

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Vítor Henrique Pires da Silva Braga

Monitorização de estruturas de betão a partir de varões inteligentes em material compósito.

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Raúl Figueiro

Outubro de 2017

DECLARAÇÃO

Nome: Vítor Henrique Pires da Silva Braga

Endereço eletrónico: vitorbraga1988@gmail.com Telefone: 91 993 94 31/253 043 960

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13431270

Título da dissertação: Monitorização de estruturas de betão a partir de varões inteligentes em material compósito.

Orientador:

Professor Doutor Raúl Manuel Esteves Sousa Figueiro

Ano de conclusão: 2017

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO (indicar, caso tal seja necessário, nº máximo de páginas, ilustrações, gráficos, etc.), APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho apresenta-se como a última barreira de uma importante etapa da minha vida, cujas dificuldades fui ultrapassando com a valiosa ajuda de professores, colegas, familiares e amigos, a quem me cabe agora prestar os meus agradecimentos.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Raúl Fanguero, pela orientação e pelos incentivos prestados na elaboração desta dissertação, bem como pela disponibilidade e simpatia com que sempre me recebeu.

Ao grupo de investigação Fibrenamics, em particular ao Fernando Cunha e ao Carlos Mota, por todos os esclarecimentos, sugestões e conselhos que me deram durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Vítor e Dora, pela educação e pelos valores que me transmitiram durante a minha vida, por me fazerem acreditar nas virtudes do trabalho e da paciência e por toda a confiança que sempre depositaram em mim.

À restante família, em especial à minha Tia Matilde, por todo o apoio nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos Pedro Costa, Diogo Gonçalves, Hugo Freire, Tiago Costa, José Brandão, Ricardo Otero, João Pedro Pereira e Bruno Ribeiro pelos momentos de companheirismo e amizade, e pela certeza de que seja qual for o problema estarão sempre presentes para me ajudar.

A estes e a todos os colegas que fizeram parte do meu percurso académico o meu muito obrigado.

RESUMO

Os custos com a reabilitação de estruturas representam hoje em dia uma importante fatia no setor da construção. De modo a diminuir esses custos, e a prevenir falhas catastróficas, tem sido feita uma aposta em sistemas de monitorização, não só em estruturas novas, como em estruturas intervencionadas. Nos últimos anos foram desenvolvidos varões entrançados em material compósito, que por serem constituídos por materiais condutores de eletricidade, como as fibras de carbono, apresentam potencial de utilização como elementos de monitorização. Foram preparadas e ensaiadas amostras de varões compósitos com diferentes percentagens de fibra de carbono de modo a estudar a sua piezoresistividade. Todos as percentagens testadas revelaram boa sensibilidade, tendo-se concluído que a percentagem ideal de fibra de carbono na composição destes varões compósitos para aplicação como sensor de deformações é de 3%, ou seja, a mais baixa das percentagens testadas.

Palavras-Chave: Varões compósitos, Monitorização, Piezoresistividade, Fibra de Carbono

ABSTRACT

Structural rehabilitation costs represent nowadays a great part of the construction business. To low those costs and to prevent catastrophic failure, there has been a growing implementation of monitoring systems, not only on new structures, but on rehabilitated ones. In the last few year, a type of braided composite rod has been developed, containing conductive materials such as carbon fiber, making it a potential material to be used in a monitoring system. Several samples of this material with different percentages of carbon fiber were produced and tested to study their piezoresistivity. All tested percentages showed good sensitivity, and it was concluded that the ideal carbon fiber percentage of the composite rods to be applied as a deformation sensor is 3%, the lowest percentage tested.

KEYWORDS: COMPOSITE RODS, MONITORING, PIEZORESISTIVITY, CARBON FIBRE.

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento temático.....	1
1.2 Plano de trabalho e Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2. Estado de Arte	5
2.1 Monitorização na Engenharia Civil	5
2.2 Métodos de Monitorização	7
2.2.1 Monitorização através de Fibras Óticas	7
2.2.2 Monitorização por corrente galvânica (durabilidade)	10
2.2.3 Monitorização por vibração	11
2.3 Piezoresistividade	13
2.4 Materiais Fibrosos.....	24
2.4.1 Fibras de Vidro.....	25
2.4.2 Fibras de Carbono.....	26
2.4.3 Fibras de Aço	28
2.5 Varões Entrançados em Material Compósito.....	29
2.5.1 BCR's (Braided Composite Rods).....	31
2.5.2 FRP (Fibre Reinforced Polymer).....	35
3. Trabalho Experimental	39
3.1 Processo de produção de varões entrançados em material compósito com capacidade de monitorização	39
3.1.1 Colocação das fibras	40
3.1.2 Impregnação em resina	41
3.1.3 Sistema de entrançamento	41

3.1.4	Processo de cura dos varões.....	43
3.1.5	Tiragem dos varões.....	44
3.2	Planeamento da produção dos varões entrançados em material compósito.....	45
3.2.1	Preparação da Resina.....	45
3.2.2	Fibras utilizadas.....	46
3.2.3	Composições dos varões.....	47
3.3	Preparação das amostras para ensaio.....	48
3.3.1	Preparação para a leitura de resistência elétrica.....	48
4.	Ensaio dos Varões.....	51
4.1	Ensaio de Flexão.....	51
4.1.1	Resultados do Ensaio.....	54
4.1.2	Análise de resultados.....	63
5.	Conclusões.....	67
5.1	Conclusões Gerais.....	67
5.2	Investigações Futuras.....	68
	Referências Bibliográficas.....	71
	Anexo I – Informação técnica da resina.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Degradação do betão e corrosão nas armaduras[3].....	6
Figura 2 – Interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot[6]	8
Figura 3 - Funcionamento do Sensor de Bragg[8].....	9
Figura 4 - Construção da Ponte da Lezíria[9]	9
Figura 5 - Rede de sensores para diferentes medições instalados na Ponte da Lezíria[4].....	10
Figura 6 - Sistema de medição da corrente galvânica[10].....	10
Figura 7 - Sistema de monitorização de durabilidade da Ponte da Lezíria. 1 - Sensor de corrente galvânica. 2 - Eléctrodo de referência. 3 - Sensor de temperatura[4].	11
Figura 8 - Sistema de monitorização de vibrações através de laser[12].	13
Figura 9 - Gráfico de resistividade em função do tempo (Gauge Factor negativo)[15]	14
Figura 10 - Gráfico de resistividade em função do tempo (Gauge Factor positivo)[15].....	15
Figura 11 - Resultados dos ensaios obtidos para os primeiros ciclos de carga[16].....	16
Figura 12 – Resultados dos ensaios obtidos para os ciclos avançados[16]	17
Figura 13 - Resultados do ensaio para os últimos ciclos de carga[16].....	17
Figura 14 - Secções transversais dos varões compósitos entrançados; 1-Fibra de Vidro 2-Fibra de Carbono [18].....	19
Figura 15 - Equipamento utilizado nos ensaios[18]	19
Figura 16 - Variação do deslocamento e resistência eléctrica com o tempo, BCR4 (100% Carbono)[18]	20
Figura 17 - Variação do deslocamento e resistência eléctrica com o tempo, BCR2 (77% Vidro-E, 23% Carbono)[18].....	21
Figura 18 - Relação entre a deformação e a variação de resistência eléctrica - BCR 5% de Fibra de Carbono[19].....	23
Figura 19 - Classificação dos diferentes tipos de fibras[20].....	25
Figura 20 - Roving de Fibra de Carbono[25]	27
Figura 21 - Diagrama tensão-extensão. BS - Betão Simples. BRFA - Betão reforçado com fibras de aço[28].....	28
Figura 22 - Diferentes Classificações dos materiais compósitos[32]	29

Figura 23 - Estrutura entrançada do varão compósito[33].....	31
Figura 24 - Processo de entrançamento[34].....	32
Figura 25 - Diagramas Tensão-Extensão de várias fibras e do aço convencional[35].	36
Figura 26 - Aplicação de FRP no tabuleiro de uma ponte[36].	37
Figura 27 - Aplicação de FRP para reforço/reabilitação de pontes[36].	37
Figura 28 - Técnica EBR com laminados[38].	38
Figura 29 - Técnica NSR com laminados[38].	38
Figura 30 - Esquema do processo de produção de varões entrançados em material compósito[39].	39
Figura 31 - Rovings de fibra de vidro prontos para produção	40
Figura 32 - Olhais cerâmicos por onde são encaminhadas as fibras para produção dos varões	40
Figura 33 - a) Olhais cerâmicos para encaminhamento das fibras; b) Balseiro com resina onde são banhadas as fibras; c) Encaminhamento das fibras para o sistema de entrançamento...	41
Figura 34 - Mecanismo de entrançamento.....	42
Figura 35 - Ponto de entrançamento	42
Figura 36 - Recipiente para reaproveitamento da resina.	43
Figura 37 - Entrada do varão na câmara de cura, após o processo de entrançamento.....	43
Figura 38 - Regulador de temperatura da estufa de cura.....	44
Figura 39 - Roldanas para tiragem e extração dos varões	45
Figura 40 - Regulador de velocidade (Sistema de tiragem e entrançamento)	45
Figura 41 - Produtos utilizados na preparação da resina.....	46
Figura 42 - Aspeto dos varões após o corte.	48
Figura 43 - Tinta condutora utilizada na preparação dos ensaios.	49
Figura 44 - Pormenor da preparação dos varões / Aplicação da tinta condutora.....	49
Figura 45 - Esquema do ensaio de Flexão em 3 pontos[40]	51
Figura 46 - Equipamentos utilizados no ensaio de flexão.....	52
Figura 47 - Colocação do BCR no dinamómetro.	53
Figura 48 - Funcionamento do software do multímetro	54
Figura 49 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 1 (3% Carbono, 97% Vidro-E).....	54
Figura 50 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 2 (3% Carbono, 97% Vidro-E).....	55
Figura 51 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 3(3% Carbono, 97% Vidro-E)	55

Figura 52 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 4(3% Carbono, 97% Vidro-E)	55
Figura 53 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 1(4% Carbono, 96% Vidro-E)	55
Figura 54 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 2(4% Carbono, 96% Vidro-E)	56
Figura 55 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 3(4% Carbono, 96% Vidro-E)	56
Figura 56 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 4(4% Carbono, 96% Vidro-E)	56
Figura 57 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 1(5% Carbono, 95% Vidro-E)	57
Figura 58 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 2(5% Carbono, 95% Vidro-E)	57
Figura 59 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 3(5% Carbono, 95% Vidro-E)	57
Figura 60 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 4(5% Carbono, 95% Vidro-E)	57
Figura 61 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 1(6% Carbono, 94% Vidro-E)	58
Figura 62 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 2(6% Carbono, 94% Vidro-E)	58
Figura 63 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 3(6% Carbono, 94% Vidro-E)	58
Figura 64 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 4(6% Carbono, 94% Vidro-E)	58
Figura 65 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 1(7% Carbono, 93% Vidro-E)	59
Figura 66 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 2(7% Carbono, 93% Vidro-E)	59
Figura 67 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 3(7% Carbono, 93% Vidro-E)	59
Figura 68 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 4(7% Carbono, 93% Vidro-E)	59
Figura 69 - Resultados da amostra BCR1-4	65
Figura 70 - Posição das fibras de carbono na secção transversal - BCR1 - 4 a) Superfície de aplicação da carga	66

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Composição dos varões compósitos produzidos[18]	18
Quadro 2 - Dimensões dos varões compósitos produzidos[18]	19
Quadro 3 - Parâmetros do ensaio de flexão[18].....	20
Quadro 4 - Cálculo do Gauge Factor e das linhas de tendência lineares[18]	22
Quadro 5 - Composição e diâmetros dos varões compósitos produzidos para ensaio[19]	23
Quadro 6 - Fatores de sensibilidade e linhas de tendência[19].....	24
Quadro 7 - Composições de diferentes tipos de fibras de vidro[23].....	26
Quadro 8 - Propriedades físicas dos diferentes tipos de fibra de vidro[24]	26
Quadro 9 - Propriedades das Fibras de Carbono[25],[26]	27
Quadro 10 - Propriedades mecânicas das fibras de aço utilizadas como reforço[29].	28
Quadro 11 - Propriedades importantes dos materiais da matriz[31].....	30
Quadro 12 - Composições do reforço da estrutura entrançada para cada varão[34].	33
Quadro 13 - Resultado dos ensaios de tração uniaxial para cada varão[34].....	33
Quadro 14 - Resultados dos Ensaios/Comparação com o aço corrente[34]	34
Quadro 15 - Propriedades das resinas utilizadas no reforço[35].	35
Quadro 16 - Propriedades do betão, aço e das fibras utilizadas em FRP[20], [37].	36
Quadro 17 - Características das fibras de reforço.....	46
Quadro 18 - Características de produção: Varão tipo BCR1	47
Quadro 19 - Características de produção: Varão tipo BCR2	47
Quadro 20 - Características de produção: Varão tipo BCR3	47
Quadro 21 - Características de produção: Varão tipo BCR4	47
Quadro 22 - Características de produção: Varão tipo BCR5	48
Quadro 23 - Propriedades do ensaio de flexão em três pontos.....	52
Quadro 24 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR1 (3% Carbono)	60
Quadro 25 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR2 (4% Carbono)	61
Quadro 26 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR3 (5% Carbono)	61
Quadro 27 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR4 (6% Carbono)	61
Quadro 28 - Gauge factor e linhas de tendência - BCR5(7% Carbono).....	61

Quadro 29 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra – BCR 1 (3% Carbono)	62
Quadro 30 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra - BCR 2 (4% Carbono).....	62
Quadro 31 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra - BCR 3 (5% Carbono).....	62
Quadro 32 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra - BCR 4 (6% Carbono).....	62
Quadro 33 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra – BCR 5 (7% Carbono).....	63
Quadro 34 - Valores médios de Gauge Factor, Linha de tendência e variação de resistência para todas as tipologias.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

Atualmente, a Engenharia Civil é um dos ramos de atividade com maior impacto ambiental e económico. Estes dois fatores assumem uma dimensão maior se tivermos em conta a sua importância na sociedade atual, em que cada vez há uma consciencialização maior para estas problemáticas e em que os objetivos e políticas seguidas têm vindo a dar cada vez mais prioridade a fatores ecológicos e ambientais, procurando ao mesmo tempo reduzir custos e impactos económicos.

Um dos aspetos mais importantes, no âmbito da Engenharia Civil, que tem bastante influência do ponto de vista ambiental e económico, é a durabilidade das estruturas. Uma estrutura durável deverá, previsivelmente, acarretar menores impactos económicos e ambientais, pois necessitará de menos operações de manutenção. Outro conceito que está intimamente ligado às questões ambientais e económicas é o da monitorização de estruturas. Em estruturas devidamente monitorizadas e em que é feito um acompanhamento constante da sua evolução ao longo do tempo, é mais fácil prever e planejar as operações de manutenção necessárias, bem como prever e evitar falhas catastróficas, conseguindo assim uma maior eficiência na utilização de recursos.

Existem, hoje em dia, vários métodos de monitorização que podem ser utilizados em estruturas correntes. Entre eles estão a monitorização por vibração, e a monitorização por fibras óticas, que têm revelado resultados encorajadores para este campo de investigação, funcionando à base de sensores. É também possível fazer um aproveitamento das propriedades piezoelétricas dos materiais condutores para efeitos de monitorização estrutural. O conceito de piezoresistividade consiste na variação das características elétricas de um material em função das cargas e deformações que lhe são aplicadas.

Recentemente foi desenvolvido um tipo de varão em material compósito, cujas propriedades mecânicas se revelaram encorajadoras à sua futura utilização na construção

como substituto do aço tradicional, tendo como grande vantagem em relação a este o facto de não sofrerem corrosão. A corrosão das armaduras de aço é uma das causas maiores dos problemas de falta de durabilidade das estruturas de betão armado, tornando-se evidente que o investimento e desenvolvimento deste tipo de varões em material compósito pode ser bastante importante na evolução da Engenharia Civil.

O núcleo destes varões compósitos é constituído por fibras inorgânicas, normalmente de vidro ou carbono. A inclusão de fibras de carbono, material condutor, no núcleo destes varões permite, à partida, assumir que estes varões apresentam potencialidades de monitorização através de piezoelectricidade. Importa então perceber qual a quantidade relativa de fibras de carbono que deve ser utilizada na produção destes varões de modo a produzir os resultados mais fiáveis na aplicação dos varões compósitos em monitorização de estruturas de betão armado.

1.2 Plano de trabalho e Objetivos

O presente estudo tem como objetivo primordial o desenvolvimento de varões em material compósito com capacidade de monitorização de deformações. No sentido de garantir a combinação de desempenho mecânico com capacidade de monitorização, o núcleo destes varões será constituído por uma combinação de fibras de vidro e de carbono. Estudos anteriores sobre a temática dos varões compósitos com capacidade de monitorização indicaram uma percentagem de 5% de fibras de carbono na constituição do núcleo do varão como a que melhores resultados de monitorização apresenta. O intervalo de percentagens testadas na altura foi relativamente alto, pelo que se pretende com este estudo testar percentagens à volta de 5%, num âmbito de continuidade dos trabalhos anteriormente desenvolvidos, para tentar melhorar o conhecimento das propriedades de monitorização deste tipo de material.

O trabalho experimental será constituído pelas seguintes etapas/objetivos:

- Produção dos varões compósitos com diferentes percentagens de fibra de carbono no seu interior (3%, 4%, 5%, 6% e 7%);
- Preparação de varões compósitos produzidos para os ensaios de carga, incluindo o corte dos varões e preparação para ensaios de flexão, bem como a preparação dos varões para a leitura da resistência elétrica;
- Ensaios de flexão, com cargas cíclicas, onde serão avaliadas as variações de resistência elétrica aquando da aplicação das deformações através da utilização de um software de registo automático de dados;
- Análise dos resultados, onde serão construídos os gráficos que correlacionam as variações de resistência elétrica com as variações da deformação ao longo do ensaio de flexão e serão também apresentados cálculos do fator de sensibilidade dos varões para efeitos de monitorização, sendo possível apresentar conclusões sobre a composição que apresenta melhor desempenho.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo contém uma breve introdução à temática em desenvolvimento, bem como o planeamento da atividade experimental e os objetivos do estudo.

No segundo capítulo é efetuado um levantamento do estado de arte relacionado com as várias questões abordadas neste estudo, nomeadamente a monitorização de estruturas em Engenharia Civil, no que diz respeito às suas vantagens e diferentes formas de ser implementada. É também desenvolvido o tema dos materiais compósitos e o seu papel atual na Engenharia Civil com alguns exemplos de aplicação, bem como explorados alguns trabalhos já realizados com varões em material compósito, onde se dão a conhecer algumas propriedades importantes e potencialidades deste tipo de materiais.

O terceiro capítulo contém uma descrição aprofundada de todo o processo experimental realizado neste estudo, com informação sobre os materiais utilizados, processos de

produção, equipamentos e recursos, bem como o planeamento da produção em termos de tipologias de composição dos varões em material compósito. É também aprofundada neste capítulo a preparação dos varões para os ensaios de tração e flexão.

O quarto capítulo aborda o processo de ensaio dos varões. Nele é descrito o processo do ensaio de flexão, incluindo os equipamentos utilizados. Posteriormente, são apresentados os resultados dos ensaios juntamente com uma análise do comportamento de cada tipologia de varão.

Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o estudo realizado nos varões em material compósito, nomeadamente sobre a influência da composição do núcleo dos varões no seu comportamento como elemento de monitorização, bem como algumas perspetivas de investigação futura a realizar no âmbito dos varões compósitos.

