



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruna Raquel Marques da Silva Fernandes

Varões entrançados de material
compósito com capacidade de monitorização



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruna Raquel Marques da Silva Fernandes

Varões entrançados de material
compósito com capacidade de monitorização

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

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Raul Figueiro

Declaração

Nome: Bruna Raquel Marques da Silva Fernandes

Endereço Eletrónico: brunarmsfernandes_@hotmail.com

Número do Bilhete de Identidade: 13615121

Título da dissertação: Varões entrançados em material compósito com capacidade de monitorização

Orientador: Professor Doutor Raúl Figueiro

Ano de Conclusão: 2015

Dissertação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil

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

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

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

Em especial quero agradecer ao meu namorado pelo apoio incondicional, pela compreensão e pelo amor demonstrado em todo o caminho percorrido, por ser um ouvinte paciente de todas as minhas dúvidas, inquietações e desânimos.

Aos meus pais, que sempre demonstraram amor, compreensão e incentivo nos momentos mais difíceis. A eles agradeço do fundo do meu coração por tudo o que fizeram por mim, por toda a força que estão constantemente a dar-me e toda a confiança que em mim sempre depositaram.

Ao Professor Raul Fangueiro, por me ter orientado no decorrer da realização deste trabalho, quero expressar o meu profundo agradecimento pelo seu apoio, orientações, revisão crítica e incentivos.

Agradeço à minha família, em especial aos meus avós pelo apoio e ânimo incondicional que me proporcionaram ao longo da minha vida.

Agradeço à Fibrenamics, em particular ao Fernando Cunha, por todas as sugestões, conselhos e apoio fornecido ao longo deste trabalho.

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

RESUMO

O investimento em infraestruturas de engenharia civil sofreu um crescimento acentuado nas últimas décadas, representando de um modo geral os investimentos mais dispendiosos das nossas sociedades.

Para evitar a degradação destas estruturas até níveis insustentáveis poderá passar pela implementação de um sistema de monitorização. Neste trabalho explorou-se a capacidade de monitorização através das propriedades piezo-resistivas de materiais compósitos com reforço por fibras.

Numa primeira campanha experimental constituída pela produção e avaliação das propriedades piezo-resistivas de varões entrançados em material compósito (BCR) com diversas percentagens de fibra de carbono. Para a avaliação da resistividade elétrica destes varões entrançados em material compósito (BCR) recorreu-se a ensaios de flexão. Destes ensaios observou-se que a capacidade de monitorização varia com a percentagem de fibra de carbono utilizada no varão, verificou-se que a sensibilidade do varão BCR aumenta com a redução da fibra de carbono.

Na segunda fase deste trabalho, consistiu em produzir e ensaiar a flexão elementos estruturais em argamassa com os varões BCR que obtiveram melhor resistividade elétrica dos ensaios realizados na primeira campanha experimental deste trabalho e com varões de aço.

Palavras-Chave:

Fibras

Compósitos

BCR

Monitorização

Resistividade elétrica

ABSTRACT

Investment in civil engineering infrastructure suffered a sharp growth in recent decades, representing generally the most costly investments in our societies.

To prevent degradation of these structures and unsustainable levels may involve the implementation of a monitoring system. This paper explored the monitoring capacity through the piezo-resistive properties of composite materials with reinforcement fibers.

In the first experimental program comprises the production and evaluation of the piezo-resistive properties of the twisted rods of composite material (BCR) with various percentages of carbon fiber. To evaluate the resistivity of these composite rods braid (BCR) resorted to bending tests. From these tests it was observed that the monitoring capacity varies with the percentage of carbon fiber used in man, it was found that BCR rod sensitivity increases with decreasing carbon fiber.

In the second phase of this work is to produce and send the bending structural elements in mortar with BCR men who had better electrical resistivity of testing the first experimental campaign this work and with steel rods.

Keywords:

Fiber

Composites

BCR

Monitoring

Electrical resistivity

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento temático	1
1.2. Objetivos e fases do trabalho	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. Estruturas de Betão: necessidade de monitorização	5
2.2. Métodos de monitorização de estruturas	7
2.2.1. Monitorização por vibração	7
2.2.2. Monitorização usando fibras óticas	8
2.2.3. Monitorização através de materiais condutores.....	9
2.3. Monitorização piezoelétrica.....	11
2.3.1. Gauge Factor (GF).....	11
2.3.2. Materiais piezoelétricos	12
2.4. Varões entrançados em material compósito	19
2.4.1. BCR (Braided Composite Rods)	20
2.4.2. FRP (Polímero reforçado com fibra)	25
3. Trabalho Experimental	33
3.1. Produção de varões entrançados em material compósito (BCR) com capacidade de monitorização	33
3.2. Processo de produção de BCRs	33
3.2.1. Sistema de colocação das fibras.....	35
3.2.2. Impregnação das fibras na resina.....	36
3.2.3. Mecanismo de entrançamento	37
3.2.4. Processo de cura	38
3.2.5. Processo de tiragem	39
3.3. Planeamento da produção	40
3.3.1. Materiais utilizados na produção dos varões entrançados	40
4. Determinação das propriedades mecânicas e piezoelétricas dos BCR	43
4.1. Ensaio à flexão.....	43
4.1.1. Preparação dos varões compósitos para ensaio	44
4.1.2. Procedimento de ensaio	44
4.2. Resultados obtidos	47
4.3. Conclusões	55
5. Argamassa reforçada e monitorizada por BCR`s.....	57
5.1. Preparação da argamassa	57

5.2. Determinação das propriedades mecânicas e piezoelétricas dos varões entrançados aplicados em elementos de argamassa	60
5.2.1. Preparação dos elementos de argamassa com varões BCR2.....	60
5.2.2. Procedimento e equipamento de ensaio	61
5.3. Resultados	65
5.4. Conclusões	74
6. CONCLUSÕES	77
6.1. Conclusões gerais	77
6.2. Trabalhos futuros.....	78
7. Referências bibliográficas.....	79
ANEXO	83
Anexo A: Informação técnica da resina utilizada	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Recuperação superficial da estrutura com argamassa: a); reparação de fissuras com resina epoxi: b); aplicação de revestimentos superficiais de proteção: c) [1].....	6
Figura 2- Sensor Bragg [4].....	9
Figura 3- Gráfico que relaciona a variação da resistência elétrica com a deformação em flexão sob carga cíclica, ao longo do tempo [7]	11
Figura 4- Classificação das fibras quanto à sua origem [34].....	13
Figura 5- Roving de fibra de carbono [13].....	14
Figura 6- Exemplo da estrutura de um nanotubo de carbono [14].....	14
Figura 7- Classificação dos materiais compósitos [34].....	15
Figura 8- Gráfico da resistência (R) da PANI em função do tempo (time). As zonas azuis correspondem aos intervalos de tempo em que é aplicada uma tensão, as zonas brancas correspondem a intervalos de tempo em que não é aplicada tensão [15].....	16
Figura 9- Gráfico da variação relativa da resistência $\Delta R/R$ em função da deformação ϵ [15].....	17
Figura 10- Gráfico da variação relativa da resistência ($\Delta R/R$) em função da deformação [16].....	18
Figura 11- Gráficos da resistividade em função do tempo obtidos nos ensaios de tração das duas amostras [17].	19
Figura 12- Estrutura entrançada do varão [34].....	20
Figura 13- Composição dos BCR's [24]	22
Figura 14- secções transversais de BCR2, BCR3 e BCR4. 1 - Fibra de vidro 2 - A fibra de carbono [24].....	22
Figura 15- BCR durante o ensaio de flexão [24].....	22
Figura 16- Deslocamento, resistência e dependência do tempo para o tipo BCR4 (100% de carbono); resposta positiva das amostras testadas. [24].....	23
Figura 17--Deslocamento, resistência e dependência do tempo para o tipo BCR2 (77% de vidro, 23% de carbono); resposta negativa de amostras testadas.[24].....	23
Figura 18- Tensão e resistência fracional da mudança de BCR [24]	24
Figura 19- <i>Gauge factor</i> (GF) e quadrado do valor de regressão (R^2) [24]	24
Figura 20- Variação da resistência elétrica com a deformação a flexão sob cargas cíclicas [7].....	26
Figura 21- vista longitudinal e transversal de CF-GFRP do varão [28].....	26
Figura 22- Resposta elétrica e mecânica de compósitos HCFRP, [29].	27
Figura 23- curvas de carga-deformação e $\Delta R/R_0$ -strain, [29].....	27
Figura 24- Corte transversal dos varões CNP-PRFV (esquerda) e imagens SEM [31].	28
Figura 25- curva tensão / tempo e curva $\Delta R/R_0\%$ / tempo para varão CF-GFRP (à esquerda) e CNP-GFRP (direita), [32].....	28
Figura 26- vigas sob flexão (esquerda), e curva de flexão com $\Delta R/R_0\%$ [32].	29
Figura 27- Comparação do momento vs curvatura das vigas de aço e DH-FRP [32].....	30
Figura 28- Comparação do comportamento carga-flexão das vigas de aço e DH-FRP [32].....	30
Figura 29- Configuração de teste de carga cíclica [35,36].....	30
Figura 30- A curva de carga-deflexão (à esquerda) e momento-rotação (à direita) para feixe exemplar desenvolveu sobre cargas cíclicas [36]	31

Figura 31-- Processo de produção de varão entrançado compósito [7]	33
Figura 32- Processo de produção	34
Figura 33- Processo de produção de BCRs.....	35
Figura 34- Esquadro com olhais ceramicos para a condução das fibras.....	36
Figura 35- Sistema da colocação das fibras	36
Figura 36- Impregnação das fibras pela resina	37
Figura 37- controlador de velocidade	38
Figura 38- Mecanismo da entrançadeira	38
Figura 39- Chapa para reaproveitamento de resina	38
Figura 40- Câmara de cura.....	39
Figura 41- Mecanismo de tiragem	40
Figura 42- Balseiro com limitadores de espaço (XPS).....	41
Figura 43- a)Resina, b)acelerador e c) endurecedor utilizados na produção dos varões	41
Figura 44- Varões entrançados em material composito produzidos.	42
Figura 45- Ensaio de flexão três pontos [36]	43
Figura 46- Detalhe da tinta de prata na secção transversal do varão (1);manta termoretractil (2); varão pronto para ensaio com tinta de prata, fio de cobre e manta termoretractil (3).....	44
Figura 47-Esquema de ensaio	45
Figura 48-(1) Multimetro (Agilent, 34461 A); (2) PC com Software Agilent	46
Figura 49- Ensaio de flexão três pontos; [1] pinças do multimetro	46
Figura 50- Mecanismo de ensaio	47
Figura 51- Gráficos da resistividade eletrica(R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s)das amostras de BCR1	48
Figura 52- Gráficos da resistividade eletrica(R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s)das amostras de BCR2	48
Figura 53- Gráficos da resistividade eletrica(R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s)das amostras de BCR3	49
Figura 54- Gráficos da resistividade eletrica(R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s)das amostras de BCR4	50
Figura 55- Variação da resistência eléctrica em função da percentagem de fibra de carbono aplicada para os quatro ciclos do BCR2(provete 1,3,4) ,BCR3(provete1,3,4),BCR4(1,2,3,6).....	53
Figura 56- Variação da resistência eléctrica em função da percentagem de fibra de carbono aplicada para os quatro ciclos do BCR2(provete 2,5,6) ,BCR3(provete 2),BCR4(1,2,3,6)	54
Figura 57- Provete 1 do BCR2.....	55
Figura 58- moldes com as três amostras preparados para encher com argamassa.	57
Figura 59- a) misturadora; b) mistura de argamassa.....	58
Figura 60- Molde com argamassa na mesa vibratória	59
Figura 61- três moldes dos elementos estruturais finalizados (argamassa,BCR, Aço).....	59
Figura 62- a) Elementos estruturais BCR 2; b) Elementos estruturais de Aço; c) Elementos estruturais de argamassa.....	60
Figura 63- secção transversal do varão pintado com tinta de prata: a); secção transversal do varão com fio de cobre e fita isoladora em toda a secção transversal do elemento de argamassa : b)	61
Figura 65-Esquema de ensaio dos elementos de argamassa com varão BCR2	62
Figura 64- Ensaio de flexão dos elementos de argamassa com BCR2	63
Figura 66- Pinças do multimetro ligadas aos fios de cobre para medir a resistencia eletrica	63

Figura 67- Esquema de ensaio dos elementos de argamassa com varão de aço e elementos de argamassa simples	64
Figura 68- Ensaio de flexão três pontos do elemento estrutural com varão de aço	64
Figura 69- valor da resistência elétrica e deformação em função do tempo (s) do provete 2 BCR2.....	66
Figura 70- Valor da resistência elétrica e deformação em função do tempo (s) do provete 6 BCR2.....	66
Figura 71- Valor da resistência elétrica e deformação em função do tempo (s) do provete 1 e 3 BCR2.....	67
Figura 72- Valor da resistência elétrica e deformação em função do tempo (s) do provete 4 e 5 BCR2.....	68
Figura 73- Valores obtidos da argamassa reforçada com aço	69
Figura 74- Resultados obtidos para a argamassa.....	70
Figura 75- Curvas da tensão extensão das três amostras com melhor módulo de elasticidade (Mpa).....	71
Figura 76- Gráfico da variação da resistência elétrica para o segundo ciclo de carga do provete 2.....	73
Figura 77- Gráfico da variação da resistência elétrica para o segundo ciclo de carga do provete 6.....	73

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Vantagens e desvantagens da monitorização por vibração [3]	8
Quadro 2- Vantagens e desvantagens da monitorização por fibras oticas [4].....	9
Quadro 3- Propriedades das fibras de carbono [13]	14
Quadro 4 Caraterísticas e vantagens dos materiais compósitos [34].....	16
Quadro 5- Caraterisiticas das fibras de vidro	41
Quadro 6- Caraterisiticas das fibras de carbono	41
Quadro 7- Composição dos varões entrançados compositos.....	42
Quadro 8- Procedimento de ensaio.....	45
Quadro 9- Valores do <i>gauge factor</i> BCR1	51
Quadro 10- Valores do <i>gauge factor</i> BCR2	52
Quadro 11- Valores do <i>gauge factor</i> BCR3	52
Quadro 12- Valores do <i>gauge factor</i> BCR4	52
Quadro 13- Variação da resistência elétrica em função da deformação aplicada para os quatro ciclos do BCR1,BCR2,BCR3,BCR4	53
Quadro 14- Parametros de ensaio de flexão	62
Quadro 15- Valores dos resultados mecânicos e eletricos da amostra de argamassa com varão de BCR	65
Quadro 16- Valores da resistencia elétrica das vigas com BCR2	65
Quadro 17- Valores medios do modulo de elasticidade para a viga com BCR2.....	71
Quadro 18- Valores medios do modulo de elasticidade para a viga argamassa.....	72
Quadro 19- Valores medios do modulo de elasticidade para a viga com aço	72
Quadro 20- Valores do <i>Gauge Factor</i> (GF)	74
Quadro 21- Resiliência para as três amostras de argamassa	74

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento temático

As obras de engenharia civil correspondem, de um modo geral, aos investimentos mais dispendiosos da nossa sociedade. Nos países desenvolvidos, o investimento em infraestruturas de engenharia sofreu um crescimento acentuado nas últimas décadas. No entanto, o desempenho de muitas dessas estruturas tem vindo a diminuir, afetando substancialmente a exploração e manutenção das construções, podendo reduzir a segurança até ao colapso de forma inadmissível em termos socioeconómicos.

A capacidade de monitorização é uma função muito importante, que pode detetar e prevenir falhas catastróficas, salvando vidas e bens e com isso prevenir as perdas económicas associadas. Além disso, a utilização de varões de reforço com capacidade simultânea de monitorização durante o seu tempo de vida, contribui para a melhoria da confiança, aumentando a sua vida útil, desde que o estado de tensão-deformação do varão entrançado seja continuamente verificado. Assim, a monitorização de uma estrutura não é mais do que a implementação de um sistema de monitorização de danos e ações. Este processo envolve a observação e inspeção periódica da estrutura, fazendo leituras e recolhendo valores cuja análise permita determinar e estado atual da integridade da estrutura.

Existem atualmente diferentes abordagens de monitorização, utilizando técnicas não destrutivas que têm sido investigados na comunidade científica. Os métodos de monitorização com resultados mais promissores são: monitorização de vibração, monitorização através da ressonância magnética dos materiais, monitorização através de propriedades piezo-resistivas de materiais e também a monitorização usando fibras óticas. Os sistemas atuais de monitorização são baseados em sensores. Basicamente, existem dois métodos para inclusão destes sensores numa estrutura: integrados dentro da estrutura ou colocados sobre a sua superfície.

No âmbito deste trabalho pretende-se explorar a capacidade de monitorização através de propriedades piezo-resistivas de materiais compósitos com reforço por fibras.

A monitorização por piezo-resistividade é efetuada através de elementos condutores, tais como as fibras de carbono misturados na matriz polimérica. Neste trabalho, fibras de carbono utilizadas nos varões são usadas em várias percentagens (5 %, 10%, 15%). Os varões de material

compósito são compostos por fibras de poliéster na camada do entrançado, fibra de vidro no reforço e, para monitorização, são usados filamentos em fibra de carbono em várias percentagens, tal como mencionado anteriormente.

1.2. Objetivos e fases do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de varões em material compósito, com base em fibra de vidro/fibra de carbono, com capacidade de monitorização, varão utilizando, para sua produção, a tecnologia de entrançamento, anteriormente desenvolvida.

Este varão é constituído por um núcleo, que confere as características mecânicas ao material, e uma camada de entrançado exterior, com o objetivo de proteger o varão as fibras de reforço contra agentes agressivos exteriores e garantir a necessária adesão à matriz cimentícia.

A combinação de dois tipos de fibras e em diferentes percentagens, no núcleo, pretende melhorar o comportamento mecânico e o custo, quando se tomam por referência os varões conhecidos e comercializados no mundo da construção.

Com a realização deste trabalho pretende-se alcançar, de forma faseada, os seguintes objetivos gerais:

- Desenvolvimento de varões entrançados em material compósito com capacidade de reforço e de monitorização da deformação de elementos de betão;
- Avaliação experimental do desempenho de monitorização destes varões;
- Definição do melhor desempenho em função do tipo de fibra, quantidade e configuração.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se uma introdução ao tema abordado na dissertação e explica-se a sua importância no domínio da Engenharia Civil.

No segundo capítulo abordam-se o tema da monitorização e analisam-se as várias técnicas de monitorização de estruturas de betão. Para além disso, descreve-se a monitorização em varões entrançados em material compósito. É ainda realizada uma análise crítica do trabalho efetuado por outros autores na área dos varões compósitos, apresentando diversos resultados e conclusões.

No terceiro capítulo descreve-se o processo de fabrico existente idealizado por outros autores e um levantamento das limitações deste processo. De seguida, é realizada uma previsão teórica das propriedades geométricas e físicas, são descritos o procedimento e os materiais utilizados no processo produtivo, assim como se descreve o funcionamento do equipamento.

No quarto capítulo é feita a apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos dos ensaios realizados.

No quinto capítulo é descrito o processo para a produção e de ensaio de elementos de betão com os varões produzidos no capítulo anterior e também com varões de aço. Em seguida é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

O sexto capítulo é dedicado às conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Estruturas de Betão: necessidade de monitorização

As obras de engenharia civil correspondem, de um modo geral, aos investimentos mais dispendiosos das nossas sociedades. Nos países desenvolvidos, o investimento em infraestruturas de engenharia sofreu um crescimento acentuado nas últimas décadas. No entanto, o desempenho de muitas dessas estruturas tem vindo a diminuir, afetando substancialmente a exploração e manutenção das construções, podendo reduzir a segurança até ao colapso de forma inadmissível em termos socioeconómicos.

As estruturas não se mantêm inalteradas ao longo do seu tempo de vida útil. Associadas à sua degradação existem várias causas tais como, as condições ambientais a que o betão está exposto (CO_2 , cloretos, humidade), as reações químicas expansivas internas (reações álcalis-agregado e reações sulfáticas), de ações físicas que normalmente são tratadas no cálculo estrutural (p.e., ações térmicas, fluência, retração, desgaste e erosão) e outras ações específicas como seja ação biológica, penetração de água sob pressão, lixiviação e ações de ataque por produtos químicos diversos (ácidos, bases, orgânicos). [1]

Durante anos, a manutenção das obras nunca foi devidamente equacionada, sendo agora os proprietários e organismos responsáveis pela sua exploração confrontados com a necessidade de estabelecer programas de reabilitação que exigem orçamentos avultados. Normalmente a manutenção que se faz nestas estruturas no caso de ausência de monitorização são as seguintes (Figura 1):

- ✓ Recuperação superficial da estrutura com argamassa;
- ✓ Reparação de fissuras (fissuras estáticas, fissuras dinâmicas);
- ✓ Proteção da estrutura (quando uma estrutura apresenta anomalias devido ao ataque de agentes químicos, neste caso procede-se a aplicação de revestimentos superficiais de proteção). [1]

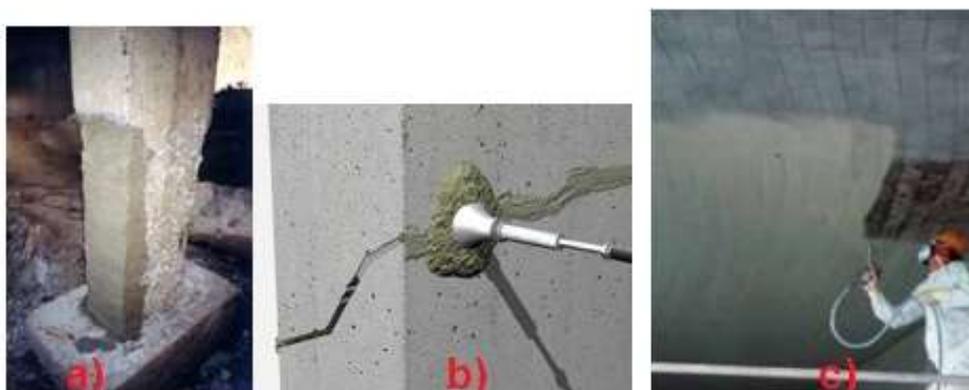


Figura 1- Recuperação superficial da estrutura com argamassa: a); reparação de fissuras com resina epoxi: b); aplicação de revestimentos superficiais de proteção: c) [1]

A capacidade de monitorização é uma função muito importante, que pode detetar e prevenir falhas catastróficas, salvando vidas e bens, prevenindo as perdas económicas associadas. Para além disso, a monitorização durante o seu tempo de vida vai aumentar o nível de confiança, aumentando a sua vida útil, desde que o estado de tensão-deformação da estrutura seja continuamente verificada. Assim, a monitorização de uma estrutura não é mais do que a implementação de um sistema de monitorização de danos e ações. Este processo envolve a observação e inspeção periódica da estrutura, fazendo leituras e recolhendo valores cuja análise permita determinar e estado atual da integridade da estrutura. [1]

Existem então diferentes abordagens de monitorização, utilizando técnicas não destrutivas que têm sido investigados pela comunidade científica, sendo que, muitas delas, se encontram já disponíveis no mercado. Os métodos de monitorização com resultados mais promissores são: monitorização de vibração, monitorização através da ressonância magnética dos materiais, monitorização através de propriedades piezo-resistivas de materiais e, também, a monitorização usando fibras óticas. Os sistemas atuais de monitorização são baseados em sensores.

Basicamente, existem dois métodos para inclusão destes sensores numa estrutura, incluindo integrados dentro da estrutura ou colocados sobre a sua superfície. A monitorização surge como meio eficaz para prevenir, em tempo útil, a necessidade de eventuais ações de reabilitação, monitorizando três grandezas sendo estas Mecânicas (deslocamentos, força, pressão, tensão, deformação), Físicas (temperatura, humidade relativa, vento, etc) e Químicas (PH, corrosão das armaduras e corrosão do aço). [2]

2.2. Métodos de monitorização de estruturas

2.2.1. Monitorização por vibração

A técnica de monitorização de vibração é normalmente utilizada para a identificação de danos das estruturas e para avaliar as cargas cíclicas, permitindo estimar com precisão a condição atual dos varões.

