturas no conjunto dos cinco termopares.

Ao fim de uma hora de ensaio, e para uma temperatura ambiente média de 22,1°C observaram-se aumentos nos valores da temperatura que variaram inversamente ao aumento da resistência eléctrica, situando-se entre os 15,1°C e os 27,4°C de mínimo e máximo obtidos respectivamente (valores médios).

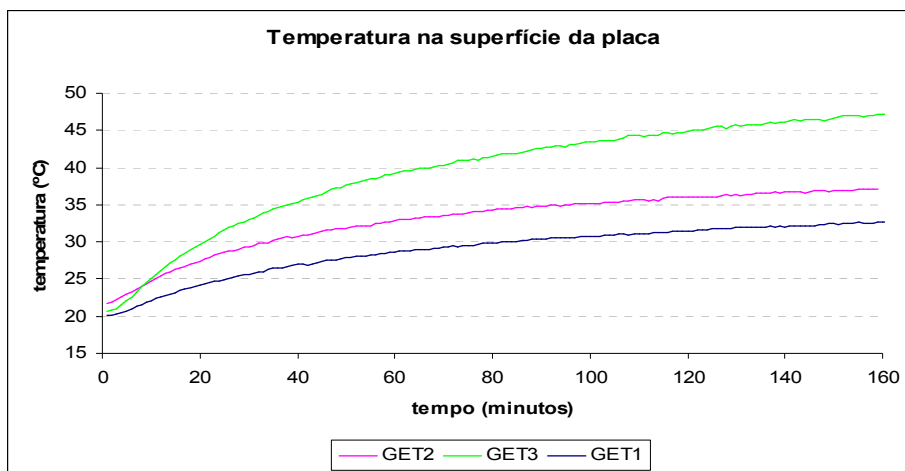


Figura 111 – evolução da temperatura nas placas do tipo GET

Observou-se ainda que as placas precisam de 2h30min para que seja atingida temperatura máxima (fig.111). As placas GET2 e GET3 ao fim de 30 minutos já tinham atingido cerca de 70% da temperatura máxima enquanto a placa GET1 atingiu o mesmo nível de temperatura só ao fim de 1 hora.

5.4 *Análise de Resultados*

Os sistemas comercialmente disponíveis funcionam dentro da gama de temperaturas de 30 a 38°C à superfície do elemento aquecedor e consomem cerca de 19W/m para uma tensão de 220Volt. Comparativamente á tecnologia aqui estudada, as placas que mais se aproximam dos valores de temperatura dos sistemas comerciais são as placas PCL2 e GET1.

A placa PCL2 apresentou uma temperatura média de 32.8°C e máxima de 40.9°C à superfície com um consumo de 10.35W/m o que corresponde a apenas 54,5% da potencia necessária para atingir a mesma gama de temperaturas quando comparado com um sistema comercial.

No caso das placas de gesso a que mais se aproxima das comerciais é a GET1, e apresenta uma temperatura média de 36.8°C e máxima de 43.0°C, produzida por uma potência de 16.6W/m. Neste caso o ganho em consumo eléctrico é mais baixo, menos 12,7% quando comparado com a média dos cabos comerciais, contudo esta placa apresenta uma temperatura 5°C acima do máximo obtido nos sistemas comerciais.

De referir que estas temperaturas foram obtidas não na superfície do elemento aquecedor mas na superfície da placa, o que significa que para se poder ter temperaturas típicas de 24°C num pavimento radiante pode-se produzir elementos com um consumo mais baixo, quer fazendo variar a tensão da corrente ou a resistência eléctrica do elemento.

No que concerne à potência do elemento aquecedor, esta pode ser facilmente ajustada às necessidades bastando para isso acrescentar ou diminuir fios de carbono, ou mesmo adoptar ligações do tipo em série ou em paralelo como aliás é usualmente feito para outros sistemas comercialmente disponíveis.

5.5 Conclusões

Foram fabricadas placas para piso radiante com polímero e gesso reforçados com fibras de carbono a fim de se estudar a possibilidade de poderem ser usadas como elementos para aquecimento de pavimento.

É possível utilizar o fio de carbono na construção de placas de polímero e gesso para serem usadas como elementos de aquecimento no interior das habitações.

A tensão usada foi de 24 Volt em corrente contínua, a fim de se poder ligar directamente a sistemas de produção de energia eléctrica como painéis fotovoltaicos e mini-eólicas, disponível para pequenos consumidores.

Actualmente, uma das grandes desvantagens deste tipo de sistemas, consiste no facto de produzirem corrente continua a uma tensão de 24Volt, o que para esta poder ser introduzida no circuito eléctrico de uma habitação, tem que obrigatoriamente possuir um conversor de tensão DC-AC, conversor esse dispendioso e que, por si só, também consome energia. O facto de o sistema aqui estudado funcionar à mesma tensão que os sistemas fotovoltaicos, permitem a ligação directa ao seu circuito eléctrico, não sendo necessário a utilização de um conversor de tensão.

Comparativamente aos sistemas de aquecimento comercialmente disponíveis, a placas aqui estudadas apresentam menores consumos, o que faz desta tecnologia uma opção que no futuro será certamente comercialmente mais apelativa.

De referir ainda, e em trabalhos futuros, deverá ser levado a cabo um conjunto de ensaios a placas com fio de carbono e a placas com os sistemas comerciais de forma a se poder quantificar mais objectivamente o desempenho das mesmas.

6 Conclusões Gerais

Sexto Capítulo

Nos dias de hoje a indústria da construção é confrontada com uma necessidade e preocupação cada vez maiores de os edifícios obedecerem a uma filosofia de desenvolvimento sustentável, só conseguido através de aplicação de novos materiais eco-eficientes e de soluções tecnológicas que permitam prolongar a durabilidade e ao mesmo tempo que minimizem a manutenção das estruturas construídas, de forma a se conseguir não só dar resposta às exigências actuais mas também tendo em conta as preocupações no futuro.

O crescente desenvolvimento e aplicação de novos materiais nas últimas décadas permitiram melhorar a qualidade de vida para o ser humano e consequentemente a sociedade em que está inserido. As fibras de carbono têm merecido uma atenção especial devido às suas características particulares, as quais se destacam a sua baixa densidade associada a uma elevada resistência mecânica assim com as suas propriedades eléctricas.