2. ESTADO DE ARTE

Neste capítulo é feito um estudo bibliográfico dos vários temas que a presente dissertação aborda, tais como a monitorização de estruturas e a sua estreita relação com as necessidades de reabilitação. São também apresentados alguns métodos de monitorização correntemente utilizados, sendo dado especial destaque aos métodos utilizados com materiais piezorresistivos. Finalmente, são abordadas algumas questões principais sobre materiais fibrosos, e sobre materiais compósitos à base de carbono correntemente utilizados na construção.

2.1 Monitorização na Engenharia Civil

A Engenharia Civil é, nos tempos atuais, uma das áreas de atividade mais dispendiosas em termos de recursos, não só financeiros, mas também ambientais. A sua importância para a sociedade atual toma uma dimensão ainda maior, tendo em conta a segurança de bens e pessoas, que deve estar totalmente salvaguardada, não só durante a fase de construção, mas também durante a fase de utilização de uma estrutura. É durante a fase de utilização de uma estrutura que costumam surgir a maioria dos problemas que prejudicam o seu estado de serviço, e que podem evoluir e levar à perda de segurança para pessoas e bens, caso não sejam tratados atempadamente.

O betão armado é o material mais utilizado na construção, conferindo às estruturas as propriedades mecânicas essenciais ao seu funcionamento. Este material é constituído por uma argamassa de cimento, à qual é adicionada uma armadura em aço que incrementa as suas propriedades mecânicas, nomeadamente no que toca à resistência em tração. Visto tratar-se do material primordial utilizado nas estruturas correntes, é necessário ter uma especial atenção aos fenómenos de degradação que podem ocorrer[1].

As causas da degradação das estruturas relacionam-se, na maior parte dos casos, com o ambiente ao qual se encontram expostas. Surgem neste contexto três grandes ações ambientais que afetam a generalidade das estruturas: ação do dióxido de carbono

(carbonatação), ação dos cloretos, humidade e variações de temperatura. Para além das ações ambientais, as estruturas podem também sofrer outras formas de desgaste, como fluência e retração no betão, ou agentes químicos e biológicos[2]. O conceito de durabilidade na Engenharia Civil relaciona as ações de degradação a que uma estrutura está sujeita, com a perda de qualidade de serviço que ela sofre devido a essas mesmas ações. Todas as estruturas devem ser projetadas de modo a satisfazer um conjunto de requisitos funcionais, num determinado período de tempo, sem que sejam necessárias operações de manutenção imprevistas que acarretem grandes custos para os proprietários[2]. Na Figura 1[3] apresenta-se um exemplo de degradação de uma estrutura de betão armado em que ocorreu a corrosão das armaduras.



Figura 1 - Degradação do betão e corrosão nas armaduras[3]

Torna-se então fundamental a existência de mecanismos que permitam monitorizar as estruturas de forma contínua durante o seu período de vida útil, de forma a conseguir prever com exatidão a existência de falhas catastróficas que possam colocar em risco a segurança de pessoas e bens. A monitorização das estruturas tem também importância sob o ponto de vista da manutenção. A elaboração e efetivação de um plano de manutenção numa estrutura monitorizada é um processo mais simples que o de uma estrutura não-monitorizada, e os resultados obtidos na estrutura monitorizada também serão consideravelmente melhores que os da estrutura não-monitorizada, não só em termos de eficiência do processo como em termos de custos[4].

Em termos gerais, um sistema de monitorização deve obedecer aos seguintes princípios [4]:

- Facilidade de utilização do equipamento de medição;
- Não interferir com a funcionalidade da estrutura;
- Fiabilidade e capacidade de resposta aos estímulos aplicados;
- Custos reduzidos;
- A vida útil dos sensores deve coincidir com a vida útil da estrutura, obedecendo a requisitos de durabilidade;

2.2 Métodos de Monitorização

2.2.1 Monitorização através de Fibras Óticas

A evolução tecnológica no campo das fibras óticas tem impulsionado o progresso constante da monitorização de estruturas, através do desenvolvimento dos sensores em fibra ótica. Em conjunto com os avanços registados no domínio dos materiais compósitos, o desenvolvimento dos sensores em fibra ótica constitui um importante passo para o conceito de estruturas inteligentes, visto que apresentam uma série de vantagens em relação aos sensores elétricos convencionais:

- Isolamento elétrico;
- Imunidade à corrosão;
- Elevada sensibilidade;
- Tolerância a temperaturas elevadas;
- Abundância de matéria prima.

A monitorização através de sensores de fibra ótica pode ser feita através da utilização de sensores interferométricos, cuja função é medir determinadas grandezas que atuam sobre a fibra ótica. Estas medições são realizadas através da determinação das variações de fase dos feixes de luz que atravessam o sensor. Os sensores interferométricos são atualmente um dos métodos mais precisos na medição de distâncias, sendo que o tipo de sensor mais apropriado para aplicação em materiais compósitos é o interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot[5]

O interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot consiste na interferência de duas ondas eletromagnéticas e é constituído por dois planos paralelos separados por uma distância L . Este tipo de sensor é utilizado com sucesso na medição de deformações e deteção de emissão acústica. Para uma melhor sensibilidade, devem ser utilizadas fibras monomodo nos sensores. Existem, porém, dificuldades na fase de desmodulação, cujas metodologias implicam custos elevados[5]. Na Figura 2 está representado esquematicamente o interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot[6].

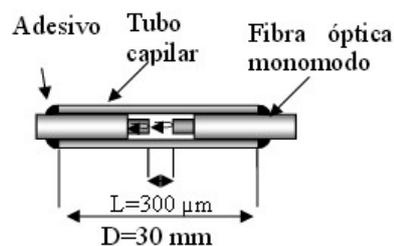


Figura 2 – Interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot[6]

As redes de Bragg são sensores que podem ser aplicados dentro do material, bem como na sua superfície, e medem extensões até cerca de $10000 \mu\text{m}/\text{m}$, para um intervalo de temperaturas entre -50°C e 200°C . O seu comprimento pode ser ajustado conforme as necessidades de medição. Este tipo de sensores apresentam um baixo nível de histerese e uma boa linearidade, e não são sensíveis a perturbações eletromagnéticas[7]. Devido à elevada sensibilidade térmica deste sistema, devem ser instalados sistemas que estabilizem a temperatura durante as medições. A Figura 3 apresenta esquematicamente o funcionamento dos sensores de Bragg[8]:

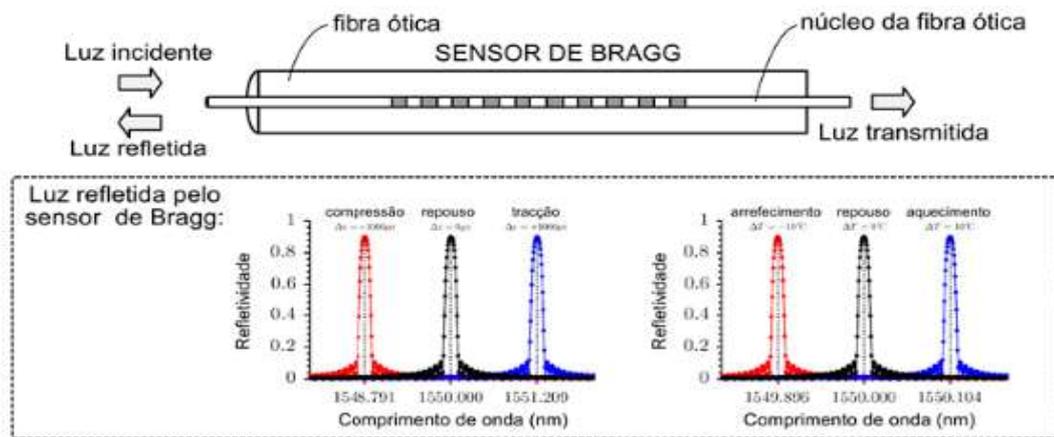


Figura 3 - Funcionamento do Sensor de Bragg[8]

Os sensores de Bragg podem assim ser comparados a uma série de espelhos que refletem apenas feixes de luz com comprimentos de onda específicos.[5]

Um exemplo prático de aplicação de sensores de Bragg com o objetivo de monitorizar permanentemente uma estrutura, é o caso da Ponte da Lezíria sobre o rio Tejo, ilustrada na sua fase de construção na figura 4[9]. Nela foram instalados vários transdutores e sensores de Bragg em pontos chave do tabuleiro (todos os meios vãos, e pontos junto aos pilares), conforme mostra a figura 5[4]:



Figura 4 - Construção da Ponte da Lezíria[9]

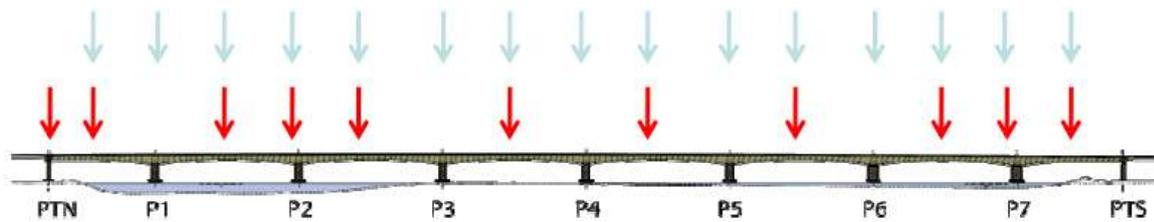


Figura 5 - Rede de sensores para diferentes medições instalados na Ponte da Lezíria[4].

2.2.2 Monitorização por corrente galvânica (durabilidade)

Este sistema pode ser aplicado tanto em estruturas novas, como em estruturas em que o betão de recobrimento tenha sido removido. O princípio baseia-se na instalação de um sistema que permita medir a corrente elétrica conforme mostra a figura 6[10]:

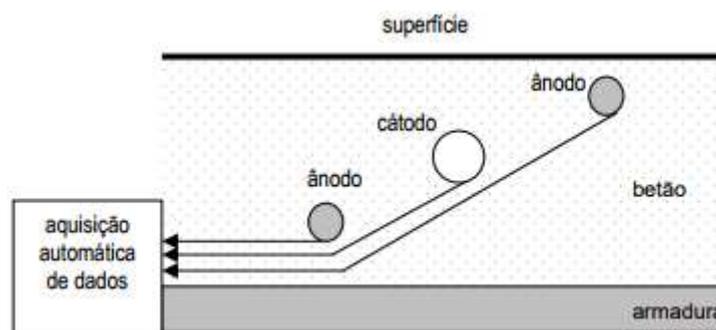


Figura 6 - Sistema de medição da corrente galvânica[10].

A corrente elétrica medida entre o ânodo e o cátodo é proporcional à dissolução do ferro no ânodo, sendo possível estabelecer uma relação que permite saber a velocidade de corrosão. Com a aplicação deste sistema é possível acompanhar a progressão da corrosão nas armaduras, bem como dos níveis de humidade e carbonatação no betão, podendo assim ser feito um controlo permanente das estruturas e tomar as medidas necessárias, tais como a aplicação de revestimentos de proteção [10].

Este sistema foi também instalado na fase de construção da Ponte da Lezíria. Em vários pontos da estrutura foram colocados os sistemas de sensores que se apresentam na figura 7[4], que ficaram embebidos no betão, e permitem uma aquisição de dados constante:

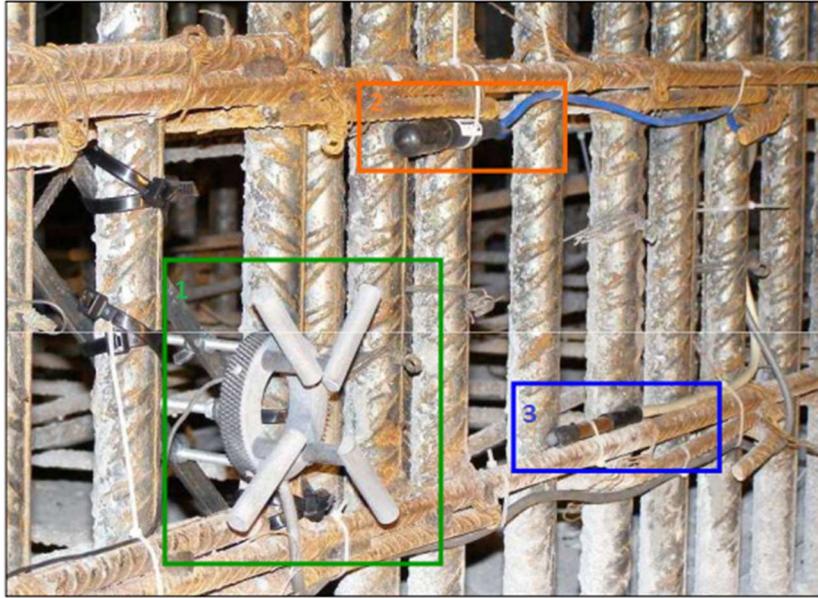


Figura 7 - Sistema de monitorização de durabilidade da Ponte da Lezíria. 1 - Sensor de corrente galvânica. 2 - Eléctrodo de referência. 3 - Sensor de temperatura[4].

Como podemos ver na figura anterior, o sistema instalado na ponte da Lezíria é constituído por três unidades de medição. O sensor de corrente galvânica serve para monitorizar a entrada de agentes agressivos no betão. O eléctrodo de referência permite prever quando se iniciará a corrosão e o sensor de temperatura permite avaliar o estado da corrosão nas armaduras[4].

2.2.3 Monitorização por vibração

A análise de vibrações de uma estrutura é outra das metodologias utilizadas para monitorizar o seu comportamento, considerando-se como um método de ensaio não-destrutivo. O seu principal objetivo é avaliar o comportamento dinâmico da estrutura, tendo bastante utilidade na preparação de operações de reabilitação, sendo de particular importância na definição das medidas corretivas a implementar. Este tipo de análise pode ser realizado em duas vertentes distintas[11]:

1. Análise da resposta das estruturas às solicitações dinâmicas impostas pelo meio envolvente;
2. Aplicação de vibrações à estrutura (que não afetem a sua integridade) e registo da resposta;

O método consiste na utilização de um conjunto de acelerómetros de alta sensibilidade, ligados a um computador dotado de *software* adequado, sendo possível medir com exatidão dados relativos a acelerações, velocidades e deslocamento de estruturas, bem como o seu espectro de amplitude no domínio da frequência. Os dados recolhidos são processados pelo computador, e fornecem informações importantes para a monitorização das estruturas[11]:

- Intensidade das vibrações;
- Representação gráfica dos valores medidos para a aceleração, velocidade e deslocamento;
- Valores máximos de aceleração, velocidade e deslocamento;
- Frequências dominantes das vibrações;
- Verificação automática e alerta se forem ultrapassados os valores limite previamente estabelecidos;

Para além das vantagens inerentes ao facto de este método representar um processo não-destrutivo, a monitorização de vibrações permite conhecer com exatidão a uniformidade da estrutura e identificar e detetar eventuais defeitos, avarias e modificações das propriedades da estrutura ao longo do tempo. O processo de ensaio é bastante simples, embora os resultados sejam influenciados por um grande número de fatores, o que dificulta a definição da precisão dos ensaios.

Outro método para deteção e monitorização de vibrações em estruturas é a utilização de detetores laser, que permitem medições a distâncias relativamente grandes. O princípio de funcionamento deste sistema consiste na emissão de um sinal ótico direcionado a um objeto, seguido da análise do sinal refletido[12]. Na figura 8 podemos ver um exemplo de um equipamento para monitorização de vibrações em estruturas através de detetores laser.

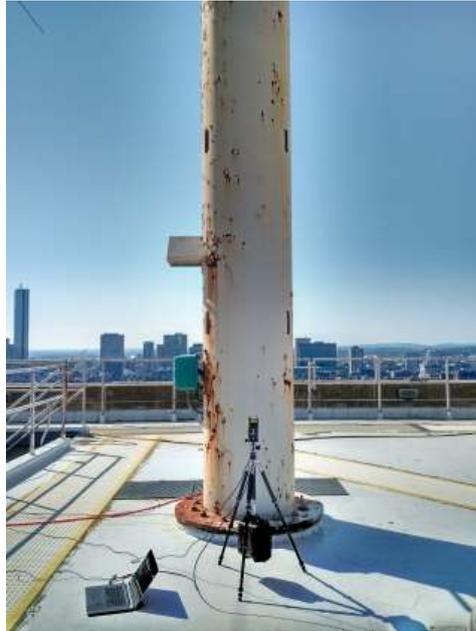


Figura 8 - Sistema de monitorização de vibrações através de laser[12].

2.3 Piezoresistividade

Alguns materiais à base de fibras apresentam potencialidades de monitorização baseadas nas suas propriedades de resistividade elétrica[13]. A aplicação destes materiais na indústria da construção permite realizar uma monitorização em linha do estado físico da estrutura, sendo possível conhecer o estado de conservação do betão e agir em conformidade caso sejam detetadas quebras, ou problemas de degradação excessiva.

A resistência elétrica de um fio condutor pode ser obtida através da seguinte equação[14]:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

em que ρ representa a resistividade do material, ou seja, a oposição intrínseca do material à passagem de corrente elétrica, L é o comprimento do material e A a área da sua secção transversal. Quando o material se deforma, a variação de resistência pode ser dada pela seguinte equação[14]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A}$$

A piezoresistividade trata-se então de uma propriedade dos materiais que consiste na variação da resistência elétrica dos materiais condutores quando estes são sujeitos à aplicação de cargas ou deformações mecânicas[13].

O fator que caracteriza a piezoresistividade dos materiais é denominado de **Gauge Factor (GF)**, traduzindo-se no fator sensor da deformação em função da resistência elétrica. A equação que caracteriza o Gauge Factor é apresentada em seguida[13]:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon}$$

em que,

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

R_0 – Resistência elétrica do material sem deformação ($\varepsilon=0$);

ε – Deformação unitária aplicada no material;

O valor do Gauge Factor varia consoante o material, e pode tomar valores negativos (piezoresistividade negativa, ou seja, a resistividade elétrica diminui com a deformação) (Figura 9), ou positivos (piezo-resistividade positiva, ou seja, a resistividade elétrica aumenta com a deformação) (Figura 10)[15].