A monitorização por vibração requer modificações no sistema de obtenção de dados, que deverá ser de alta velocidade. No caso de leituras dinâmicas, há sistemas comerciais de aquisição de dados a alta velocidade disponíveis que vêm tendo um vasto campo de utilização em pontes. O desenvolvimento de acelerómetros de baixo custo irá permitir a utilização generalizada deste tipo de registo para avaliação de danos. O princípio de funcionamento deste tipo de monitorização consiste na interpretação da informação adquirida a partir da velocidade de propagação de ondas ultra-sons. Segundo esta teoria identificam-se três tipos de ondas criadas quando um meio sólido é perturbado por uma ação vibratória. Estas ondas designadas de compressão, transversais e de superfície. As ondas de compressão são as mais rápidas, seguidas pelas ondas transversais e por último pelas ondas de superfície. A velocidade das ondas depende das propriedades elásticas do meio em que estas se propagam. Os dispositivos de ultra-sons são constituídos por um transdutor eletro-acústico que está ligado a um circuito eletrónico, onde é recebido um impulso para oscilar mecanicamente, pois o circuito eletrónico emite pequenos estímulos elétricos ao transdutor ativando-o na sua frequência natural. Esta vibração produz os impulsos, que por sua vez são transformados em ondas de energia mecânica pelo transdutor-transmissor, que estão em contacto com a superfície do material que está a ser monitorizado.

[3]

Quadro 1- Vantagens e desvantagens da monitorização por vibração [3]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ É um bom método para conhecer a uniformidade da estrutura, identificar defeitos e avarias, e detetar eventuais modificações das propriedades da estrutura ao longo do tempo; ✓ Procedimento de ensaio simples; ✓ Ensaio não destrutivo, permite a realização de vários ensaios sobre o mesmo provete sem o deteriorar. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Os resultados são influenciados por um grande número de fatores, sendo difícil definir a exatidão do ensaio;

Williams et al. [3] utilizou a técnica vibracional para monitorar as condições de tensão / deformação em varões. Nestes foi aplicada uma tensão de impulso de um transdutor de excitação e medido a velocidade das ondas vibracionais propagadas no interior dos varões, utilizando um outro transdutor de monitorização. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a velocidade das ondas de ultra-sons que percorreu o varão entrançado em material compósito foi consideravelmente influenciada pela tensão. Também se descobriu que as emissões acústicas produzidas no varão mediante a aplicação de até 60% a 70% da sua carga de rutura foram distribuídos aleatoriamente por toda a amostra testada. No entanto, após este limite de carga, a emissão acústica foi mais concentrada num determinado local, permitindo, assim, a localização do local da rutura. Estes investigadores também descobriram que o atraso da emissão acústica (um parâmetro que pode ser definido com a força de tração necessária para produzir um baixo nível de base especificado de emissão acústica) poderia estar correlacionada com a carga de rutura final de diferentes tipos de varões utilizados no presente estudo. [3]

2.2.2. Monitorização usando fibras óticas

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

Este sistema de monitorização tem como princípio de funcionamento uma rede de Bragg que se caracteriza por uma modelação periódica permanente do índice de refração do núcleo da fibra ótica conferindo características refletivas espectralmente controladas.

A luz que propaga-se através do núcleo das fibras óticas ao deparar-se com a rede Bragg, sendo que esta interage com as várias interfaces entre as porções de fibra que apresentam diferente índice de refração, dando origem à ocorrência de reflexões parciais localizadas. [4]

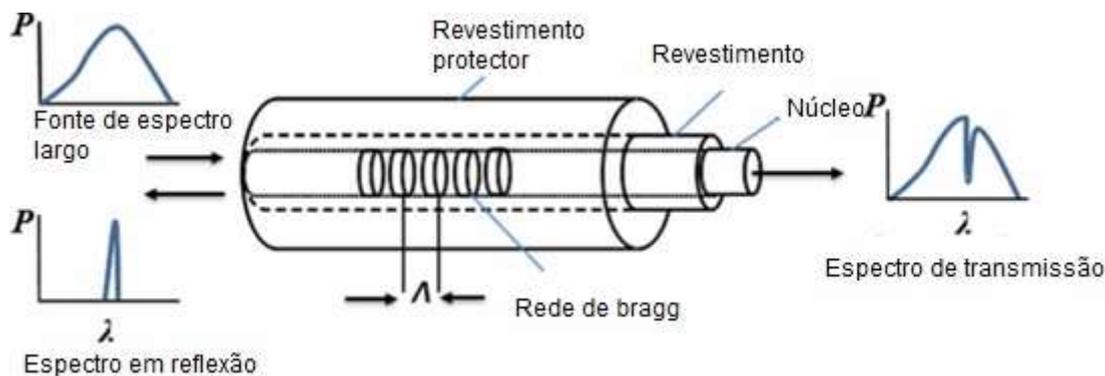


Figura 2- Sensor Bragg [4]

Esta técnica de monitorização apresenta algumas vantagens e desvantagens que são apresentadas no Quadro 2 [4].

Quadro 2- Vantagens e desvantagens da monitorização por fibras oticas [4]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Isolamento elétrico; ✓ Imune à corrosão; ✓ Tolerante a altas temperaturas; ✓ Elevada sensibilidade; ✓ Matéria-prima muito abundante; ✓ Estabilidade ao longo do tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fragilidade das fibras; ✓ Geralmente custo elevados de todos os componentes.

2.2.3. Monitorização através de materiais condutores

A monitorização de estruturas de betão aproveitando as propriedades piezoelétricas de uma estrutura recebeu um grande interesse em diversos setores industriais e, portanto, em muitas aplicações. A capacidade de monitorização de alguns materiais fibrosos com base na sua

condutividade elétrica pode ser aplicado com sucesso para a indústria da construção, uma vez que, por esta técnica, entre outras coisas, é possível realizar a monitorização em linha do estado físico da estrutura. Este tipo de sistema de monitorização é extremamente importante, uma vez que permite conhecer o estado de degradação do betão e, por outro lado, permite que, em caso de quebra / dano, identificar a localização do dano e assim agir em conformidade.

Dois estudos científicos baseados em propriedades piezoelétricas de sistemas fibrosos são apresentados e discutidos de seguida.

Wang e Chung [5] e Irving e Thiagarajan [6] têm dedicado seus esforços de investigação para o desenvolvimento de sistemas de monitorização que utilizam recursos de propriedades piezoresistivas de materiais fibrosos à base de carbono. Os seus estudos concentraram-se na medição da alteração da resistência elétrica de materiais fibrosos como uma função da tensão aplicada / deformação.

É óbvio que a aplicação deste tipo de sistema de monitorização, apesar de ser uma solução muito interessante, é sempre dependente dos fatores externos para o seu correto funcionamento. A intromissão de outros materiais ou sistemas condutores é uma das questões-chave a serem tomadas em consideração para com esta técnica, especialmente quando aplicado em produtos utilizados no ambiente aquoso ou húmido, já que essas condições ambientais podem interferir com as medições de resistividade elétrica. No entanto, esta limitação técnica pode ser com facilidade ultrapassada por revestir os componentes / materiais elétricos com substratos isolantes. [5;6]

Recentemente, Figueiro e Pereira, [7], desenvolveram um tipo de varão em material compósito para reforço de estruturas de betão, a fim de substituir o aço, que é afetado por corrosão. Em adição às características físicas destes varões compósitos, estes investigadores também estudaram as propriedades piezoresistivas, que têm origem devido à presença das fibras de carbono, condutoras de eletricidade. Os problemas relativos à humidade e outros elementos condutores, foram rapidamente superados porque estes varões compósitos foram concebidos utilizando uma matriz polimérica que protege todos os componentes fibrosos que atuam como um material de isolamento. Em termos de controlo, os resultados obtidos demonstraram que é possível estabelecer uma relação entre a deformação do varão e a sua resistência elétrica, como exemplifica a Figura 3.

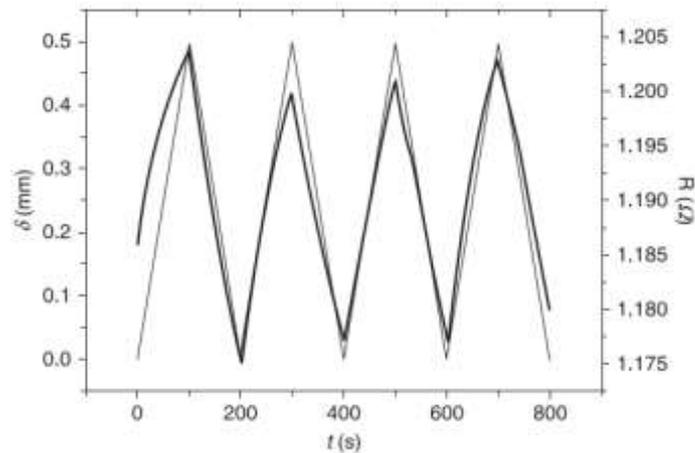


Figura 3- Gráfico que relaciona a variação da resistência elétrica com a deformação em flexão sob carga cíclica, ao longo do tempo [7]

Outra conclusão importante desta investigação é que a capacidade de monitorização varia com a percentagem de fibra de carbono utilizada no varão, sendo que a sensibilidade do varão na monitorização aumenta com a redução de fibra de carbono.

2.3. Monitorização piezoelétrica

A piezo-resistividade é a variação da resistência elétrica do material quando este é sujeito a aplicação de uma deformação mecânica ou a alterações geométricas do material. Aplicando-lhe uma diferença de potencial pode-se avaliar a sua resistência e relacionar estas alterações com as deformações provocadas no material pela tensão aplicada [8,9].

2.3.1. Gauge Factor (GF)

A piezo-resistividade é caracterizada pelo Gauge Factor (GF) sendo este também denominado de fator sensor da deformação em função da resistência elétrica:

$$GF = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Sendo:

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

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

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

No caso de só haver mudanças geométricas puras do material a equação assume a seguinte forma [8,9]:

$$\frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} = 1 + 2\nu \quad (2.2)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}^2} \quad (2.3)$$

O valor do GF depende do tipo de material e pode ser negativo ou positivo. Para materiais metálicos varia entre 2 e 4. Um Gage Fator com valor positivo exprime uma piezo-resistividade positiva, e um GF negativo traduz uma piezo-resistividade negativa.

Este fenómeno permite a utilização do material, como um sensor de deformação, pois a resistência elétrica medida pode ser relacionada com a tensão. A resistividade aumenta linearmente com a carga aplicada sob tração e diminui linearmente com carga aplicada sob compressão [8,9].

A deformação produzirá mudanças na atual densidade que fará mudanças na $\Delta\rho$ resistividade. Nesse caso, a alteração total na resistência, devido à tensão mecânica é a seguinte: [10, 11].

$$\frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho}{\rho \varepsilon} \quad (2.4)$$

2.3.2. Materiais piezoelétricos

Existe uma vasta gama de materiais que apresentam propriedades piezoelétricas, e associados a eles, uma grande disparidade de fatores de medição. Neste ponto serão abordados as fibras e os materiais compósitos.

2.3.2.1 Fibras

As fibras são classificadas em duas grandes classes, fibras naturais ou não naturais. As fibras naturais existem, tal como são, na natureza e podem ser de origem animal, vegetal e mineral. As fibras não naturais encontram-se divididas em dois grupos, as orgânicas e as inorgânicas. [34]

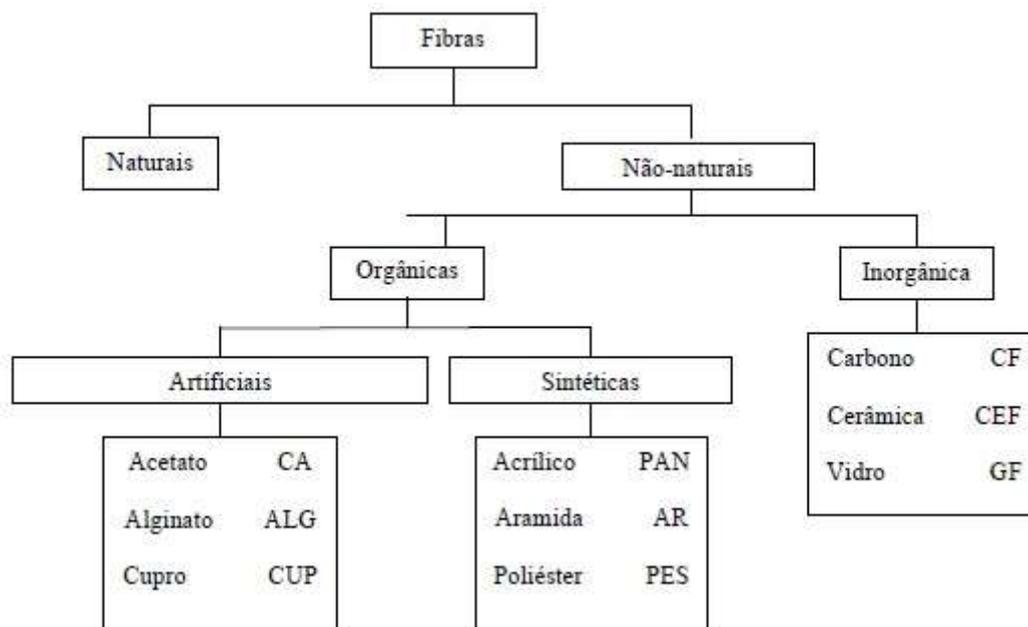


Figura 4- Classificação das fibras quanto à sua origem [34]

A fibra de carbono é um material filamentoso, obtido a partir de vários tipos de materiais compostos de carbono através da decomposição térmica sem oxigenação. Existem três tipos de fibras de carbono, tendo em conta o precursor utilizado: viscose, alcatrão e poliacrilonitrilo. A fibra de carbono Rayon (viscose) é produzida a partir de fibras de celulose, sendo assim um material produzido através de um recurso renovável, assumindo um rótulo de material sustentável do futuro [12].

As fibras de carbono apresentam elevada rigidez e resistência, preservando estas características com o aumento da temperatura. São bastantes resistentes a ambientes agressivos e têm um comportamento linear até à rotura. Os materiais compósitos de matriz polimérica com fibras de carbono apresentam propriedades piezo-resistivas. As fibras de carbono apresentam diversas características, sendo estas: elevada resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado, baixa massa específica, boa resistência elétrica e térmica, além de inércia química, exceto quanto à oxidação. [13].



Figura 5- Roving de fibra de carbono [13]

Quadro 3- Propriedades das fibras de carbono [13]

Propriedades	Unidades	Fibra de Carbono
Diâmetro	μm	7,0-9,7
Massa volúmica	10^3Kg m^{-3}	1,95
Módulo de young	GPa	390
Resistência à tração	GPa	2,2
Deformação na rotura	%	0,5

Os nanotubos de carbono são folhas de grafeno enroladas de modo a formar uma peça cilíndrica, dependendo da forma como a folha de grafeno é enrolada, os nanotubos podem apresentar propriedades metálicas ou semicondutoras, sendo uma nova classe de materiais descobertos em 1991 que apresentam boas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. As propriedades mecânicas notáveis exibidas pelos nanotubos de carbono têm estimulado muito interesse no seu uso para reforçar compósitos avançados. O seu módulo elasticidade e resistência à tração é mais de 270 GPa e de 150 GPa, respetivamente, o que os torna muitas vezes mais duros e mais resistentes do que o aço, sendo, ao mesmo tempo três a cinco vezes mais leve (figura 6) [13].

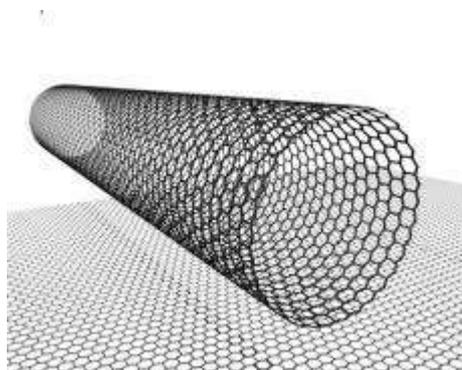


Figura 6- Exemplo da estrutura de um nanotubo de carbono [14]

2.3.2.2 Materiais Compósitos com capacidade piezoelétrica

Os compósitos são materiais formados por dois ou mais componentes com composições diversas, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface.

O principal objetivo na produção de materiais compósitos é de combinar pelo menos dois componentes ou duas fases, com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas em sua composição superiores às dos componentes unitários.

Os materiais compósitos são classificados em três tipos: particulados, reforçados com fibras e estruturais, como mostra a figura 7. [34]

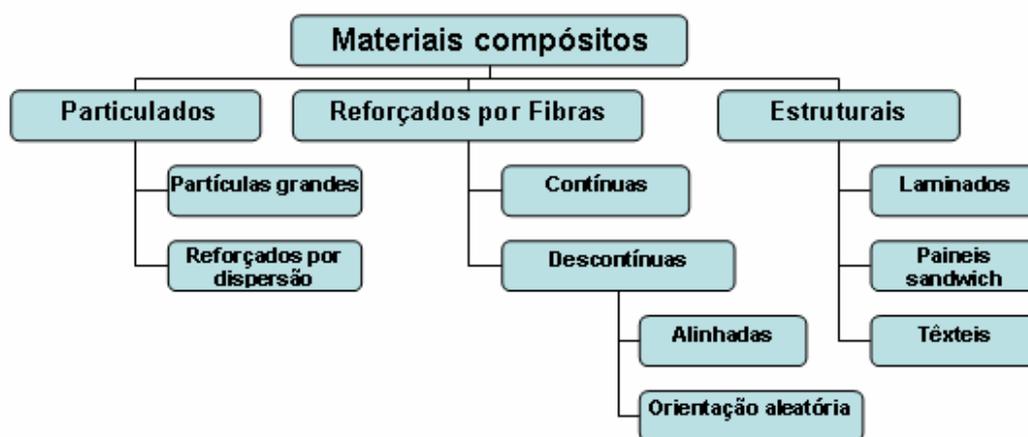


Figura 7- Classificação dos materiais compósitos [34]

Os materiais compósitos particulados podem ser constituídos por fragmentos de elevadas dimensões como as borrachas (polímero/metal) e o betão (cerâmico/cerâmico), ou então podem ser reforçados por dispersões. 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.

Os materiais compósitos reforçados por fibras mais comuns são as fibras de carbono em matrizes de polímeros e as fibras de vidro em matrizes de epóxi ou poliéster

Os materiais compósitos estruturais são constituídos por materiais homogêneos com propriedades dependentes da orientação relativa dos componentes. De modo que os laminados (ex. contraplacado de madeira), os painéis Sandwich e os têxteis são exemplos destes materiais compósitos. [34]

Quadro 4 Características e vantagens dos materiais compósitos [34]

Características/ Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> ✓ São resistentes à fadiga; ✓ Têm maior resistência ao fogo que as ligas ligeiras para uma espessura idêntica; ✓ Não plastificam, o seu limite plástico corresponde à rotura; ✓ Têm uma maior resistência ao choque que os materiais metálicos.
---------------------------------------	--

A polianilina (PANI) é um polímero intrinsecamente condutor (PIC) que exibe um efeito piezo-resistivo estável, com GF's aproximadamente iguais a 5 [3]. No estudo de M. Lillemose et. al. [3], efetuado com o propósito de analisar as propriedades piezo-resistivas da PANI, construiu-se um elemento baseado neste polímero, e com ele realizaram-se alguns testes. Numa fase preliminar a amostra foi submetida a testes de flexão de 4 pontos – 4-point bending. Os ensaios realizaram-se com tensões da ordem dos 160 MPa em intervalos de 2 minutos. Isto é, 2 minutos sujeito a tensão, 2 minutos sem tensão, e assim sucessivamente. Os resultados obtidos, estão expressos no gráfico da figura 8, comprovando a piezo-resistividade da PANI.

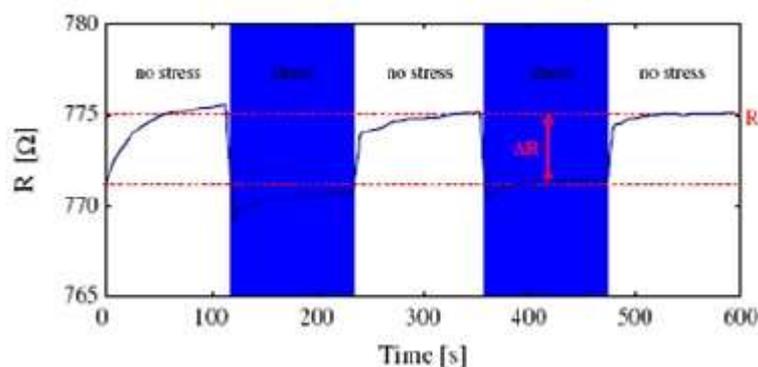


Figura 8- Gráfico da resistência (R) da PANI em função do tempo (time). As zonas azuis correspondem aos intervalos de tempo em que é aplicada uma tensão, as zonas brancas correspondem a intervalos de tempo em que não é aplicada tensão [15].

Considerando que um ciclo completo corresponde a um momento de tensão seguido de um momento de relaxamento, podem considerar-se dois ciclos completos no gráfico. Neste ensaio obtiveram-se valores de $GF_1 = -4,9$ e $GF_2 = -4,1$, para o primeiro e segundo ciclo respetivamente.

Os valores dos GF's são negativos uma vez que a resistência da amostra diminui quando é deformada.

Neste estudo foram também realizados testes de flexão em 4 pontos.

As amostras foram sujeitas a 3 ciclos de 30 minutos, com 10 variações de tensão entre os 0 e os 70 MPa. Com os resultados adquiridos traçaram-se as curvas da variação relativa da resistência em função da deformação, para cada ciclo como ilustra a seguinte figura 9. [15]

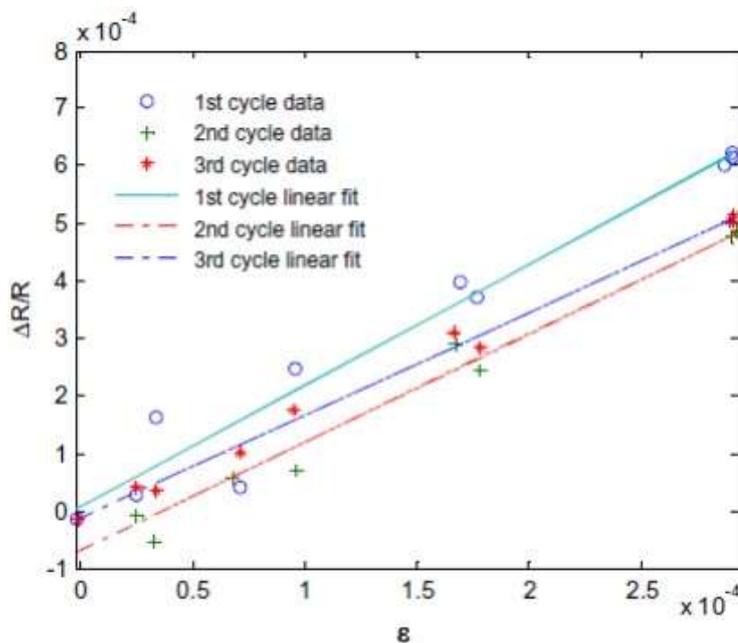


Figura 9- Gráfico da variação relativa da resistência $\Delta R/R$ em função da deformação ϵ [15]

Da análise obtiveram-se os valores de $GF_1 = -2,1$; $GF_2 = -1,9$ e $GF_3 = -1,8$ para o 1.º, 2.º e 3.º ciclo respetivamente. Os valores de GF obtidos são negativos porque os testes de flexão de 4 pontos foram realizados na zona comprimida.

Num outro estudo de R. Mateiu et. al. (2007) [4] foi produzido um elemento baseado no polímero condutor 3,4-ethylenedioxythiophene. Este tinha como objetivo examinar a fiabilidade do efeito piezo-resistivo do polímero, com utilizações em ambientes secos e líquidos. Para tal, submeteu-se a amostra a testes de flexão de 4 pontos. Com os valores obtidos produziu-se o gráfico da variação relativa da resistência ($\Delta R/R$) em função da deformação aplicada (figura 10) [16].