Este trabalho apresentou um estudo sobre as propriedades eléctricas e piezoelectricas das fibras de carbono. Estudou-se a aplicação de uma nova base de suporte, o silicone, para o fabrico de um compósito com incorporação de fibras de carbono com vista a avaliar as suas propriedades piezoresistivas na qualidade de poder funcionar como sensor.

De modo a se poder avaliar adequadamente a capacidade sensitiva de cada um dos sensores, realizaram-se ensaios cíclicos e estáticos de deformação. O primeiro, visou o estudo da reversibilidade dos valores lidos assim como a extracção das curvas de calibração que permitam efectuar uma relação com a deformação que se encontra aplicada no sensor. Já o ensaio em condições estáticas permitiu avaliar a evolução das leituras em condições de deformação constante e assim verificar a sua estabilidade ao longo do tempo. O estudo ficou concluído com a avaliação da sua aplicabilidade prática em que se sujeitou os sensores às condições reais de obra, onde foram colocados nos solos das fundações das estruturas a construir, devidamente escolhidas para o efeito.

Após a realização deste trabalho pode concluir-se que a fibras de carbono podem ser utilizadas no fabrico de compósitos que apresentem capacidade de funcionarem como sensores, contudo deverá ter-se em conta o efeito da temperatura na condutividade dos sensores, uma vez que se demonstrou que existe um aumento da RE com o aumento da temperatura.

Estudou-se igualmente as propriedades termoelétricas das fibras de carbono quando incorporadas num material base de suporte com a finalidade de este poder actuar como um elemento capaz de produzir radiação térmica quando sujeito a uma corrente eléctrica. Foram desenvolvidas placas com incorporação de fibras de carbono em diferentes quantidades, que simularam um pavimento radiante. Estas placas serviram para quantificar o consumo energético e efectuar uma comparação quantitativa das placas desenvolvidas neste trabalho com as placas comercialmente disponíveis no mercado.

Campos de investigação no futuro

Os estudos apresentados neste trabalho devem ser continuados de modo a se poder viabilizar a utilização generalizada e comercialização dos produtos considerados. Deste modo parece necessário:

- Estudar a possibilidade do fabrico industrial dos sensores;
- Optimizar o tipo de polímero, quantidade de fibras usadas bem como as dimensões do sensor de modo a reduzir as variações de leituras em situações de carga/descarga e de relaxamento de tensões;
- Aplicação de fios de carbono no desenvolvimento de pavimentos radiantes num projecto-piloto para demonstrar a sua aplicabilidade prática.

7 Referências Bibliográficas

Sétimo Capítulo

- [1] Donnet, J. B.; Ehrburger, P.; Carbon 1977, 15, 143; Fourdeux, A.; Herinckx, C.; Perret R. and Ruland W.; Compt. Rendus Acad. Sci. 1969, 269C, 1597; Johnson, D. J. and Tyson, C. N.; Br. J. Appl. Phys. (J. Phys. D) 1969, 2, 789.
- [2] Edmonds, T. E.; Anal. Chim. Acta 1985, 175.
- [3] Tang, M. M.; Bacon, R.; Carbon 1964, 2, 221.
- [4] Savage, G.; Carbon-Carbon Composite, Chapman & Hall, London 1992.
- [5] Ishitani, A.; Carbon 1981, 19, 269.
- [6] Dayton, M. A.; Brown, J. C.; Stutts, K. J.; Wightman, R. M.; Anal. Chem. 1980, 52, 946.
- [7] Csöregi, E.; Gorton, L.; Marko-Varga, G.; Anal. Chim. Acta 1993, 273, 59.
- [8] Biniak, S.; Dzielendziak, B.; Siedlewski, J.; Carbon 1995, 33, 1255.
- [9] J. Piaget, language and Learning (1980) Routledge, Kegan, Paul.
- [10] Kell, Intelligent buildings now, Electrotechnology, October/November (1996), 26-27.
- [11] M. Wigginton, J. Harris, Intelligent Skin, Architectural Press, Oxford, UK, 2002.
- [12] W.M. Kroner, An intelligent and responsive architecture, Automation in Construction 6 (1997) 381–393.
- [13] T.D.J. Clements-Croome, What do we mean by intelligent buildings? Automation in Construction 6 (1997) 395– 399.
- [14] A.T.P. So, A.C.W. Wong, K.C. Wong, A new definition of intelligent buildings for Asia, The Intelligent Building Index Manual, 2nd edition, Asian Institute of Intelligent Buildings, Hong Kong, 2001 (October), pp. 1 – 20.
- [15] L. Chow, Preface, The Intelligent Building Index 10: Health and Sanitation, 3rd edition, Asian Institute of Intelligent Buildings, Hong Kong, 2004, pp. 1– 3.
- [16] Kohler, N. (1999) The relevance of Green Building Challenge: an observer's perspective, Building Research and Information, 27(4/5) 309-320.
- [17] Hartkopf V, et al. An integrated approach to design and engineering of intelligent buildings – the Intelligent Workplace at Carnegie Mellon University Automation in construction 1997; 6(5/6):401-15.
- [18] Hartkopf V, Loftness V. Global relevance of total building performance. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Applications of Performance Concept in Buildings, Tel-Aviv, 1996.
- [19] Kell A. Intelligent building now. Electro-technology, October/November 1996; 26-27.
- [20] Myers C. Intelligent building requires a smart pitch. Facilities design and management, September, 1997; 52±55.