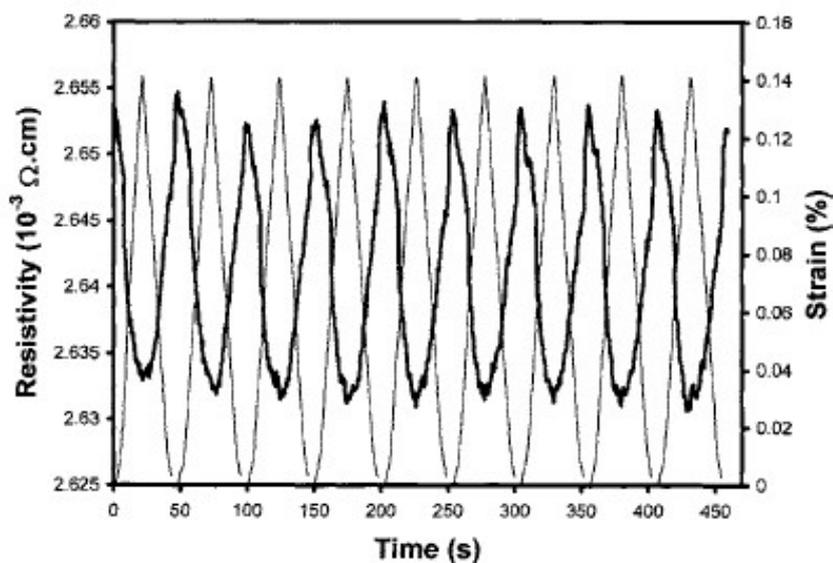


Figura 9 - Gráfico de resistividade em função do tempo (Gauge Factor negativo)[15]

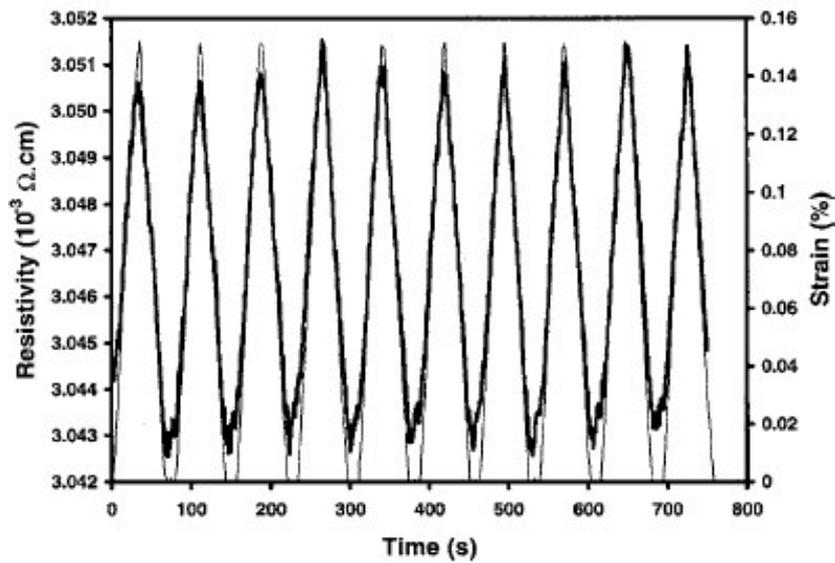


Figura 10 - Gráfico de resistividade em função do tempo (Gauge Factor positivo)[15]

Este fenómeno permite a aplicação do material como sensor de deformações, abrindo possibilidades de utilização para efeitos de monitorização em estruturas. Existem vários materiais com propriedades piezoelétricas passíveis de serem utilizados em sistemas de monitorização. No âmbito deste estudo, será dado um maior foco às fibras e aos materiais compósitos.

Wang e Chung [16] estudaram a possibilidade de aplicação da piezoresistividade na monitorização da fadiga de compósitos laminados à base de fibras de carbono. Para tal, realizaram ensaios cíclicos com cargas reduzidas, onde mediram as variações de resistência elétrica das amostras para cada ciclo até ocorrer a rotura por fadiga, que aconteceu perto dos 400000 ciclos de carga. Na figura 11 apresentam-se os resultados obtidos para os primeiros ciclos de carga.

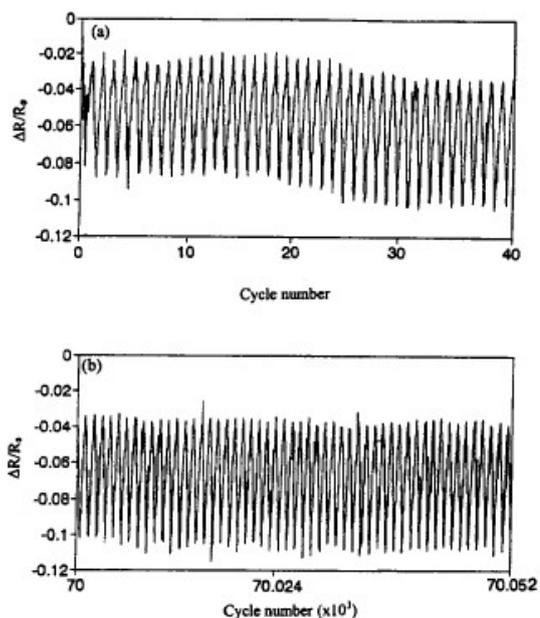


Figura 11 - Resultados dos ensaios obtidos para os primeiros ciclos de carga[16]

Da análise dos gráficos é possível perceber uma variação na resistência elétrica das amostras ao longo de cada ciclo de carga, em que o pico de resistência, bem como a resistência na ausência de carga aplicada se vão mantendo constantes, provando que o compósito laminado à base de fibras de carbono utilizado nos ensaios tem excelente potencial de monitorização. Na figura 12 pode ver-se os resultados para ciclos mais avançados, correspondendo a 55% da fadiga do material.

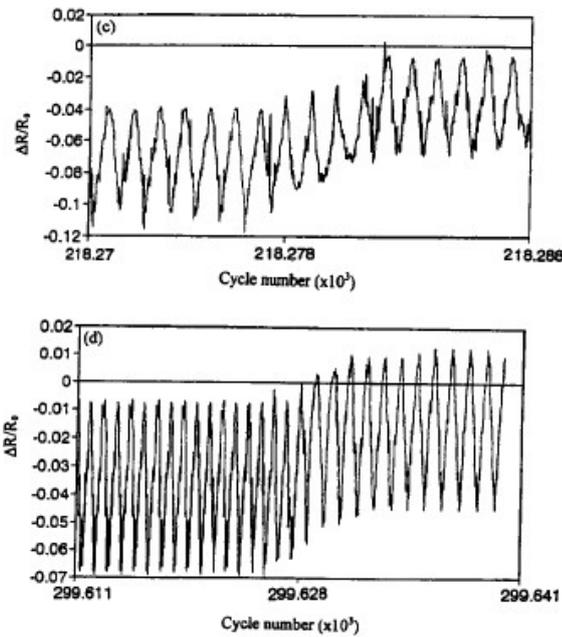


Figura 12 – Resultados dos ensaios obtidos para os ciclos avançados[16]

Da análise dos gráficos da figura 12 pode verificar-se um súbito aumento da resistência de pico e na resistência na ausência de carga, indicando o início da quebra das fibras na amostra devido à fadiga. Estas variações não ocorrem continuamente de ciclo para ciclo, mas sim em patamares. Na figura 13 podemos ver os resultados para os últimos ciclos antes da rotura por fadiga.

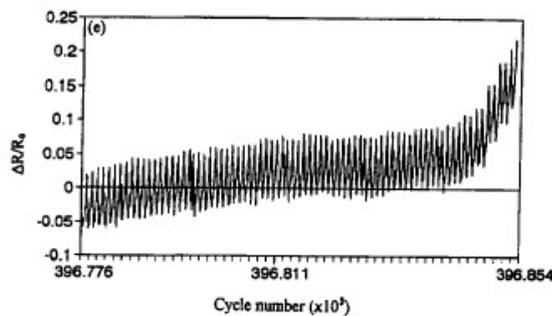


Figura 13 - Resultados do ensaio para os últimos ciclos de carga[16]

À medida que se aproxima da rotura, as resistências de pico, e na ausência de carga, vão aumentando gradualmente e irreversivelmente devido a sucessivas quebras nas fibras do compósito. A rotura por fadiga é finalmente atingida, sendo perceptível um aumento abrupto das resistências medidas na figura 13. Este estudo conseguiu demonstrar as possibilidades de monitorização em tempo real do estado de fadiga de compósitos de fibra de carbono de

matriz polimérica. As variações de resistência elétrica e o comportamento do material ao longo dos ciclos permitiu ter uma indicação progressiva do tempo de vida do compósito, sendo possível prever com exatidão a sua rotura.

Irving e Thiagarajan[17] exploraram as possibilidades de utilização deste tipo de monitorização, nomeadamente através de materiais fibrosos à base de carbono. Estes materiais revelaram-se como potencialmente eficazes para aplicação em sistemas de monitorização, pois as suas propriedades piezo-resistivas permitiram estabelecer uma relação entre a resistência elétrica e a carga aplicada/deformação. Este é um sistema que tenta potenciar as propriedades de resistência/condução elétrica dos materiais, e é consequentemente vulnerável às condições ambientais da envolvente onde está aplicado, que podem interferir diretamente nos valores de resistência elétrica medidos e diminuir a sua fiabilidade para efeitos de monitorização, com especial relevância para ambientes húmidos/aquosos.

Fangueiro e Pereira[18] desenvolveram um tipo de varão em material compósito, com capacidade de monitorização, com a vantagem de ser imune à corrosão. O objetivo do estudo foi testar o potencial de diferentes composições do núcleo dos varões para aplicação em monitorização de estruturas de betão. Para tal, foram produzidos varões com diferentes percentagens de fibras de carbono no seu núcleo, segundo os dados apresentados no quadro 1. O quadro 2 apresenta as dimensões dos varões compósitos produzidos.

Quadro 1 - Composição dos varões compósitos produzidos[18]

Varão	Composição	% Fibra	Rovings	Massa Linear (tex)
BCR2	Vidro-E/Carbono	77/23	18/3	1600/900
BCR2	Vidro-E/Carbono	53/47	53/47	900
BCR4	Carbono	100	12	900

Quadro 2 - Dimensões dos varões compósitos produzidos[18]

Tipo de Varão	Diâmetro (mm)	Massa Linear (g/m)
BCR2 (Vidro-E 77%, Carbono 23%)	5,66	36,16
BCR3 (Vidro-E 53%, Carbono 47%)	5,80	39,89
BCR4 (Carbono 100%)	6,40	40,47

Na figura 14 pode ver-se um pormenor da secção transversal dos três tipos de varões produzidos. São perfeitamente perceptíveis as diferenças de cor e de textura, que permitem distinguir claramente as fibras de carbono e as fibras de vidro-E.

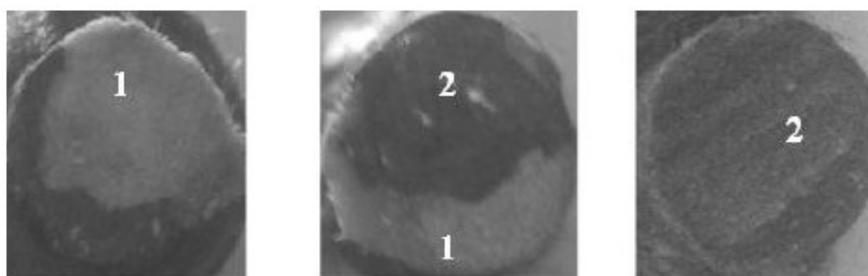


Figura 14 - Secções transversais dos varões compósitos entrançados; 1-Fibra de Vidro 2-Fibra de Carbono [18]

O procedimento de teste utilizado para os BCR's baseou-se em medições da resistência elétrica aquando da aplicação de deformações cíclicas através de um ensaio flexão de três pontos. Para tal, foram colocados nas extremidades de cada varão dois fios condutores ligados com tinta de prata, que se encontravam ligados a um multímetro digital para registo das variações de resistência elétrica, enquanto a deformação dos varões era aplicada com o equipamento Autograph IS (Shimadzu) 500N, conforme mostra a Figura 15.

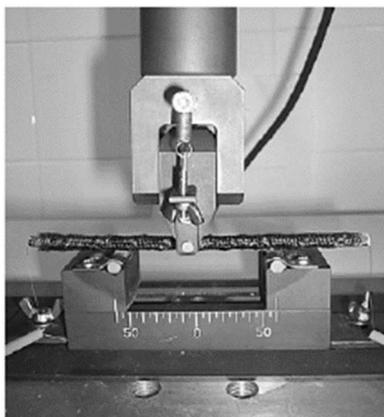


Figura 15 - Equipamento utilizado nos ensaios[18]

No Quadro 3 pode observar-se alguns dos parâmetros de ensaio utilizados.

Quadro 3 - Parâmetros do ensaio de flexão[18]

Parâmetro	Valor
Nº de Ciclos	4
Célula de Carga	500 N
Distância entre apoios	60 mm
Limite de deslocamento	0,5 mm
Velocidade de deslocamento	0,3 mm/min
Intervalo de amostragem	500 ms

Os ensaios realizados mostraram dois tipos de comportamento distintos, obtidos para a relação entre as medições de resistência elétrica e deformação que resultaram do ensaio de três pontos. As Figuras 16 e 17 apresentam dois exemplos dos resultados obtidos.

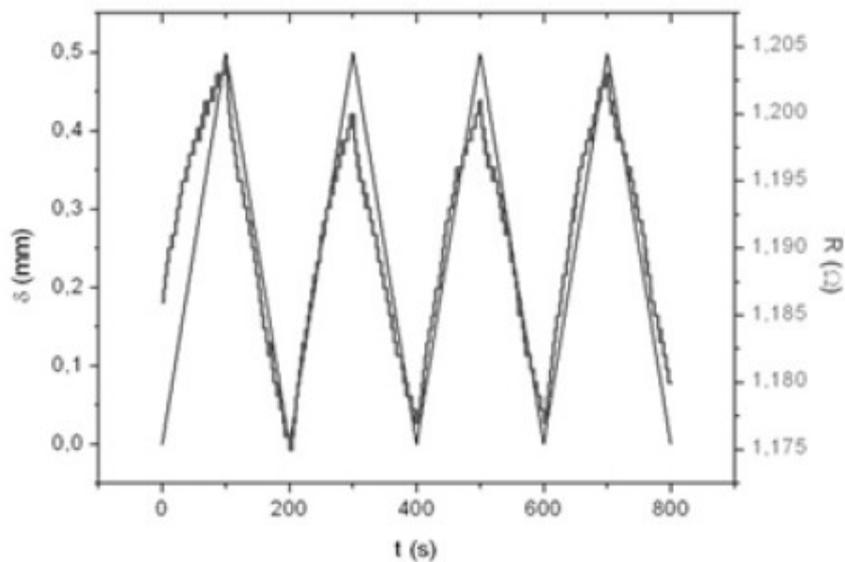


Figura 16 - Variação do deslocamento e resistência elétrica com o tempo, BCR4 (100% Carbono)[18]

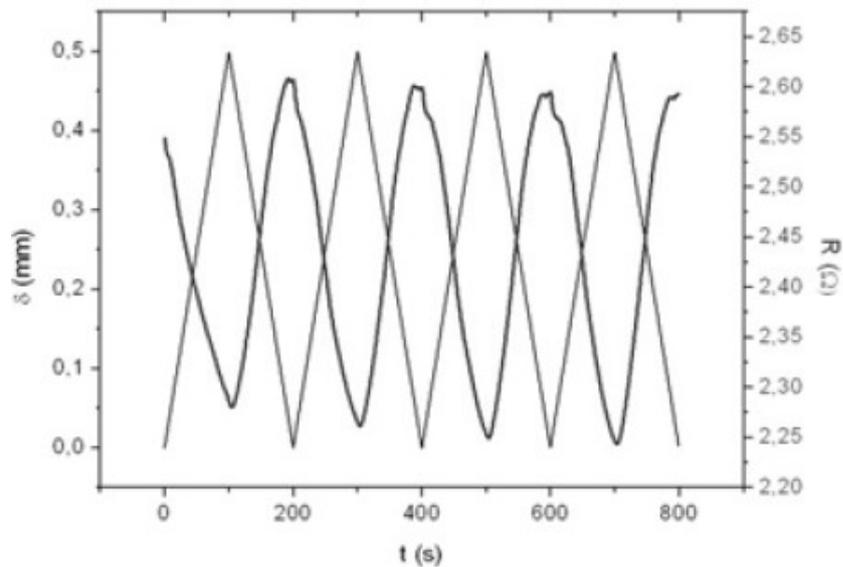


Figura 17 - Variação do deslocamento e resistência elétrica com o tempo, BCR2 (77% Vidro-E, 23% Carbono)[18]

A Figura 16 mostra um aumento da resistência elétrica quando aumenta o deslocamento (comportamento positivo), enquanto que a Figura 17 evidencia uma diminuição da resistência elétrica da amostra quando o deslocamento aumenta (comportamento negativo). É também perceptível que, de um modo geral, o aumento de resistência elétrica durante os ciclos de carga e descarga é linear para deslocamentos baixos e apresenta não-linearidade para valores de deslocamento mais elevados. No caso da amostra com resposta negativa, a linearidade é menos evidente, embora seja possível, para ambos os tipos de resposta, estabelecer uma relação clara entre os deslocamentos aplicados e a variação de resistência elétrica[18].

O fator determinante para o tipo de resposta observado para cada amostra foi o arranjo das fibras e da resina ao longo dos varões, mais propriamente o posicionamento das fibras de carbono ao longo do comprimento do varão. Conforme foi possível verificar na Figura 14, que mostra as secções transversais dos varões, a distribuição das fibras não é uniforme ao longo da secção transversal, não o sendo também ao longo do comprimento do varão. Nestes casos, os varões apresentaram resposta positiva (resistência elétrica aumentou com o aumento da deformação) quando as fibras estavam na parte tracionada do varão durante o ensaio, e resposta negativa quando as fibras estavam presentes na parte comprimida[18].

Com os resultados dos ensaios foi possível também fazer uma análise das capacidades de monitorização através do cálculo do Gauge Factor, bem como dos quadrados das regressões lineares, que representam as tendências das curvas de variação de resistência elétrica obtidas. No quadro 4 pode verificar-se os valores médios de cada amostra obtidos para os ciclos de carga e descarga.

Quadro 4 - Cálculo do Gauge Factor e das linhas de tendência lineares[18]

Tipo de Varão	Gauge Factor		R ²	
	Carga	Descarga	Carga	Descarga
BCR2	0,58100	0,46312	0,98965	0,99602
	0,09554	0,12951	0,95651	0,97279
	-0,28869	-0,34058	0,99218	0,97288
BCR3	0,16095	0,15806	0,98918	0,99668
	0,03847	0,07018	0,98339	0,98172
	-0,14084	-0,16380	0,93925	0,96892
BCR4	0,03581	0,03702	0,97118	0,99305
	-0,07451	-0,07684	0,99448	0,98699

O valor do gauge factor, função da sensibilidade dos varões às deformações, mostra o comportamento de cada amostra durante o ensaio. Dos valores do quadro anterior consegue-se notar uma certa influência da percentagem de carbono no comportamento dos varões compósitos. O valor do Gauge Factor para o varão com 23% de Carbono é quase três vezes superior ao do varão com 47% de Carbono. Este, por sua vez, apresenta um gauge factor quase cinco vezes maior que o valor do varão compósito com 100% de fibra de carbono, sendo possível concluir que a capacidade de monitorização dos varões varia com a percentagem de fibra de carbono utilizada na sua composição, sendo que uma diminuição da percentagem de fibra de carbono leva a uma maior sensibilidade do varão para efeitos de monitorização.

Mais recentemente foi feito um estudo (Fernandes, 2015)[19] em que foram testadas percentagens de carbono mais baixas no núcleo dos varões compósitos. No quadro 5[19] pode verificar-se as propriedades de composição dos varões utilizados neste estudo:

Quadro 5 - Composição e diâmetros dos varões compósitos produzidos para ensaio[19]

Varão	Vidro-E (%)	Carbono (%)	Diâmetro (mm)
BCR1	100	0	6,40
BCR2	95	5	6,15
BCR3	90	10	6,00
BCR4	85	15	6,00

Os resultados deste estudo revelaram uma sensibilidade maior nos varões compósitos com 5% de fibra de carbono na composição do seu núcleo. Para estas amostras, os gráficos que correlacionam a deformação e a variação de resistência elétrica demonstraram uma resposta bastante boa às deformações, sendo claramente possível distinguir um aumento/redução de resistência elétrica nas amostras influenciado pelas condições de deformação[19]. A figura 18 mostra um exemplo de um gráfico para uma amostra com 5% de fibra de carbono, cujo ensaio deu uma resposta negativa.