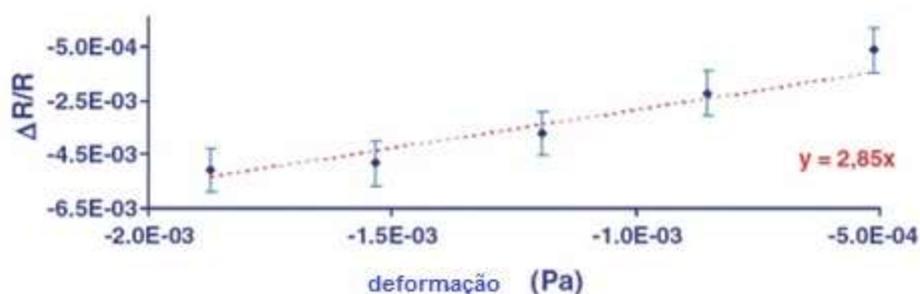


Figura 10- Gráfico da variação relativa da resistência ($\Delta R/R$) em função da deformação [16]

O valor de GF foi calculado através de uma regressão linear ajustando os pontos do gráfico à função $\Delta R/R$, obtendo-se o valor de 2,85.

Os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de carbono são materiais que apresentam propriedades piezo-resistivas [17,18,19].

O trabalho realizado por D.A. Gordon et. al. [7], foi desenvolvido com o intuito de estudar o efeito piezo-resistivo de dois compósitos comerciais com fibras de carbono. Realizaram-se ensaios de tração a estas duas amostras. A resistência elétrica dos compósitos durante os ensaios, confirmou a existência de características piezo-resistivas. Na seguinte figura 11 [17] apresentam-se dois gráficos com os resultados dos ensaios de tração:

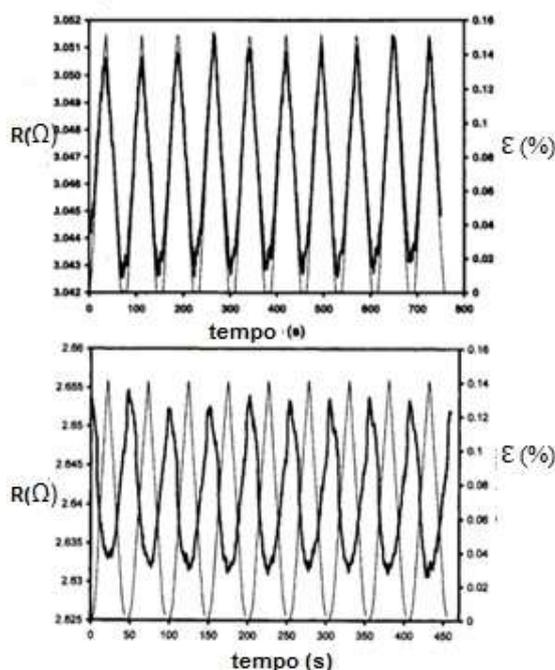


Figura 11- Gráficos da resistividade em função do tempo obtidos nos ensaios de tração das duas amostras [17].

Da análise do primeiro gráfico denota-se um aumento da resistência quando o compósito é sujeito a uma deformação, o que resulta num GF positivo de aproximadamente 2. No segundo gráfico averigua-se uma diminuição da resistência quando o compósito é sujeito a uma deformação, o que resulta num GF negativo de cerca de 6.

Têm sido alvo de estudo as propriedades piezo-resistivas dos compósitos poliméricos com fibras de carbono. São exemplo os sensores de deformação de compósitos de borracha nitrílica com fibras de carbono [20], sensores de deformação na forma de revestimentos para betão, à base de resinas epóxicas reforçadas com fibras de carbono [21]. O efeito piezo-resistivo das fibras de carbono tem sido também objeto de estudo, como o trabalho desenvolvido por J.K. Kim et. al. [22], que reporta a medição do GF de fibras de carbono, produzidas a partir de polyactylonitrile (PAN), com vista a utilizações em sensores ressonantes. O GF obtido para estas fibras foi entre 100 e 400.

2.4. Varões entrançados em material compósito

Os varões compósitos tiveram um grande desenvolvimento nos finais dos anos 80, por se mostrarem uma boa alternativa à armadura convencional, a fim de resolver os problemas relacionados com a corrosão, humidade e entre outros.

A produção dos primeiros varões compósitos ocorreram pela técnica de pultrusão, com utilização da fibra de vidro e de resinas, como poliéster e viniléster. A aderência é uma das propriedades que deve ter qualquer armadura que incorpora o betão, e para isso foram aplicadas várias técnicas como, o revestimento superficial dos varões por grãos de areia, com nervuras moldadas na resina final de recobrimento, o que obtiveram varões com a superfície coberta de areia e varões com enrolamento helicoidal da fibra.

Nos anos 90 foi desenvolvida uma solução para melhorar as propriedades e características do varão em material compósito, essa melhoria passou por uma estrutura entrançada composta por fios de fibras de aramida com um núcleo cilíndrico. [34]

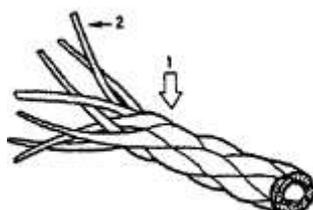


Fig. 2

Figura 12- Estrutura entrançada do varão [34]

Esta estrutura entrançada tem um núcleo cilíndrico que tem como objetivo, ter um comportamento elástico, numa primeira fase, e depois do pico ter um comportamento dúctil. Desta forma, pretendia-se que quando o varão fosse sujeito a cargas de tração, o núcleo estivesse tracionado e as fibras entrançadas exteriores fossem capazes de girar e dar uma maior deformação para uma determinada carga. [34]

Após esta investigação, nos finais dos anos 90, um grupo de pesquisa da Universidade de Drexel, EUA, desenvolveu uma técnica inovadora de uma estrutura entrançada, denominada por "braidtrusion". [34]

O processo "braidtrusion" consiste numa entrançadeira que transporta 24 fios, produzindo uma estrutura tubular entrançada, possibilitando uma utilização de diferentes tipos de fibras na camada entrançada e no núcleo. [34]

Após a realização deste entrançamento, esta estrutura passa numa zona, que, através da infusão da resina, são impregnadas as fibras, e por último passa, numa estufa para curar a resina.

2.4.1. BCR (Braided Composite Rods)

Os varões compósitos entrançados (BCR) são utilizados para reforço de betão (vigas, pilares e, em forma de rede, lajes e pavimentos) e estabilização de solos (pregagens e ancoragens).

Estes varões não sofrem o processo de corrosão apresentando assim uma elevada durabilidade. São varões leves em que a relação da tensão de rotura/peso específico é elevada, permitindo o reforço de elementos de betão em que o peso do material é um fator importante. São materiais inteligentes, que permitem a monitorização dos estados de tensão das estruturas. São varões produzidos com diferentes tipos de materiais, de acordo as aplicações e exigências em vista e executados numa única etapa de produção. São constituídos por uma superfície nervurada cujo material é o nylon.

Os BCR apresentam propriedades mecânicas, físicas e químicas compatíveis com as exigências que o reforço do betão, podem substituir os varões de aço eliminando o principal problema que é a corrosão das armaduras. São igualmente adequados na substituição dos varões de aço na estabilização dos solos.

O BCR tem como características:

- ✓ Não sofre corrosão;
- ✓ Permite a monitorização de estados de tensão de ensaios através de uma técnica não destrutiva;
- ✓ Relação elevada desempenho/custo;
- ✓ Ajuda a minimizar a degradação e os procedimentos de reabilitação das estruturas;
- ✓ Elevada durabilidade;
- ✓ Custos reduzidos de manuseamento, transporte e aplicação em obra.

As fibras de carbono têm sido utilizados como materiais de reforço e de monitorização, juntamente com a fibra de vidro. Vários varões compósitos foram produzidos através de uma técnica patenteada com base em uma máquina de entrançar convencional modificada [24].

O trabalho realizado (Fangueiro, et. al, 2010) apresenta o desenvolvimento de um varão compósito entrançado (BCR) capaz de reforçar e monitorizar o estado de tensão de estruturas de betão. Os materiais estudados foram preparados com uma composição diferente de fibra de carbono, como se segue: BCR2 (77% fibra de vidro /23% de fibra de carbono), BCR3 (53% fibra de vidro/47% de fibra de carbono), BCR4 (100% de fibra de carbono). Os BCR's foram testados sob flexão, enquanto a variação da resistência elétrica foi monitorizada simultaneamente. As correlações obtidas entre a deformação e a resistência elétrica mostram o funcionamento dos varões para serem usados como sensores.

Estes três tipos de BCR com teor de fibra de carbono diferentes (23%, 77% e 100%) foram preparados pelo processo de entrançamento em simultâneo da impregnação da resina. Os BCR's foram produzidos numa máquina de entrançamento vertical com um sistema de impregnação incorporado (Gonilho Pereira, 2008). A figura 13 mostra a composição BCR ao

passo que a Figura 14 mostra a secção transversal do correspondente BCR. Um total de 14 amostras foram preparadas e avaliadas [24].

Rod type	Fibre composition	Fibre (%)	Nº of rovings	Linear mass (tex)
2	E-glass/Carbon	77/23	18/3	1600/900
3	E-glass/Carbon	53/47	53/47	900
4	Carbon	100	12	900

Figura 13- Composição dos BCR's [24]

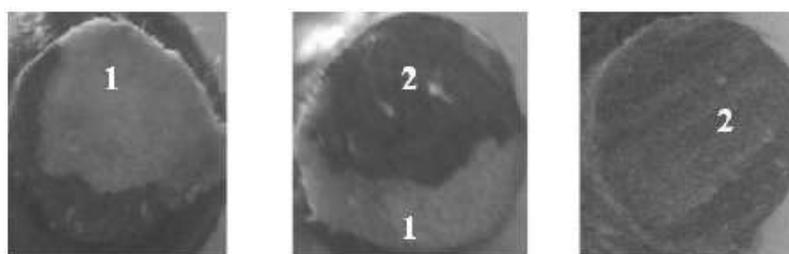


Figura 14- secções transversais de BCR2, BCR3 e BCR4. 1 - Fibra de vidro 2 - A fibra de carbono [24]

O procedimento dos ensaios realizados no BCR baseia-se na medição da resistência elétrica durante a aplicação simultânea de uma deformação de um teste de flexão em três pontos cíclico como mostra a figura 15. Testes cíclicos de flexão de três pontos foram realizados numa máquina universal de ensaios - Autograph IS (Shimadzu) 500N. A medição da resistência elétrica foi realizada num multímetro digital (Agilent, 84401A). O sinal elétrico foi adquirido através de fios de ouro ligados à secção transversal das amostras com tinta prata [24].

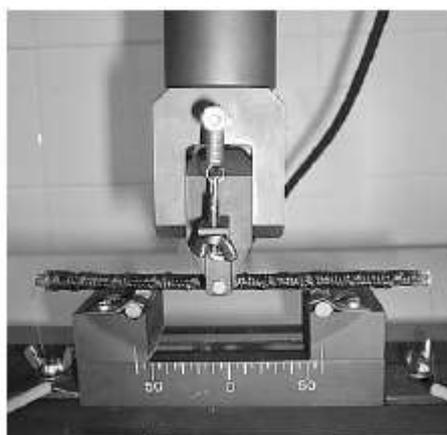


Figura 15- BCR durante o ensaio de flexão [24]

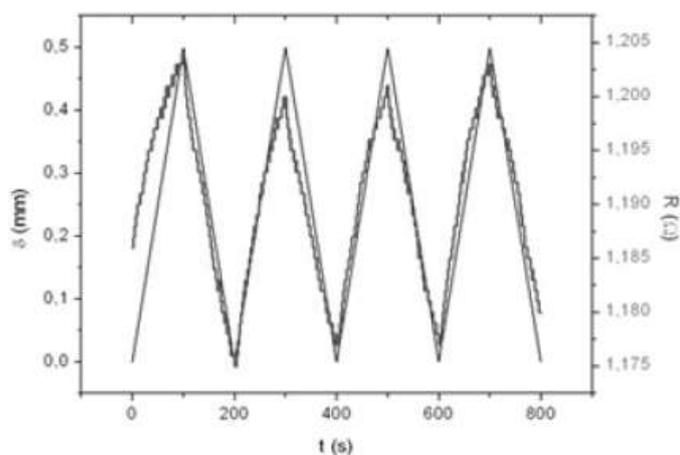


Figura 16- Deslocamento, resistência e dependência do tempo para o tipo BCR4 (100% de carbono); resposta positiva das

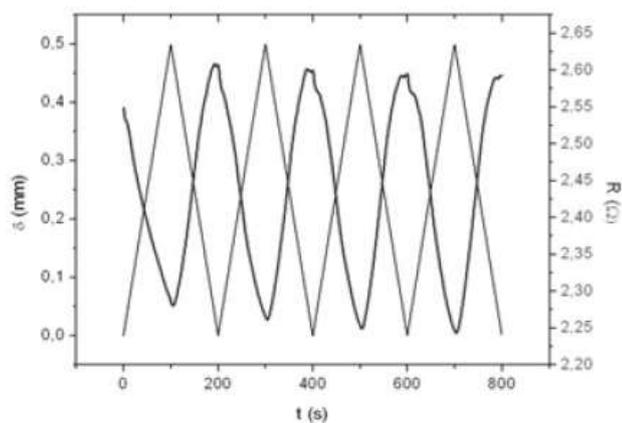


Figura 17--Deslocamento, resistência e dependência do tempo para o tipo BCR2 (77% de vidro, 23% de carbono); resposta negativa de amostras testadas.[24]

A tensão é calculada a partir do deslocamento e a mudança de resistência fracionada é calculada a partir da alteração da resistência elétrica, os valores dos dois parâmetros são apresentados ao longo do tempo de 100, 300, 500 e 700 segundos [24].

Cycle No.		1	2	3	4				
t (s)		100	300	500	700				
Rod type	Sample No.	$\epsilon (\times 10^{-2})$	$\Delta R/R_0$						
2	Xm 1, 2, 3	0.48	-0.10	0.48	-0.11	0.48	-0.12	0.48	-0.12
	12, 13, 14	0.47	0.08	0.47	0.07	0.47	0.07	0.47	0.06
3	3, 7, 12	0.48	0.04	0.48	0.02	0.48	0.01	0.48	0.01
	6, 10, 13	0.48	-0.06	0.48	-0.07	0.48	-0.07	0.48	-0.07
4	5, 7, 12	0.55	0.02	0.55	0.01	0.55	0.01	0.55	0.01

Figura 18- Tensão e resistência fracional da mudança de BCR [24]

No caso de a resposta ser positiva o que engloba os tipos BCR2 (77% de vidro, 23% de carbono) e BCR3 (53% de vidro, 47% de carbono), as curvas traçadas foram divididas em duas partes, apresentadas por duas linhas de tendência (1- carregamento e 2- descarregamento) para cada curva. A razão para esta divisão é o declive acentuado das curvas no intervalo de 0 a 0,1 para o tipo BCR2 (77% de vidro, 23% de carbono) e de 0 a 0,2 para o tipo BCR3. A variação da resistência fracionada foi expressa a partir das equações de tendência linear como uma função da tensão de cada um dos três tipos de varões de BCR, para a parte de carga e descarga do ciclo (1 e 2) para ambos os tipos de respostas. As relações lineares totais dos dois parâmetros obtidos no trabalho mostrou um elevado nível satisfatório de capacidade de monitorização do BCR [24].

Rod type	GF		Xm	R ²		Response
	1*	2*		1	2	
2	0.58100	0.46312	0.52206	0.98965	0.99602	Positive
	0.09554	0.12951	0.11253	0.95651	0.97279	Positive
	-0.28869	-0.34058	-0.31464	0.99218	0.97288	Negative
3	0.16095	0.15806	0.15951	0.98918	0.99668	Positive
	0.03847	0.07018	0.05433	0.98339	0.98172	Positive
	-0.14084	-0.16380	-0.15232	0.93925	0.96892	Negative
4	0.03581	0.03702	0.03415	0.97118	0.99305	Positive
	-0.07451	-0.07684	-0.07568	0.99448	0.98699	Negative

Figura 19- Gauge factor (GF) e quadrado do valor de regressão (R²) [24]

Da análise da figura 19 conclui-se que o *gauge factor* para o tipo BCR2 (77% de vidro, 23% de carbono) é quase cinco vezes maior do que para o tipo BCR3 (53% de vidro, 47% de carbono) e BCR4 (100% de carbono). O *gauge factor* do tipo BCR3 (53% de vidro, 47% de carbono) é um pouco maior. O *gauge factor*, mostra o comportamento de monitorização das amostras de BCR. Este aumenta com a diminuição da percentagem de fibra de carbono. Isto significa que o tipo BCR2 (77% de vidro, 23% de carbono) tem um comportamento de monitorização mais fiável. Os *gauge factors* calculados para os BCR's estão com valores inferiores a 1, a razão para

estes pequenos valores seria, como mencionado anteriormente, a percentagem mais elevada do componente de carbono. Por outro lado, a principal vantagem dos presentes materiais é a capacidade de reforço superior e, portanto, a combinação de reforço e capacidade de monitorização [24].

2.4.2. FRP (Polímero reforçado com fibra)

O varão de FRP é um material anisotrópico constituído por fibras contínuas impregnadas com resinas, podendo ser produzido através do método de pultrusão e entrançamento. As propriedades físicas e mecânicas dos varões de FRP influenciam o seu comportamento nas estruturas de betão armado e dependem de diversos fatores tais como o volume, tipo e orientação das fibras, tipo de resina, dimensão do varão assim como da qualidade durante o processo de fabrico. As propriedades dos varões são também influenciadas pela história e duração da carga, temperatura e humidade [25,26,27].

A corrosão da armadura no betão é um processo eletroquímico, que consiste na oxidação destrutiva do aço pelo meio que envolve, isto é, o processo pelo qual o aço tende a regressar ao seu estado natural (óxido de ferro).

Recentemente, Figueiro e Pereira (2011) [7], desenvolveram um tipo de varão de compósitos para reforço de betão, a fim de substituir o aço, que é afetada pela corrosão. Em adição às propriedades físicas desses varões compósitos, estes investigadores, também estudaram as propriedades piezo-resistivas, que se originam devido à presença das fibras de carbono e transformam estes materiais em uma ferramenta de monitorização.

Os problemas identificados acima, como a humidade em outros elementos condutores, foram rapidamente superados porque estes varões compósitos sendo projetados usando uma matriz polimérica que protege todos os constituintes fibrosos agindo como um material de isolamento. Em termos de controlo, os resultados obtidos demonstraram que é possível estabelecer uma relação entre a deformação do varão e a sua resistência elétrica, como mostrado na Figura 20 [7].

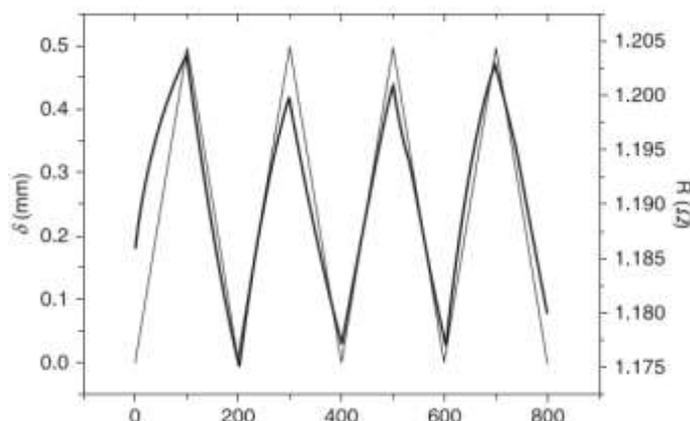


Figura 20- Variação da resistência elétrica com a deformação a flexão sob cargas cíclicas [7]

Outra conclusão importante deste estudo está relacionada com a percentagem de carbono utilizada (material condutor). A sensibilidade da tensão deste sistema de controlo verificou-se um aumento com a diminuição da percentagem de fibras de carbono usadas como reforço axial. O sistema de monitorização desenvolvido baseou-se num conceito semelhante também investigado por Nanni et al, [28]. Varões com capacidade de monitorização foram aplicados a vigas de betão e a estas foram realizados ensaios de flexão, a fim de avaliar a resposta piezo-resistiva. Estes varões foram produzidos com fibra de carbono interna com 0,5 mm de diâmetro, e uma camada externa de GFRP (compósito reforçado com fibra de vidro) com 6 mm de diâmetro e impregnado com uma resina epoxy, figura 21 [28].

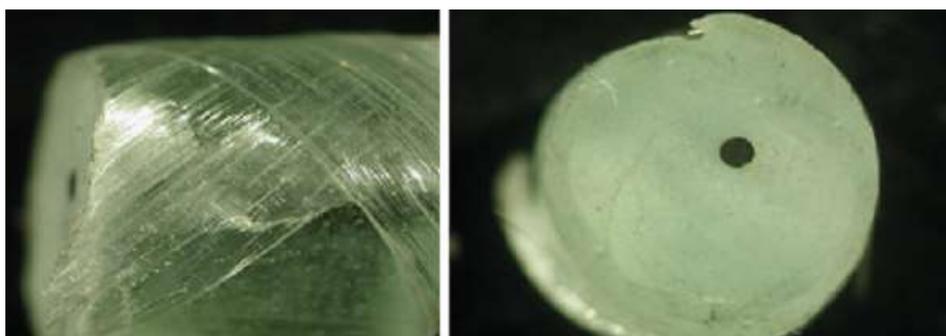


Figura 21- vista longitudinal e transversal de CF-GFRP do varão [28].

Para melhorar o desempenho dos varões com capacidade de monitorização, Yang et al [29], realizou novas investigações nessa direção e mostrou que era possível alcançar uma melhor deteção do comportamento pseudo- dúctil através da hibridização dos varões de FRP usando uma combinação de diferentes tipos de fibras de carbono, tais como alta resistência (HS), de módulo elevado (HM) e fibras de aramida de alta ductilidade, figura 22 [29].

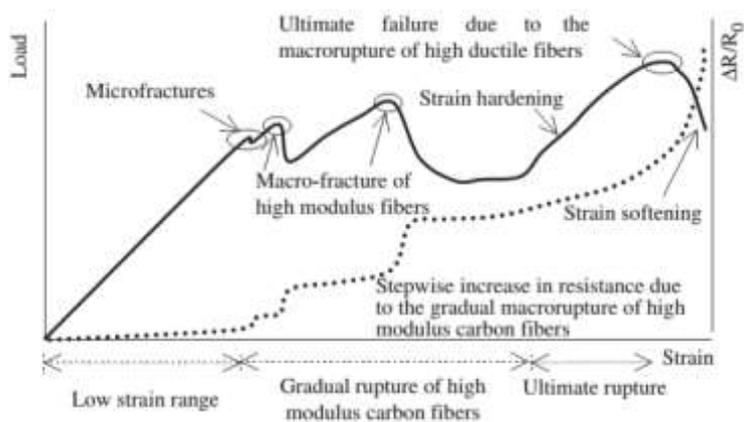


Figura 22- Resposta elétrica e mecânica de compósitos HCFRP, [29].

A ideia implícita de usar vários tipos de fibras de carbono e de aramida melhorou o comportamento pseudo-dúctil do varão, e ao mesmo tempo houve uma melhoria do comportamento de monitorização através da introdução de diferentes tipos de fibras como mostra a figura 23. [29]

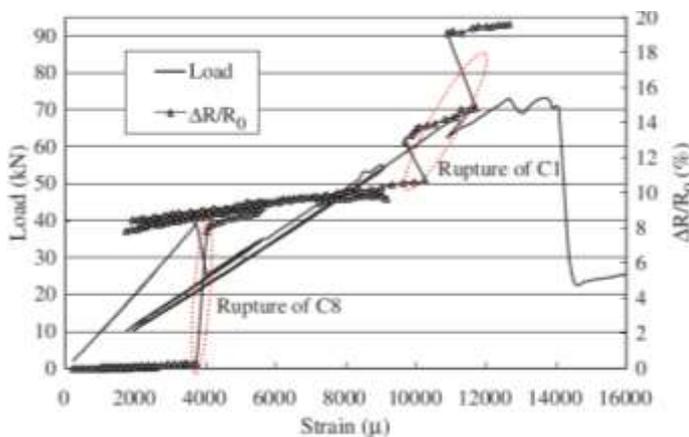


Figura 23- curvas de carga-deformação e $\Delta R/R_0$ -strain, [29]

Após a hibridação a sensibilidade do varão melhorou, onde a resistência elétrica varia com a tensão de uma forma lenta devido ao gradual macro-fracturas de diferentes tipos de fibras de carbono.