- [21] Chatelet, A., P. Fernandez, et al. (1998). Architecture climatique. Aix-en-Provence, Edisud
- [22] Claude-Alain Roulet. « Role of ventilation ». LESO-PB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH 1015 Lausanne, Switzerland
- [23] Piedade, A. Canha; Rodrigues, A. Moret e Roriz, Luis F.. "Climatização em Edifícios - Envolvente e Comportamento Térmico"; Edições Orion. Amadora, 2000
- [24] Goulding, John; Lewis, Owen; Steemers, Theo. "Energy in Architecture, the European Passive Solar Handbook". B.T. Batsford Limited. Londres, 1992
- [25] Viegas, João Carlos. "Ventilação Natural de Edifícios de Habitação", LNEC, 1ª edição, Lisboa, 1996
- [26] Goulding, John; Lewis, J. Owen; Steemers, Theo C.. "Energy Conscious Design - A primer for architects". B.T. Batsford Limited. Londres, 1992
- [27] DGGE - www.dge.pt, 2005
- [28] Santos, António J. "Desenvolvimento de uma Metodologia de Caracterização das Condições de Iluminação Natural nos Edifícios Baseada na Avaliação "in situ". LNEC/FCUL, Lisboa, 2002. Dissertação de Mestrado
- [29] Gonzalez, José "Betões reforçados com fibras de carbono (CFRC)", Universidade do Minho, Guimarães, 1998. Dissertação de Mestrado
- [30] Farhad Reza et all. "Resistance Changes during Compression of carbon fiber cement composites", journal of Materials in Civil Eng. October 2003. 476-483
- [31] D.D.L Chung "Methods and Sensors for Detecting Strain and Stress" Patent nº6079277
- [32] Sihai Wen, D.D.L.Chung "Uniaxial tension in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions", Journal of Cement and Concrete Research 30 (2000) 1289-1294
- [33] J.F. Lataste et all "Electrical Resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering" Journal of NDT&E International 36 (2003) 383-394
- [34] G. Kister et all "Structural integrity monitoring of reinforced concrete structures. Part 1: evaluation of protection systems for extrinsic fibre Fabry-Perot sensors", journal of Engineering Structures 27 (2005) 411-419
- [35] M Imran et all "Performance updating of concrete bridges using proactive health monitoring methods" journal of Reliability Engineering & System Safety 86 (2004) 247-256
- [36] Xiaoping Shui & D.D.L. Chung "A piezoresistive carbon filament polymer-matrix composite strain sensor" Technical note – Journal of Smart Mater. Struc. 5 (1996) 243-246

- [37] Xiaojun Wang & D.D.L. Chung "Short carbon fiber reinforced epoxy coating as a piezoresistive strain sensor for cement mortar" *journal of sensors and actuators* A71 (1998) 208-212
- [38] Mei Xuan Xu et al "Correlation Change in Electrical Resistance with Strain of Carbon Fiber-Reinforced Plastic in Tension" *Journal of Applied Polymer Science* vol.60 (1996) 1595-1599
- [39] J.K.W. Wong et al "Intelligent building research: a review" *Journal of Automation in construction* 14 (2005) 143-159
- [40] Silva, Bruno "Estruturas Inteligentes Utilizando Betão e polímero reforçado com fibras de carbono", Universidade do Minho 2005, Dissertação de Mestrado
- [41] A.E. Aktan et al "Issues in health monitoring for intelligent infrastructure" *Journal of Smart Materials Structures* 7 (1998) 674-692
- [42] Z.S. Wu et al "Self-Diagnosis of structures strengthened with hybrid carbon-fiber-reinforced polymer sheets" *Journal of Smart Materials Structures* 14 (2005) S39-S51
- [43] Sihai Wen & D.D.L. Chung "Carbon Fiber-reinforced cement as a thermistor" *journal of cement and Concrete Research* 29 (1999) 961-965
- [44] H.W. Kua et al "Demonstration intelligent building – a methodology for the promotion of total sustainability in the built environment" *journal of Building and Environment* 37 (2002) 231-240
- [45] J. Yang et al "Decision support to the application of intelligent building technologies" *journal of Renewable energy* 22 (2001) 67-77
- [46] H. Arkin et al "Evaluating intelligent buildings according to level of service systems integration" *journal of Automation in Construction* 6 (1997) 471-479
- [47] Martinez Alonso "Fibras de Carbono" (1996)
- [48] Pesquisa na Internet:
www.google.com
www.wikipedia.org
- [49] Csoregi E. et al "Carbon Fibres as electrode materials for the constructions of peroxidase modified amperometric biosensors"
- [50] Po Woei, Ph.D. Thesis University of New York at Buffalo, 1994

8.1 Anexo A

Tabela 23 – Valores obtidos no ensaio “*in situ*” na construção da habitação unifamiliar

Data																
	28-09-2006		06-10-2006		10-10-2006		12-10-2006		24-10-2006		30-10-2006		02-11-2006		11-12-2006	
	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)
Sensor																
FC15-51	139,00	2,9148	72,20	4,7050	69,50	4,7774	71,30	4,7292	63,60	4,9355	60,80	5,0106	61,30	4,9972	51,80	5,2518
FC15-101	61,70	3,3948	39,09	4,2360	55,82	3,6136	49,67	3,8421	24,05	4,7952	13,01	5,2062	12,82	5,2130	16,44	5,0783
FC15-131	11,30	5,1512	6,67	5,6673	8,70	5,4407	6,44	5,6925	4,97	5,8561	5,31	5,8184	3,96	5,9694	2,26	6,1582
Carga (N/cm²)	0		3,85		3,85		4,23		5,44		5,96		5,96		8,75	
FC15-52	128,00	3,2240	47,00	5,6135	45,70	5,6519	46,20	5,6371	47,20	5,6076	41,70	5,7699	41,00	5,7905	35,00	5,9675
FC15-102	90,60	2,7592	48,08	4,0219	60,46	3,6544	70,35	3,3607	42,87	4,1767	42,69	4,1820	44,47	4,1292	37,54	4,3350
FC15-132	69,20	4,8100	38,75	5,5712	47,75	5,3463	42,21	5,4847	33,91	5,6923	32,52	5,7269	28,37	5,8307	24,91	5,9172
Carga (N/cm²)	0		3,31		3,31		3,69		7,24		8,28		8,28		10,57	
FC15-51	116,10	3,7619	52,90	5,0891	50,60	5,1374	50,30	5,1437	47,10	5,2109	45,70	5,2403	42,40	5,3096	40,20	5,3558
FC15-103	117,60	2,9604	62,20	4,1238	43,80	4,5102	49,40	4,3926	43,70	4,5123	42,70	4,5333	36,20	4,6698	46,40	4,4556
FC15-133	8,80	6,2987	5,81	6,8466	4,40	7,1044	3,96	7,1849	3,61	7,2494	2,90	7,3783	1,94	7,5555	1,58	7,6200
Carga (N/cm²)	0		3,31		3,31		3,69		6,73		7,46		7,46		7,8	