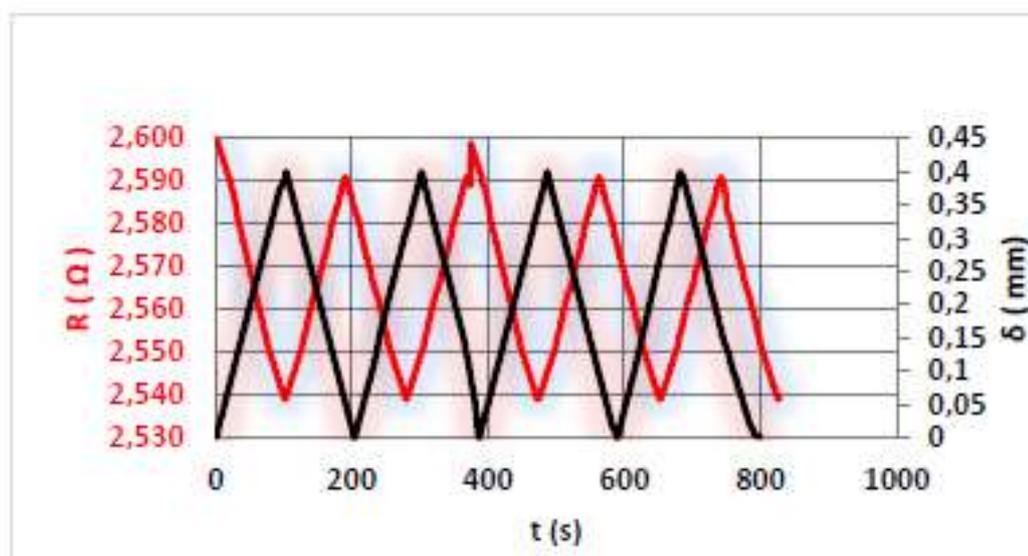


Figura 18 - Relação entre a deformação e a variação de resistência elétrica - BCR 5% de Fibra de Carbono[19]

No quadro 6 pode ver-se um resumo dos valores médios dos resultados em termos de fator de sensibilidade e linha de tendência obtidos para todas as tipologias de varão compósito.

Quadro 6 - Fatores de sensibilidade e linhas de tendência[19].

Tipologia	Ciclo	1		2		3		4	
	Fibra de Carbono %	GF	R ²	GF	R ²	GF	R ²	GF	R ²
BCR1	0	0	-	0	-	0	-	0	-
BCR2	5	3,053	0,96875	3,325	0,9899	3,737	0,9658	3,523	0,9876
BCR3	10	2,1375	0,8935	2,077	0,88	2,1435	0,8767	2,1235	0,8768
BCR4	15	1,2795	0,574	1,204	0,594	1,316	0,5866	3,185	0,7963

Da análise do quadro 6 é possível notar as diferenças de comportamento das diferentes composições dos varões compósitos. Tanto o Gauge Factor (fator de sensibilidade), como as linhas de tendência sobem com a diminuição da percentagem de fibra de carbono. As amostras de BCR1 (100% fibra de vidro) não demonstraram qualquer resposta às deformações aplicadas por não terem na sua composição nenhum elemento condutor. Face a estes resultados, concluiu-se que das composições testadas a que apresentava melhor sensibilidade e por conseguinte melhor capacidade de monitorização é a BCR2 (5% de fibra de carbono, 95% de fibra de vidro-E)[19].

2.4 Materiais Fibrosos

As fibras são materiais que, de acordo com a sua proveniência, podem ser divididos em duas grandes classes, naturais e não-naturais. As fibras não-naturais foram desenvolvidas com o objetivo de melhorar várias propriedades importantes, quando relacionadas com as fibras naturais. As fibras de carbono, importantes para este estudo, são classificadas como fibras não-naturais e inorgânicas, de acordo com a Figura 19.

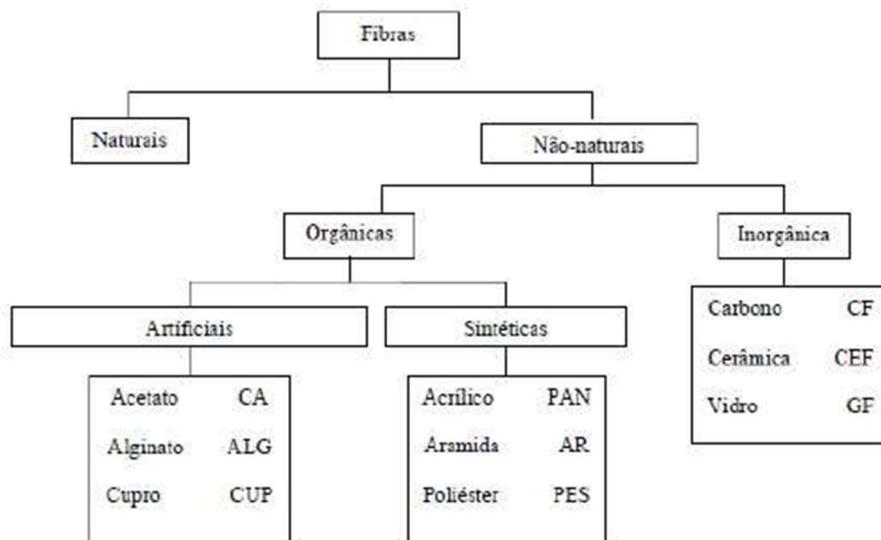


Figura 19 - Classificação dos diferentes tipos de fibras[20]

2.4.1 Fibras de Vidro

No domínio dos materiais compósitos, as fibras de vidro são as mais utilizadas devido essencialmente a propriedades como a elevada resistência e módulo de elasticidade, bem como o baixo custo de obtenção e aplicação[21].

De entre os vários tipos de fibras de vidro, contam-se o vidro-E, vidro-S, vidro-C e vidro-AR. As fibras de vidro-E são correntemente mais utilizadas que as fibras de vidro-S, devido ao seu custo reduzido. As fibras vidro-AR são especialmente preparadas para resistirem a agentes alcalinos, o que ajuda a prevenir a corrosão[21].

O módulo de elasticidade das fibras de vidro e a sua deformação na rotura fazem das fibras de vidro um excelente material de reforço, sendo também um material com uma boa estabilidade dimensional e uma boa resistência química, que o torna compatível com a maior parte das matrizes utilizadas em materiais compósitos[22].

No caso dos materiais compósitos, os tipos de fibras de vidro mais utilizados são as fibras de vidro-E e vidro-C, pois apresentam melhores propriedades de resistência química e mecânica. No quadro 7 são apresentadas as composições de diferentes tipos de fibras de vidro[23].

Quadro 7 - Composições de diferentes tipos de fibras de vidro[23]

Composição (%)	Vidro-E	Vidro-C	Vidro-A	Vidro-S	Vidro-R
SiO ₂	55,2	64,5	71,8	65	60
Al ₂ O ₃	14,8	4	1	25	25
B ₂ O ₂	7,3	5	-	-	-
MgO	3,3	3	3,8	10	6
CaO	18,7	14	8,8	-	9
Na ₂ O	0,3	8,5	13,6	-	-
K ₂ O	0,2	-	0,6	-	-
Fe ₂ O ₃	0,3	0,3	0,5	-	-
F ₂	0,3	-	-	-	-

No Quadro 8 são apresentadas as propriedades físicas mais importantes dos diferentes tipos de fibras de vidro.

Quadro 8 - Propriedades físicas dos diferentes tipos de fibra de vidro[24]

Propriedade/Tipo	Vidro-E	Vidro-C	Vidro-A	Vidro-S	Vidro-R
Densidade (g/cm ³)	2,58	2,52	2,44	2,46	2,54
Tensão de Rotura (MPa)	3445	3310	3310	4890	4135
Módulo de Young (GPa)	72,3	68,9	68,9	86,9	85,5
Extensão na rotura (%)	4,8	4,8	4,8	5,7	4,8

2.4.2 Fibras de Carbono

A fibra de carbono é um material filamentosos, com uma constituição de cerca de 90% de carbono, sendo que o termo “fibra de carbono” refere-se a uma variedade de produtos compostos na sua maioria por carbono, produzidos utilizando precursores como a poliacrilonitrila (PAN), alcatrão ou viscoso (rayon)[21].

As fibras de carbono foram os primeiros materiais utilizados para aumentar a rigidez e a resistência de materiais compósitos avançados leves, com aplicações comuns nos campos da aeronáutica, engenharia e aplicações industriais. Devido ao facto de apresentarem elevados valores de resistência à tração e módulo de elasticidade, características que preserva em situações de aumento de temperatura, quando comparados com outros materiais utilizados em engenharia, são predominantemente utilizadas em aplicações que envolvem redução de

massa[25]. No Quadro 9 são apresentadas algumas propriedades importantes das fibras de carbono:

Quadro 9 - Propriedades das Fibras de Carbono[25],[26]

Propriedades das Fibras de Carbono	
Diâmetro	7,0 – 9,7 μm
Massa Volúmica	$1,95 \times 10^3 \text{ Kg m}^{-3}$
Módulo de Young	390 GPa
Resistência à tração	2,2 GPa
Deformação na rotura	0,5 %
Resistividade elétrica	$5.00 \times 10^{-4} - 8.00 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$
Condutividade elétrica	$1.25 \times 10^3 \text{ to } 2 \times 10^3 \text{ S/m}$

Apesar de os primeiros registos da produção de fibras de carbono datarem do final do século XIX, o fabrico deste material para fins comerciais apenas se iniciou em meados do século XX, impulsionado pelos avanços ocorridos nas indústrias bélicas e aeronáuticas.

Embora o processo de fabrico das fibras de carbono varie consoante o precursor utilizado, pode-se, de um modo geral, estabelecer uma primeira etapa onde é feita a preparação do elemento precursor. Em seguida, na fase de fiação, o precursor é transformado em fibra com diâmetro reduzido à saída da fieira. Segue-se o processo de estabilização, onde as fibras do material precursor são oxidadas a temperaturas que rondam os 200°C , de maneira lenta e controlada, de modo a endurecê-las e a fixar a orientação das moléculas. Na fase seguinte, a temperatura é elevada a valores próximos dos 1600°C para permitir a carbonização do material em atmosfera inerte, com uma estrutura baseada na grafite. Nos casos em que seja necessário, as fibras podem ser aquecidas a temperaturas superiores a 2500°C , o que provoca um aumento do grau da estrutura gráfica. Na Figura 20 podemos ver um exemplo de apresentação de um roving de fibra de carbono após produção.



Figura 20 - Roving de Fibra de Carbono[25]

2.4.3 Fibras de Aço

Uma das aplicações das fibras de aço na construção civil é no reforço do betão[27]. Para esse efeito, a mistura de betão é completada com a adição de fibras de vários tipos, entre os mais comuns as fibras de aço, vidro e carbono[27]. No caso das fibras de aço, este tipo de reforço já é bastante utilizado em estruturas com elevadas cargas de utilização, como edifícios industriais ou túneis[28]. As vantagens deste sistema estão relacionadas com aspetos como o aumento de resistência do betão, mas também com o aumento da ductilidade e com a melhoria do comportamento de fendilhação do betão[28]. Na figura 21 podemos ver uma comparação entre o diagrama tensão-extensão do betão convencional e do betão reforçado com fibras de aço, onde se verifica uma resistência significativamente maior do betão reforçado:

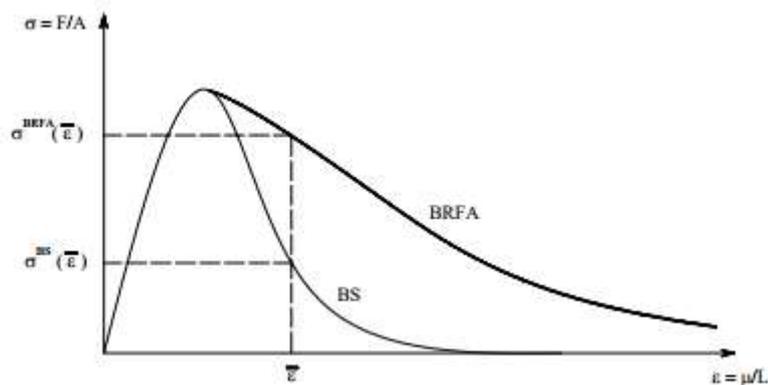


Figura 21 - Diagrama tensão-extensão. BS - Betão Simples. BRFA - Betão reforçado com fibras de aço[28].

No quadro 10 podemos as propriedades mais importantes das fibras de aço utilizadas no reforço do betão.

Quadro 10 - Propriedades mecânicas das fibras de aço utilizadas como reforço[29].

Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na rotura (%)
5 – 500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5

2.5 Varões Entrançados em Material Compósito

Os recentes avanços no domínio da tecnologia, provocaram uma mudança nos requisitos esperados aos diferentes materiais, motivando o aparecimento e desenvolvimento dos materiais compósitos. Parte do seu sucesso reside na facilidade de obtenção e aplicação das técnicas de produção, cujo objetivo passa sempre por melhorar propriedades como a forma, massa, rigidez, durabilidade e custos, entre outras. Assim sendo, uma aposta crescente no desenvolvimento deste tipo de materiais terá sempre como mote o melhoramento destas propriedades[30].

Os compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais componentes com propriedades e estruturas diversas, separados por uma interface clara entre eles[31]. O objetivo principal do fabrico destes materiais, é obter materiais com propriedades distintas, que não se conseguem obter através dos componentes isolados. São constituídos por uma fase de reforço, constituída por fibras, partículas ou folhas, dispersas numa matriz, ou fase contínua[31]. As propriedades deste tipo de materiais dependem da natureza dos componentes utilizados, bem como do grau de ligação entre eles, através da interface. Os materiais compósitos podem ser divididos em três tipos: particulados, reforçados com fibras e estruturais, conforme mostra a figura 22.

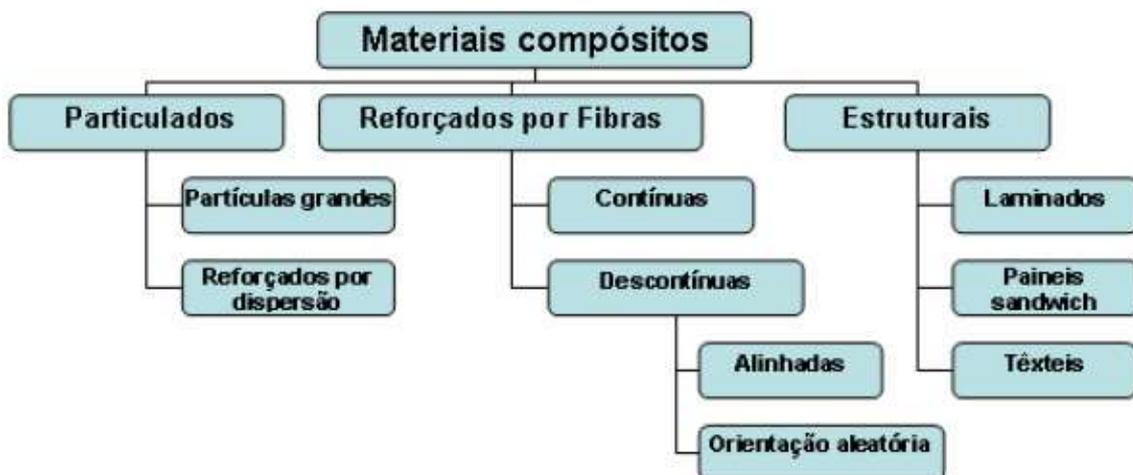


Figura 22 - Diferentes Classificações dos materiais compósitos[32]

Os materiais compósitos particulados podem ser constituídos por fragmentos de elevadas dimensões como as borrachas e o betão, ou podem ser reforçados através de dispersões.

Os materiais compósitos reforçados por fibras mais comuns são as fibras de carbono em matrizes de polímeros e as fibras de vidro em matrizes epóxicas ou poliéster. As fibras de vidro em matriz epóxida ou de poliéster e as fibras de carbono em matrizes poliméricas de diversos tipos são os compósitos reforçados com fibras mais utilizados nos dias que correm[31].

Os materiais compósitos estruturais são constituídos por materiais homogêneos e por compósitos com propriedades dependentes da orientação relativa dos componentes. Deste modo, os laminados (ex. contraplacado de madeira), os painéis Sandwich e os têxteis são exemplos destes tipos de materiais compósitos.

A matriz de um material compósito deve garantir as seguintes funções[32]:

- Proteção das fibras do meio envolvente;
- Garantir a coesão das fibras;
- Proteção das fibras de danos durante o manuseamento;
- Distribuir o carregamento pelas fibras;
- Redistribuir o carregamento pelas fibras resistentes em caso de rotura;

Os materiais mais comuns utilizados como matriz em materiais compósitos são os polímeros (termoplásticos e termoendurecíveis), os metais, os materiais cerâmicos e o carbono. Os materiais compósitos de matriz polimérica surgiram, na sua vertente estrutural, em meados do século XX. Este tipo de material combina fibras de elevada rigidez e resistência (fibras de vidro, carbono ou aramida), com matrizes plásticas macias e relativamente dúcteis (poliéster ou resina epóxida). No quadro 11[31] apresentam-se algumas propriedades relevantes para os materiais da matriz.

Quadro 11 - Propriedades importantes dos materiais da matriz[31].

Propriedades Mecânicas	Resistência à tração Resistência ao corte Resistência ao impacto Ductilidade Tenacidade
Propriedades Térmicas	Resistência a temperaturas extremas Coeficiente de dilatação térmica próximo do da fibra Baixa condutividade térmica
Propriedades Químicas	Boa adesão às fibras

	Resistência à degradação em ambientes quimicamente agressivos Baixa absorção de humidade
Outras propriedades	Baixo custo; Solidificação ou cura rápidas

No final da década de 80, e com o objetivo de solucionar questões relacionadas com a corrosão e humidade, entre outras, foi feita uma aposta no desenvolvimento de varões compósitos por estes se revelarem como uma alternativa viável às armaduras tradicionais[33]. Os primeiros varões compósitos, produzidos pela técnica de pultrusão, eram constituídos por fibras de vidro e materiais resinosos, tais como o poliéster e o viniléster. Com os avanços da tecnologia e novos estudos efetuados na área dos materiais compósitos, foi desenvolvida uma solução baseada numa estrutura entrançada para os varões composta por fios de fibras de aramida entrançados sobre um núcleo cilíndrico. Na figura 23 é possível observar a estrutura entrançada do varão compósito.

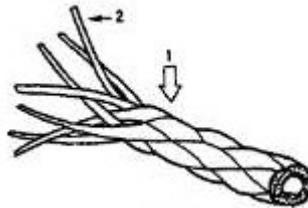


Figura 23 - Estrutura entrançada do varão compósito[33].

O objetivo do entrançamento com núcleo cilíndrico passa por obter um comportamento elástico no varão, e após o pico um comportamento dúctil.

2.5.1 BCR's (Braided Composite Rods)

A indústria da construção tem lidado constantemente com problemas de deterioração das estruturas de betão armado. Este tipo de estruturas, sujeitas a vários carregamentos e condições ambientais agressivas, sofrem problemas de desgaste e perda de propriedades mecânicas que afetam a sua durabilidade, sendo a corrosão das armaduras o problema mais comum. Algumas das soluções convencionais para contornar este problema, tais como a utilização de aços inoxidáveis ou galvanizados, ou a proteção através de tintas epóxicas,

revelaram-se insuficientes ou pouco eficazes. No domínio dos varões compósitos, para além da técnica de pultrusão no fabrico deste tipo de varões, pode também optar-se pelo processo de entrançamento[34].