Esta pesquisa também demonstrou que as fibras de alta ductilidade, eletricamente inertes tiveram um papel positivo na melhoria das propriedades piezo-eletricas, pois ajudaram a obter curvas mais suaves $\Delta R/R_0$ [29,30].

Após alguns anos, estes varões sofreram algumas melhorias com a adição de nanopartículas de carbono (CNP), em vez de fibra de carbono (CF) no núcleo, como mostra a Figura 24. Para testar estas melhorias, o desempenho dos varões híbridos desenvolvidas anteriormente em [28], foram comparadas com os varões híbridos contendo nanopartículas de carbono no núcleo e GFRP na camada exterior. [31]

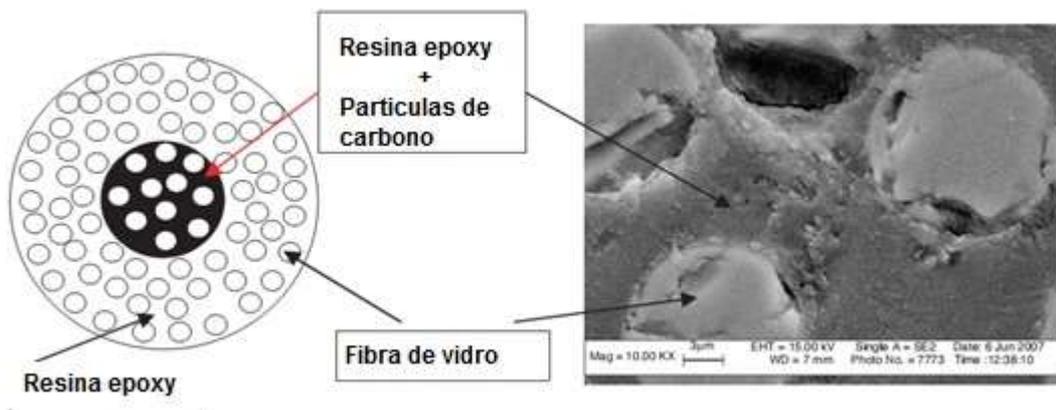


Figura 24- Corte transversal dos varões CNP-PRFV (esquerda) e imagens SEM [31].

Observou-se que amostras de núcleo CNP apresentaram medidas mais sensíveis em monitorização contínua dos varões de FC híbridos. Isto deveu-se à separação progressiva de partículas de carvão resultantes da aplicação de força, o que leva a uma maior sensibilidade, tal como descrito na Figura 25. Ao contrário dos varões de CnP-GFRP, a resistência elétrica no caso dos varões CF-GFRP aumentou significativamente quando ocorreu a súbita fratura da fibra causando interrupções no fluxo de corrente [32].

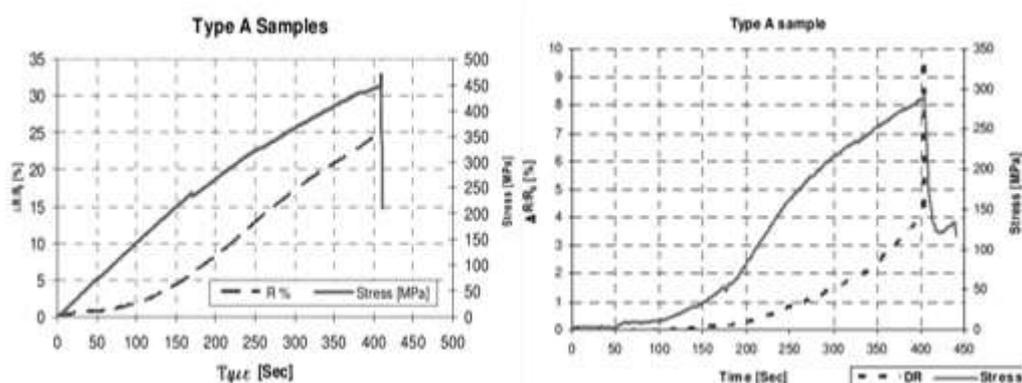


Figura 25- curva tensão / tempo e curva $\Delta R/R_0\%$ / tempo para varão CF-GFRP (à esquerda) e CNP-GFRP (direita), [32]

Após este trabalho de pesquisa inicial, os mesmos varões CnP-GFRP foram aplicados e ensaiados em vigas de betão, Figura 26, [32].

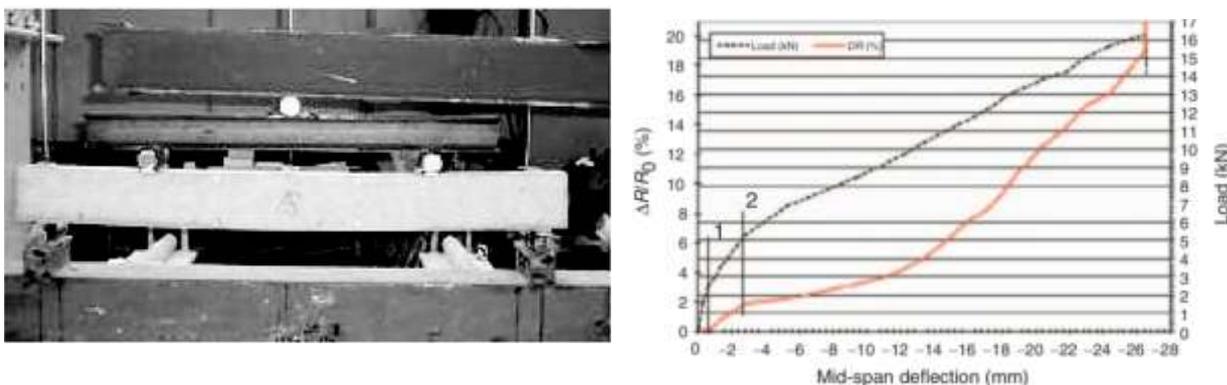


Figura 26- vigas sob flexão (esquerda), e curva de flexão com $\Delta R/R_0\%$ [32].

De acordo com este estudo efetuado, os varões CNP-GFRP apresentaram variação significativa de resistência elétrica quando estavam sujeitos a um carregamento no ensaio de flexão. Desta forma foi alcançada a monitorização, e a sensibilidade era tão alta que o sistema era ainda adequado para monitorizar a cura do betão, onde a variação da resistência elétrica negativa foi notada [32].

Um outro teste foi feito comparativo em vigas de betão com secção transversal de 50 por 100 mm, e um comprimento de 1,2 m de comprimento. Quatro vigas foram testadas em quatro pontos de flexão, três reforçados com DH-FRP e um com aço. Os resultados mostraram que o comportamento foi excelente de todos os três DH-FRP tinha uma curva de carga-deflexão bilinear bem definida até ao ponto de escoamento, após o ponto de cedência da capacidade de carga contínua a aumentar até atingir a sua resistência final, a figura 27 e 28. A carga / descarga ciclos aplicados em cada viga também mostraram a capacidade de absorção de energia e a reprodutibilidade do comportamento dúctil, de modo que a deformação permanente verificada poderia funcionar como um sinal de alerta para a estrutura.

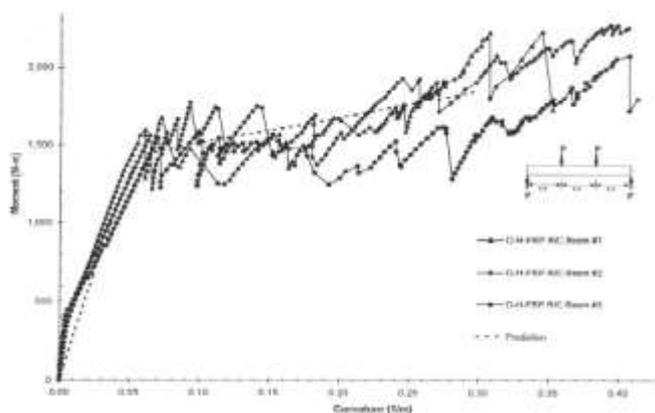


Figura 27- Comparação do momento vs curvatura das vigas de aço e DH-FRP [32]

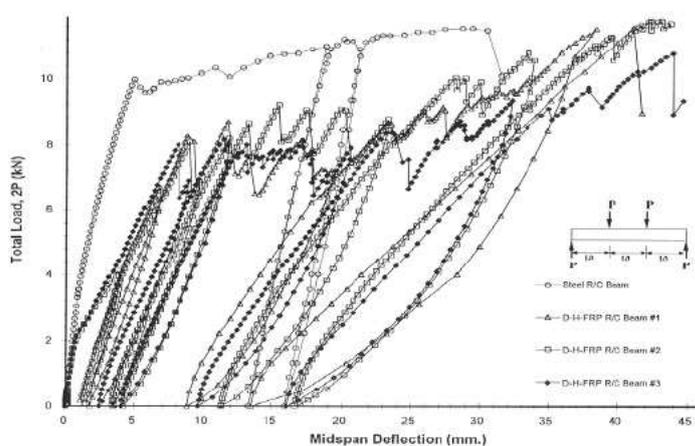


Figura 28- Comparação do comportamento carga-flexão das vigas de aço e DH-FRP [32]

O desempenho em situações sismo também foi medida em pequenas vigas que representavam porções de estrutura rígida, estas foram carregadas com o aumento da carga horizontal cíclico, que simula o efeito de um sismo.

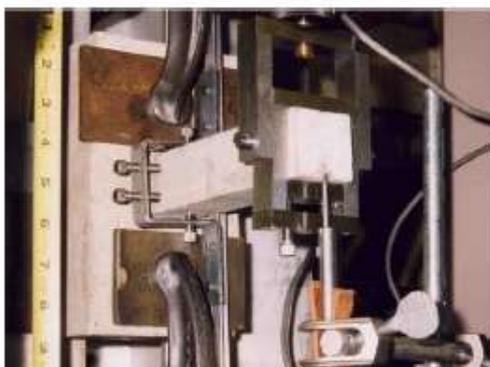


Figura 29- Configuração de teste de carga cíclica [35,36]

O comportamento medido demonstrou a energia considerável absorvendo recursos da DH-FRP [36], como apresentado na Figura 30. Este tipo de comportamento de absorção de energia elástica durante eventos sísmicos é crítica de modo a que a estrutura sobreviva a sismos e não é típico para materiais FRP [36].

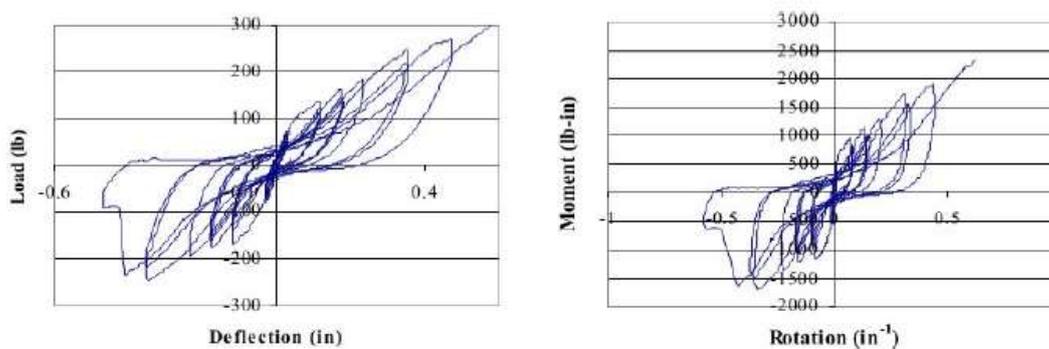


Figura 30- A curva de carga-deflexão (à esquerda) e momento-rotação (à direita) para feixe exemplar desenvolveu sobre cargas cíclicas [36]

CAPÍTULO III

3. Trabalho Experimental

3.1. Produção de varões entrançados em material compósito (BCR) com capacidade de monitorização

3.2. Processo de produção de BCRs

O grupo de investigação Fibrenamics da Universidade do Minho desenvolveu o processo existente para a produção dos varões entrançados em material compósito. A técnica de entrançamento tem um baixo custo de produção e com uma panóplia de vantagens, tais como: permite a orientação multiaxial das fibras no plano, o reforço do seu núcleo confere a resistência em tração, a estrutura nervurada possibilita a aderência ao betão e uma variedade de propriedades mecânicas podem ser melhoradas quando os núcleos das estruturas entrançadas são reforçados com diferentes tipos de fibra [7].

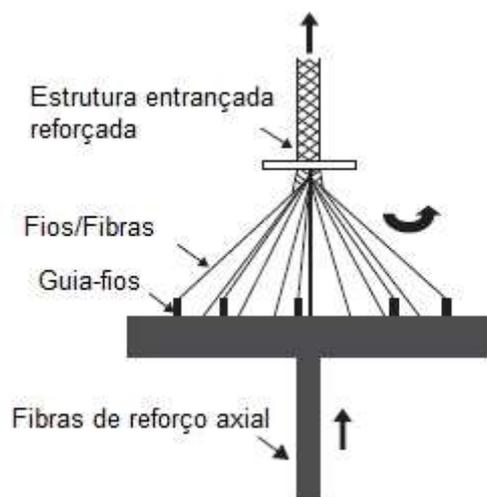


Figura 31-- Processo de produção de varão entrançado compósito [7]

O mecanismo de funcionamento do aparelho de entrançamento consiste no entrelaçamento de dois sistemas de fios em direções helicoidais, seguido por um mecanismo que desloca continuamente a uma velocidade constante, produzindo uma estrutura entrançada.

A produção tem começo no sistema da colocação ou alimentação das fibras, quando as fibras são desenroladas das bobines e colocadas nos diversos olhais cerâmicos, até passarem num

sistema de barras metálicas corretamente distanciadas entre si, vertical e horizontalmente, para que as fibras permaneçam tensionadas durante o processo de produção.

Na etapa em que as fibras são impregnadas na resina que se encontra no balseiro, estas encontram-se prontas para incorporar o núcleo do varão na zona seguinte a etapa de entrançamento. No percurso ocorrido da etapa de entrançamento até à câmara de cura, a resina encontra-se em estado líquido, juntando-se na parte inferior do varão, ao ponto de escorrer, deste modo existem zonas díspares de resina no varão. A solução que se encontrou para esta questão, foi passar a mão num movimento de vai-e-vem, na extensão entre a zona de entrançamento e a câmara, para uniformizar a distribuição de resina no varão.

Em seguida o varão entra na câmara de cura a uma temperatura constante saindo desta o varão curado sendo puxado pelo sistema de tiragem até obter os metros necessários.

Este processo produtivo é constituído por cinco etapas: sistema da colocação das fibras, impregnação das fibras na resina, mecanismo de entrançamento, processo de cura e processo de tiragem descritos abaixo.

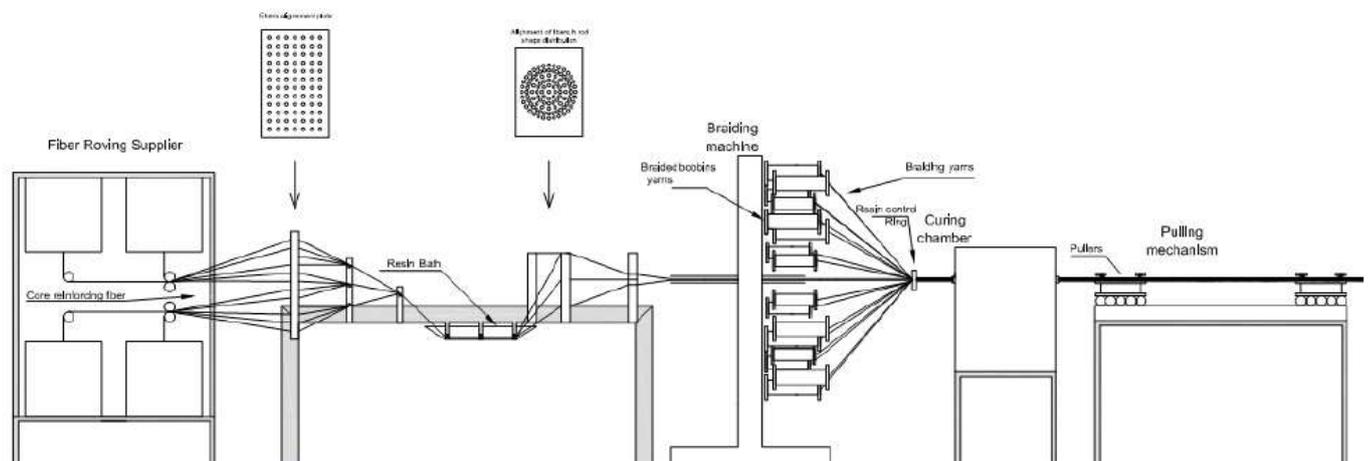


Figura 32- Processo de produção



Figura 33- Processo de produção de BCRs

3.2.1. Sistema de colocação das fibras

O modo como se manuseia as fibras requer uma atenção especial, por ser um material com enorme fragilidade, e apresentar uma grande relevância no comportamento mecânico do material. Um roving é constituído por um conjunto de filamentos contínuos de fibras, sem torção, e devem ser conservados nesse estado até ao seu processamento, para deste modo não se verificar a separação dos filamentos. Posto isto, é essencial que todas as superfícies em contato com as mechas de filamentos estejam corretamente polidas e eximes de quaisquer poeiras ou detritos. Para tal, existe uma estrutura metálica para a armazenagem das fibras e respetiva condução, através da passagem em olhais cerâmicos (Figura 34).

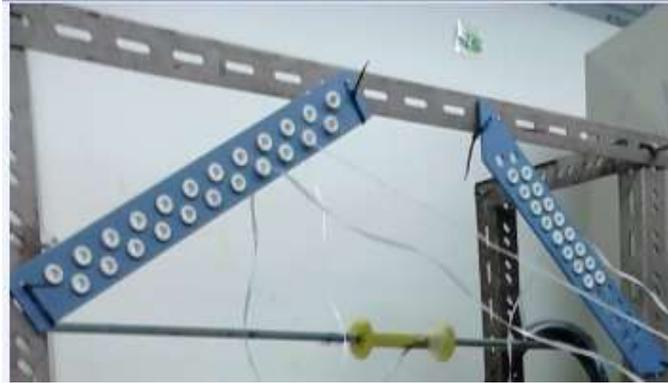


Figura 34- Esquadro com olhais ceramicos para a condução das fibras

Esta estrutura foi criada para suportar as várias formas das fibras. Os rovings são dispostos na parte inferior da estrutura, as bobinas são sustentadas pelas estruturas com o sistema de molas, sendo desta forma possível regular a tensão de saída das fibras.



Figura 35- Sistema da colocação das fibras

3.2.2. Impregnação das fibras na resina

Ao longo deste processo as fibras que estão dispostas em “rovings”, na parte de trás do equipamento, como mencionado no ponto anterior (3.2.1), são introduzidas axialmente no entrançado. Este sistema de impregnação das fibras foi concebido para que estas sejam

uniformemente impregnadas, utilizando-se ainda várias placas para o alinhamento das fibras, em que a primeira é a placa de guiamento e alinhamento dos “rovings” até ao recipiente do banho da resina e a segunda placa é responsável por alinhar cada tipo de fibra para a sua posição no núcleo do varão (Figura 36). Antes da preparação da resina foi necessário aplicar um desmoldante em todas as superfícies de contacto com esta, pois a resina adere a qualquer tipo de superfície após a cura, de forma a garantir a sua eliminação sem qualquer tipo de dificuldade no final do processo de produção.

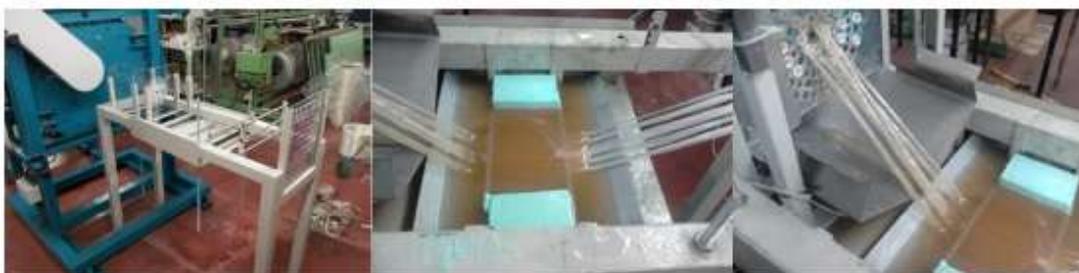


Figura 36- Impregnação das fibras pela resina

3.2.3. Mecanismo de entrançamento

O princípio básico do entrançamento consiste no entrelaçamento de, pelo menos, dois sistemas de fios adquirindo-se assim uma estrutura entrançada tubular. A entrançadeira é constituída por 40 bobines de fio de poliéster que confere o entrançado exterior do varão, da marca Trenz-Export modelo 40/100. Após a colocação das bobines, enfiam-se os fios nos fusos onde depois serão puxados até à zona onde sucede o entrançamento. O núcleo de fibras que chega da fase anterior é coberto pelo entrançado exterior de poliéster gerado pela movimentação circular dos fusos com bobines. Nesta fase obtém-se um excedente de resina, provocado pela força de compressão dos fios de poliéster sobre o núcleo. O excesso de resina é recolhido numa chapa de alumínio que se encontra na zona inferior da entrançadeira e aparafusada a câmara de cura para reaproveitamento no balseiro. Este mecanismo de entrançamento possui também um controlador de velocidade.



Figura 37- controlador de velocidade



Figura 38- Mecanismo da entrançadeira



Figura 39- Chapa para reaproveitamento de resina

3.2.4. Processo de cura

A câmara de cura tem como objetivo principal promover a cura da resina através do calor devendo atingir uma temperatura que ronda os 150 °C, para não danificar a camada exterior do entrançado.

Esta é constituída por um painel tipo sanduiche composto por duas chapas perfiladas contendo lã de rocha no seu interior, com 7,5 cm de espessura. Como fonte de calor tem dois radiadores domésticos infravermelhos Equation com 1200 W e termóstato.

Para o controle da temperatura no interior da câmara, possui um equipamento com função on/off, o qual permite regular a temperatura através de uma sonda no seu interior.

A câmara de cura tem dimensões de 1×0,50×0,50 metros, com dois orifícios nas paredes laterais, com 5 centímetros de diâmetro, para a entrada e saída do varão. Para a união destas várias peças foram colocadas perfis metálicos galvanizados de 25×25 mm aparafusados.



Figura 40- Câmara de cura

3.2.5. Processo de tiragem

O processo de tiragem é o último procedimento deste sistema produtivo de materiais compósitos contínuos, em que há a existência de um componente que desloca o material através de maxilas que funcionam de forma pneumática, o que garante um deslocamento contínuo do material a uma velocidade constante (7,4 rad/s). Este sistema de tiragem situa-se a jusante da câmara de cura, desta forma, aquando a passagem do varão nas roldanas dentadas, este encontra-se totalmente curado, não danificando assim a superfície exterior do mesmo.

Para um correto funcionamento do sistema de tiragem requer a utilização de uma corda que se encontra ancorada ao sistema. Numa fase inicial do método produtivo a corda está esticada desde o equipamento de produção até ao sistema de tiragem.



Figura 41- Mecanismo de tiragem

3.3. Planeamento da produção

O método de produção inicia-se com o planeamento da produção, determinando-se a quantidade de fibras e da resina a utilizar para a fabrico dos varões.

3.3.1. Materiais utilizados na produção dos varões entrançados

Os varões em material compósito são compostos por uma estrutura entrançada no exterior produzida com fio de poliéster (foram escolhidas as fibras de poliéster, devido à sua facilidade de aplicação no processo produtivo, custo baixo e pela facilidade de as obter) reforçada com fibras de vidro-E e carbono com características mencionadas nos Quadros 5 e 6. A matriz polimérica é uma resina epoxy. A preparação desta resina consistiu na utilização de 300 g de resina Berisin CR 141 com a adição d 270 g de um endurecedor Berisin CH141e 15 g de um acelerador Berisin Ca141, a quantidade de resina preparada nunca foi excedente à capacidade do bolseiro. Como as fibras utilizadas na produção de cada varão ocupam um pequeno espaço do bolseiro, e para não ocorrer desperdício de resina, foram colocados pedaços de poliestireno extrudido para limitar o volume.