Tabela 24 – Valores obtidos no ensaio in situ na construção da escola básica

Data																					
05-09-2006		06-09-2006		16-09-2006		27-09-2006		30-10-2006		09-11-2006		17-11-2006									
Sensor	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)	Leitura (Ω)	Def. estimada (mm)							
FC03-401	123,70	1,4466	179,37	3,2000	186,79	3,4338	197,92	3,7845	200,39	3,8624	200,39	3,8624	210,29	4,1741							
FC03-501	87,30	0,9054	130,95	4,6331	134,44	4,9313	140,55	5,4532	141,43	5,5278	141,43	5,5278	146,66	5,9751							
Carga (N/cm²)		0	1,226		1,226		1,606		1,606		2,12		3,755								
FC03-402	432,40	1,6784	562,12	3,7539	588,06	4,1690	622,66	4,7225	626,98	4,7917	618,33	4,6533	678,87	5,6219							
FC03-502	187,10	2,0198	248,84	4,3660	250,71	4,4371	278,78	5,5036	282,52	5,6458	282,52	5,6458	314,33	6,8545							
Carga (N/cm²)		0	1,226		1,226		1,606		1,606		2,12		3,755								
FC03-403	290,60	1,5513	427,18	2,9854	432,99	3,0464	467,87	3,4126	470,77	3,4431	470,77	3,4431	479,49	3,5346							
FC03-503	99,70	2,2119	59,82	5,1191	54,84	5,4825	52,84	5,6279	49,85	5,8459	49,85	5,8459	40,88	6,5001							
Carga (N/cm²)		0	0,821		0,821		1,794		1,794		6,44		11,3								

8.2 Anexo B

Curvas de calibração “*deformação vs resistência eléctrica*” dos sensores estudados
FC15-05