O entrançamento é uma técnica de baixo custo, que permite obter varões com uma vasta gama de propriedades mecânicas, passíveis de serem melhoradas do tipo de fibra de reforço a utilizar no núcleo do varão. A Figura 24 apresenta um esquema simplificado do processo de entrançamento.

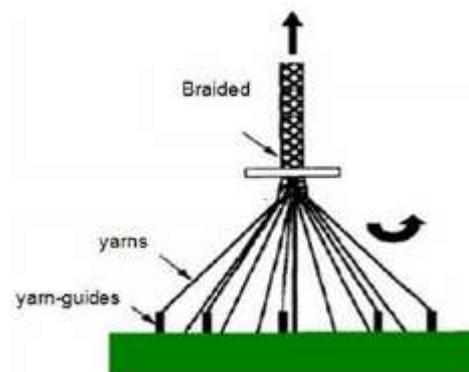


Figura 24 - Processo de entrançamento[34]

As utilizações mais comuns dos varões compósitos entrançados (BCR's), são o reforço de elementos de betão (vigas, pilares e lajes) e a estabilização de solos (pregagens e ancoragens). As características principais dos BCR's são[34]:

- Não sofre corrosão;
- Permite a monitorização de estados de tensão através de ensaios não-destrutivos;
- Elevado rácio desempenho/custo;
- Elevada durabilidade;
- A sua utilização permite diminuir as necessidades de reabilitação das estruturas;
- Baixos custos de fabrico, manuseamento, transporte e aplicação em obra;

C. Gonilho Pereira, et al (2008)[34], estudaram as potencialidades dos varões compósitos entrançados como substitutos dos varões de aço tradicionais. A estrutura entrançada foi produzida com fibra de poliéster, e o reforço foi feito de fibras de vidro-E, fibras de carbono

e polietileno de alta tenacidade. Neste estudo foram produzidos sete tipos de varões entrançados, com diferentes composições de fibras de reforço (Quadro 12)[34], de modo a perceber a influência dos materiais utilizados no comportamento mecânico dos varões.

Quadro 12 - Composições do reforço da estrutura entrançada para cada varão[34].

Varão	Vidro-E [%]	Carbono [%]	Polietileno de alta tenacidade [%]
1	100	-	-
2	77	23	-
3	53	47	-
4	-	100	-
5	50	45	5
6	52	45	3
7	75	22	3

O desempenho dos varões compósitos entrançados produzidos foi avaliado com recurso a um ensaio de tração uniaxial, realizado após a aplicação de uma carga de 50kN aos varões. O quadro 13 apresenta os resultados dos ensaios com os valores encontrados para cada varão:

Quadro 13 - Resultado dos ensaios de tração uniaxial para cada varão[34]

Varão	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão na Rotura	Tensão de Rotura a 0,2% de extensão [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]
1	485,35	0,01701	110,73	55,36
2	766,70	0,01416	157,05	78,52
3	740,41	0,01178	148,96	74,48
4	747,77	0,01183	192,58	96,29
5	679,45	0,01105	167,84	83,92
6	652,77	0,01098	162,17	81,09
7	690,99	0,01438	146,40	73,20

Da análise do Quadro 13 pode verificar-se que o varão 2 (77% Vidro-E, 23% Carbono) é o que apresenta maior capacidade de carga. Os varões 3 (53% Vidro-E, 47% Carbono) e 4 (100% Carbono) apresentam uma tensão de rotura ligeiramente inferior, enquanto que o varão 1 (100% Vidro-E) é o que apresenta a tensão de rotura mais baixa.

Em termos de extensão na rotura, o varão 1 (100% Carbono) apresenta o valor mais elevado, enquanto que o varão 6 (52% Vidro-E, 45% Carbono, 3% Polietileno) apresenta o valor mais baixo.

O interesse da determinação da tensão a 0,2% de extensão para os varões compósitos entrançados prende-se com o facto de que a tensão de cedência do aço define-se como a tensão que provoca extensões de 0,2%. Neste parâmetro, o varão 4 (100% Carbono) apresenta a tensão mais elevada, enquanto o varão 1 (100% Vidro-E) apresenta a tensão mais baixa.

Finalmente, no que diz respeito ao módulo de elasticidade, o varão 4 (100% Carbono) é o que apresenta o valor mais elevado, enquanto que o varão 1 (100% Vidro-E) apresenta o valor mais baixo.

Com os valores determinados em ensaio, foi possível estabelecer uma comparação com as propriedades mecânicas de alguns tipos de aço usados correntemente na construção, conforme podemos verificar no Quadro 14[34]:

Quadro 14 - Resultados dos Ensaios/Comparação com o aço corrente[34]

Varão	Tensão de Rotura [MPa]	Tensão de Cedência / Tensão à extensão de 0,2% [MPa]	Tensão de Rotura a 0,2% de extensão [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]
1	485,35	-	110,73	55,36
2	766,70	-	157,05	78,52
3	740,41	-	148,96	74,48
4	747,77	-	192,58	96,29
5	679,45	-	167,84	83,92
6	652,77	-	162,17	81,09
7	690,99	-	146,40	73,20
A235 NL	360	235	-	210
A400 NR/ER	460	400	-	210
A500 NR/ER	550	500	-	210

Fazendo a comparação entre os varões compósitos entrançados e os varões de aço, verificamos que a tensão de rotura à tração é superior em todos os varões compósitos, exceto no varão 1, reforçado apenas com fibra de Vidro-E, em que a tensão de rotura é inferior à tensão de rotura do aço A500 NR/ER. Avaliando o módulo de elasticidade, e a tensão a 0,2% de extensão, verificamos que os valores dos varões compósitos são inferiores aos valores do aço corrente.

Este estudo permitiu concluir que as propriedades mecânicas dos varões compósitos entrançados são bastante afetadas pela composição da sua estrutura de reforço, não só em

termos do tipo de fibra utilizada, mas também pelas quantidades utilizadas e pelas diferentes percentagens adotadas na composição dos varões. Exemplo disso é o facto de os varões com comportamento mecânico mais interessante serem os que apresentam menor quantidade de fibra de Vidro-E na sua composição. Nos varões com a mesma quantidade de fibra de Vidro-E e fibra de Carbono, os que apresentam melhores propriedades são os que têm maior percentagem de polietileno de alta tenacidade[34]

2.5.2 FRP (*Fibre Reinforced Polymer*)

Sendo a reabilitação de estruturas em betão armado uma atividade em franco crescimento, as intervenções de reforço devem eficazes, devendo-se atender à simplicidade dos métodos de reforço, bem como à leveza e propriedades mecânicas e ambientais dos materiais utilizados[35]. Os FRP (*Fibre Reinforced Polymers*), materiais de matriz polimérica reforçados com fibras, bem como as técnicas utilizadas na sua aplicação, têm demonstrado elevado potencial para suprir as necessidades da indústria da construção civil[35]. Estes materiais são constituídos por uma matriz polimérica, que permite uma perfeita transferência de carga entre as fibras. A matriz polimérica serve também para resistir a tensões de corte, bem como proteger as fibras dos agentes ambientais[36]. O quadro 15 mostra algumas propriedades importantes das resinas normalmente utilizadas como matriz.

Quadro 15 - Propriedades das resinas utilizadas no reforço[35].

Resina	Módulo Elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]	Extensão na rotura [%]	Densidade [Kg/m³]
Polyester	2,1 – 4,1	20 - 100	1.0 – 6.5	1000 - 1450
Epoxídica	2,5 – 4,5	55 - 130	1.5 – 9.0	1100 - 1300

As fibras devem conferir ao FRP as propriedades mecânicas e de resistência necessárias à sua utilização como reforço estrutural. Correntemente, os tipos de fibras utilizados na produção de FRP são as fibras de vidro, carbono e aramida. Na figura 25[35] são apresentados os diagramas de tensão-extensão destes tipos de fibras, bem como de dois tipos de aço utilizados na construção.

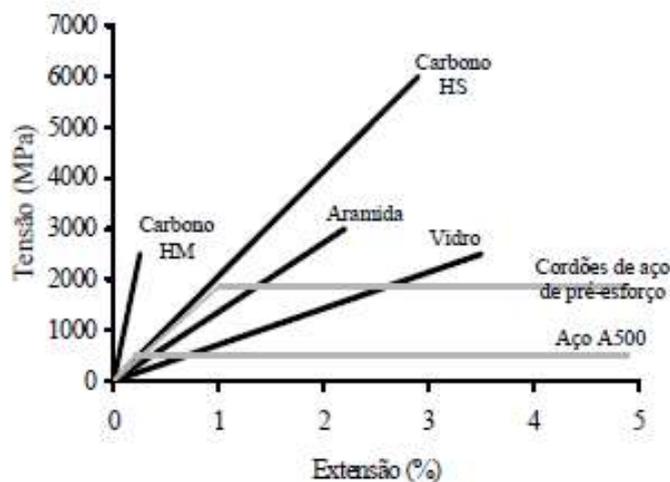


Figura 25 - Diagramas Tensão-Extensão de várias fibras e do aço convencional[35].

Os diagramas tensão-extensão indicam um comportamento superior das fibras em relação ao aço em termos de resistência. O quadro 16, mostra algumas propriedades essenciais das fibras de vidro, carbono e aramida, em comparação com o betão e o aço correntemente utilizado na construção.

Quadro 16 - Propriedades do betão, aço e das fibras utilizadas em FRP[20], [37].

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Resistência à Compressão [MPa]	Resistência à Tração [MPa]	Densidade [Kg/m ³]	Extensão na rotura (%)
Betão	20 – 40	10 – 100	1 – 5	2400	-
Aço	200 – 210	240 – 690	240 – 690	7850	-
Aramida	70 – 190	-	2800 – 4100	1370 - 1470	2,0 – 4,0
Vidro	73 – 88	-	2350 – 4600	2500	2,5 – 4,5
Carbono	200 – 400	-	2600 – 3600	1750 - 1950	0,6 – 1,5

Nos FRP aplicados à indústria da construção civil existem essencialmente dois processos de produção distintos: i) pultrusão, em que a produção se faz num cenário de linha de montagem e depois se efetua o transporte para a obra, processo que permite produzir FRP com vários tipos de secção transversal; ii) moldação manual, em que os produtos podem ser produzidos em fábrica, ou diretamente na obra[36].

Em termos de aplicações correntes, os produtos FRP são utilizados como: i) armadura de reforço do betão (interior); ii) reforço ou reparação de elementos estruturais (exterior); iii) estruturas mistas; iv) estruturas totalmente compósitas[36].

Um exemplo da aplicação prática dos produtos FRP em obras de engenharia são as pontes e viadutos, tanto no reforço dos tabuleiros e elementos de pontes novas, como utilizado na reabilitação de pontes antigas. Esta implementação revelou-se um sucesso face às excepcionais características dos produtos FRP em termos de resistência ambiental e fatores económicos[36]. Na figura 26 podemos ver algumas aplicações de FRP em pontes. A figura 27 mostra a aplicação de um laminado de FRP como reforço de um pilar de um viaduto.



Figura 26 - Aplicação de FRP no tabuleiro de uma ponte[36].



Figura 27 - Aplicação de FRP para reforço/reabilitação de pontes[36].

No que toca à reabilitação de edifícios correntes, sejam eles de betão, aço, pedra ou madeira, os produtos FRP são utilizados como reforço sendo aplicados de duas maneiras distintas: i) colagem exterior, designada por EBR (*Externally Bonded Reinforcement*); ii) colagem num rasgo na superfície do elemento, designada por NSR (*Near-Surface Mounted Reinforcement*). A escolha de um método de reforço sobre outro, depende do tipo de

reforço que se pretende efetuar[38]. Nas figuras 28 e 29 podemos ver a aplicação das duas técnicas anteriormente enunciadas.



Figura 28 - Técnica EBR com laminados[38].



Figura 29 - Técnica NSR com laminados[38].

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Processo de produção de varões entrançados em material compósito com capacidade de monitorização

Face aos objetivos do presente trabalho, houve a necessidade de produzir varões entrançados em material compósito com o propósito de testar a sua capacidade de monitorização. O grupo de investigação Fibrenamics, sediado na Universidade do Minho, desenvolveu um processo de produção de baixo custo, que utiliza a técnica de entrançamento, que permite a orientação multiaxial das fibras no plano, bem como a produção de estruturas nervuradas e a variação das propriedades mecânicas dos varões através da colocação de diferentes tipos e quantidades de fibras. O processo de produção de varões entrançados em material compósito é constituído por várias etapas. A Figura 30 apresenta um esquema do processo produtivo desenvolvido. Na figura podemos observar o sistema de colocação das fibras, que são impregnadas em resina, passando depois para a fase de entrançamento e pela câmara de cura.

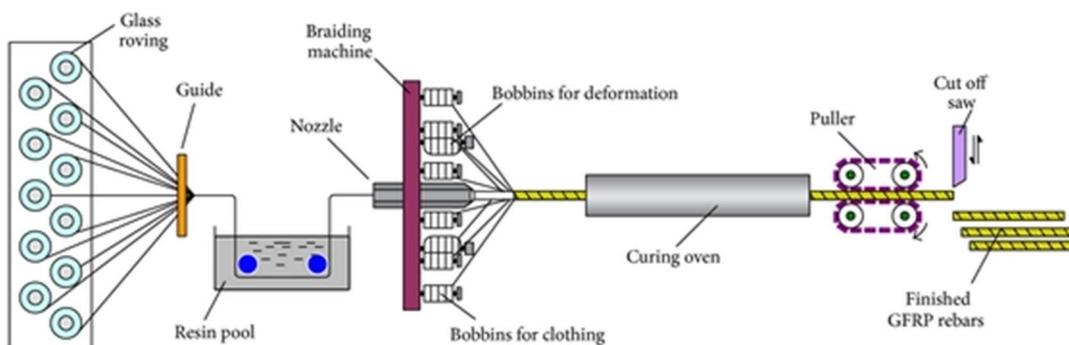


Figura 30 - Esquema do processo de produção de varões entrançados em material compósito[39].

O sistema de produção dos varões entrançados em material compósito encontra-se no Laboratório de Materiais Compósitos da Universidade do Minho.

3.1.1 Colocação das fibras

A primeira etapa da produção dos varões entrançados em material compósito é a colocação das fibras. As fibras estão colocadas em rovings, que são rolos constituídos por filamentos contínuos de fibras, cujo manuseamento deve ser bastante cuidadoso de modo a evitar a separação dos filamentos e consequente perda de propriedades mecânicas dos varões. Os rovings estão armazenados numa estante (Figura 31), e as fibras são encaminhadas através de pequenos olhais cerâmicos (Figura 32) até à fase de impregnação em resina.



Figura 31 - Rovings de fibra de vidro prontos para produção



Figura 32 - Olhais cerâmicos por onde são encaminhadas as fibras para produção dos varões

É fundamental nesta fase manter as fibras ligeiramente tensionadas, bem como evitar que sejam contaminadas com qualquer tipo de detritos ou sujidades, sob pena de a qualidade dos varões ser afetada.

3.1.2 Impregnação em resina

A segunda etapa da produção dos varões entrançados em material compósito é a impregnação das fibras em resina. As fibras entram no sistema de produção através de um sistema de olhais cerâmicos (Figura 33a). A resina está depositada num recipiente (balseiro) que contém duas barras para o encaminhamento das fibras ao longo do processo, bem como duas placas de poliestireno extrudido para limitar o volume e permitir um menor desperdício de resina (Figura 33b). Após a imersão em resina, as fibras são encaminhadas através de uma barra para a máquina de entrançamento (Figura 33c).

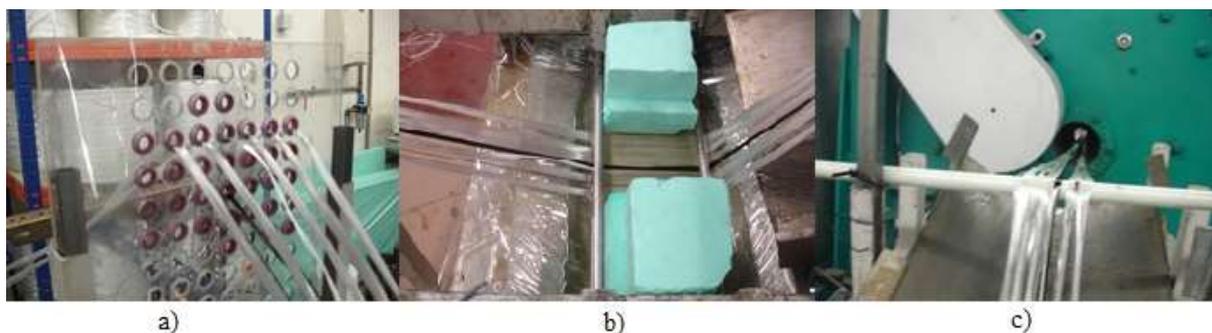


Figura 33 - a) Olhais cerâmicos para encaminhamento das fibras; b) Balseiro com resina onde são banhadas as fibras; c) Encaminhamento das fibras para o sistema de entrançamento

Devido ao facto de a resina ser um material que, após a cura, adere bastante facilmente a qualquer superfície, os recipientes que a contêm devem ser envolvidos num plástico para proteção. No final do processo de produção, as superfícies das máquinas e outros elementos cuja proteção com plástico é inconveniente, devem ser limpas com acetona.

3.1.3 Sistema de entrançamento

A terceira etapa da produção dos varões entrançados em material compósito é o entrançamento do varão. Este sistema permite conferir aos varões melhores características e propriedades mecânicas. O mecanismo consiste na utilização de uma máquina

entrançadeira (Trenz-Export modelo 40/100) que possui 40 fusos onde são montadas bobines de fio de poliéster (Figura 34). O fio é puxado até à zona onde se dá o entrançamento, onde também chegam as fibras impregnadas de resina (Figura 35).



Figura 34 - Mecanismo de entrançamento

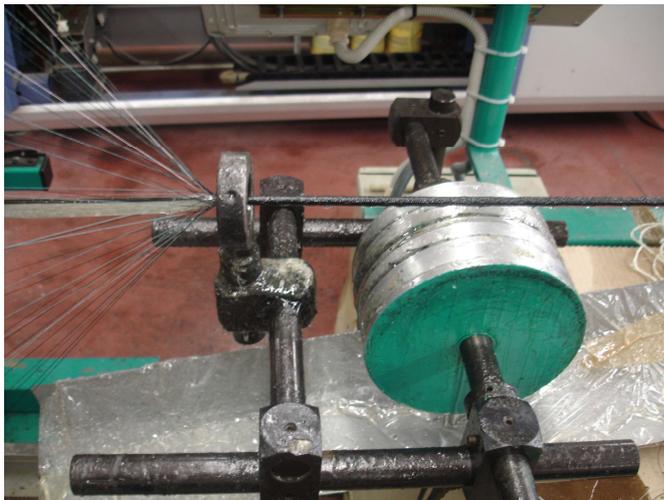


Figura 35 - Ponto de entrançamento

A compressão exercida pelos fios de poliéster nas fibras banhadas em resina durante o processo de entrançamento, faz com que o excesso de resina seja libertado. Para possibilitar o reaproveitamento da resina em excesso, existe uma chapa metálica que recolhe e encaminha a resina para um recipiente, como mostra a Figura 36.



Figura 36 - Recipiente para reaproveitamento da resina.

3.1.4 Processo de cura dos varões

A cura da resina dos varões entrançados em material compósito é processada numa estufa a uma temperatura a rondar os 170°C. A estufa é constituída por painéis sandwich contendo lã de rocha no seu interior para isolamento térmico. A fonte de calor é constituída por dois radiadores infravermelhos com 1200W de potência. A Figura 37 mostra a entrada de um varão na estufa de cura.