Figura 42- Balseiro com limitadores de espaço (XPS)

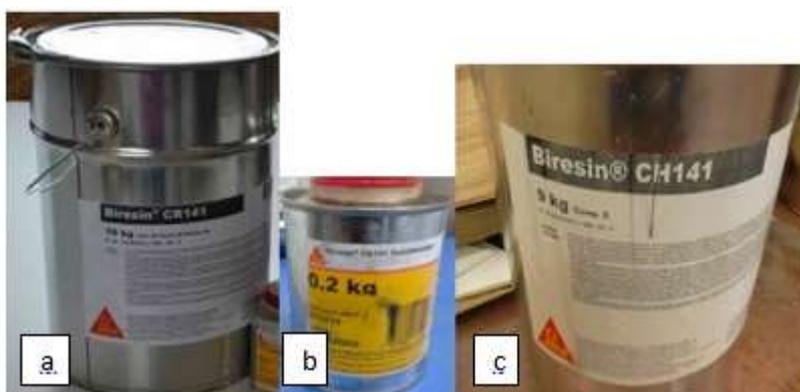


Figura 43- a)Resina, b)acelerador e c) endurecedor utilizados na produção dos varões

Quadro 5- Caraterisiticas das fibras de vidro

Características das fibras de vidro	Valor
Tex (g/Km)	9600 e 540
Massa volúmica (gr/cm ³)	2,54
Módulo de elasticidade (GPa)	72

Quadro 6- Caraterisiticas das fibras de carbono

Características das fibras d carbono	Valor
Tex (g/Km)	1600
Massa volúmica (gr/cm ³)	1,77
Módulo de elasticidade (GPa)	240

Nesta sequência de produção apresentam-se quatro tipos de varões entrançados compósitos com geometria e densidade linear constantes variando apenas o tipo de fibras usadas no reforço axial da estrutura entrançada, em concordância com o Quadro 7.

Os varões entrançados foram reforçados axialmente com um único tipo de fibra (fibra de vidro), e com dois tipos de fibras (fibra de vidro e carbono), em diversas combinações, tendo o propósito de avaliar a efeito piezoresistivo dos varões compósitos entrançados produzidos. A escolha para estas percentagens de fibras deveu-se a conclusões de trabalhos anteriores realizados, quanto menor a percentagem de fibra de carbono melhor a capacidade de monitorização dos BCR.

O diâmetro final do varão é a soma do núcleo com a camada exterior entrançada, no entanto não é possível quantificar o volume e a área ocupada pelo fio poliéster, usado na produção da camada exterior do entrançado. O tipo de resina, a fibra utilizada na estrutura entrançada e os parâmetros de entrançamento, foram constantes em todos os varões.

Quadro 7- Composição dos varões entrançados compósitos

Varão	Fibra de reforço		V resina (%)	\varnothing_{BCR} (mm)
	Vidro E (%)	Carbono (%)		
BCR1	100	0	50,0	6,4
BCR2	95	5	50,0	6,15
BCR3	90	10	50,0	6
BCR4	85	15	50,0	6



Figura 44- Varões entrançados em material compósito produzidos.

CAPÍTULO IV

4. Determinação das propriedades mecânicas e piezoelétricas dos BCR

De modo a avaliar o desempenho mecânico e piezoelétrico, através de monitorização dos varões entrançados compósitos, foram realizados ensaios de flexão.

O diâmetro dos varões entrançados em material compósito (Quadro 7) têm uma variação que se deve ao tipo de fibras utilizadas na constituição de reforço axial e também devido à resina presente.

4.1. Ensaio à flexão

O ensaio de flexão consiste num carregamento transversal sobre o corpo apoiado pontualmente (dois ou mais pontos).

O ensaio mais simples de flexão é designado por ensaio de flexão em três pontos e consiste em apoiar o material a testar em dois pontos e carrega-lo no seu ponto médio. O provete de ensaio é fletido até à rotura ou até a uma deformação de um valor imposto.

Para a avaliação da monitorização o ensaio é realizado com base na medição da resistência elétrica durante a aplicação simultânea de uma força no ensaio de flexão de três pontos.

Estes testes foram realizados no departamento de física têxtil da Universidade do Minho.

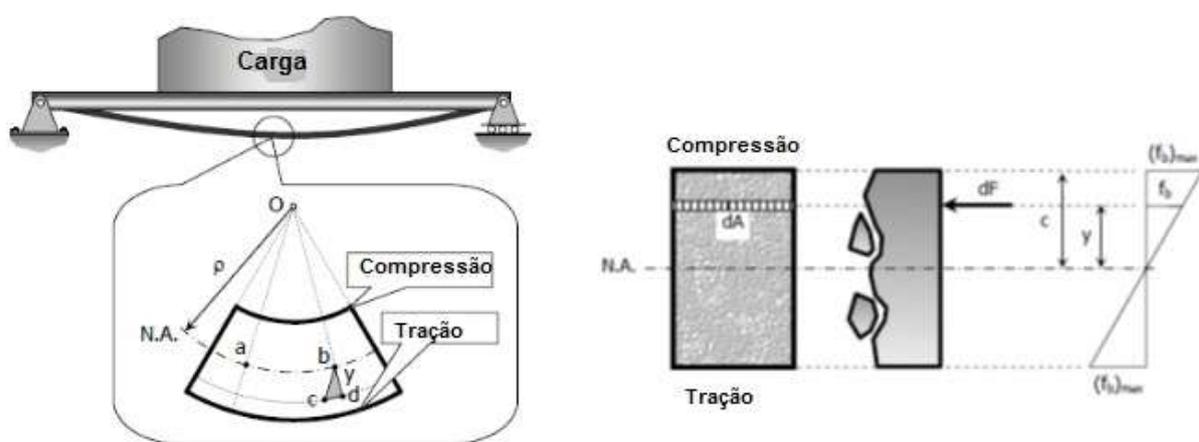


Figura 45- Ensaio de flexão três pontos
[36]

Este ensaio de flexão de três pontos foi realizado de acordo com a norma ASTM D 790 “ Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials “, no equipamento dinamómetro (Hounsfield). A medição da variação da resistência elétrica foi feita através de um multímetro (Agilent, 34461 A).

4.1.1. Preparação dos varões compósitos para ensaio

A principal razão para se obter uma variação da resistência elétrica é o contacto entre a secção transversal do varão e as pinças do dispositivo de medição de resistência elétrica (multímetro). Para ultrapassar este problema de instabilidade, as secções transversais de cada varão foram pintadas com tinta de prata e a esta foi ligado um fio de cobre escarnado, tendo-se de seguida colocado uma manga termo retráctil para fixar o fio na secção pintada.

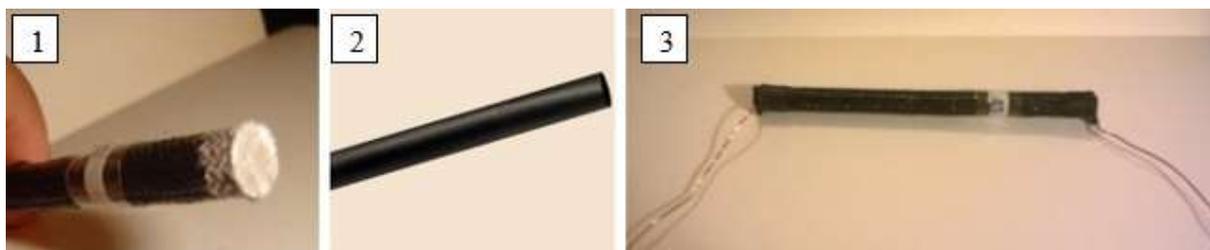


Figura 46- Detalhe da tinta de prata na secção transversal do varão (1);manta termoretractil (2); varão pronto para ensaio com tinta de prata, fio de cobre e manta termoretractil (3).

4.1.2. Procedimento de ensaio

Por forma a estabelecer uma relação entre o deslocamento e a alteração da resistência elétrica devido à carga aplicada, ambos os equipamentos utilizados foram ativados ao mesmo tempo. Cada valor obtido do deslocamento corresponde a cada valor adquirido da resistência elétrica. Dos equipamentos que foram usados no procedimento deste ensaio (dinamómetro e multímetro), foram retirados dados. Do dinamómetro os dados obtidos foram a força e o deslocamento, do multímetro foram a resistência elétrica e o tempo.

O número de pontos de medição foi cerca de 1500 e cada ensaio ocorreu por cerca de 800 segundos. Os parâmetros de ensaio são apresentados no Quadro 8, para um ensaio cíclico de flexão de três pontos, desenvolvido de acordo com as amostras e requisitos das mesmas.

Quadro 8- Procedimento de ensaio

Parâmetro	Cenário de ensaio
Modo de teste	Cíclico
Nº de ciclos	4
Tipo de teste	Flexão de 3 pontos
Carga	500 (N)
Vão	60 (mm)
Limite de deslocamento	0,5 (mm)
Velocidade	0,3 (mm/mm)
Intervalo	500 (ms)

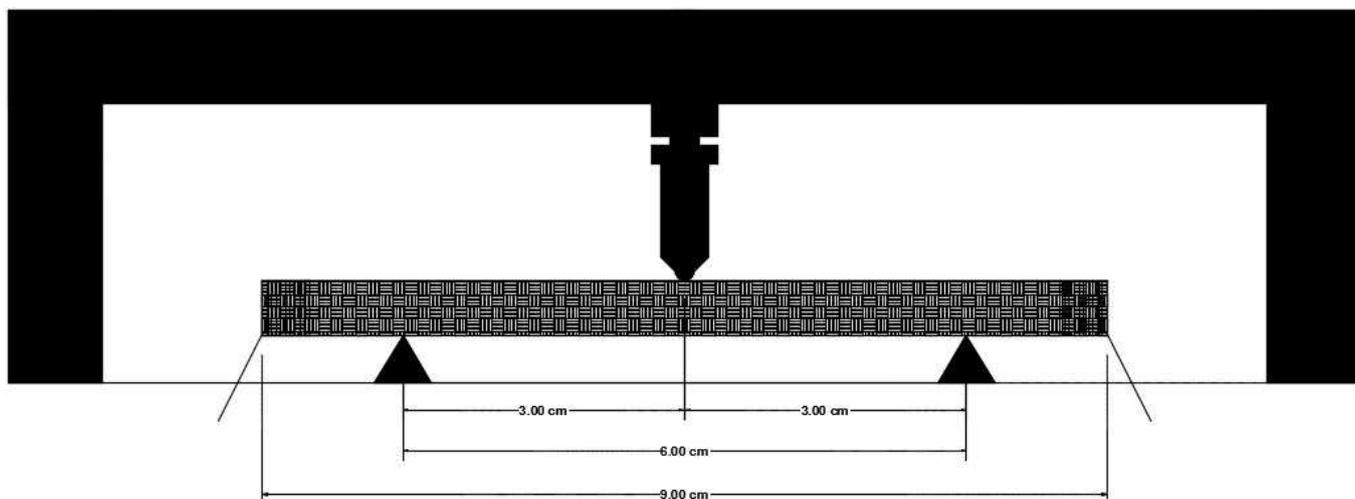


Figura 47-Esquema de ensaio

O ensaio consiste em colocar o varão devidamente preparado como referido no ponto 4.1.1. no dinamómetro simplesmente apoiado com um vão de 60 mm. Em seguida liga-se as pinças do multímetro aos fios de cobre para que possa ser contabilizada a resistência elétrica ao longo do ensaio. Esta leitura é verificada num PC que está ligado ao multímetro com um software Agilent, enquanto o dinamómetro tem um software designado Qmat 3.51 cuja leitura dos dados certifica-se em outro PC de onde se retira os valores da força e deslocamento.



Figura 48-(1) Multimetro (Agilent, 34461 A); (2) PC com Software Agilent

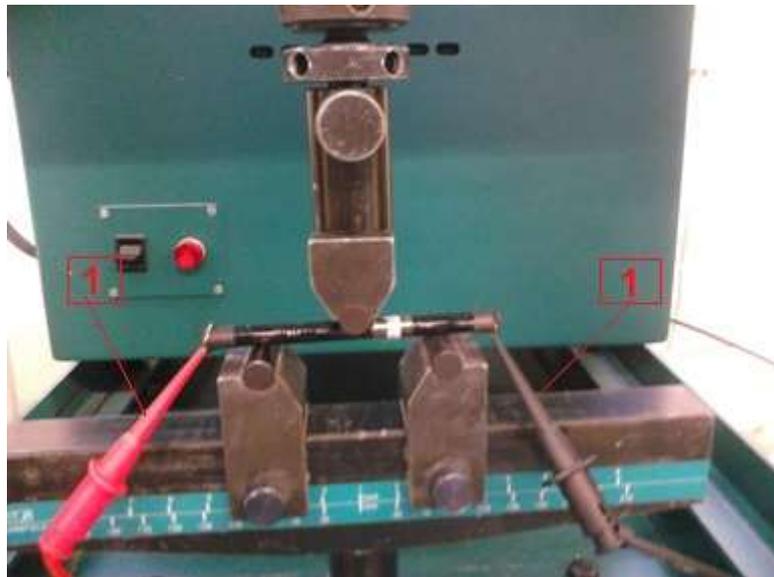


Figura 49- Ensaio de flexão três pontos; [1] pinças do multimetro



Figura 50- Mecanismo de ensaio

4.2. Resultados obtidos

Nos gráficos e tabelas seguintes estão apresentados os resultados obtido nos ensaios de flexão de três pontos das amostras de BCR produzidas. Foram analisadas seis amostras para cada tipo de BCR. Foram analisadas seis amostras para cada tipo de BCR.

À medida que o deslocamento e a força são linearmente proporcionais, o valor da força máxima foi dependendo da amostra testada e foi obtida quando o deslocamento máximo foi atingido. O deslocamento máximo obtido foi de 0,4 mm em cada ciclo, os valores de pico da força e da resistência elétrica foram adquiridos em 100,300,500 e 700 segundos cada.

✓ BCR1 (100% vidro-E; 0% carbono)

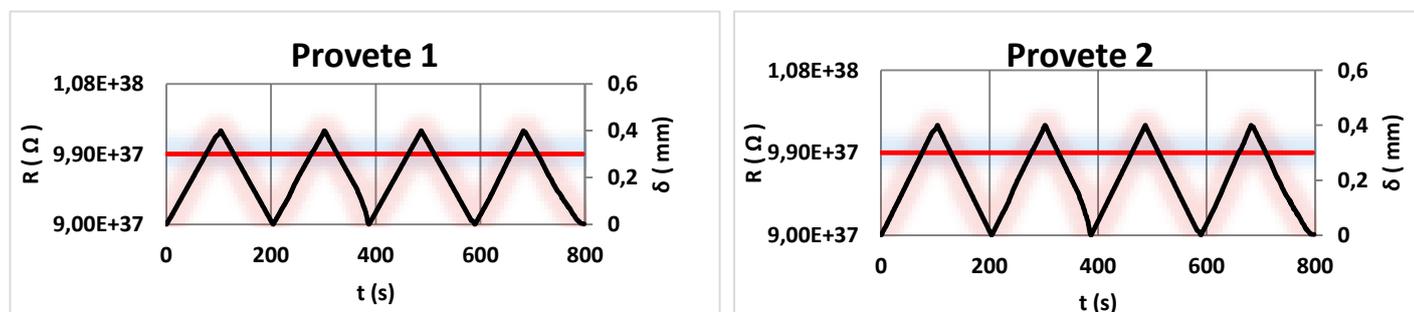


Figura 51- Gráficos da resistividade elétrica (R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s) das amostras de BCR1

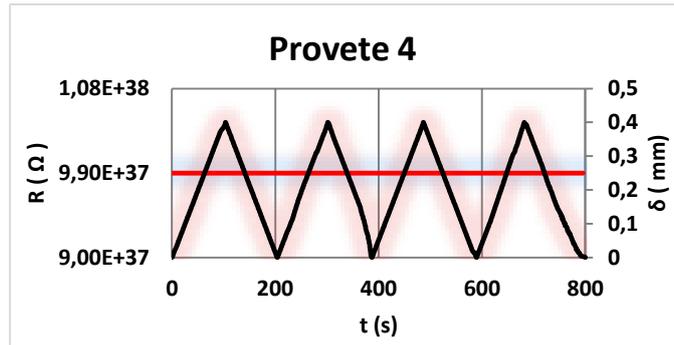
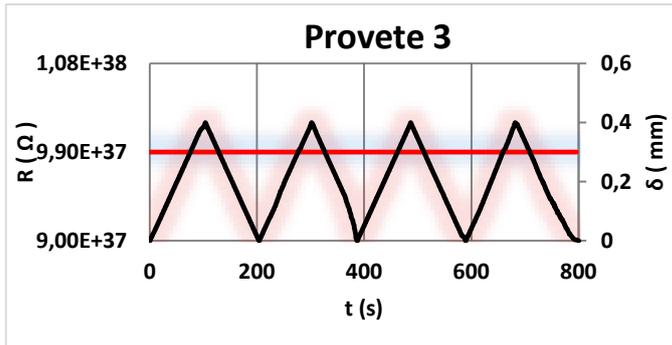


Figura 52- Gráficos da resistividade elétrica (R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s) das amostras de BCR1

✓ BCR2 (95% vidro-E; 5% carbono)

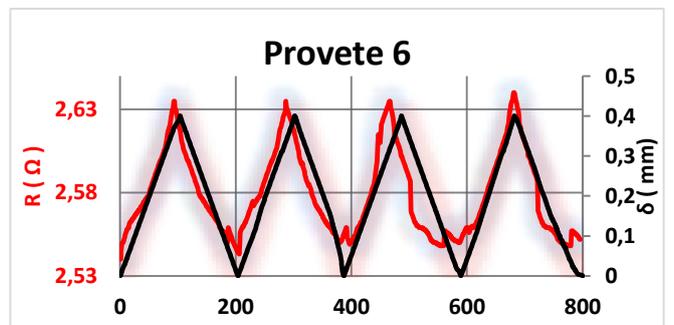
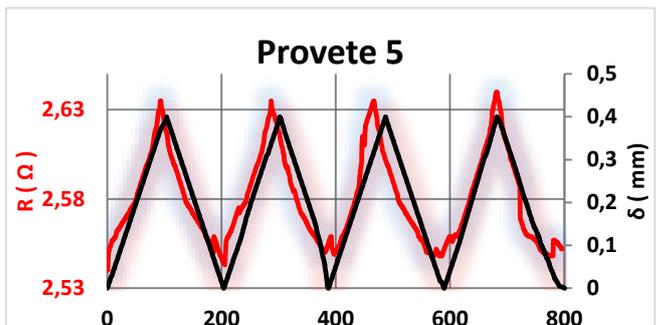
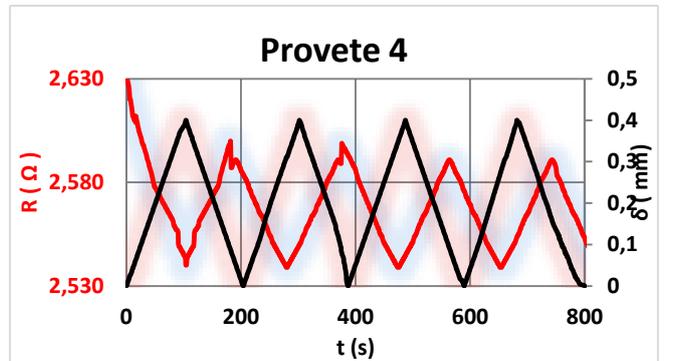
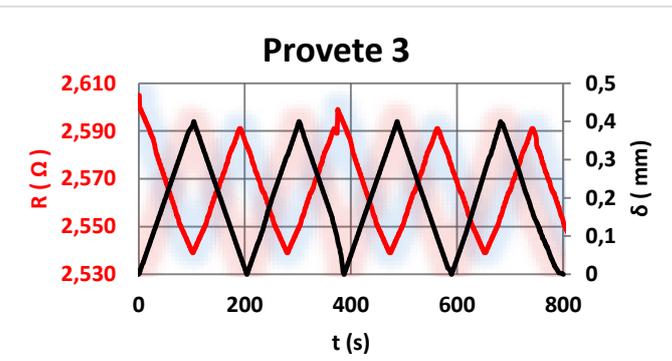
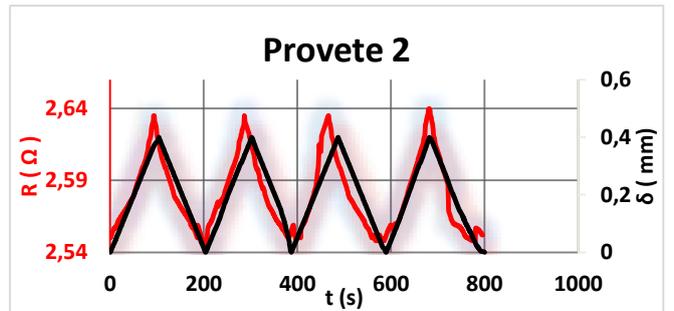
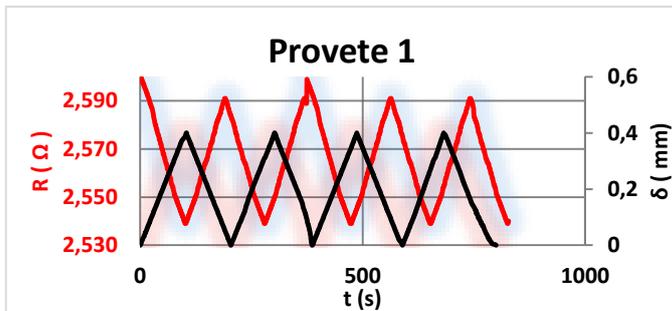


Figura 53- Gráficos da resistividade elétrica (R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s) das amostras de BCR2

✓ BCR3 (90% vidro-E; 10% carbono)

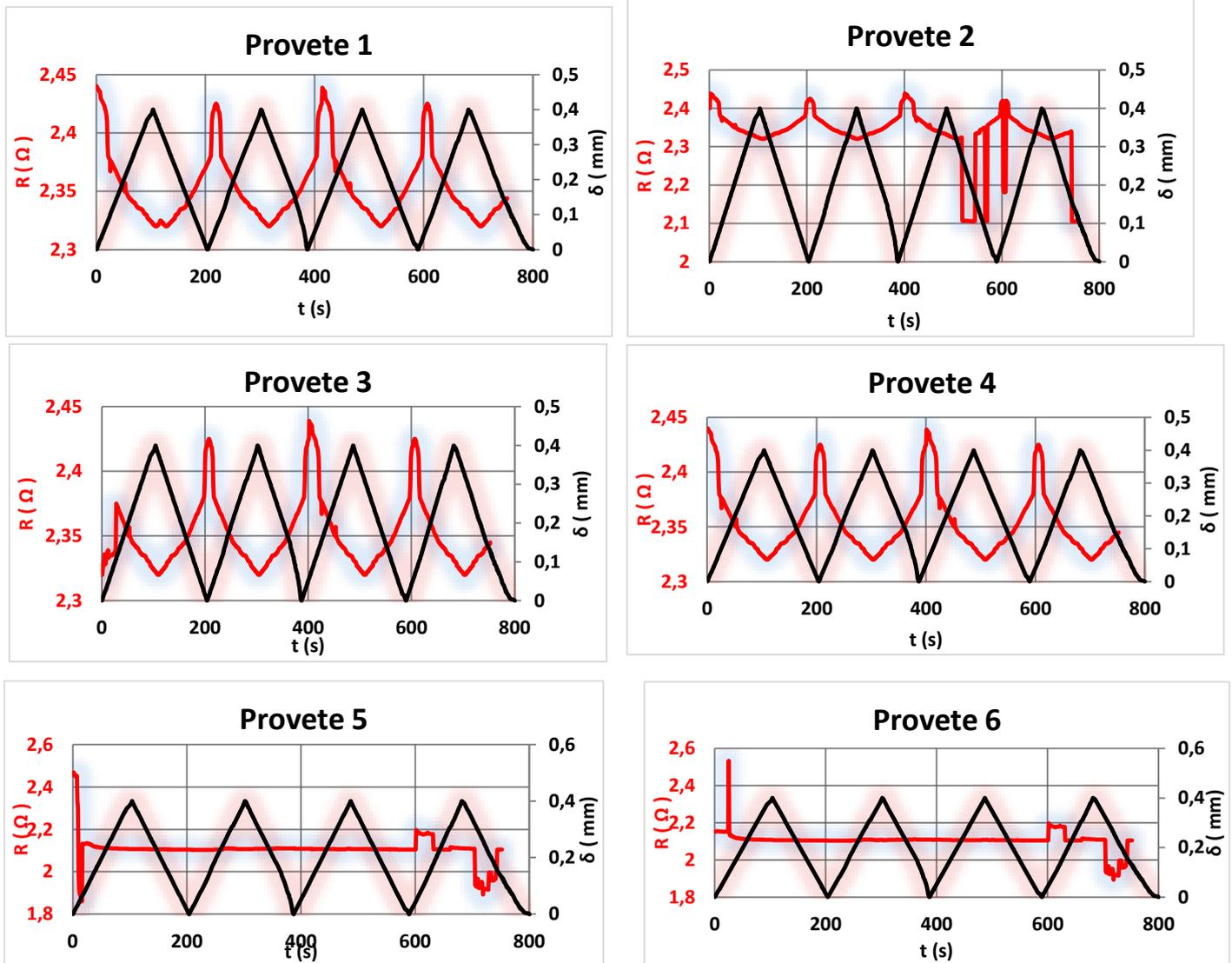


Figura 54- Gráficos da resistividade elétrica($R (\Omega)$) e deslocamento ($\delta (\text{mm})$) em função do tempo (s) das amostras de BCR3