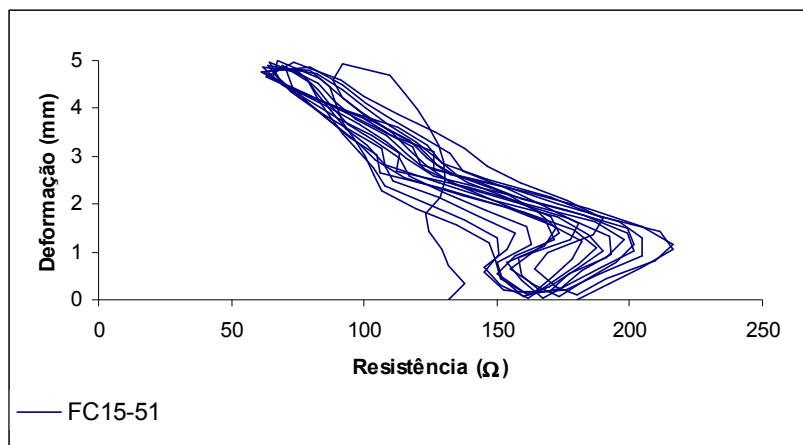


Figura 112 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-51

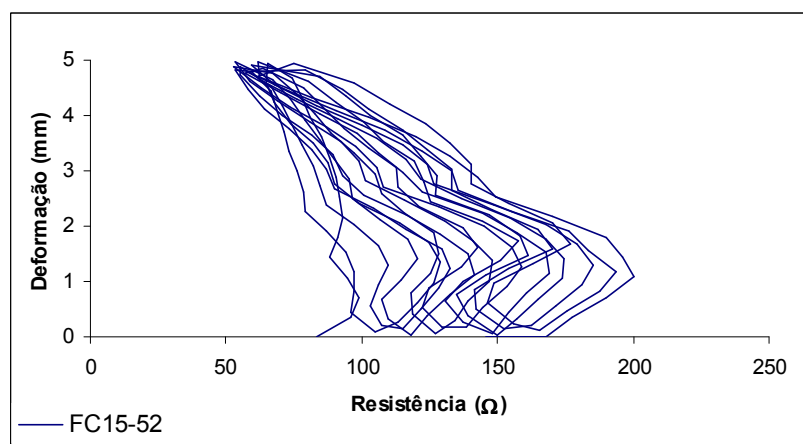


Figura 113 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-52

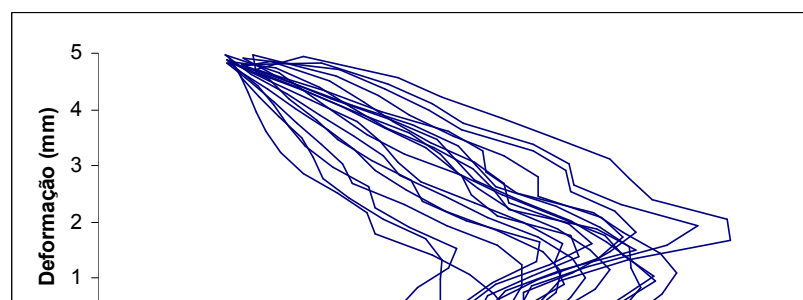


Figura 114 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-53

FC15-10

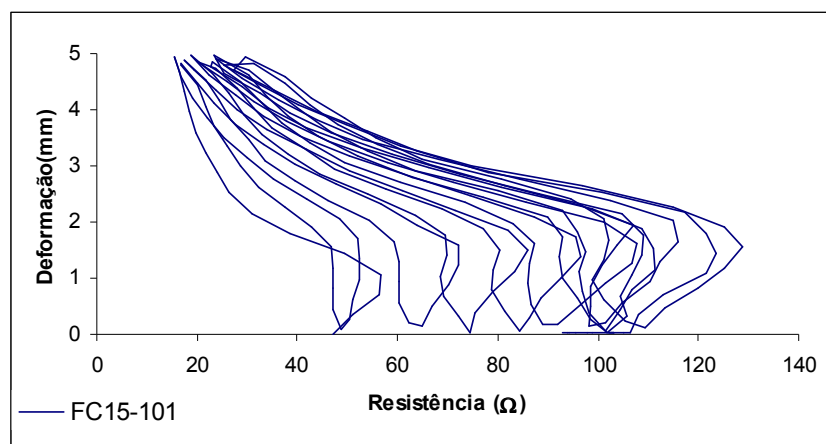


Figura 115 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-101

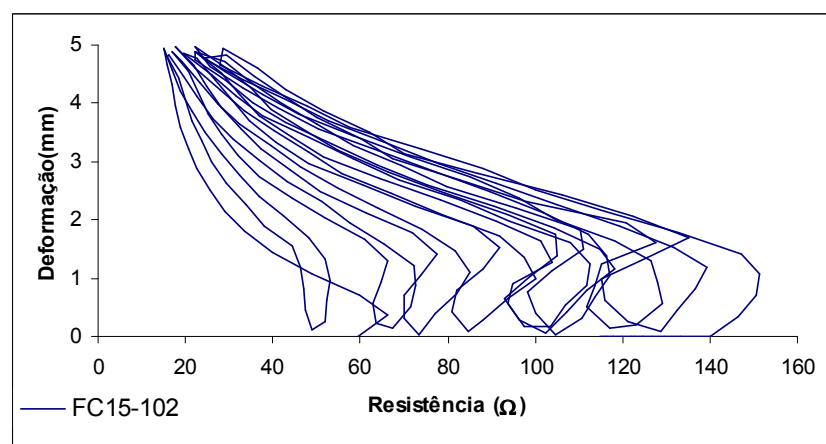


Figura 116 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-102

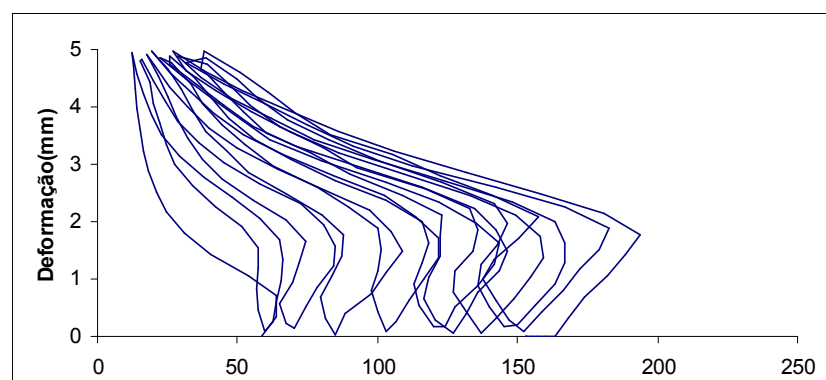


Figura 117 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-103

FC15-13

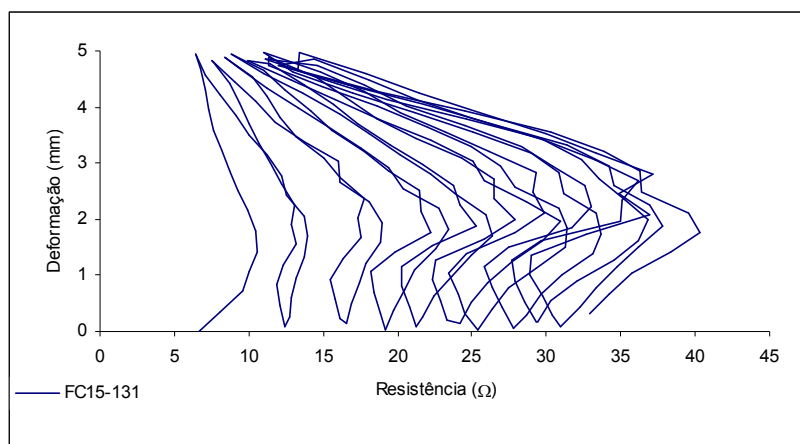


Figura 118 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-131

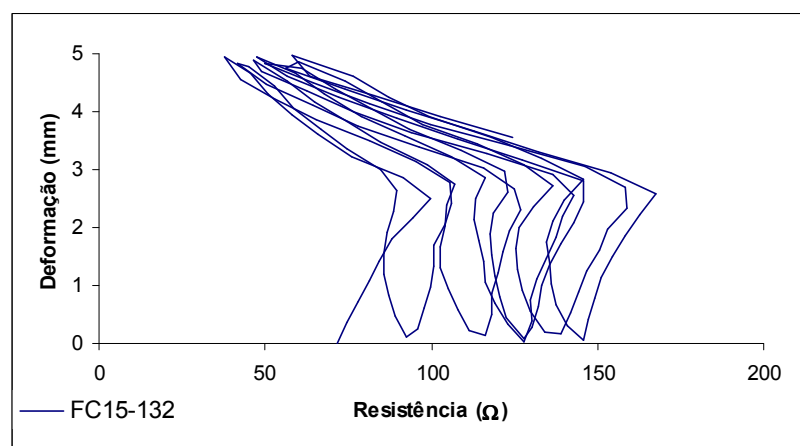


Figura 119 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-132

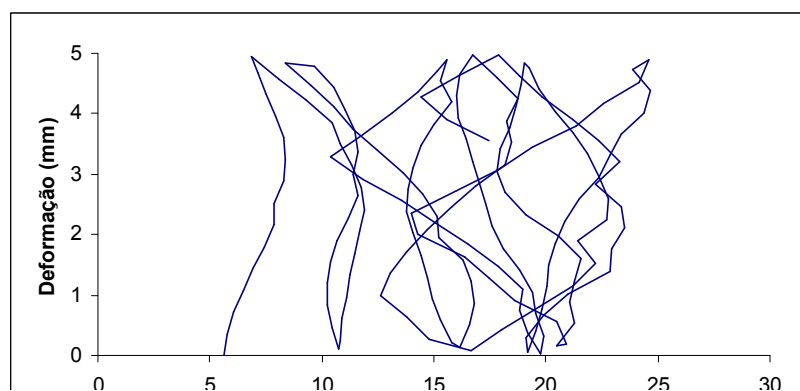


Figura 120 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC15-133

FC03-40

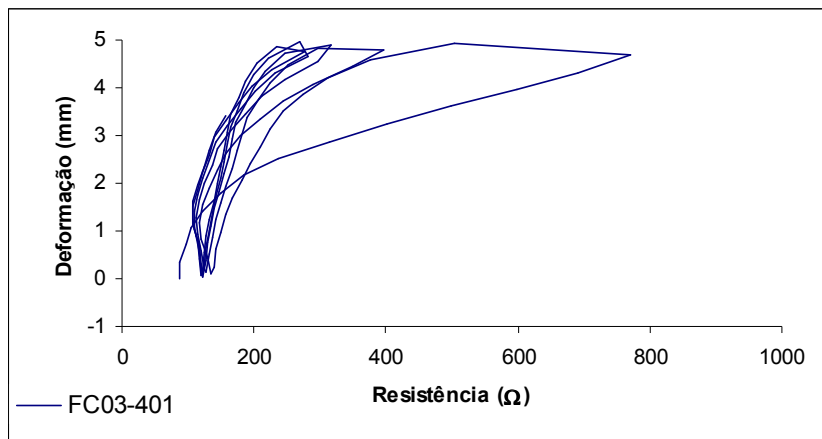


Figura 121 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-401

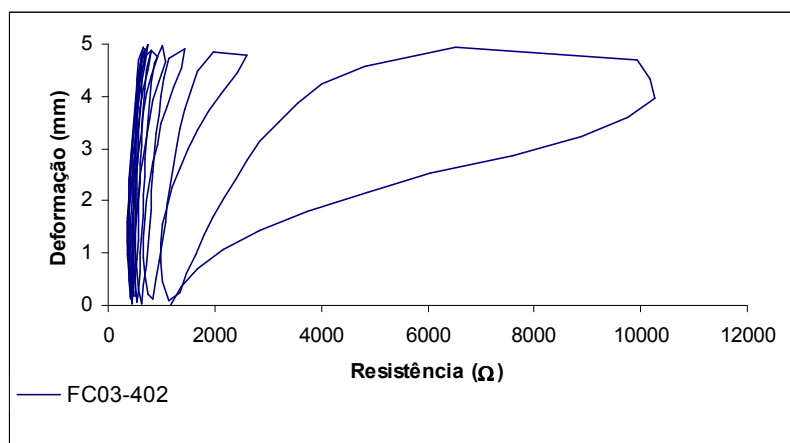