Figura 37 - Entrada do varão na câmara de cura, após o processo de entrançamento.

A estufa tem um controlador de temperatura na parte exterior, como apresentado na Figura 38. Deve ser dada especial atenção à temperatura de cura dos varões. Uma temperatura muito baixa pode provocar uma cura deficiente da resina, e uma temperatura demasiado

alta pode danificar a camada de entrançado, bem como queimar a resina, factos que têm consequências diretas nas propriedades dos varões.



Figura 38 - Regulador de temperatura da estufa de cura

A cura da resina a temperaturas elevadas produz vapores prejudiciais. Para além de ser aconselhável a utilização de uma máscara de proteção durante a produção dos varões, existe também um sistema de extração de fumos para o exterior.

3.1.5 Tiragem dos varões

Após a cura, os varões são puxados através de um sistema de duas roldanas pneumáticas (Figura 39) a uma velocidade constante, que deve ser regulada em conformidade com a velocidade de entrançamento, para evitar perdas de qualidade da camada exterior do entrançado, bem como a perda da tensão aplicada às fibras e consequente perda de qualidade dos varões. Tanto as roldanas pneumáticas como a entrançadeira possuem controladores de velocidade (Figura 40).



Figura 39 - Roldanas para tiragem e extração dos varões



Figura 40 - Regulador de velocidade (Sistema de tiragem e entrançamento)

3.2 Planeamento da produção dos varões entrançados em material compósito.

3.2.1 Preparação da Resina

A resina utilizada na produção dos varões foi preparada no Laboratório de Materiais Compósitos da Fibrenamics na Universidade do Minho. Este tipo de material tem uma cura

relativamente rápida, podendo ficar inutilizável até 3h após a sua preparação. Como tal foi tomada a opção de preparar uma mistura de 970g de cada vez, de modo a evitar desperdícios. Em cada mistura foram utilizadas 500g de resina epóxida Biresin CR 144, 450g de endurecedor Biresin CH 141 e 20g de catalisador Biresin CA 144. A mistura foi preparada num recipiente de plástico e os elementos foram pesados numa balança de precisão disponível no laboratório. A figura 42 mostra os produtos utilizados na preparação da resina a utilizar na produção dos varões.



Figura 41 - Produtos utilizados na preparação da resina

3.2.2 Fibras utilizadas

Na produção dos varões entrançados em material compósito foram utilizados dois tipos de fibras: Fibra de Vidro-E e Fibra de Carbono. As características das fibras utilizadas no núcleo de reforço dos varões podem ser consultadas no Quadro 17.

Quadro 17 - Características das fibras de reforço

Tipo de Fibra	Tex (g/km)	Massa Volúmica (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)
---------------	------------	-------------------------------------	------------------------------

Vidro-E	9600/1200	2,54	72
Carbono	1600/400/200	1,77	240

3.2.3 Composições dos varões

No presente estudo foram produzidos 5 tipos de varões com composições diferentes do núcleo de reforço. A percentagem de cada tipo de fibra foi variada para ser possível aferir a influência da quantidade de fibras de carbono utilizadas na capacidade de monitorização dos varões entrançados em material compósito. Nos Quadros 18, 19, 20, 21 e 22 pode ver-se as características dos 5 tipos de varões produzidos:

Quadro 18 - Características de produção: Varão tipo BCR1

BCR1	Fibras de Reforço	Tex (g/km)	Nº de mechas	V _{resina}	Φ _{varão} (mm)
	Vidro-E	9600	5		
	Vidro-E	1200	1		
	Carbono	400	3		

Quadro 19 - Características de produção: Varão tipo BCR2

BCR2	Fibras de Reforço	Tex (g/km)	Nº de mechas	V _{resina}	Φ _{varão} (mm)
	Vidro-E	9600	5		
	Vidro-E	1200	1		
	Carbono	1600	1		

Quadro 20 - Características de produção: Varão tipo BCR3

BCR3	Fibras de Reforço	Tex (g/km)	Nº de mechas	V _{resina}	Φ _{varão} (mm)
	Vidro-E	9600	5		
	Vidro-E	1200	1		
	Carbono	1600	1		
	Carbono	200	1		

Quadro 21 - Características de produção: Varão tipo BCR4

BCR4	Fibras de Reforço	Tex (g/km)	Nº de mechas	V _{resina}	Φ _{varão} (mm)
	Vidro-E	9600	5		
	Vidro-E	1200	1		
	Carbono	1600	1		
	Carbono	400	1		

	Carbono	200	1		
--	---------	-----	---	--	--

Quadro 22 - Características de produção: Varão tipo BCR5

	Fibras de Reforço	Tex (g/km)	Nº de mechas	V _{resina}	Φ _{varão} (mm)
BCR5	Vidro-E	9600	5	40%	6,09
	Vidro-E	1200	1		
	Carbono	1600	1		
	Carbono	400	2		
	Carbono	200	1		

3.3 Preparação das amostras para ensaio

Após a produção dos varões foi necessário prepará-los para os ensaios a realizar. Para cada tipologia produzida, foram cortadas com o auxílio de uma serra de fita várias amostras com cerca de 20cm de comprimento, para a realização de ensaios de flexão. Na figura 42 mostra-se o aspeto das amostras após o corte.



Figura 42 - Aspeto dos varões após o corte.

3.3.1 Preparação para a leitura de resistência elétrica.

Sendo o objetivo deste estudo aferir sobre as capacidades de monitorização dos varões entrançados em material compósito através das variações de resistência elétrica, os provetes devem ser preparados para que se possa efetuar uma leitura da resistência elétrica aquando dos ensaios de carga. Para tal efeito, foram utilizados fios de cobre ligados às duas extremidades de cada varão através de uma tinta condutora da marca *Bare Conductive*, conforme se mostra na figura 43.



Figura 43 - Tinta condutora utilizada na preparação dos ensaios.

Antes da aplicação da tinta, as superfícies das extremidades dos varões foram tratadas suavemente com uma lixa, de modo a remover as sujidades existentes e promover um contacto melhor entre a fibra de carbono dos varões e o fio de cobre. Após a aplicação da tinta, utilizou-se uma manga termoretrátil para estabilizar o fio na posição correta. Na figura 44 ilustra-se um pormenor da ligação dos fios e da aplicação da tinta.

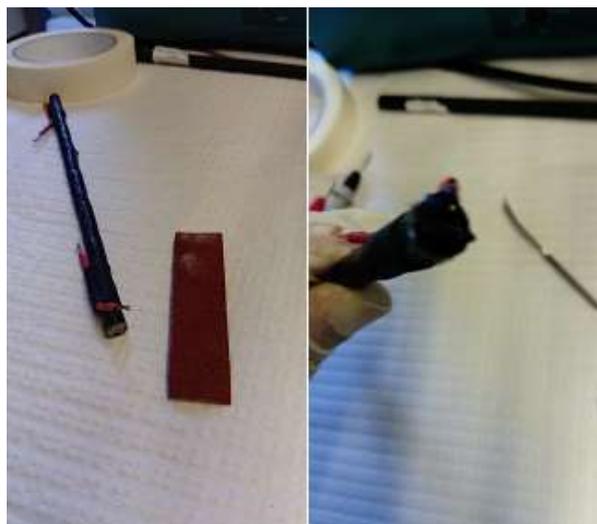


Figura 44 - Pormenor da preparação dos varões / Aplicação da tinta condutora

4. ENSAIO DOS VARÕES

O quarto capítulo desta dissertação aborda os ensaios realizados nos varões em material compósito. Será descrito o processo de ensaio de flexão, com especial atenção aos equipamentos e softwares utilizados. Serão também apresentados os resultados dos ensaios, na forma de gráficos e tabelas.

4.1 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão realizado nas amostras produzidas é designado como “ensaio de flexão em três pontos” e consiste na aplicação da carga num ponto do provete, equidistante de dois pontos, em que o provete se encontra simplesmente apoiada, de acordo com a figura 45.

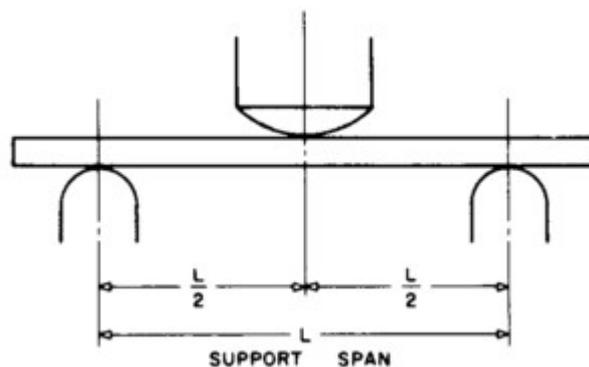


Figura 45 - Esquema do ensaio de Flexão em 3 pontos[40]

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Física Têxtil da Universidade do Minho, com a ajuda de um dinamómetro *Hounsfield*, em que a amostra está ligada a um multímetro digital *Agilent 64461a*, que mede os valores de resistência ao longo do ensaio. O multímetro

foi ligado a um computador com o software *KeySight* de forma a facilitar a obtenção dos dados durante o ensaio. No início de cada ensaio o dinamómetro e o software de leitura foram iniciados ao mesmo tempo, para garantir uma interpretação correta dos resultados. A figura 46 mostra a disposição dos equipamentos utilizados no ensaio (set-up).

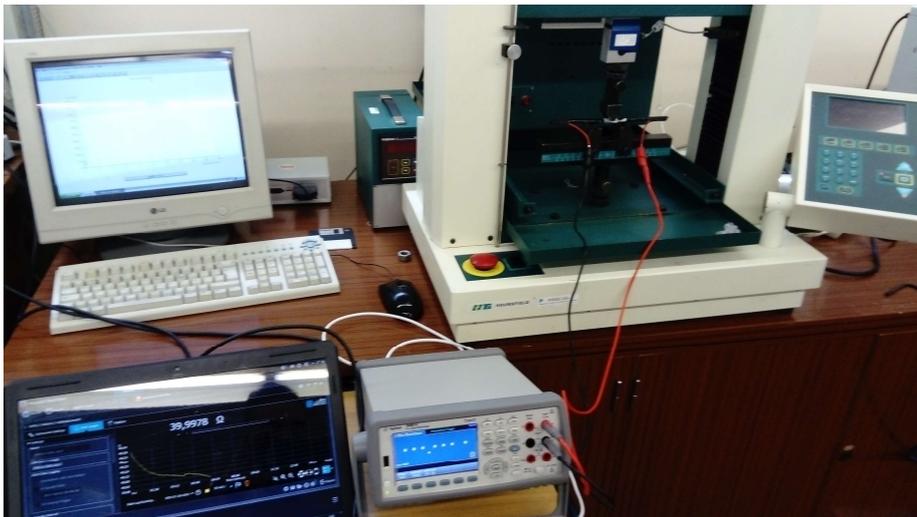


Figura 46 - Equipamentos utilizados no ensaio de flexão.

O ensaio realizado nos varões foi do tipo cíclico, com quatro ciclos de carga em que os provetes são sujeitas a uma carga progressiva com limite de 500N. O quadro 23 resume as características do ensaio.

Quadro 23 - Propriedades do ensaio de flexão em três pontos.

Parâmetro	Valor de ensaio
Tipo de Teste	Cíclico
Nº de Ciclos	4
Célula de Carga	5000 N
Carga Máxima	500 N
Vão	60 mm
Velocidade de deslocamento	0.3 mm/min

O procedimento para cada amostra consiste na sua colocação no dinamómetro, estando o varão simplesmente apoiado a uma distância de 60mm entre apoios, sendo que cada apoio está a uma distância de 30mm do ponto de carga. O multímetro é ligado à amostra através de pinças que fixam nos fios de cobre previamente colocados para o efeito. O ensaio é iniciado através de um computador com software controlador do dinamómetro, que regista os valores da força e do deslocamento, enquanto que o computador ligado ao multímetro regista os valores de resistência eléctrica ao longo do ensaio. Nas figuras 47 e 48 mostra-se um pormenor da amostra no dinamómetro, bem como o funcionamento do multímetro durante o ensaio.

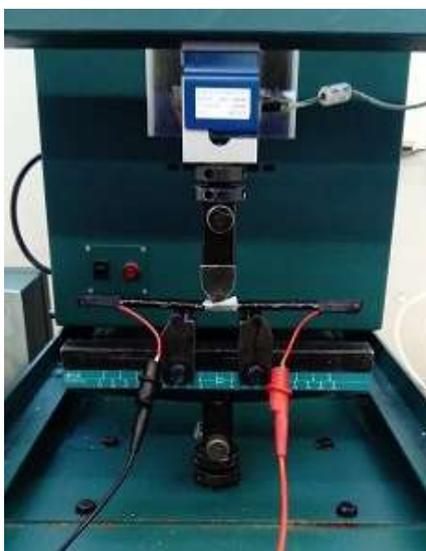


Figura 47 - Colocação do BCR no dinamómetro.

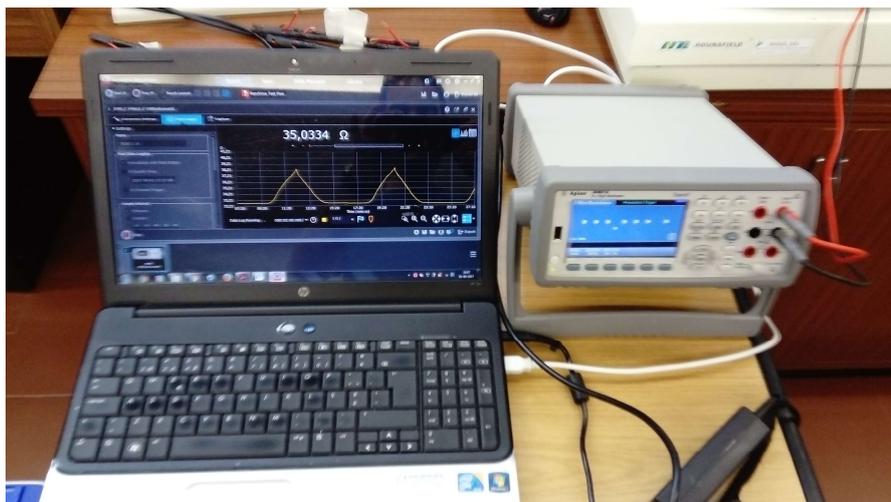


Figura 48 - Funcionamento do software do multímetro

4.1.1 Resultados do Ensaio

Foram analisadas quatro provetes para cada tipologia de composição dos varões. O valor do deslocamento máximo variou sempre conforme a amostra ensaiada, embora o valor da força máxima tenha sido sempre 500 N, o que provocou pequenas variações no tempo de ensaio para cada provete. Os gráficos seguintes (figuras 49 a 68) mostram as relações entre os deslocamentos e as variações de resistência elétrica que foram possíveis obter com cada ensaio.

- BCR1 (97% Vidro-E, 3% Carbono)

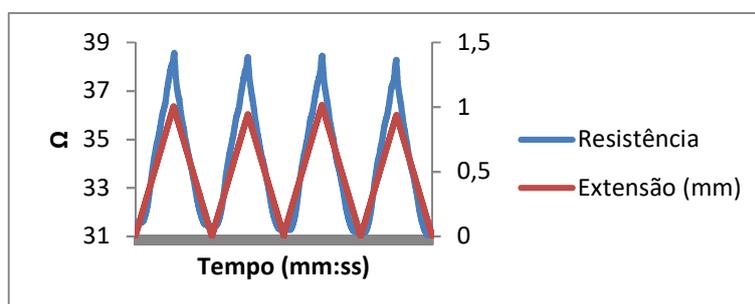


Figura 49 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 1 (3% Carbono, 97% Vidro-E)

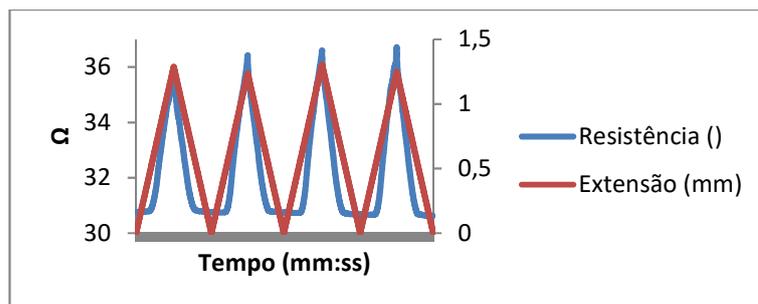


Figura 50 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 2 (3% Carbono, 97% Vidro-E)

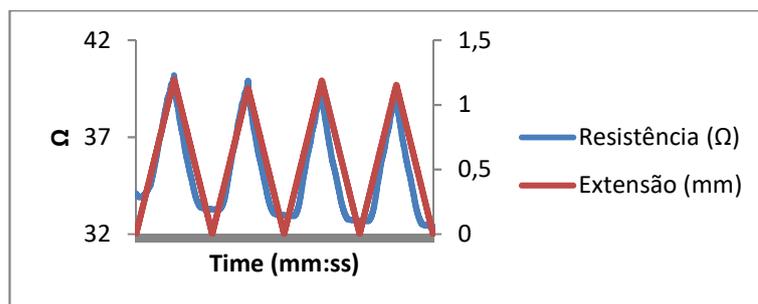


Figura 51 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 3(3% Carbono, 97% Vidro-E)

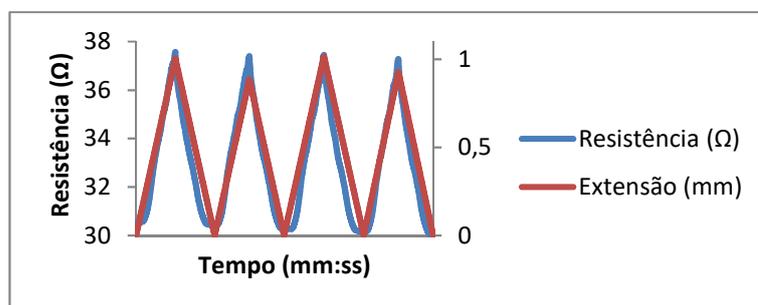


Figura 52 - Resultados do Ensaio: BCR1 - Amostra 4(3% Carbono, 97% Vidro-E)

- BCR2 (96% Vidro-E, 4% Carbono)

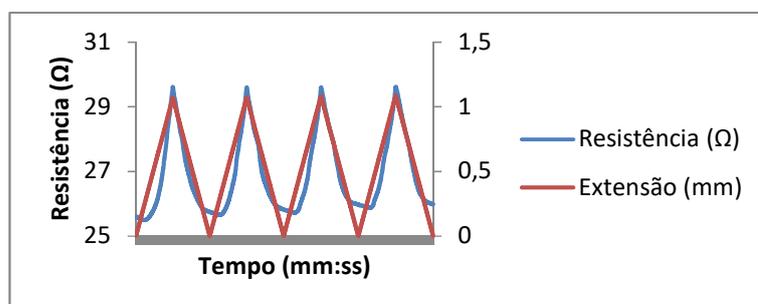


Figura 53 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 1(4% Carbono, 96% Vidro-E)