✓ BCR4 (85% vidro-E; 15% carbono)

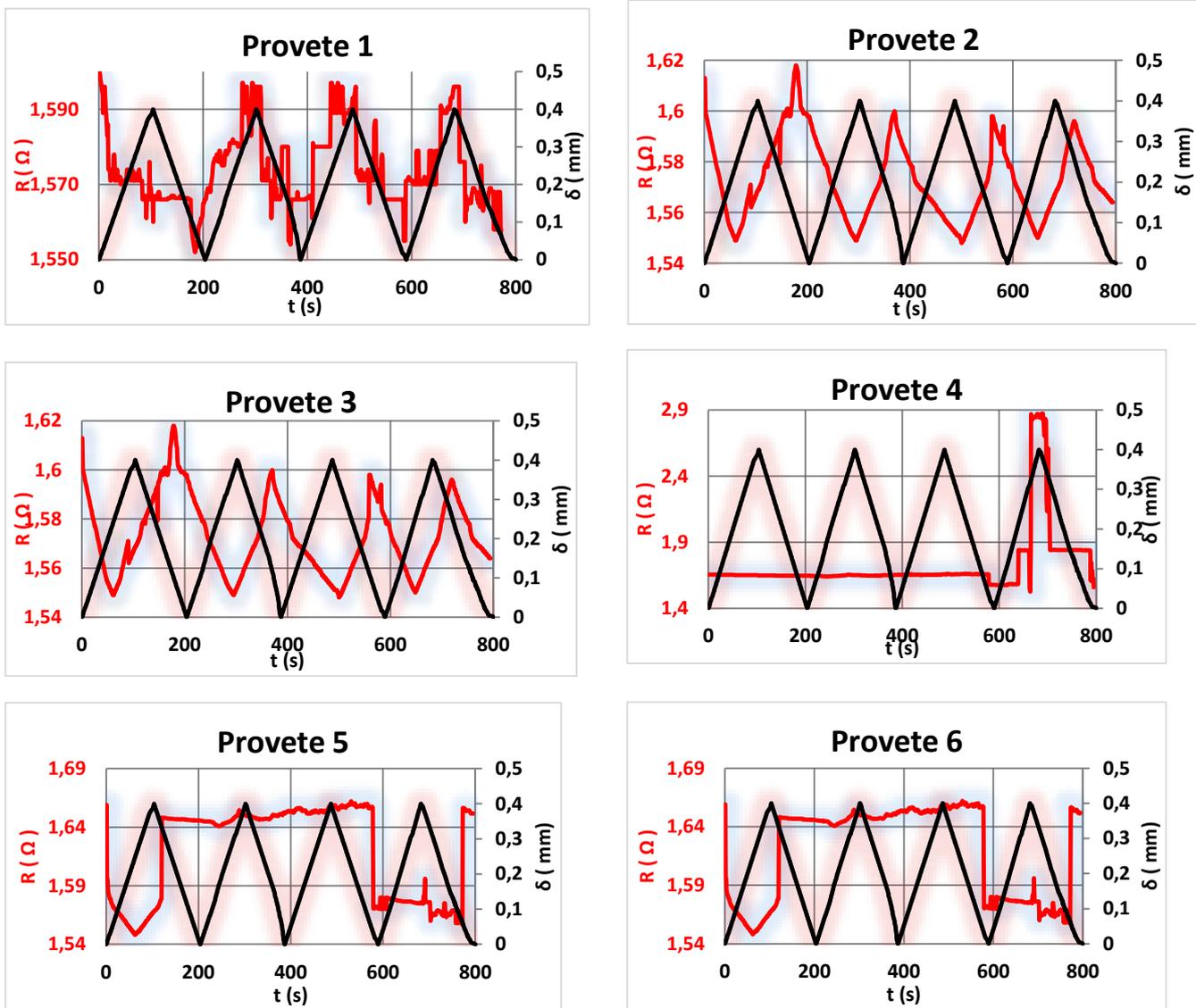


Figura 55- Gráficos da resistividade elétrica (R (Ω)) e deslocamento (δ (mm)) em função do tempo (s) das amostras de BCR4

As tabelas seguintes são referentes ao aumento da resistência elétrica e resistência elétrica inicial em função da deformação aplicada para os quatro ciclos de todas as amostras. Os valores dos GF foram obtidos através de uma regressão linear em cada ciclo (carga). Os valores foram obtidos através das equações apresentadas

$$\Delta R/R_0 = (R_1 \dots R_n - R_0)/R_0 \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = \frac{12 \times \delta \times r}{L^2} \quad (2.5)$$

Em que:

ε - Extensão;

δ -deslocamento, m;

r- raio da secção transversal do varão;

L- comprimento do varão, m.

Quadro 9- Valores do *gauge factor* BCR1

BCR1 (100% fibra de vidro)								
Provete	1		2		3		4	
	GF	R ²						
Nº Ciclo								
1	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND
2	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND
3	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND
4	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND

Quadro 10- Valores do *gauge factor* BCR2

BCR2 (95% vidro; 5% de carbono)												
Provete	1		2		3		4		5		6	
	GF	R ²	GF	R ²	GF	R ²	GF	R ²	GF	R ²	GF	R ²
Nº Ciclo												
1	-3,24	0,993	3,36	0,964	-3,88	0,969	-2,47	0,959	1,99	0,954	3,36	0,972
2	-3,12	0,991	3,61	0,980	-2,87	0,997	-2,87	0,996	3,85	0,990	3,61	0,984
3	-2,98	0,931	4,34	0,955	-4,25	0,984	-2,50	0,983	3,98	0,975	4,34	0,964
4	-3,00	0,978	3,21	0,993	-3,63	0,988	-3,87	0,97	4,21	0,992	3,21	0,994

Quadro 11- Valores do *gauge factor* BCR3

BCR3 (90% vidro; 10% carbono)									
Provete	1		2		3		4		
	GF	R ²							
Nº Ciclo									
1	-2,003	0,8783	-2,361	0,9644	-2,083	0,8621	-2,103	0,8693	
2	-2,136	0,8636	-2,014	0,9602	-2,104	0,8436	-2,054	0,8526	
3	-2,149	0,8337	-2,147	0,9556	-2,119	0,8637	-2,159	0,8537	
4	-2,099	0,8471	-2,231	0,9738	-2,092	0,8382	-2,072	0,8482	

Quadro 12- Valores do *gauge factor* BCR4

BCR4 (85% vidro; 15% carbono)									
Amostra	1		2		3		6		
	GF	R ²							
Nº Ciclo									
1	-0,952	0,5584	-1,462	0,621	-1,352	0,5584	-1,352	0,5584	
2	-1,125	0,5342	-1,25	0,7724	-1,221	0,5342	-1,221	0,5342	
3	-0,982	0,493	-1,441	0,6176	-1,421	0,6176	-1,421	0,6176	
4	-1,295	0,7974	-1,552	0,7928	-1,512	0,7974	-1,512	0,7974	

Quadro 13- Variação da resistência elétrica em função da deformação aplicada para os quatro ciclos do BCR1,BCR2,BCR3,BCR4

	Ciclo	1		2		3		4	
BCR	Provete	$\epsilon (*10^{-2})$	$\Delta R/R_0$						
BCR 1	1,2,3,4	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
BCR 2	1,3,4	0,4	-0,28	0,4	-0,28	0,4	-0,26	0,4	-0,25
	2,5,6	0,39	0,24	0,39	0,25	0,39	0,27	0,39	0,28
BCR 3	1,3,4	0,39	-0,086	0,39	0,085	0,39	0,084	0,39	0,087
	2	0,4	-0,072	0,4	0,074	0,4	0,076	0,4	0,078
BCR 4	1,2,3,6	0,4	-0,086	0,4	0,087	0,4	0,089	0,4	-0,09

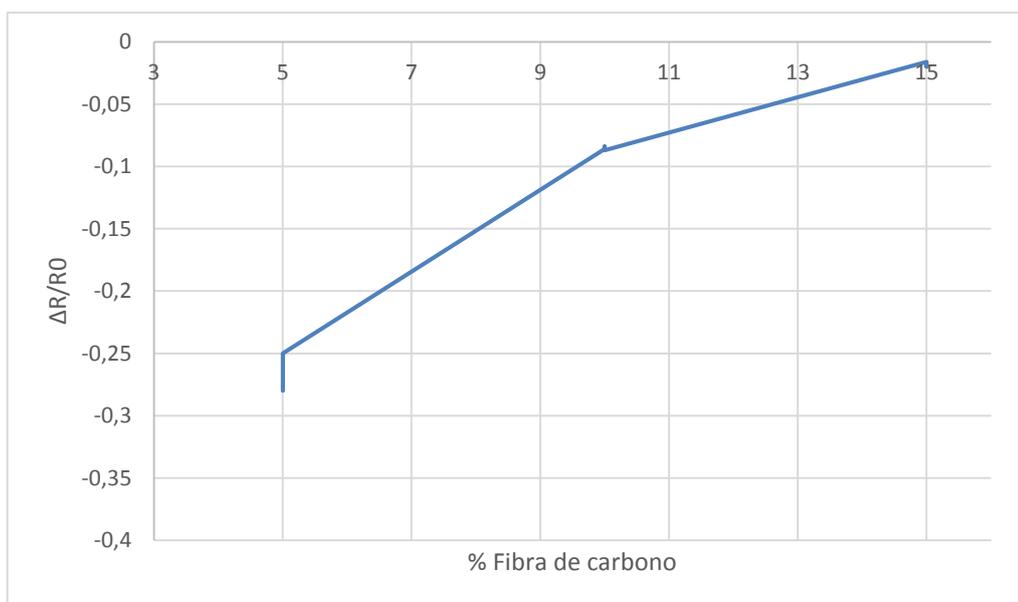


Figura 56- Variação da resistência elétrica em função da percentagem de fibra de carbono aplicada para os quatro ciclos do BCR2(provete 1,3,4) ,BCR3(provete1,3,4),BCR4(1,2,3,6)

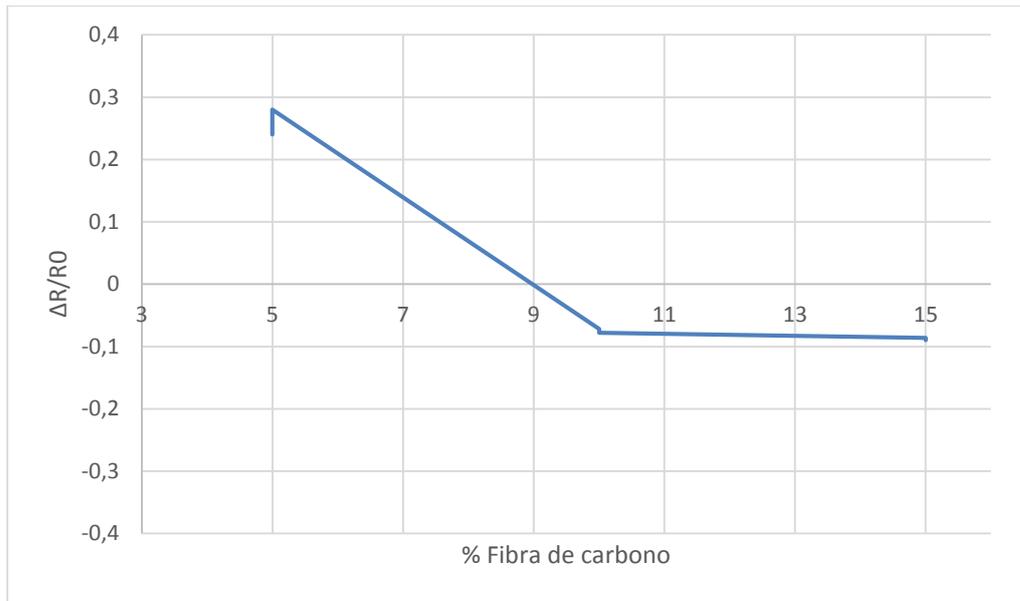


Figura 57- Variação da resistência elétrica em função da percentagem de fibra de carbono aplicada para os quatro ciclos do BCR2(provete 2,5,6) ,BCR3(provete 2),BCR4(1,2,3,6)

4.3. Conclusões

Nesta parte da dissertação foi estudada a capacidade de monitorização de varões em material compósito com fibra de carbono, a partir da sua capacidade piezoresistiva.

As amostras do varão BCR1 (100% fibra de vidro) não demonstram variação de resistência elétrica, como demonstram os gráficos da Figura 51 e o Quadro 9, pois este varão não tem na sua constituição nenhum elemento condutor. Já as amostras dos varões BCR2, BCR3 e BCR4 apresentam variações de resistência elétrica, o que evidenciam que estes varões sofrem alterações na sua resistência quando são deformados, ou seja, tem características piezoresistivas.

O aumento do valor máximo e mínimo da resistência elétrica ao longo dos quatro ciclos de ensaio pressupõe que o varão sofre alterações geométricas na sua estrutura à medida que é deformado. Apesar destas alterações, a variação relativa da resistência mantém-se constante ao longo do ensaio, este fato verifica-se pela proximidade dos valores de GF 's para os quatro ciclos. Os pontos de inflexão das curvas ocorrem com um ligeiro desfasamento no tempo em algumas amostras o que pressupõe que a resposta elétrica das amostras às solicitações mecânicas não é imediata.

A maioria dos provetes deu origem a dois tipos de respostas, positiva ou negativa.

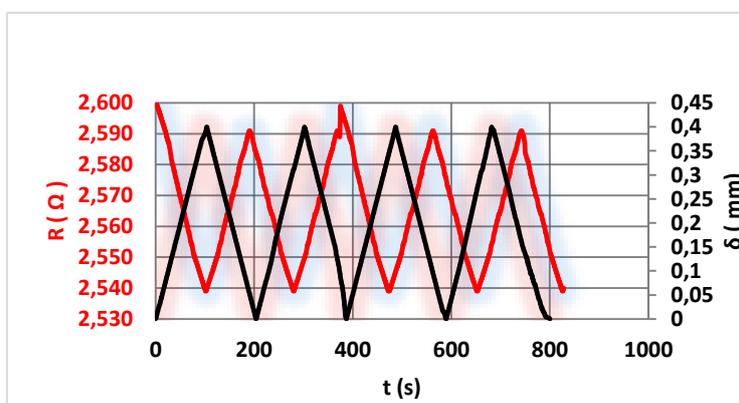


Figura 58- Provete 1 do BCR2

Este provete do BCR2 (Figura 58) apresenta uma resposta negativa, pois neste gráfico observa-se uma diminuição da resistência elétrica quando o varão é sujeito a uma deformação. Já o provete 2 deste BCR2 (Figura 53) demonstra uma resposta positiva, pois a resistência elétrica aumenta quando este sofre uma deformação.

Relativamente aos varões BCR3 e BCR4, os provetes (5 e 6) e (4 e 5) respetivamente, não foram contabilizadas para os resultados pois estas não apresentaram grande sensibilidade durante o ensaio como demonstram os respetivos gráficos.

Os valores dos quadrados das regressões lineares diminuem com o aumento da percentagem de fibra de carbono. O BCR2 apresenta o maior valor médio de regressão linear 0,9776. Por outro lado, da análise dos gráficos e Quadros dos resultados obtidos, os valores de GF's aumentam com a diminuição de percentagem de fibra de carbono, constatando-se que o varão BCR2 tem valores de GF's mais elevados.

Destes ensaios denota-se que a capacidade de monitorização varia com a percentagem de fibras de carbono utilizada no varão, verificou-se que a sensibilidade do varão aumenta com a redução de fibra de carbono.

Da análise da Figura 56 denota-se um aumento da variação da resistência elétrica em função da percentagem de fibra de carbono para os quatro ciclos do BCR2 (1,3,4), BCR3 (1,3,4) e BCR4 (1,2,3,6). No gráfico da figura 57 ocorre uma diminuição da variação da resistência elétrica em função da percentagem de fibra de carbono para os quatro ciclos do BCR2 (2,5,6), BCR3 (2) e BCR4 (1,2,3,6).

Dos quatro tipos de varões produzidos (BCR1,BCR2,BCR3,BCR4) o que melhor resultado apresentou foi o BCR2 (95% vidro;5% carbono).

CAPÍTULO V

5. Argamassa reforçada e monitorizada por BCR`s

5.1. Preparação da argamassa

A preparação das amostras de argamassa contendo BCR decorreu no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade do Minho.

A argamassa é uma mistura homogénea constituída por cimento, areia e água.

Esta mistura de argamassa foi preparada segundo as norma: **196_1_NPEN_1996**

As proporções em massa da composição da argamassa consistiu em uma parte de cimento, duas partes de areia e meia parte de água. A razão água/cimento é, portanto, de 0,50.

Cada molde, que consiste em três amostras de argamassa, foi preparado com metade da massa de argamassa padrão determinada.

Os moldes usados para a preparação destes elementos estruturais têm como dimensões 2,5×2,5×25 (cm).

Foram necessários três moldes para três tipos de amostras: elemento estrutural simples; elemento estrutural com varão de aço A400 NR de ϕ de 6 mm e, por fim, elemento estrutural com varão BCR (95% de fibra de vidro; 5% fibra de carbono) (Figura 59)



Figura 59- moldes com as três amostras preparados para encher com argamassa.

A massa/volume de cada componente de argamassa para os três moldes é a seguinte:

- ✓ 0,3375 Kg/544,80×10⁻⁶ m³ massa de cimento;
- ✓ 0,675 Kg/544,80×10⁻⁶ m³ massa de areia;
- ✓ 0,16875 Kg/544,80×10⁻⁶ m de massa de água.

O cimento, areia e água foram misturados na misturadora padrão de acordo com as especificações da norma **196_1_NPEN_1996**.

A areia foi seca durante várias horas numa estufa. Em seguida a água e o cimento foram vertidos para a tigela da misturadora, a misturadora foi iniciada imediatamente a baixa velocidade de $140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$ com duração de 30 segundos. A areia foi adicionada de forma constante durante os próximos 30 segundos. A mistura foi continuada durante mais 30 segundos a alta velocidade de $285 \pm 10 \text{ min}^{-1}$. Seguidamente a misturadora foi parada durante 1 minuto 30 segundos. Durante os primeiros 15 segundos a argamassa que esta aderira às paredes da tigela foi retirada e colocada na parte do meio da tigela, e a mistura foi continuada a alta velocidade durante 60 segundos.



Figura 60- a) misturadora; b) mistura de argamassa

Antes do processo de moldagem foi aplicado um óleo nos moldes utilizando um pincel, para facilitar a desmoldagem, posteriormente. Em cada uma das duas peças de amostra do molde que contém os varões BCR e de aço, colocou-se uma camada fina de argamassa. Em seguida introduziu-se os varões ao longo do comprimento do molde, sendo que, depois, o molde é cheio

com o resto da massa de argamassa. Para homogeneizar a massa de argamassa no interior do molde, estes são colocados numa mesa vibratória.



Figura 61- Molde com argamassa na mesa vibratória



Figura 62- três moldes dos elementos estruturais finalizados (argamassa,BCR, Aço)

A desmoldagem das amostras ocorreu após 24h. As amostras foram colocadas numa sala com condições padrão, com a temperatura de 22 ° C e humidade de 65%, para o processo de cura.

Os ensaios das amostras foram realizados após 14 dias.

As amostras foram cortadas e testadas com dimensão 2,5×2,5×12 (cm) Figura 63.



Figura 63- a) Elementos estruturais BCR 2; b) Elementos estruturais de Aço; c) Elementos estruturais de argamassa

5.2. Determinação das propriedades mecânicas e piezoelétricas dos varões entrançados aplicados em elementos de argamassa

De modo a avaliar o desempenho mecânico e piezoelétrico através de monitorização dos varões entrançados compósitos e varões de aço aplicados em elementos estruturais de argamassa, foram realizados ensaios de flexão.

5.2.1. Preparação dos elementos de argamassa com varões BCR2

A principal razão para se obter uma variação da resistência elétrica é o contacto entre a secção transversal do varão e as pinças do dispositivo de medição de resistência elétrica (multímetro). Para ultrapassar este problema de instabilidade as secções transversais de cada varão inserido no elemento de argamassa foram pintadas com tinta de prata e a esta foi ligado um fio de cobre escarnado, em seguida colocou-se uma fita isoladora para fixar o fio na secção pintada.

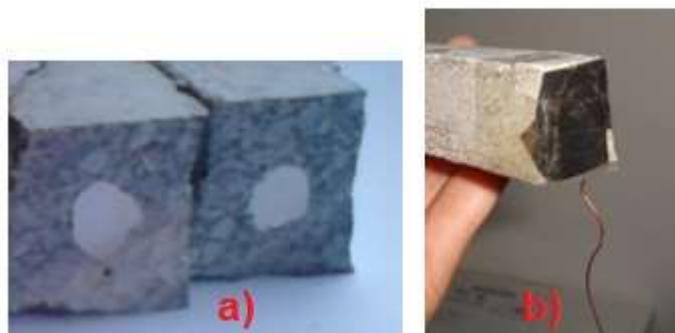


Figura 64- secção transversal do varão pintado com tinta de prata: a); secção transversal do varão com fio de cobre e fita isoladora em toda a secção transversal do elemento de argamassa : b)

5.2.2. Procedimento e equipamento de ensaio

A segunda fase deste estudo consistiu na análise do comportamento dos varões compósitos usados como reforço em elementos de argamassa, em comparação com os elementos estruturais de argamassa e com argamassa com varão de aço, através de um ensaio cíclico de flexão três pontos. Simultaneamente, avaliar a variação da resistência elétrica.

O procedimento de ensaio para os elementos estruturais de argamassa é similar ao utilizado para o ensaio dos varões BCR, modificando-se, no caso das amostras de argamassa, a limitação do ensaio do deslocamento para a força aplicada. A razão para esta limitação é devido à fragilidade da argamassa (ou betão). O deslocamento da amostra de argamassa não pode ser mantida o mais constante em cada ciclo, uma vez que a capacidade de recuperação da argamassa quase nunca é completa, o que significa que, em cada ciclo, o deslocamento foi aumentando. O ensaio foi realizado de acordo com os parâmetros de teste como menciona o Quadro 14.

Quadro 14- Parametros de ensaio de flexão

Parâmetro	Necessário
Nº de ciclos	4
Célula de Carga	10 KN
Limitação da força	2,5 KN
Vão	9 cm
Velocidade	0,3 mm/mm
<u>Velocidade de aproximação</u>	<u>0,3 mm/mm</u>

Com este ensaio de flexão em três pontos, os valores da força aplicada no centro do vão dos elementos de argamassa e o deslocamento resultante foram obtidos. Os dados da resistência elétrica foram obtidos com o multímetro digital.