Figura 122 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-402

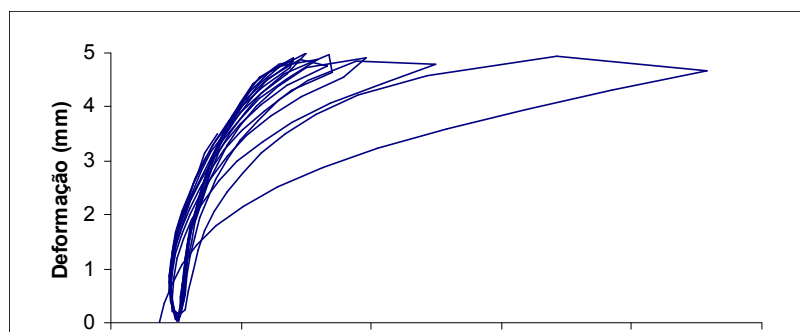


Figura 123 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-403

FC03-50

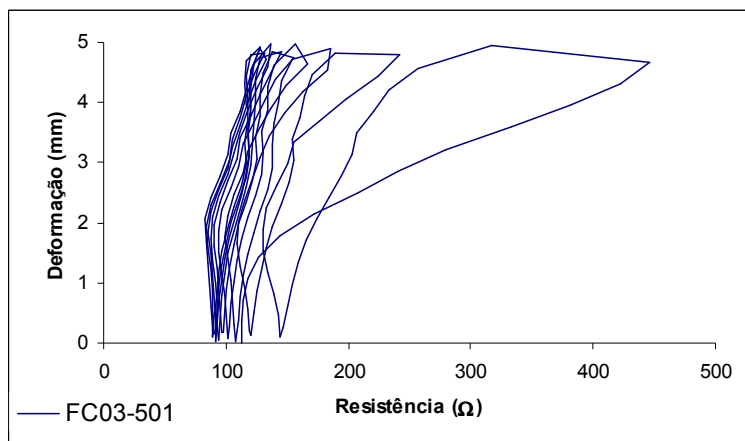


Figura 124 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-501

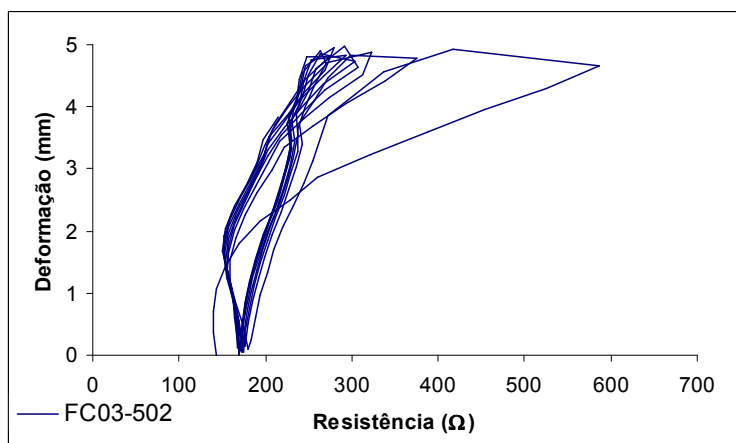


Figura 125 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-502

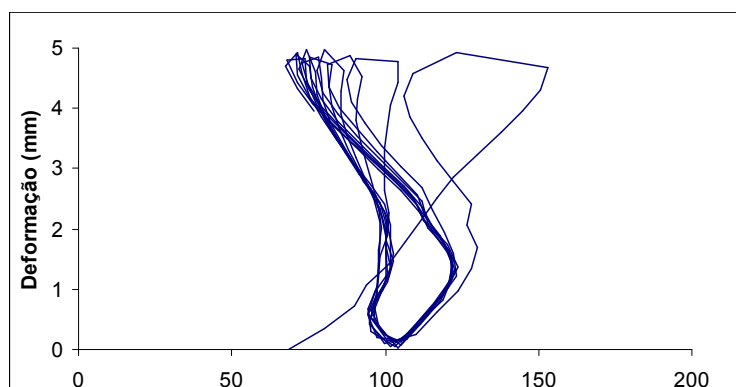


Figura 126 – Dispersão obtida para calibração do sensor FC03-503

8.3 Anexo C

Tabela 25 – valores de sensibilidade em cada ciclo dos sensores FC15

Ciclo	FC15-51	FC15-52	FC15-53	FC15-101	FC15-102	FC15-103	FC15-131	FC15-132	FC15-133
1	6,59	7,74	0,57	2,94	1,63	1,89	15,55	6,84	15,59
2	5,52	8,53	0,99	7,76	3,21	6,59	27,01	11,28	28,62
3	6,06	9,95	2,40	11,85	6,12	12,30	36,16	14,29	35,73
4	6,21	10,89	3,25	14,82	9,68	15,31	42,10	14,68	35,50
5	7,22	12,99	5,10	18,60	12,84	21,03	53,07	17,66	43,72
6	7,58	14,76	4,14	19,73	14,18	21,57	53,45	19,27	48,26
7	7,42	15,32	5,70	18,58	13,58	24,27	57,38	20,18	53,10
8	7,94	17,40	5,77	20,92	16,77	26,71	65,38	21,20	50,82
9	9,23	19,14	7,27	25,17	19,42	30,64	67,62	22,52	57,96
10	9,04	19,82	8,46	23,06	21,84	32,79	71,61	23,01	61,38