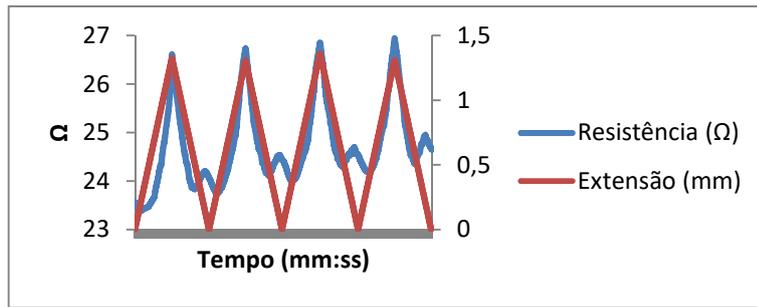


Figura 54 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 2(4% Carbono, 96% Vidro-E)

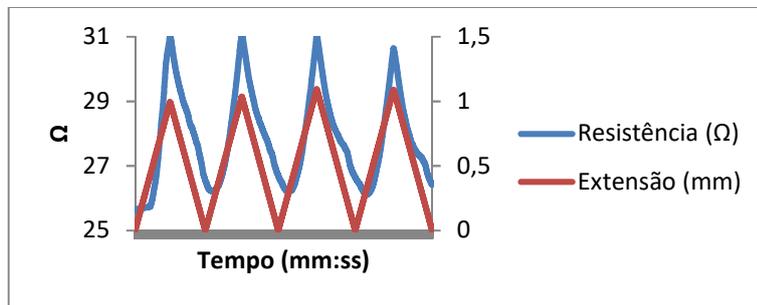


Figura 55 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 3(4% Carbono, 96% Vidro-E)

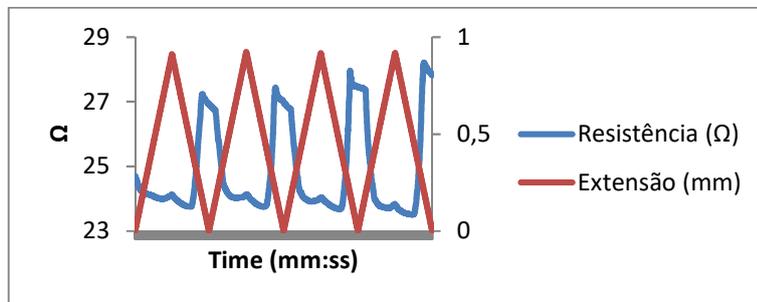


Figura 56 - Resultados do Ensaio: BCR2 - Amostra 4(4% Carbono, 96% Vidro-E)

- BCR3 (95% Vidro-E, 5% Carbono)

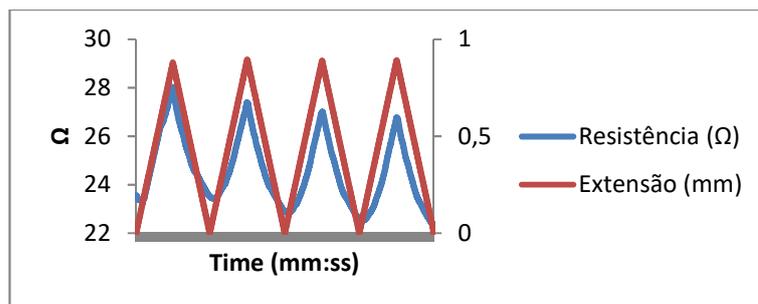


Figura 57 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 1(5% Carbono, 95% Vidro-E)

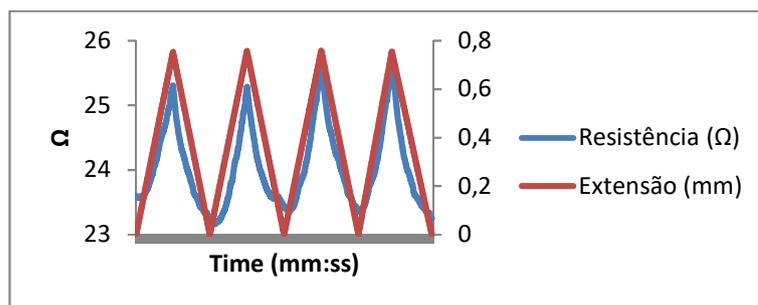


Figura 58 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 2(5% Carbono, 95% Vidro-E)

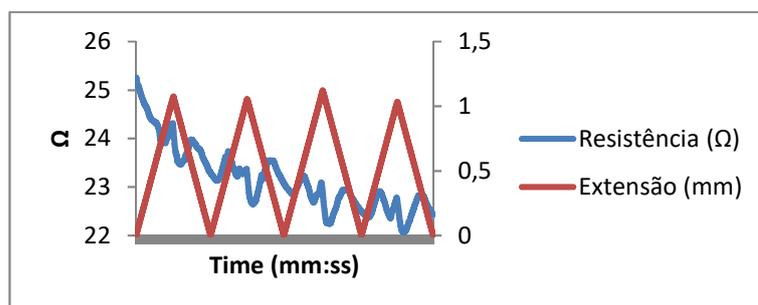


Figura 59 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 3(5% Carbono, 95% Vidro-E)

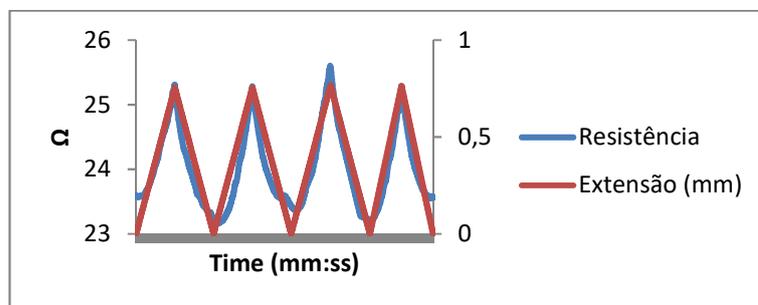


Figura 60 - Resultados do Ensaio: BCR3 - Amostra 4(5% Carbono, 95% Vidro-E)

- BCR3 (94% Vidro-E, 6% Carbono)

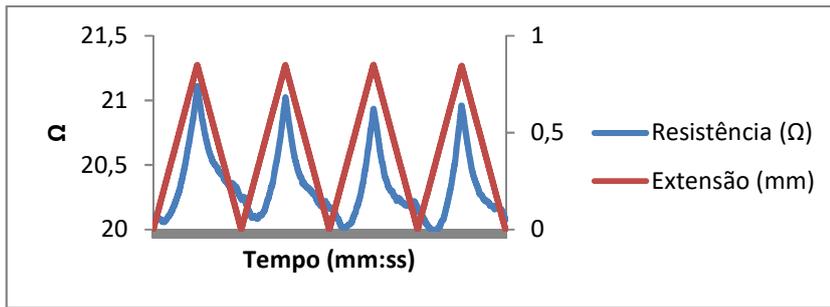


Figura 61 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 1(6% Carbono, 94% Vidro-E)

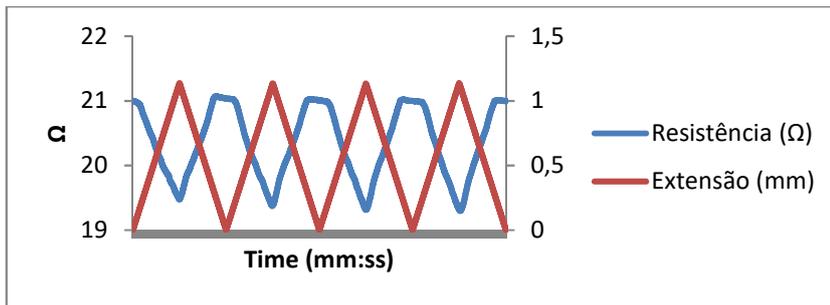


Figura 62 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 2(6% Carbono, 94% Vidro-E)

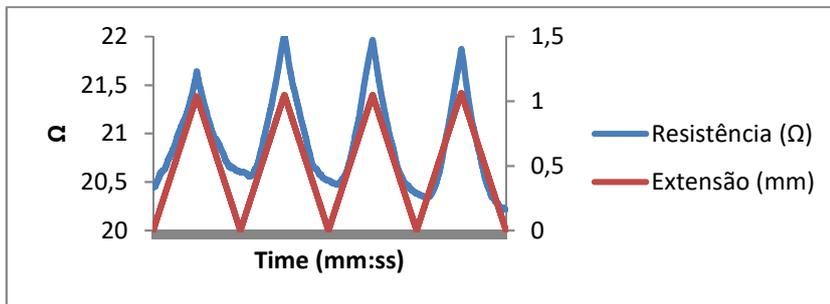


Figura 63 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 3(6% Carbono, 94% Vidro-E)

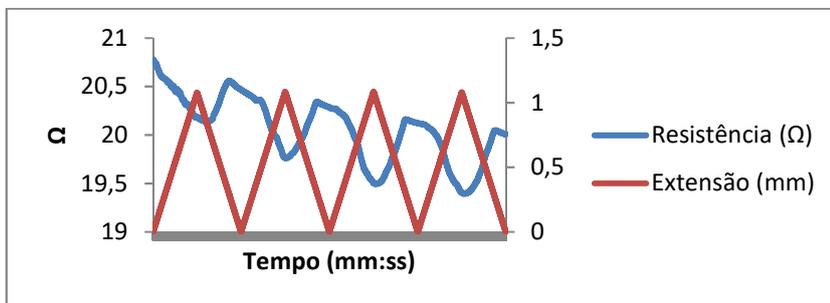


Figura 64 - Resultados do Ensaio: BCR4 - Amostra 4(6% Carbono, 94% Vidro-E)

- BCR5 (93% Vidro-E, 7% Carbono)

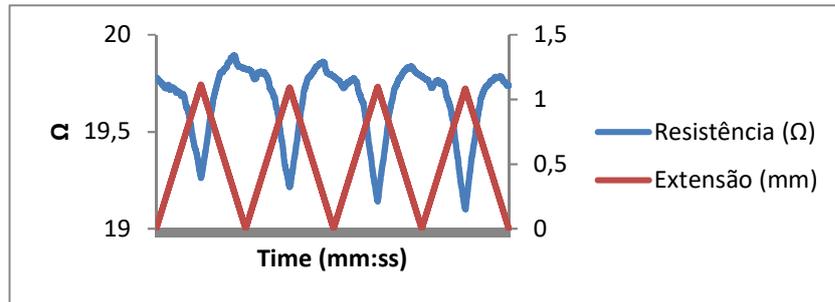


Figura 65 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 1(7% Carbono, 93% Vidro-E)

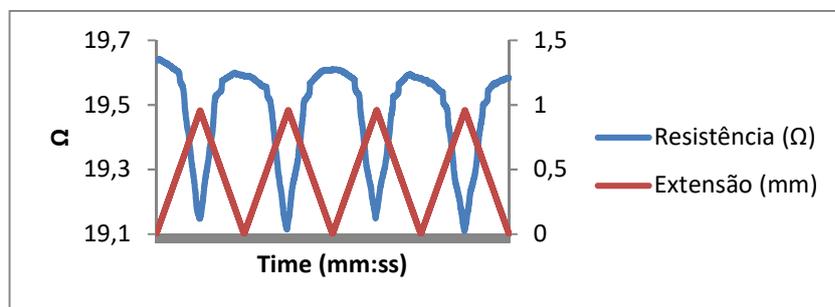


Figura 66 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 2(7% Carbono, 93% Vidro-E)

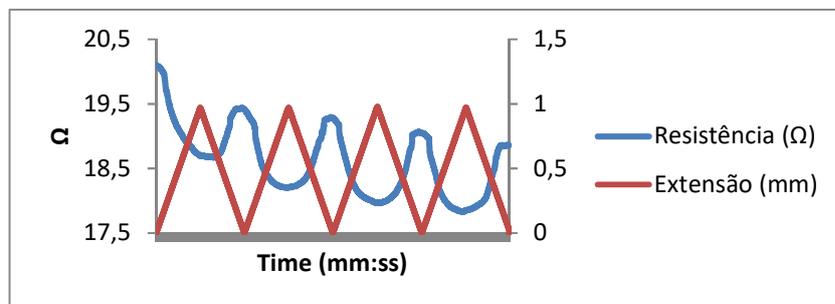


Figura 67 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 3(7% Carbono, 93% Vidro-E)

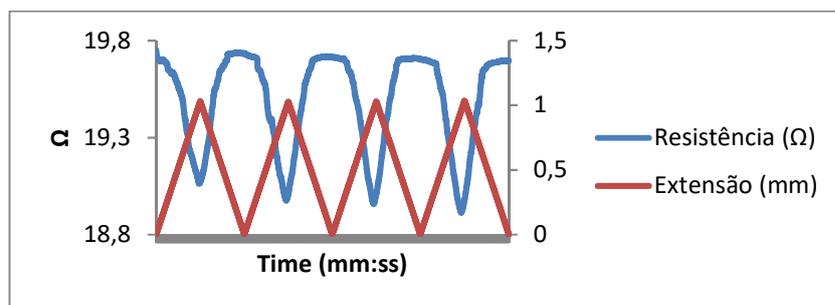


Figura 68 - Resultados do Ensaio: BCR5 - Amostra 4(7% Carbono, 93% Vidro-E)

Da análise dos gráficos pode-se constatar que para a generalidade das amostras ensaiadas existe uma variação da resistência elétrica bastante perceptível quando se variam as condições de deformação dos varões.

De modo a apurar a sensibilidade ao deslocamento de cada uma das composições de BCR estudadas, importa calcular o Gauge Factor (GF), a partir da seguinte equação:

$$GF = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

em que, ΔR representa a variação de resistência em cada ciclo, e R_0 representa a resistência inicial. ε representa a extensão de flexão a meio vão e pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{6 \times D \times d}{L^2} \quad (4.2)$$

em que D é o deslocamento máximo do varão a meio vão, d é o diâmetro do varão e L a distância entre apoios durante o ensaio.

Para cada amostra foi também calculada a linha de tendência do gráfico para cada ciclo, que consiste no valor do quadrado da regressão linear aplicada aos valores do gráfico obtidos na fase de aplicação de deslocamento em cada ciclo. Os valores do Gauge Factor e das linhas de tendência calculados são apresentados nos quadros 24 a 28:

Quadro 24 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR1 (3% Carbono)

BCR 1	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3			Ciclo 4		
Amostr a	ε	GF	R ²									
1	0,01007	21,5836	0,973	0,00946	23,4195	0,987	0,01017	22,5683	0,977	0,00940	24,2883	0,987
2	0,01287	12,9504	0,872	0,01236	14,9013	0,863	0,01304	14,5872	0,799	0,01247	15,8083	0,84
3	0,01197	15,5281	0,940	0,01129	20,9828	0,944	0,01188	17,0474	0,932	0,01154	18,0834	0,944

4	0,01003	22,8803	0,974	0,00886	25,8715	0,992	0,01016	23,3025	0,955	0,00928	25,4487	0,991
---	---------	---------	-------	---------	---------	-------	---------	---------	-------	---------	---------	-------

Quadro 25 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR2 (4% Carbono)

BCR 2	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3			Ciclo 4		
Amostra	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²
1	0,01070	14,606	0,962	0,01072	13,970	0,903	0,01083	13,5200	0,9183	0,010873	12,9128	0,9379
2	0,01328	9,0066	0,984	0,01309	7,8320	0,907	0,01363	6,71248	0,803	0,013114	6,959425	0,8629
3	0,00997	21,302	0,903	0,01031	18,287	0,931	0,01095	16,9153	0,8915	0,010915	15,91977	0,8643
4	0,00912	-2,5614	0,727	0,00923	-11,282	0,877	0,00917	-12,006	0,8864	0,009196	-14,3507	0,8712

Quadro 26 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR3 (5% Carbono)

BCR 3	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3			Ciclo 4		
Amostra	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²
1	0,00879	22,7435	0,976	0,00896	18,4895	0,935	0,00890	20,1403	0,938	0,008923	20,65292	0,9349
2	0,00753	9,61224	0,950	0,00757	11,7060	0,906	0,00759	12,1750	0,925	0,007551	13,26795	0,9561
3	0	-	0,780	0	-	0,035	0	-	0,083	0	-	0,0813
4	0,0075	9,61866	0,95	0,0075	11,781	0,909	0,007613	12,1614	0,925	0,007637	11,67499	0,9644

Quadro 27 - Gauge Factor e linhas de tendência - BCR4 (6% Carbono)

BCR 4	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3			Ciclo 4		
Amostra	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²
1	0,008487	6,0905	0,8421	0,008487	4,53642	0,626	0,00850	4,43327	0,599	0,0084	4,639263	0,593
2	0,011365	-6,3874	0,8946	0,01135	-6,93067	0,887	0,01133	-7,1125	0,884	0,0113	-7,03516	0,877
3	0,010398	5,6138	0,8832	0,01050	6,54444	0,802	0,01050	6,73792	0,888	0,0106	6,87123	0,879
4	0,010793	-2,6302	0,8877	0,01085	-3,1632	0,823	0,01085	-3,5342	0,841	0,0108	-3,28538	0,843

Quadro 28 - Gauge factor e linhas de tendência - BCR5(7% Carbono)

BCR 5	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3			Ciclo 4		
Amostra	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²	ϵ	GF	R ²
1	0,01116	-2,3412	0,788	0,01095	-2,8085	0,777	0,010998	-2,972	0,7216	0,01085	-3,20873	0,7618
2	0,00957	-2,5947	0,810	0,00961	-2,3669	0,818	0,009616	-2,3174	0,8278	0,009595	-2,48226	0,849
3	0,01032	-3,3379	0,917	0,01028	-3,5645	0,940	0,010303	-3,4700	0,9055	0,01037	-3,5492	0,9114
4	0,01105	-4,8597	0,947	0,00956	-5,5267	0,960	0,011055	-6,0455	0,99	0,00988	-6,12446	0,9779

Nos quadros 29 a 33 são apresentados os valores da variação de resistência elétrica ($\Delta R/R_0$) ao longo de cada ciclo para cada amostra.

Quadro 29 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra – BCR 1 (3% Carbono)

BCR1	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Amostra	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$
1	0,217376	0,221755	0,229722	0,228413
2	0,166709	0,184308	0,19034	0,197259
3	0,185872	0,236897	0,202524	0,208683
4	0,229673	0,229274	0,236847	0,236241

Quadro 30 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra - BCR 2 (4% Carbono)

BCR2	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Amostra	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$
1	0,156394	0,149871	0,146443	0,140401
2	0,119608	0,102548	0,09151	0,091266
3	0,212413	0,188668	0,185338	0,173764
4	-0,02338	-0,10424	-0,11015	-0,13197

Quadro 31 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra - BCR 3 (5% Carbono)

BCR3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Amostra	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$
1	0,200097	0,16574	0,179285	0,184276
2	0,072425	0,088683	0,09249	0,100182
3	-	-	-	-
4	0,072425	0,088708	0,092583	0,08916

Quadro 32 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra - BCR 4 (6% Carbono)

BCR4	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Amostra	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$
1	0,051689	0,038499	0,037716	0,039276
2	-0,07259	-0,07873	-0,08064	-0,08007
3	0,058374	0,06874	0,070772	0,073189
4	-0,02839	-0,03434	-0,03837	-0,03551

Quadro 33 - Variação de resistência elétrica por ciclo/amostra – BCR 5 (7% Carbono)

BCR5	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Amostra	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$	$\Delta R/R_0$
1	-0,02614	-0,03077	-0,03268	-0,03482
2	-0,02484	-0,02276	-0,02228	-0,02382
3	-0,03446	-0,03665	-0,03575	-0,03679
4	-0,05372	-0,05287	-0,06683	-0,06055

No quadro 34 são apresentadas as médias dos valores de Gauge Factor, linha de tendência e variação de resistência elétrica para todas as tipologias. No caso de tipologias com amostras em que se obteve resposta negativa (Gauge factor negativo e variação de resistência negativa) os dados foram trabalhados utilizando os valores absolutos:

Quadro 34 - Valores médios de Gauge Factor, Linha de tendência e variação de resistência para todas as tipologias

Tipologia	% Carbono	GF	R ²	$\Delta R/R_0$
BCR 1	3	19,953	0,956	0,2126
BCR 2	4	13,66	0,919	0,1465
BCR 3	5	14,23	0,915	0,1188
BCR 4	6	5,346	0,877	0,05545
BCR 5	7	3,598	0,869	0,0372

4.1.2 Análise de resultados

Os gráficos e tabelas apresentados na secção anterior permitem tirar bastantes conclusões sobre a utilização dos varões compósitos para efeitos de monitorização através de piezoresistividade, bem como a sua composição ideal.