Este ensaio de flexão em três pontos foi realizado no equipamento LLOYD LR 50K. A medição da variação da resistência elétrica foi feita através de um multímetro (Agilent,34461 A).

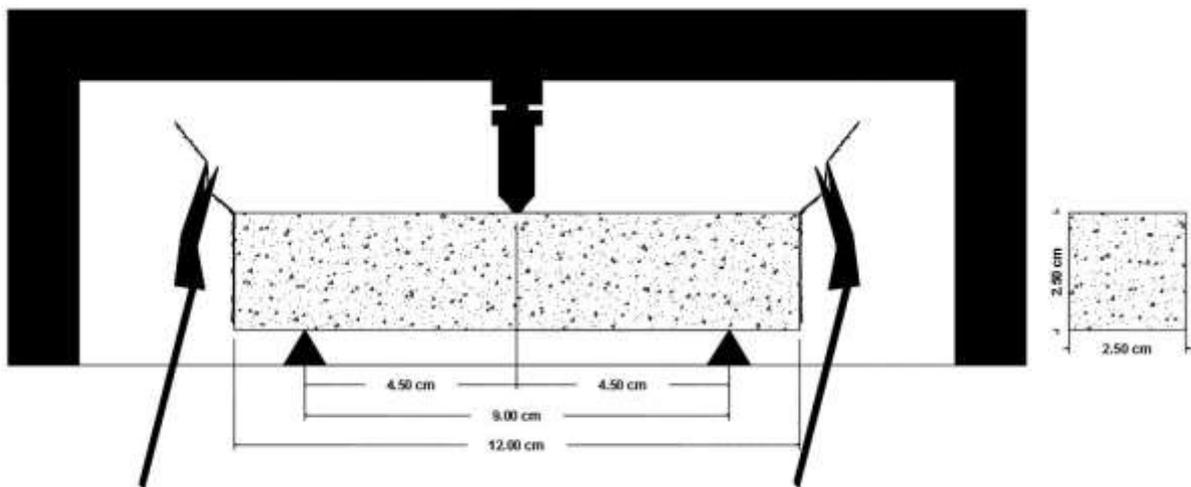


Figura 65-Esquema de ensaio dos elementos de argamassa com varão BCR2

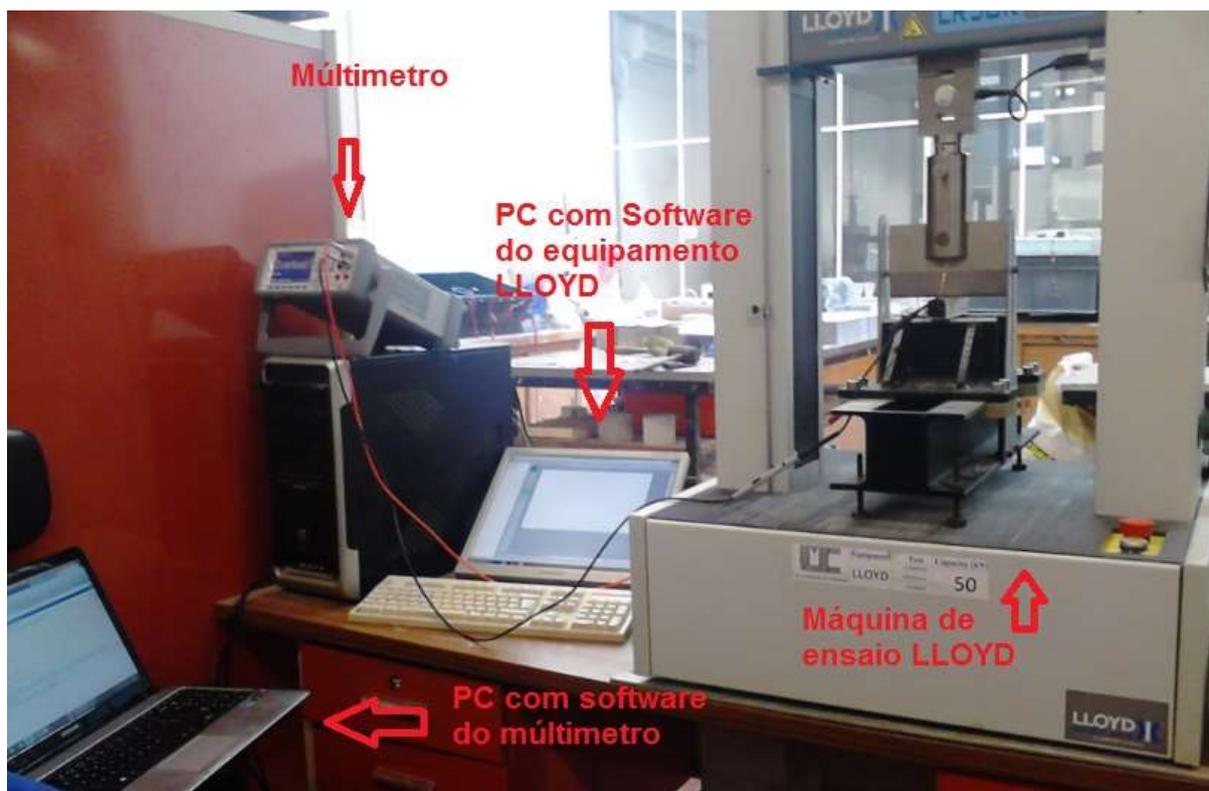


Figura 66- Ensaio de flexão dos elementos de argamassa com BCR2



Figura 67- Pinças do multímetro ligadas aos fios de cobre para medir a resistência elétrica

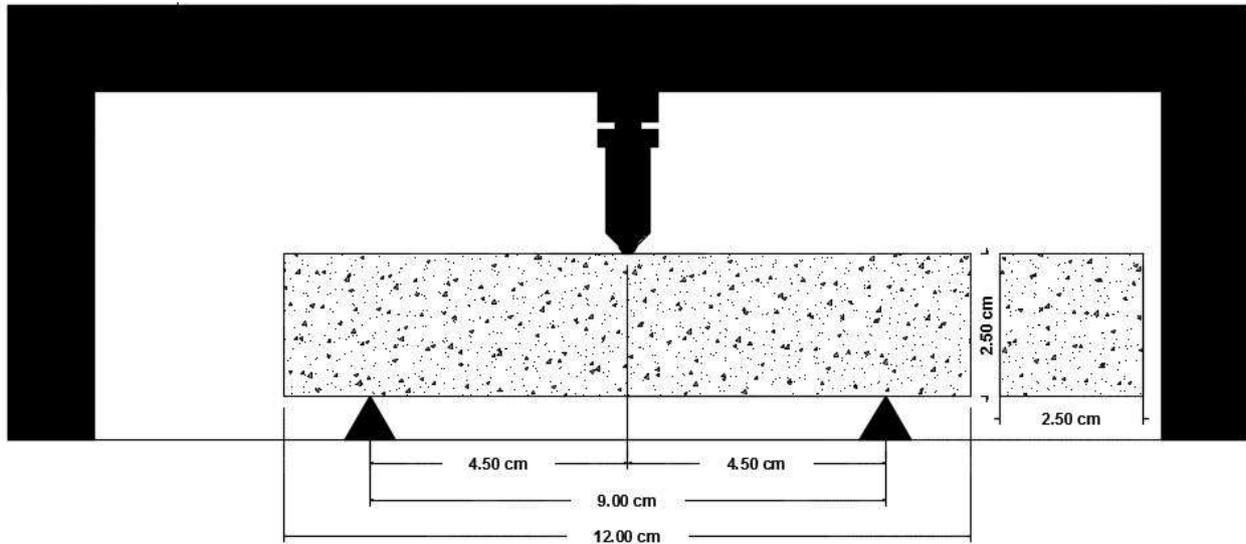


Figura 68- Esquema de ensaio dos elementos de argamassa com varão de aço e elementos de argamassa simples



Figura 69- Ensaio de flexão três pontos do elemento estrutural com varão de aço

5.3. Resultados

Os resultados obtidos para a argamassa reforçada pelo BCR2 apresentam-se no Quadro 15.

Quadro 15- Valores dos resultados mecânicos e eletricos da amostra de argamassa com varão de BCR

Varão BCR2 (95% fibra de vidro,5% fibra de carbono)		
Provete 2	Fmax (N)	2000
	σ_f (Mpa)	19,2
	R0 (Ω)	1,6
Provete 6	Fmax (N)	2100
	σ_f (Mpa)	19,1
	R0 (Ω)	1,61

Quadro 16- Valores da resistencia eléctrica das vigas com BCR2

Provete	Ciclo	1	2	3	4
2	t(s)	275	425	550	650
	δ (mm)	0,038	0,039	0,04	0,041
	R (Ω)	1,583	1,576	1,585	1,589
6	t(s)	275	425	550	650
	δ (mm)	0,038	0,039	0,04	0,041
	R (Ω)	1,584	1,586	1,595	1,589

A limitação do valor da força foi o resultado de vários ensaios de teste, sendo aproximadamente de 2,5kN. A razão para esta escolha foi a deformação elástica das amostras no intervalo determinado de força.

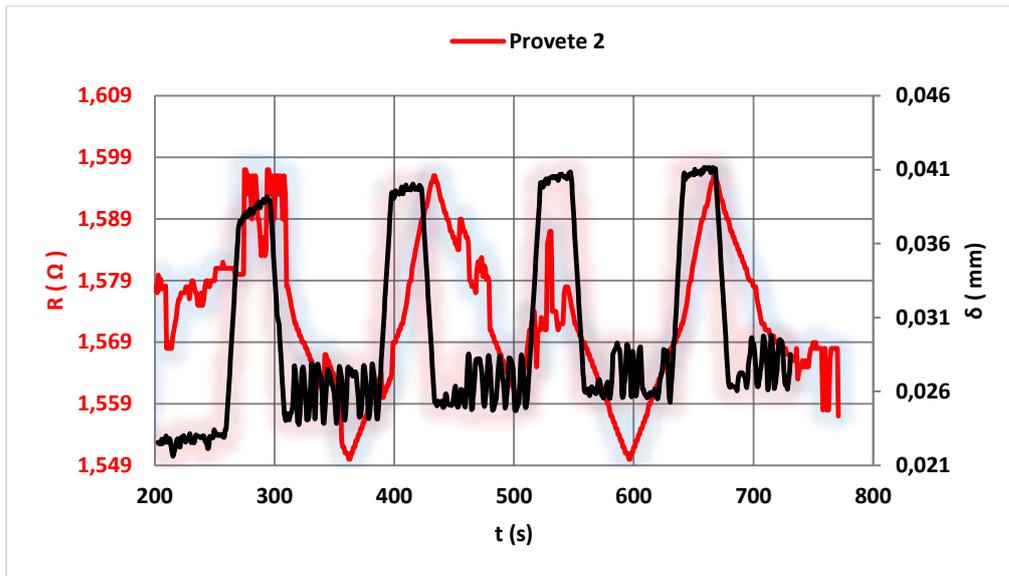


Figura 70- valor da resistencia eletrica e deformação em função do tempo (s) do provete 2 BCR2

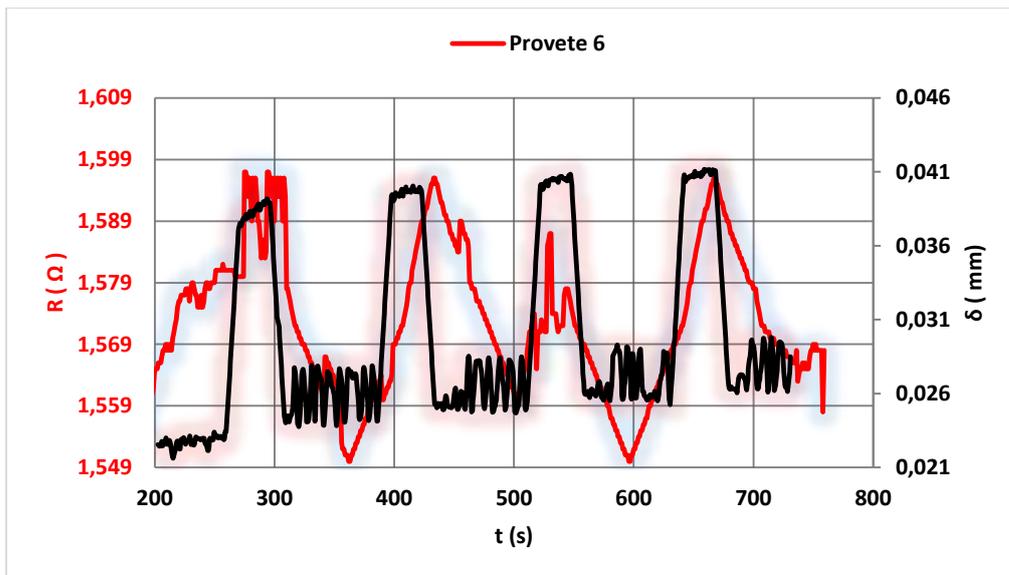


Figura 71- Valor da resistência elétrica e deformação em função do tempo (s) do provete 6 BCR2

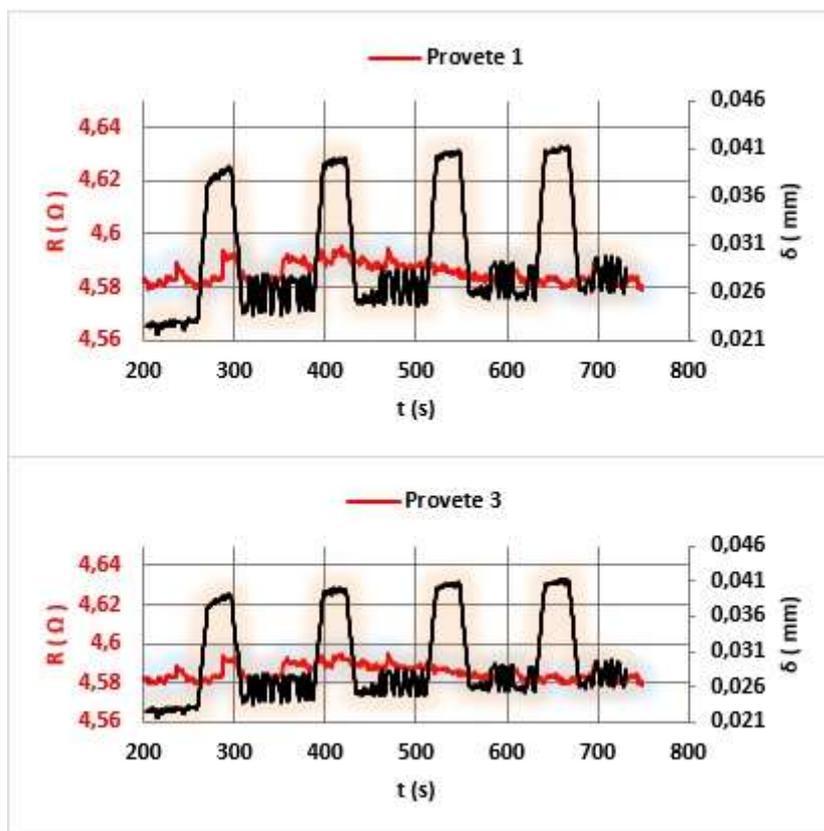


Figura 72- Valor da resistência elétrica e deformação em função do tempo (s) do provete 1 e 3 BCR2

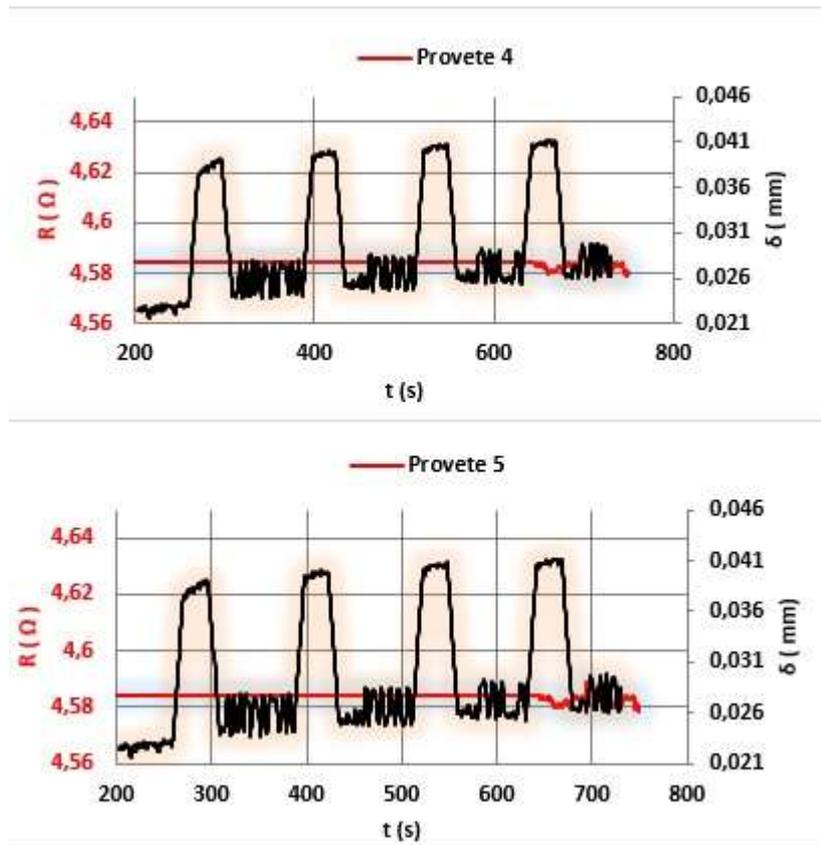


Figura 73- Valor da resistência elétrica e deformação em função do tempo (s) do provete 4 e 5 BCR2

Relativamente aos provetes 1 e 3 (figura 72) e 4 e 5 (figura 73), não foram contabilizados para os resultados uma vez que não apresentam praticamente sensibilidade para uma análise.

Os resultados obtidos para a argamassa reforçada pelo varão de aço apresentados na Figura 74.

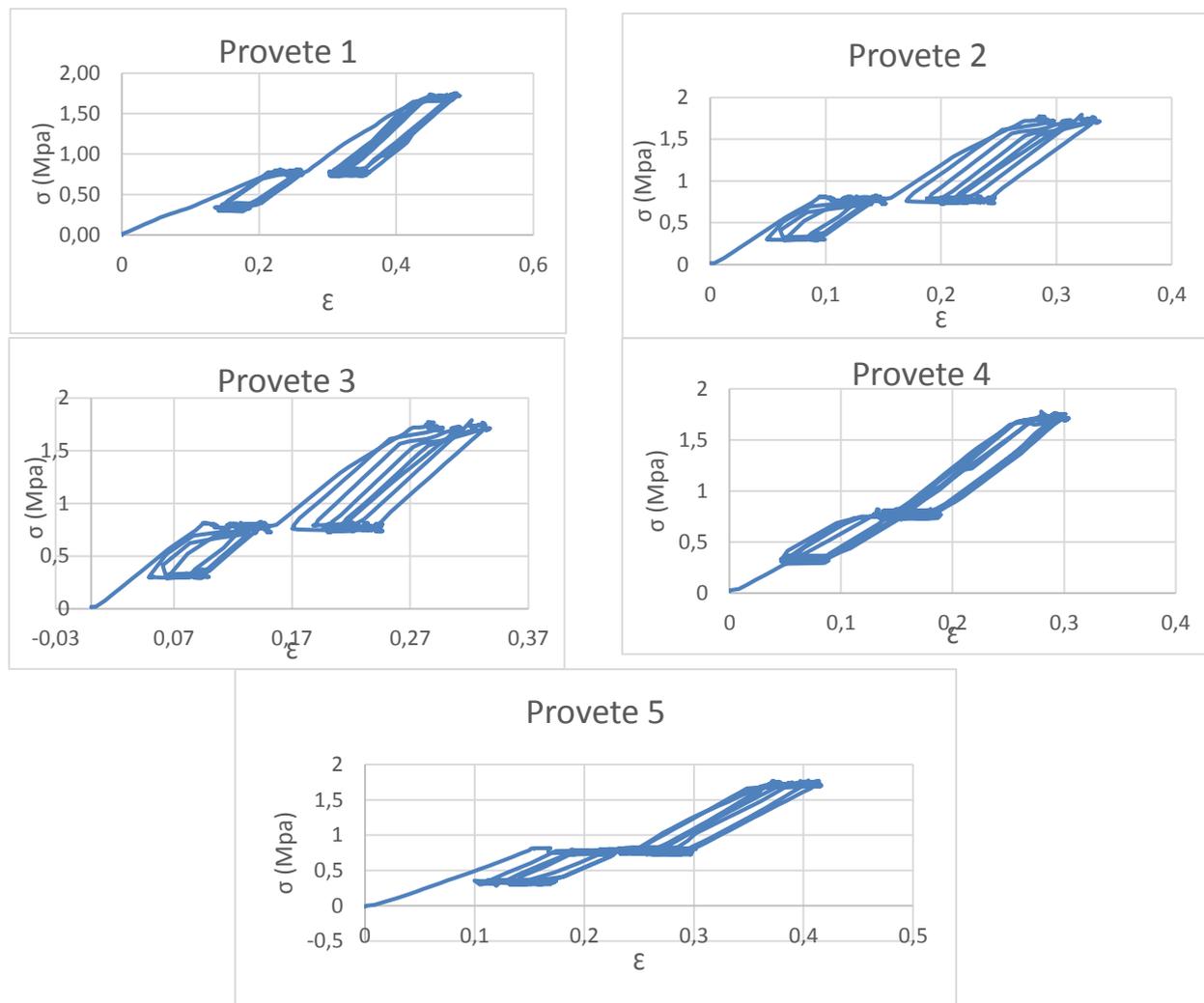


Figura 74- Valores obtidos da argamassa reforçada com aço

Os resultados obtidos para a argamassa apresentados na Figura 75.