Tabela 26 – Valores de sensibilidade em cada ciclo dos sensores FC03

Ciclo	FC03-401	FC03-402	FC03-403	FC03-501	FC03-502	FC03-503
1	109,93	111,50	157,42	41,79	43,68	17,51
2	50,97	18,33	80,94	16,57	23,33	11,51
3	37,11	3,38	59,84	9,16	17,87	11,26
4	30,99	-1,03	49,19	6,61	16,01	11,30
5	30,87	-2,89	48,83	5,38	15,99	11,32
6	28,68	-4,13	46,28	4,13	14,98	11,22
7	25,65	-5,10	41,95	2,85	13,30	10,98
8	23,76	-5,88	38,78	2,47	12,62	11,26
9	25,33	-6,05	39,35	2,38	13,14	11,26
10	24,71	-5,93	38,54	1,85	12,66	10,91

8.4 Anexo D

Sensores que apresentaram baixa sensibilidade

No decorrer do trabalho realizado, e na imensidão de compósitos fabricados houve aqueles que não apresentaram uma variabilidade na sua resistência eléctrica tal que pudessem ser chamados de sensores.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos do ensaio de calibração.

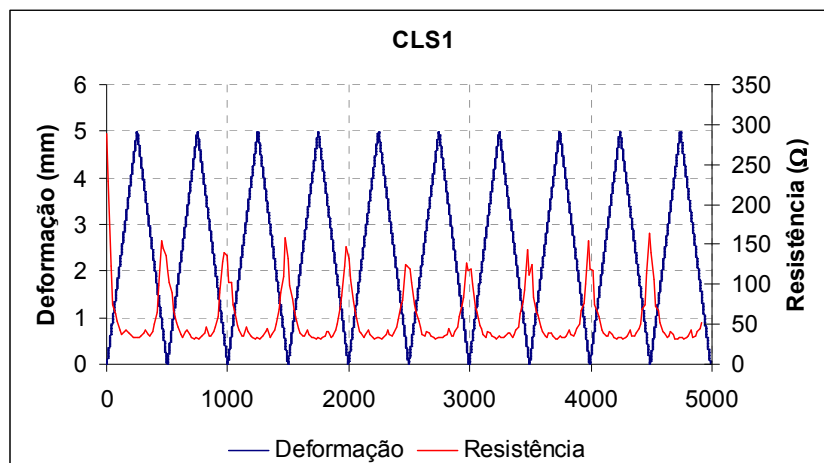


Figura 127 – ensaio de calibração do compósito CLS1

Os compósitos do tipo CLS são compósitos constituídos pelo mesmo material base, o silicone de marca "Silastic" o qual foi misturado com fibras de aço. Por último, na moldagem destes compósitos, foi inserido um laminado de carbono com dimensões de 30x10x2 mm numa das bases. Desta forma o contacto (condutor) era realizado entre o laminado e as fibras de aço dispersas na matriz.

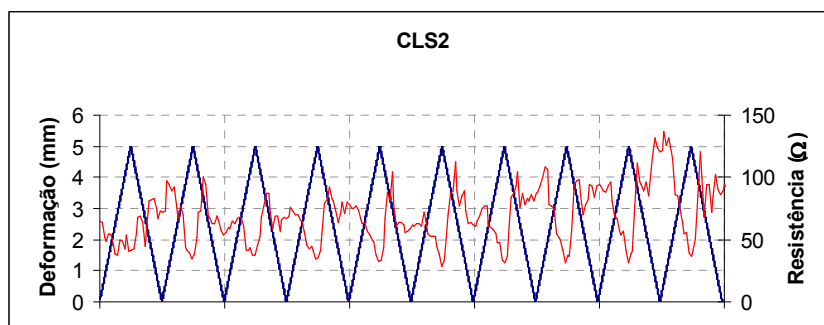


Figura 128 – ensaio de calibração do compósito CLS2

O compósito do tipo CLS1, com 1% de fibras de aço (em massa) apresentou valores da resistência eléctrica constantes para deformações superiores a 2mm o que corresponde a uma sensibilidade quase nula para deformações acima desta ordem de grandeza (fig.127).

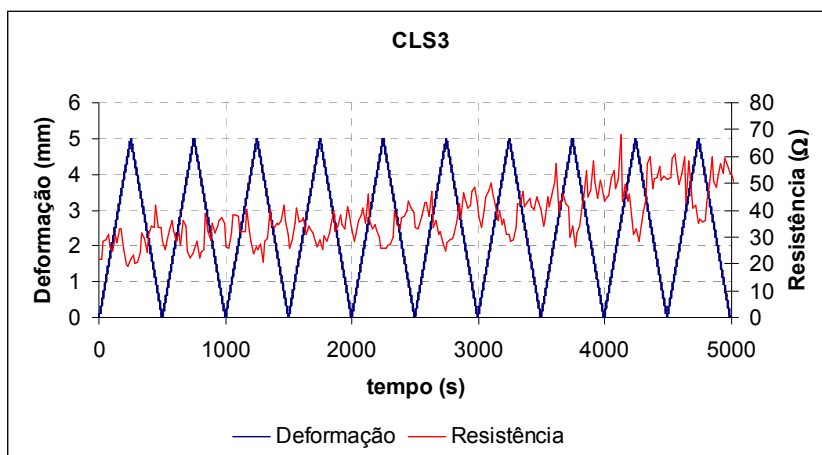


Figura 129 – ensaio de calibração do compósito CLS3

Foram ainda ensaiados provetes com 2%,3% e 5% (em massa) de fibras de aço aos quais correspondem aos compósitos CLS2, CLS3 e CLS5 respectivamente. Estes 3 tipos de compósitos apresentaram uma instabilidade leituras nos valores da resistência eléctrica, que foi aumentando à medida que a % de fibras de aço também aumentou (fig. 128,129 e 130).