R²

Todas as amostras ensaiadas, independentemente da composição, mostraram uma razoável sensibilidade às deformações, conforme se pode verificar na análise das figuras.

Algumas amostras, nomeadamente as amostras BCR2-4 (4% Carbono), BCR4-2(6% Carbono), BCR4-4(6% Carbono) e todos os provetes de BCR5(7% Carbono) apresentaram uma resposta

negativa, ou seja, a resistência elétrica diminuiu com a aplicação de carga, o que indicia a presença das fibras de carbono na parte tracionada do varão aquando do ensaio.

As amostras de BCR1 (3% de Fibra de Carbono) apresentaram um comportamento mais consistente, apresentando as variações de resistência maiores, bem como os maiores valores de gauge factor (fator de sensibilidade).

Relativamente à amostra 3 do BCR3(5% Carbono), o gráfico (Figura 67) mostra variações positivas e negativas da resistência elétrica dentro do mesmo ciclo de carga, o que pode indicar a existência de filamentos de carbono distribuídos de forma pouco homogênea dentro do varão. Os seus resultados não foram tidos em conta na análise dos valores médios da tipologia em causa.

Em algumas amostras, os valores inicial e de pico de resistência vão aumentando ou diminuindo de ciclo para ciclo, apesar de manterem variações totais idênticas. Isto pressupõe a ocorrência de alterações geométricas na estrutura dos varões devido às deformações aplicadas.

Existem também provetes em que a resistência elétrica não tem variações significativas nas deformações mais baixas. Isto acontece principalmente nas amostras com maior percentagem de carbono, pois as baixas extensões não provocam deformações suficientes aos filamentos de carbono que possam provocar alterações na resistência elétrica.

Da análise do quadro 34 pode concluir-se que a sensibilidade dos varões compósitos aumenta com a diminuição da percentagem de carbono. Os valores de Gauge Factor, linha de tendência e variação de resistência são maiores nos varões com menor percentagem de carbono, com exceção do Gauge Factor entre os BCR2 e BCR3 (4% e 5% de carbono respetivamente). Isto deve-se ao facto de as variações de resistência nas duas tipologias serem semelhantes, o que conjugado com o facto de a resistência inicial no BCR2 ser maior devido à menor composição em carbono, leva a um gauge factor ligeiramente inferior ao BCR3.

Em algumas amostras, como, por exemplo, os provetes BCR2-3(4% Carbono) (Figura 55), BCR4-4(6% Carbono) (Figura 64), e BCR5-4(7% Carbono) (Figura 68), os pontos de inflexão das curvas de resistência revelam um ligeiro atraso em relação aos pontos de inflexão das curvas de extensão, o que pode indicar que essas amostras não sofrem respostas imediatas às deformações que lhes são impostas.

O varão BCR1-4 (3% Carbono) foi o que demonstrou melhor sensibilidade às deformações aplicadas, visto o seu Gauge Factor ser o maior de entre todas as amostras. Foi também a amostra que teve um maior quadrado da regressão linear, nomeadamente nos ciclos 2 e 4 (0,992 e 0,991 respetivamente). Na figura 69 é apresentado em pormenor o resultado do ensaio desta amostra.

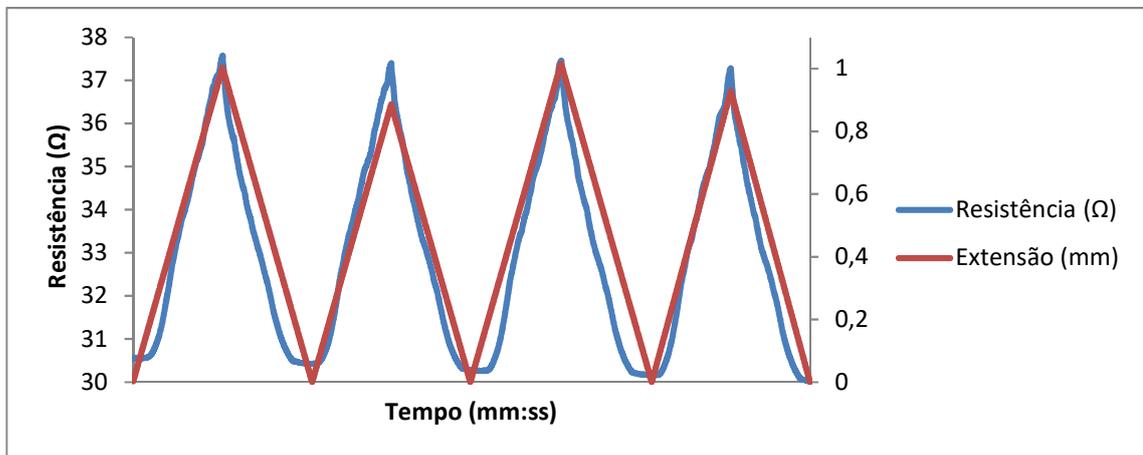


Figura 69 - Resultados da amostra BCR1-4

Na amostra aqui apresentada, a resistência tem uma variação de cerca de 7Ω entre o início de cada ciclo e a deformação máxima, sendo este o varão compósito ideal para ser utilizado como sensor de deformações. Sendo este um varão com resposta positiva, ou seja, a resistência elétrica aumenta com a deformação, foi feita a remoção da tinta condutora e do fio utilizado na leitura de resistência, com o objetivo de comprovar que as fibras de carbono na secção transversal do varão se encontram numa posição onde sofrerão forças de tração durante o ensaio. A figura seguinte mostra os dois lados da secção transversal para esta amostra:

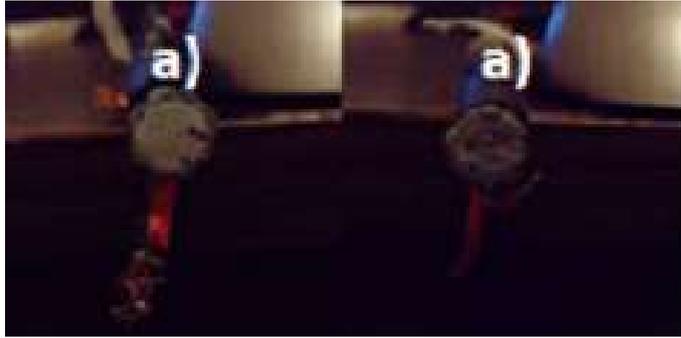


Figura 70 - Posição das fibras de carbono na secção transversal - BCR1 - 4 a) Superfície de aplicação da carga

Tal como se pode constatar, existem dois filamentos de fibra de carbono perceptíveis, um a meio da secção, e outro na parte inferior. Pela posição do varão aquando da aplicação da deformação, podemos concluir que os filamentos de carbono, em especial o filamento inferior, foram sujeitos a forças de tração, facto comprovado pela resposta exibida no gráfico.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Gerais

A realização da presente dissertação teve como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento das propriedades dos varões compósitos para aplicação em monitorização de estruturas de betão armado. Os resultados obtidos deixam boas perspetivas no que toca a futuras utilizações deste tipo de materiais como sensor do estado de deformação das estruturas, sendo que tem a vantagem de poder também ser utilizado como reforço, ao contrário dos outros métodos de monitorização.

Apesar de o processo de produção deste tipo de varões ser relativamente barato quando comparado com o de outros métodos correntes de monitorização ou reforço de estruturas, existe bastante potencial para a sua otimização no que toca, por exemplo, ao reaproveitamento da resina em excesso e à coordenação entre a velocidade de entrançamento e de tiragem, pois sendo um processo contínuo, um desfasamento entre estes parâmetros pode provocar insuficiências no entrançamento dos varões comprometendo o seu revestimento.

Este trabalho teve três fases distintas. Numa primeira fase foi feito um estudo sobre os trabalhos previamente realizados nesta área, de modo a aprender mais sobre estes materiais e as suas potencialidades. No que diz respeito aos varões compósitos com capacidade de monitorização, o estudo das investigações já desenvolvidas nesta área permitiu conhecer melhor o processo de produção, bem como os métodos de ensaio, análise e interpretação de resultados.

A segunda fase desta dissertação teve por objetivo a produção dos varões e a sua preparação para ensaio. Foram produzidas cinco tipologias diferentes de varão compósito

de 6 mm de diâmetro, com percentagens de fibra de carbono no seu núcleo entre 3% e 7% com o objetivo de perceber qual a percentagem de carbono ideal para aplicação num sistema de monitorização. A resina utilizada como matriz do material compósito foi produzida antes de cada jornada de produção. Durante a produção dos varões compósitos foram tomadas todas as medidas de segurança recomendadas, tais como a utilização de equipamentos de proteção como luvas e máscara. O sistema utilizado para a cura do material liberta alguns gases devido às altas temperaturas, que torna fundamental a utilização de um sistema de extração. A preparação dos varões compósitos para ensaio foi feita com uma tinta elétrica à base de carbono correntemente utilizada em aplicações de robótica/eletrónica. Este material revelou-se bastante bom para este tipo de aplicação, garantindo uma aderência quase perfeita entre os fios de cobre utilizados nas leituras de resistência elétrica e as extremidades dos varões.

Na última fase desta dissertação foram realizados os ensaios de flexão aos varões compósitos. Estes ensaios foram realizados com auxílio de um dinamómetro, ao mesmo tempo que eram registadas as suas variações de resistência elétrica através de um software de recolha de dados. A combinação entre estes registos e a extensão aplicada pelo dinamómetro permitiu avaliar o comportamento piezoelétrico dos varões compósitos. Todas as percentagens de fibra de carbono revelaram sensibilidade às deformações. Foi possível concluir que a percentagem ideal de carbono neste tipo de varões é de 3%, pois esta tipologia demonstrou valores de Gauge Factor mais elevados. Foi também notório que o comportamento piezoelétrico dos varões compósitos melhora com a diminuição da percentagem de fibra de carbono na composição do seu núcleo.

5.2 Investigações Futuras

Cumprido o objetivo deste estudo de ser um contributo ao desenvolvimento dos conhecimentos sobre o comportamento piezoelétrico dos varões compósitos e as suas potencialidades de aplicação como sistema de monitorização, existem ainda algumas possibilidades de desenvolvimento.

O estudo do comportamento deste tipo de varão compósito com uma percentagem de fibra de carbono ainda inferior às que foram testadas pode gerar resultados ainda mais prometedores. Seria também pertinente estudar com maior profundidade a influência do posicionamento das fibras de carbono no núcleo dos varões na sua capacidade de monitorização, otimizando ao mesmo tempo o processo de produção para que seja possível controlar a posição final das fibras de carbono no núcleo dos varões.

Outro caminho a seguir será a utilização de nanotubos de carbono ou mesmo fibras de carbono dispersas na matriz polimérica dos varões e estudar o seu comportamento piezoelétrico.

Para além das possibilidades de desenvolvimento em termos de sensibilidade e monitorização, os varões entrançados em material compósito podem também ser desenvolvidos numa ótica de reforço estrutural, pois é um material já com boas propriedades nesta área, sendo bastante ecológico e durável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Oliveira, “Betão Com Varões De Fibra De Vidro Processos De Construção,” *Construlink Press*, vol. 25, pp. 2–36, 2006.
- [2] A. Costa, “Durabilidade de Estruturas de Betão,” *Apontamentos da Cadeira Reabil. e Reforço Estruturas*, 2006.
- [3] [Http://www.clubedoconcreto.com.br](http://www.clubedoconcreto.com.br), “Clube do Concreto.” .Acedido em 04/2016
- [4] C. Félix, “A Monitorização das Estruturas na Conservação do Património em Betão - 2º Encontro Internacional de Património Mundial de Origem Portuguesa,” 2010.
- [5] C. F. G. Rodrigues, “Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica,” p. 367, 2011.
- [6] R. De Oliveira, C. a Ramos, O. Frazão, and a T. Marques, “Aplicação de Sensores em Fibra Óptica Embebidos para a Monitorização da Saúde de Estruturas Compósitas,” no. 2000, pp. 89–97, 2002.
- [7] D. C. A. Pereira, “Sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg para monitorização ambiental e estrutural,” Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2003.
- [8] C. Rodrigues, C. Félix, and J. Figueiras, “Monitorização Estrutural de Pontes com Sistemas em Fibra Ótica – Três Exemplos em Portugal,” *ASCP 2013 Segurança. Conserv. e Reabil. Pontes*, 2013.
- [9] H. Sousa, J. A. Figueiras, and J. Bento, “Sistema de monitorização da ponte da Lezíria – A sua utilidade durante a fase construtiva,” *BE2008 – Encontro Nac. Betão Estrutural 2008*, pp. 1–10, 2008.
- [10] E. V. Pereira and M. M. Salta, “Monitorização permanente da corrosão em estruturas de betão armado . Resultados a longo prazo .,” pp. 24–26, 2012.
- [11] J. H. Williams, M. J. Connolly, K. M. Malek, and S. S. Lee, *Ultrasonic wave velocity in double-braided nylon rope*, vol. 21, no. 1. 1984.
- [12] M. de F. F. Domingues, “Monitorização de Estruturas Por Varrimento Laser,” Universidade de Aveiro, 2008.
- [13] C. E. Bakis, A. Nanni, J. A. Terosky, and S. W. Koehler, “Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications,” *Compos. Sci.*

Technol., vol. 61, no. 6, pp. 815–823, 2001.

- [14] A. Todoroki and J. Yoshida, “Electrical Resistance Change of Unidirectional CFRP Due to Applied Load,” *JSME Int. J. Ser. A*, vol. 47, no. 3, pp. 357–364, 2004.
- [15] D. A. Gordon, S. Wang, and D. D. L. Chung, “Piezoresistivity in unidirectional continuous carbon fiber polymer-matrix composites: single-lamina composite versus two-lamina composite,” *Compos. Interfaces*, vol. 11, no. 1, pp. 95–103, 2004.
- [16] X. Wang and D. D. L. Chung, “Real-time monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement.” 1997.
- [17] P. E. Irving and C. Thiagarajan, *Fatigue Damage Characterization in Carbon Fibre Composite Materials Using an Electric Potential Technique*. 1998.
- [18] E. Zdraveva, R. Fanguero, C. Gonilho-Pereira, A. Ferreira, and S. Lanceros-Mendez, “Self-diagnosing braided composite rod,” *Struct. Archit. - Proc. 1st Int. Conf. Struct. Archit. ICSA 2010*, pp. 1909–1915, 2010.
- [19] B. Fernandes, “Varões entrançados de material compósito com capacidade de monitorização,” Universidade do Minho, 2015.
- [20] K. Chawla K., *Fibrous Materials*. Cambridge, 1998.
- [21] J. Militky, *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*. 2009.
- [22] P. C. Marques, “Design of Fibrous Structures for Civil Engineering Applications,” Universidade do Minho, 2009.
- [23] J. W. S. Hearle, *High-performance fibres*. Woodhead Publishing Limited, 2001.
- [24] H. Wallenberger, F.T., Watson, J.C., Li, “Glass Fibers,” *ASM Handb.*, vol. 21, no. Ref 19, pp. 27–33, 2001.
- [25] A. Nanni, T. Okamoto, M. Tanigaki, and S. Osakada, *Tensile properties of braided FRP rods for concrete reinforcement*, vol. 15, no. 3. 1993.
- [26] W. Steinmann and A. Saelhoff, *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*. 2016.
- [27] ACI 544.1R-96, *Report on fibre reinforced concrete*. 1996.
- [28] J. A. O. Barros, “Betão Reforçado com Fibras de Aço,” *Spring*, pp. 25–52, 1997.
- [29] A. Domingues de Figueiredo and G. P. Gonçalves, “Concreto com fibras,” *Inst. Bras. do Concreto*, no. February, pp. 1–26, 2016.
- [30] A. M. F. M. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas

- metálicas,” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, pp. 10–19, 2009.
- [31] P. K. Mallick, *Composites Engineering Handbook*. Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [32] P. P. Askeland, Donald R. and Phulé, *Ciência e Engenharia de Materiais*. 2013.
- [33] S. Paciornik, “Ciência e Engenharia de Materiais,” 2004. [Online]. Available: http://www.dcomm.puc-rio.br/cursos/cemat/index_files/frame.html.
- [34] C. G. Pereira, R. Figueiro, S. Jalali, P. P. Marques, and M. Araújo, “Braided composite rods to reinforce concrete subjected to aggressive environments,” 2005.
- [35] J. Barros, “Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão – PARTE I: Propriedades e Técnicas,” *Construção Mag.*, vol. ISSN 1645-, no. July, pp. 26–35, 2007.
- [36] J. C. Ramôa, M. Sá, J. Gonilha, I. Almeida, F. Branco, and M. Garrido, “Pontes em Plásticos Reforçados com Fibras (FRP) e em Betão-FRP,” *1as Jornadas Mater. na Construção*, pp. 115–148, 2011.
- [37] J. Militky, *9 - The chemistry, manufacture and tensile behaviour of polyester fibers*. Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [38] L. Juvandes, “Aplicações De Compósitos Frp No Reforço De Estruturas,” *Paginas.Fe.Up.Pt*, pp. 239–270, 2011.
- [39] D. W. Seo, K. T. Park, Y. J. You, and S. Y. Lee, “Experimental Investigation for Tensile Performance of GFRP-Steel Hybridized Rebar,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016.
- [40] ASTM, “D790-03-Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials,” *ASTM Stand.*, pp. 1–11, 2015.

ANEXO I – INFORMAÇÃO TÉCNICA DA RESINA

Packaging (net weight, kg)			
Biresin® CR141 resin (A)	1,000	220	10
Biresin® CH141 hardener (B)	1,100	220	9
Biresin® CA141 accelerator (C)			10 0.2

Physical Data		Resin (A)	Hardener (B)	Accelerator (C)
Individual Components		Biresin® CR141	Biresin® CH141	Biresin® CA141
Mixing Ratio, parts by	Weight	100	90	2
Mixing Ratio, parts by	Volume	100	87	2.4
Colour		translucent	transparent	amber
Viscosity, 25°C	mPa.s	~8,250	~40	~200
Density, 25°C	g/ml	1.16	1.20	0.98
			Mixture	
Potlife, 100 g / RT, approx. values		h	> 24	
Mixed viscosity, 25°C, approx. values		mPa.s	600	

Mechanical Data, neat resin specimen approx. values after 3 h / 80°C + 3 h / 120°C + 3 h / 140°C			
Biresin® CR141 resin (A)	with Biresin® CH141 hardener (B) and Biresin® CA141 accelerator (C)		
Tensile strength	ISO 527	MPa	78
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	3,200
Elongation at break	ISO 527	%	3.3
Flexural strength	ISO 178	MPa	145
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,100
Compressive strength	ISO 604	MPa	122
Density	ISO 1183	g/cm³	1.20
Shore hardness	ISO 868	-	D 87
Impact resistance	ISO 179	kJ/m²	18