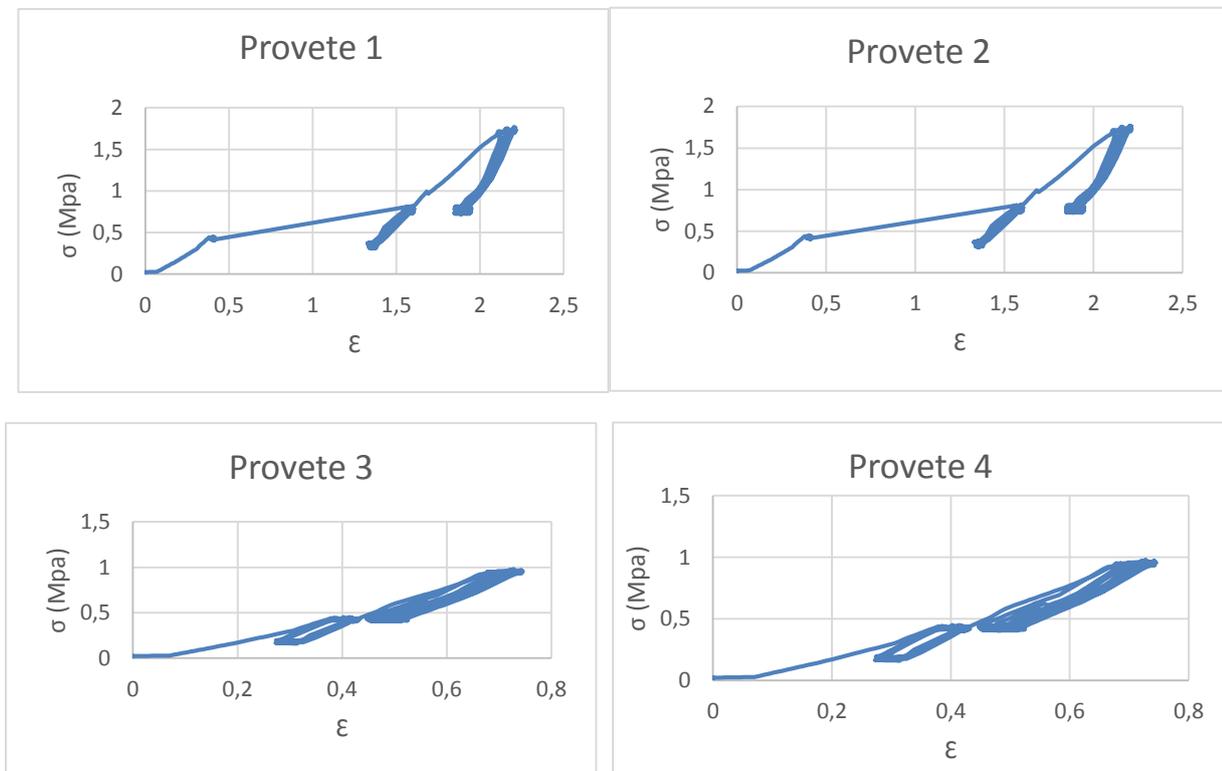


Figura 75- Resultados obtidos para a argamassa

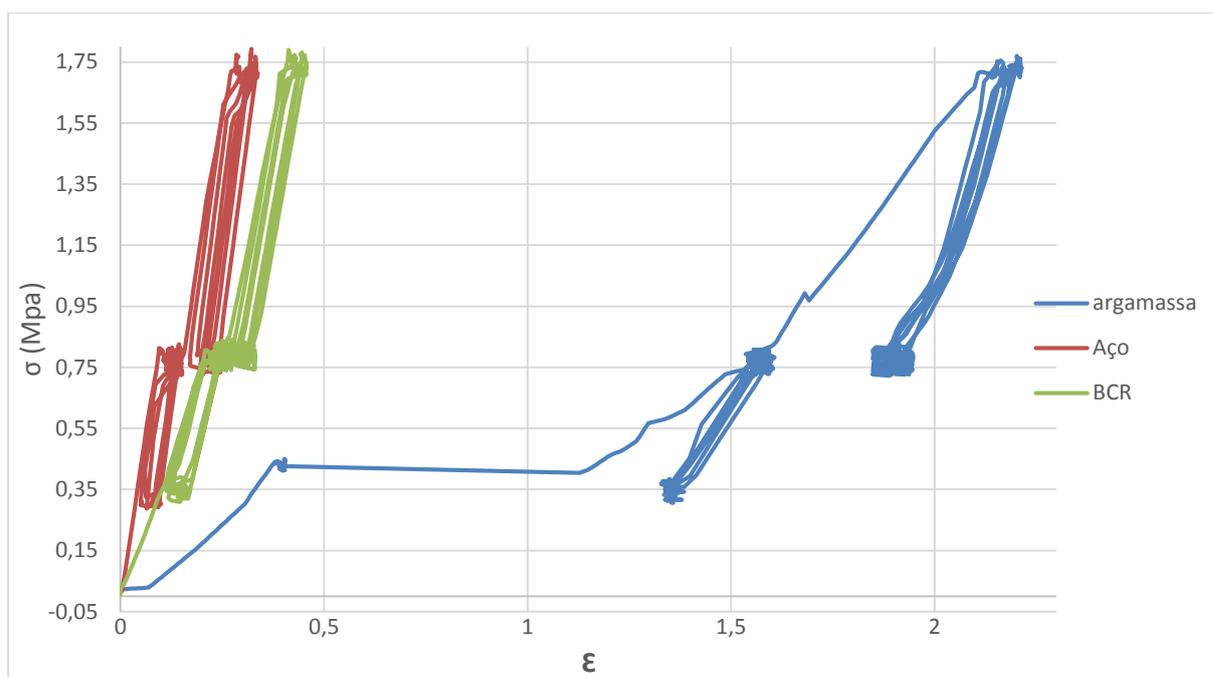


Figura 76- Curvas da tensão extensão das três amostras com melhor módulo de elasticidade (Mpa)

Neste ensaio de flexão ocorreram dois conjuntos de ciclos, mas para efeito de cálculos só se avaliou o segundo conjunto de ciclos. O primeiro conjunto de ciclos serviu para estabilizar o módulo de elasticidade da viga. Neste gráfico, estão apresentadas as amostras de cada tipo de elemento estrutural produzido, sendo estas curvas referentes às amostras com maior módulo de elasticidade medio, como apresentado nas tabelas seguintes. Esse valor medio não foi contabilizado para o primeiro ciclo, pois o valor é muito diferente dos seguintes ciclos o que interferiria na coerência dos valores. Os valores de E(Mpa) foram retirados em regime linear elástico.

Quadro 17- Valores medios do modulo de elasticidade para a viga com BCR2

BCR						
Proвете	1	2	3	4	5	6
Nº ciclo						
1	3,4201	3,7399	4,7139	3,5407	2,6384	5,5213
2	3,682	3,5469	4,521	4,559	4,698	6,65
3	3,7206	3,862	4,862	4,648	5,253	6,543
4	3,815354	4,025	4,652	4,783	5,649	6,367
E médio (Mpa)	3,739318	5,2	4,678333	4,663333	3,8113	6,52

Quadro 18- Valores medios do modulo de elasticidade para a viga argamassa

Argamassa				
Provete	1	2	3	4
Nº ciclo				
1	1,6136	1,899	1,881	1,963
2	3,385	2,5968	2,037	2,986
3	3,485	2,6852	2,1369	3,105
4	3,502	2,863	2,3987	3,296
E médio (Mpa)	3,457333333	3,275	2,190867	2,129

Quadro 19- Valores medios do modulo de elasticidade para a viga com aço

Aço					
Provete	1	2	3	4	5
Nº ciclo					
1	5,692529	6,5384	7,2119	6,9006	7,176
2	6,231879	6,8962	9,2596	8,641296	8,013187
3	6,31442	7,8651	9,2956	8,983	8,3984
4	6,351197	7,9967	9,1536	9,2564	8,7986
Emédio (Mpa)	6,299165	8,986	9,236267	8,760232	8,403396

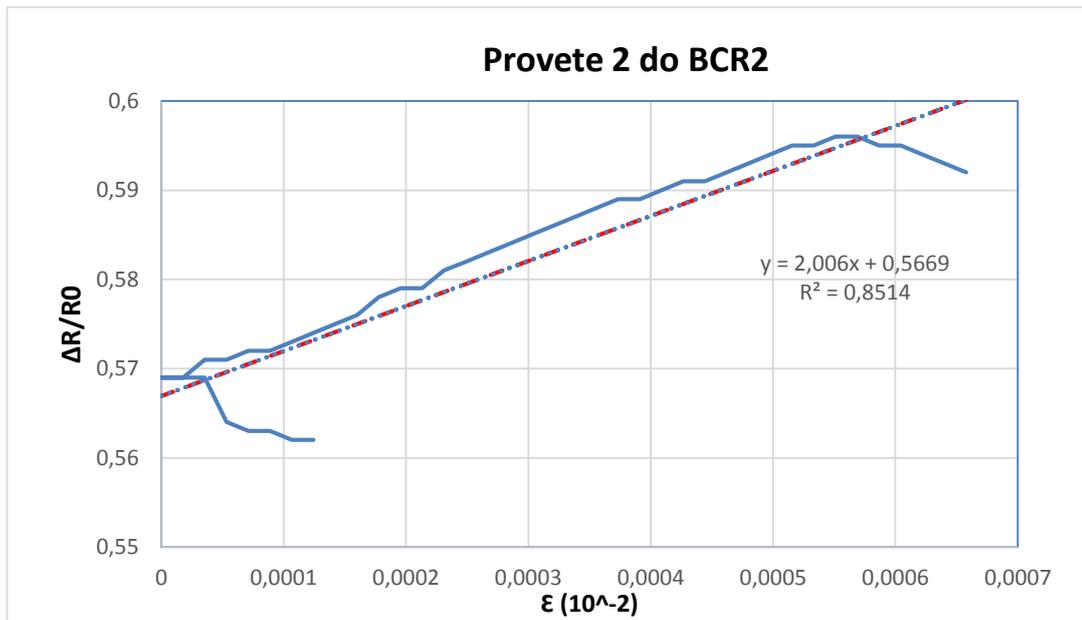


Figura 77- Gráfico da variação da resistência elétrica para o segundo ciclo de carga do provete 2

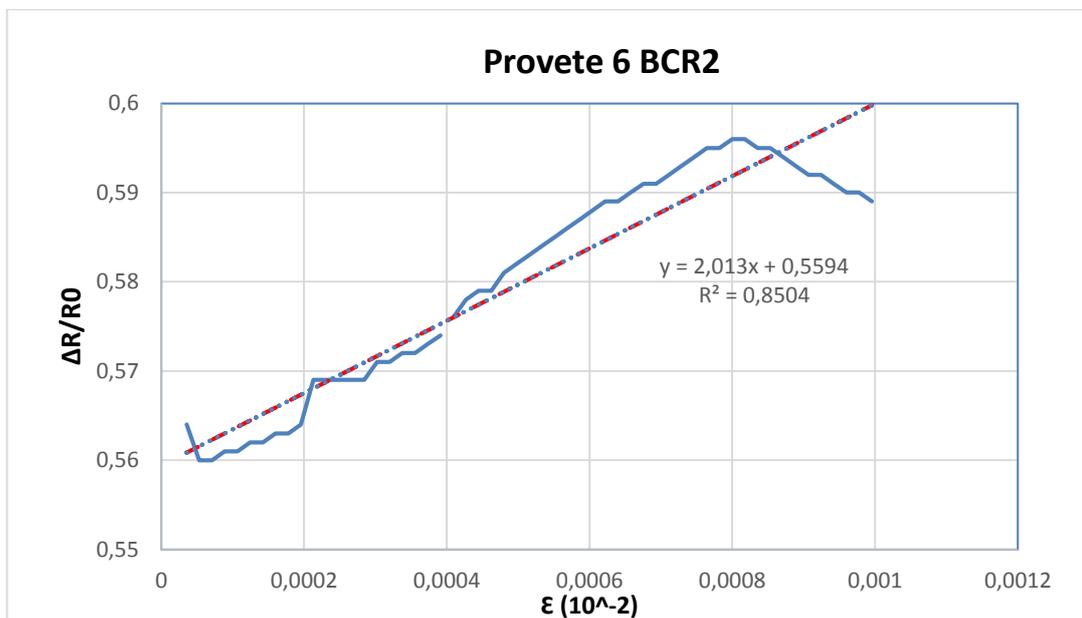


Figura 78- Gráfico da variação da resistência elétrica para o segundo ciclo de carga do provete 6

Quadro 20- Valores do *Gauge Factor* (GF)

BCR 2				
Provete	2		6	
	GF	R ²	GF	R ²
Nº Ciclo				
1	2,006	0,8514	2,013	0,8504
2	2,146	0,8804	2,153	0,9074
3	2,139	0,7931	2,129	0,8001
4	2,167	0,9004	2,179	0,9105

5.4. Conclusões

Da análise dos quadros 17,18 e 19 conclui-se que os elementos de argamassa com o varão de aço são os que apresentam melhor comportamento mecânico, com maior módulo de elasticidade (9,23 MPa) o que confere uma viga com maior rigidez. O elemento estrutural com menor rigidez são as vigas com argamassa simples com um valor médio de 3,4573 Mpa. Os elementos estruturais com BCR2 tem um valor médio de 6,52 Mpa o que se pode verificar um comportamento intermédio.

Quadro 21- Resiliência para as três amostras de argamassa

Módulo de resiliência	BCR2	Aço	Argamassa
Provete1	0,0042	0,0052	0,0021
Provete 2	0,058	0,024	0,03
Provete 3	0,065	0,07	0,035
Provete 4	0,08	0,065	0,02
Provete 5	0,066	0,062	
Provete 6	0,075		
EE medio (J/m³)	0,0580	0,04524	0,021775

A resiliência é a capacidade do material em absorver energia sem adquirir deformações permanentes. Esta energia é usada para a recuperação elástica durante a descarga. A resiliência mede-se pela área triangular que fica abaixo do diagrama Tensão(σ)-Deformação(ϵ) na fase correspondente ao regime elástico (energia necessária para provocar a cedência plástica). No

quadro 21 estão calculados os valores médios de cada amostra para os quatro ciclos. A amostra de argamassa com BCR2 demonstra um valor médio mais elevado que os valores médios das amostras de argamassa com aço e simples. Deste modo, as amostras de argamassa com o varão BCR2 têm maior capacidade de absorver energia sem adquirir deformações permanentes comparativamente com as outras amostras de argamassa.

Relativamente à resistência elétrica dos provetes com o varão BCR2, denota-se que só os provetes 2 e 6 é que demonstraram uma boa sensibilidade durante o ensaio.

O aumento do valor máximo e mínimo da resistência elétrica ao longo dos quatro ciclos de ensaio pressupõe que os provetes 2 e 6 sofrem alterações geométricas na sua estrutura à medida que é deformado. Apesar destas alterações, a variação relativa da resistência mantém-se constante ao longo do ensaio, este fato verifica-se pela proximidade dos valores de GF's (Quadro 20) para os quatro ciclos.

Da análise dos gráficos representados nas figuras 70 e 71, verifica-se que apresentam uma resposta positiva, pois observa-se um aumento da resistência elétrica quando o elemento estrutural é sujeito a uma deformação. Ambos os provetes têm um comportamento piezoresistivo muito semelhante.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões gerais

Este estudo pretende ser um contributo para desenvolvimento de sistemas de monitorização de estruturas de engenharia civil, a fim de melhorar a sua sustentabilidade. Como a maioria dos estudos realizados nos últimos anos neste campo, o objetivo final desse estudo é desenvolver um sistema de monitorização otimizado, através da aplicação dos varões entrançados em material compósito (BCR) em estruturas e betão armado.

Este trabalho foi realizado em três fases distintas, sendo a primeira fase a produção dos varões entrançados em material compósito, a segunda fase consistiu no ensaio dos mesmos e por fim a terceira fase onde ocorreu a produção e ensaio de elementos de argamassa com os varões entrançados produzidos e varões de aço.

Na primeira fase, durante a produção verificou-se a necessidade da utilização de um elemento extra para aperfeiçoar a qualidade do varão produzido, como a resina em excesso não era removida na totalidade pela força de entrançamento, esta aglomerava-se na parte inferior do varão, desta forma, era necessário passar com mão para conseguir remover a resina.

O processo de entrançamento utilizado na produção destes varões é decerto muito mais económico do que a maioria dos processos utilizados para a produção de varões, pois desta técnica de produção obtém-se a criação de rugosidade numa única fase, sem ser necessário recorrer a outros meios ou técnicas, ao contrário do processo de pultrusão, que produz varões lisos. Esta segunda fase de produção é necessária para criar rugosidades com vista a aumentar a aderência mecânica ao betão.

Foram produzidos 4 tipos de varões BCR: um constituído apenas por fibra de vidro BCR1, e os restantes com fibra de vidro e fibra de carbono em varias percentagens (5%,10%,15%), BCR2,BCR3 e BCR4 respetivamente e impregnados com resina epoxídica.

Os resultados dos ensaios à flexão revelaram que os varões BCR2 tiveram um melhor comportamento piezoelétrico, apresentando valores de GF's mais elevados. Destes ensaios denota-se que a capacidade de monitorização varia com a percentagem de fibras de carbono utilizada no varão, verificou-se que a sensibilidade do varão aumenta com a redução de fibra de carbono.

Na última fase deste estudo, foram produzidos três tipos de elementos estruturais em argamassa: um elemento estrutural em argamassa, elemento estrutural com varão BCR2 e elemento estrutural com varão de aço. Estes elementos foram ensaiados à flexão. Relativamente aos resultados destes ensaios, a resistência elétrica dos provetes 2 e 6 do elemento com varão BCR2, demonstraram uma boa sensibilidade durante o ensaio e ambos os provetes possuem um comportamento piezoelétrico muito semelhante.

E deste ensaio também se conclui que os elementos de argamassa com o varão de aço são os que apresentam melhor comportamento mecânico, com maior módulo de elasticidade (9,23 MPa) o que confere uma viga com maior rigidez. O elemento estrutural com menor rigidez são as vigas com argamassa simples com um valor médio de 3,4573 Mpa. Os elementos estruturais com BCR2 tem um valor médio de 6,52 Mpa o que se pode verificar um comportamento intermédio.

6.2. Trabalhos futuros

A realização deste estudo permitiu obter conhecimento e abrir caminhos para trabalhos vindouros, considero que a concretização das seguintes sugestões poderá constituir um bom complemento a este estudo.

- ✓ Desenvolver varões BCR para monitorização efetuada através de elementos condutores, tais como os nanotubos de carbono ou fibras de carbono cortadas e dispersas na matriz polimérica. As fibras de carbono são cortadas e dispersas na matriz também em diferentes percentagens e com comprimentos distintos.
- ✓ Determinar um sistema de monitorização destes varões em estruturas de betão armado tais como, pontes e túneis.

7. Referências bibliográficas

- [1] Acedido em Fevereiro de 2015 <http://www.duratinet.org/>
- [2] Acedido em Janeiro 2015 <http://www.fibrenamics.com>
- [3] Williams, J.H., et al., et al. *Ultrasonic Wave Velocity in Double Braided Nylon Rope. Fibre Science and Technology*. 21, 1984, pp. 41-57.
- [5] Wang, X. e Chung, D.D.L. *Real-time monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement*. Smart Materials and Structures. 1997, Vol. 6, 4.
- [6] Irving, P.E. e Thiagarajan, C. *Fatigue Damage characterization in carbo fibre composite materials using an eletrical potential technique*. Smart Materials. 1998, Vol. 7, pp. 456-466.
- [7] Fangueiro, R. Pereira, and C. Gonilho, “Fibrous materials reinforced composite for internal reinforcement” in *Fibrous and materials for civil engineering applications*, Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [8] Smart, pseudo-ductile reinforcing rods for concrete manufacture and test. Bakis, E. C., Nanni, A. and Terosky, J. A. Tucson, Arizona : s.n., 1996. First international conference on composites in infrastructures. pp. 95–108.
- [9] C. Q. Yang; Z. S. Wu and H. Huang; Electrical properties of different types of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) and hybrid CFRPs; Carbon 45 (2007), pp. 3027 – 3035.
- [10] A. Todoroki; J. Yoshida; Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load; JSME International journal, series A, Vol. 47, No. 3, 2004.
- [11] H. Inada, H. Kumagai, Y. Okuhara, Development of monitoring techniques for concrete structures using self-diagnosis materials and wireless measurement systems; online book preview; page 619-620.

[12] Bunsell, A. R. Handbook of tensile properties of textile and technical fibres. New York:Woodhead publishing limited, 2009. Vol. Volume I.

[13] *Tensile Properties of Braided FRP Rods for concrete reinforcement*. Nanni, A., et al. 1993
ИИЛ, Cement & Concrete Composites , Vol.15,pp. 121-129.

[14] Acedido em Fevereiro 2015: <http://www.i-micronews.com/interviews/Nano-Tech-2008-held-Japan-Tokyo-Sight-February-13-15-Bayer,29.html>

[15] M. Lillemose, M. Spieser, N.O. Christiansen, A. Christensen and A. Boisen, "Intrinsically conductive polymer thin film piezoresistors," *Microelectronic Engineering*, vol. 85, pp. 969-971, 2008.

[16] R. Mateiu, M. Lillemose, T.S. Hansen, A. Boisen and O.Geschke, "Reliability of poly 3,4-ethylenedioxythiophene strain gauge," *Microelectronic Engineering*, vol. 84, pp. 1270-1273, 2007.

[17] 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," *Composites Interfaces*, vol. 11, no. 1, pp. 95-103, 2004.

[18] S. Wen, S. Wang and D.D.L. Chung, "Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix and cement-matrix composites," *Journal of Materials Science*, vol. 35, pp. 3669-3675, 2000.

[19] S. Wang and D.D.L. Chung, "Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix composite," *Polymer Composites*, vol. 21, no. 1, pp. 13-19, 2000.

[20] P.K. Pramanik, D. Khastgir, S.K. De and T.N. Saha, "Pressure-sensitive electrically conductive nitrile rubber composites filled with particulate carbon black and short carbon fibre," *Journal of Materials Science*, vol. 25, 3848-3853 1990.

- [21] X. Wang and D.D.L. Chung, "Short carbon fiber reinforced epoxy coating as a piezoresistive strain sensor for cement mortar," *Sensors and Actuators*, vol. 71, pp. 208-212, 1998.
- [22] J.K. Kim, C.S. Park, D.W. Lee, S.M. Cho and C.R. Han, "Measurement of the gauge factor of carbon fiber and its application to sensors," *Microelectronic Engineering*, vol. 85, p. 787–791, 2008
- [23] International Carbon Black Association. Acedido em Fevereiro de 2015.
[Online]. http://www.carbon-black.org/what_is.html
- [24] *Self-diagnosing braided composit rod*. Fangueiro,R., Zdraveva,E., et al. Structures and Architecture- Cruz (Ed) 2010 Taylor & Francis Group, London
- [25] Benmuktane, B., Chaallalt, O. and Masmoudi, R. Glass fibre reinforced plastic (GFRP)rebars for concrete structures. *Construction and Building Materials*. No 6, 1995 йил, Vol. Vol. 9.
- [26] L. C. Bank, *Composites for construction - Structural design with FRP materials*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [27] Committee, 440 ACI. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures - ACI 440R-96*. s.l.: American Concrete Institute, 2002.
- [28] *Self-sensing CF-GFRP rods as mechanical reinforcement and sensors of concrete beams*. Nanni, F., et al., et al. 2006 йил, *Smart Materials and structures*, Vol. 15, pp. 182–186.
- [29] *Self-Diagnosis of Hybrid CFRP Rods and As-Strengthened Concrete Structures*. Yang, C., Wu, Z. and Ye, L. P. 2006 йил, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. Vol. 17, pp. 609-618.
- [30] *Self-Diagnosis of concrete beams reinforced with hybrid CFRP rods*. Wu, Z., Yang, C, and Takahashi, T. Pennsylvania, USA : s.n., 2003. *Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring*. pp. 155-162.

[31] *Self-sensing Nanocomposite CnP-GFRP Rods as Reinforcement and Sensors of Concrete Beams*. Nanni, F., et al., et al. 2009 йил, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20, pp. 1615-1623.

[32] *Health monitoring performances of FRP self-sensing composites rods in concrete beams*. Ruscito, G., et al., et al. Zurich, Switzerland : s.n., 2008. 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008).

[33] Acedido em Dezembro 2014: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bending>.

[34] Paciornik, Sidnei (2004). Ciência e Engenharia de Materiais. Acedido em Abril de 2015: http://www.dcmn.puc-rio.br/cursos/cemat/index_files/frame.html.

[35] Design Methodology of a Ductile Hybrid Kevlar-Carbon Reinforced Plastic for Concrete Structures by the Braidtrusion Process. **Lam, H., et al. Beijing**, China : s.n., 2001. 13th International Conference on Composite Materials.

[36] Creep, Stress, Rupture, and Behavior of a Ductile Hybrid FRP for Concrete Structures. Hampton, F., Ko, **F. K. and Harris, H.G. Paris**, France : s.n., 1999. 12th International Conference on Composite Materials. p. 731.

ANEXO

Anexo A: Informação técnica da resina utilizada

Description				
■ Basis	Three-component-epoxy-system			
■ Resin (A)	Biresin® CR141, epoxy resin, translucent			
■ Hardener (B)	Biresin® CH141, carboxylic acid anhydride, transparent			
■ Accelerator (C)	Biresin® CA141, amine, amber			
Physical Data		Resin (A)	Hardener (B)	Accelerator (C)
Individual Components		Biresin® CR141	Biresin® CH141	Biresin® CA141
Viscosity, 25°C	mPas	8.250	< 10	200
Density, 25°C	g/ml	1.16	1.20	0.98
Mixing ratio	in parts by weight	100	90	2
			Mixture	
Potlife, 100 g / RT, approx. values	h	> 24		
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPas	600		
Mechanical Data, neat resin specimen				
approx. values after 3 h / 80°C + 3 h / 120°C + 3 h / 140°C (source: Sika internal)				
Biresin® CR141 resin (A)		with Biresin® CH141 hardener (B) and Biresin® CA141 accelerator (C)		
Density	ISO 1183	g/cm³	1,20	
Shore hardness	ISO 868	-	D 87	
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3.100	
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	3.200	
Flexural strength	ISO 178	MPa	145	
Compressive strength	ISO 604	MPa	122	
Tensile strength	ISO 527	MPa	78	
Elongation at break	ISO 527	%	3,3	
Impact resistance	ISO 179	kJ/m²	18	