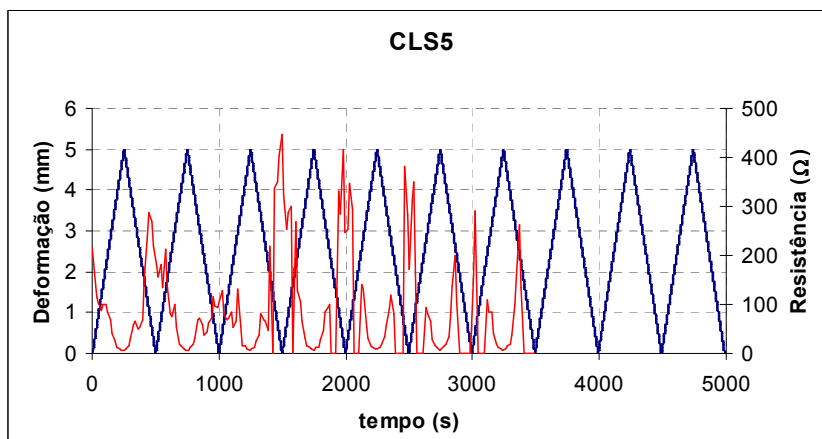


Figura 130 – ensaio de calibração do compósito CLS5

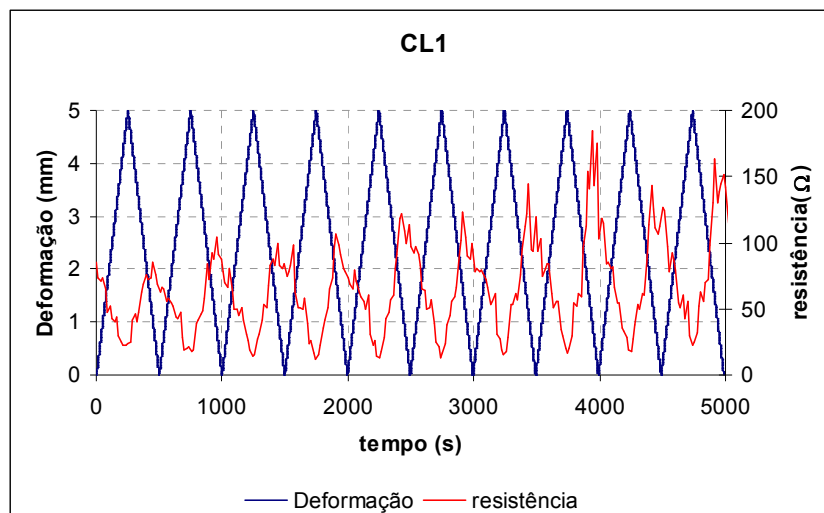


Figura 131 – ensaio de calibração do compósito CL1

Os compósitos CL1 e CL2 foram moldados em 2 fases. A primeira fase, correspondente a metade da altura final do sensor, é constituída apenas pelo polímero "*Silastic*" sem qualquer adição. Para completar a altura final do provete, na segunda fase adicionaram-se fibras de carbono do tipo FC03, com teores de 5% e 10% (em massa) para os compósitos CL1 e CL2 respectivamente. No processo de moldagem, foi introduzido um laminado de carbono com dimensões de 50x10x2 mm de tal modo que apenas 10mm do comprimento total ficaram em contacto com a mistura realizada na segunda fase.

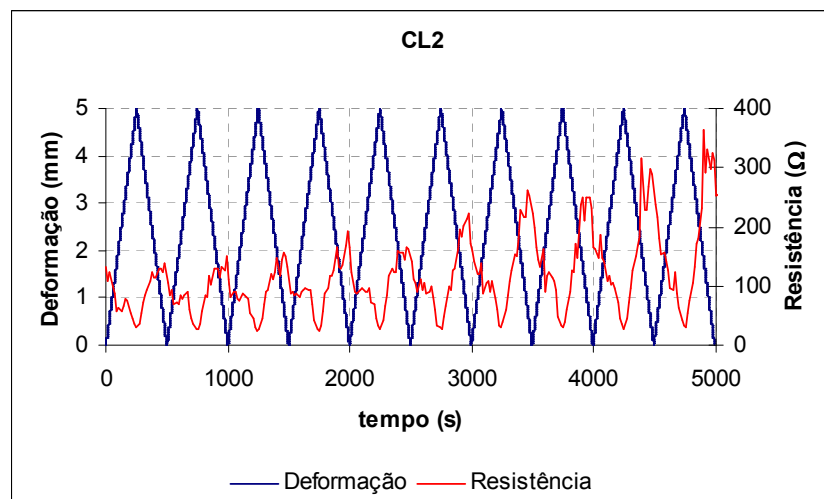


Figura 132 – ensaio de calibração do compósito CL2

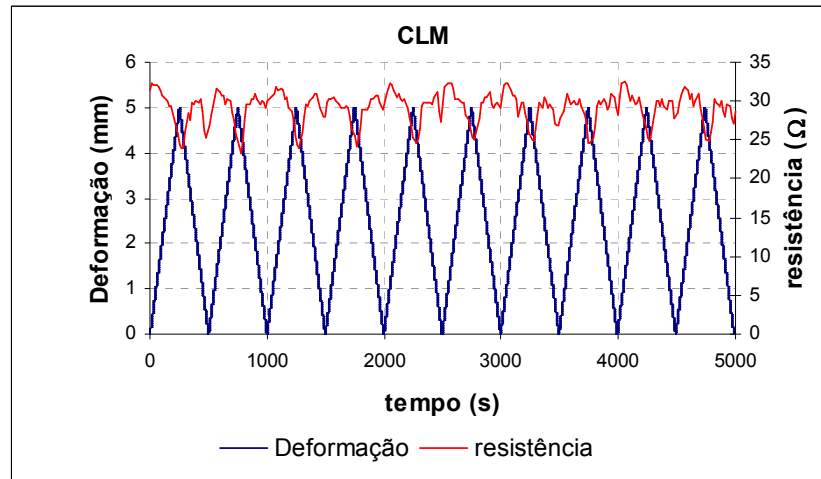


Figura 133 – ensaio de calibração do compósito CLM

O compósito CLM é em tudo semelhante aos compósitos CL1 e CL2 contudo foram utilizadas fibras de aço em substituição das fibras de carbono.