



Fernando Eduardo Macedo da Cunha

Desenvolvimento de materiais fibrosos inteligentes para o reforço de alvenarias de enchimento sujeitas à ação sísmica

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Fernando Eduardo Macedo da Cunha

Desenvolvimento de materiais fibrosos
inteligentes para o reforço de alvenarias de
enchimento sujeitas à ação sísmica

Tese de Doutoramento
Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Raúl Manuel Esteves Sousa Figueiro
Professora Doutora Graça de F. M. de Vasconcelos

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

Desejo exprimir os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, permitiram que esta tese de doutoramento se concretizasse.

Em primeiro lugar agradecer ao Prof. Raul Figueiro pela oportunidade concedida e pela motivação constante ao longo de toda esta caminhada. Obrigado acima de tudo pela amizade sempre demonstrada, ao longo de todo o processo.

Agradeço, de igual forma, à Prof. Dr. Graça Vasconcelos, todas as conversas que, de uma forma ou de outra, sempre deram resultados práticos importantes.

Gostaria também de agradecer aos meus colegas da Fibrenamics da Universidade do Minho, nomeadamente Eng^o Fernando Leite, Eng^o José Sousa, Diogo Cachetas e, com um particular destaque, para o Eng^o Carlos Mota e Eng^o João Bessa por todo o apoio e companheirismo demonstrados.

Um agradecimento especial à minha Família, Mãe, Pai, Irmão e, particularmente, à minha esposa que sempre foram uma fonte de motivação, resiliência e suporte para que esta tese fosse concluída com sucesso.

A todos um muito obrigado por mais esta página escrita na minha vida

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Desenvolvimento de materiais fibrosos inteligentes para o reforço de alvenarias, para prevenção sísmica.

Resumo

O objetivo do presente trabalho consistiu no desenvolvimento de uma nova classe de polímeros reforçados por fibras, nomeadamente Varões Compósitos Entrançados (BCR's). Assim, o objetivo traçado para a presente tese centrou-se no desenvolvimento de BCR's com pseudoductilidade com vista ao melhoramento do desempenho mecânico e BCR's com monitorização que permitam monitorizar deformações experimentadas pelo reforço quando solicitado por uma determinada ação mecânica.

Assim, numa primeira parte do trabalho foram desenvolvidas técnicas que permitissem a produção de BCR'S com a incorporação das tecnologias mencionadas anteriormente. Para além disso, neste âmbito, foram igualmente adaptados métodos de ensaio que permitissem avaliar o desempenho associado à pseudoductilidade e à capacidade de monitorização dos varões.

Para o desenvolvimento de BCR's com Pseudoductilidade foram exploradas duas abordagens, nomeadamente: (a) pseudoductilidade a partir da incorporação de materiais fibrosos com diferentes propriedades mecânicas (alongamento na rotura); (b) pseudoductilidade a partir da utilização de materiais dúcteis (aço) em combinação com fibras de Vidro e Basalto. Desta forma, foi possível concluir que a partir de fibras com diferentes alongamentos na rotura é possível induzir um comportamento pseudo-ductil em BCR's.

No que diz respeito à monitorização, foram estudadas as seguintes situações: (a) introdução de filamentos intrinsecamente condutores; (b) funcionalização de filamentos de fibra de vidro com materiais condutores, nomeadamente nanotubos de carbono. No âmbito do presente estudo foi possível desenvolver novas funcionalizações no que diz respeito aos BCR no sentido de as capacitar de propriedades piezoresistivas em ensaios de tração cíclicos.

Palavras Chave: Pseudoductilidade, monitorização, varões compósitos, alvenaria.

Development of smart fibrous materials for the reinforcement of masonry, for seismic prevention.

Abstract

The aim of this work was to develop a new class of fiber reinforced polymers, namely Braided Composite Rods (BCR's). Thus, the objective outlined for this thesis focused on the development of BCR's with pseudoductility to improve the mechanical performance and BCR's with capability that allows the monitoring of deformations experienced by reinforcement when requested by specific action.

Thus, in the first part of the thesis, the techniques associated with the BCR's development process for the incorporation of the previously described technologies are described. In this context, new tests methods were also studied and developed.

For the development of BCR's with pseudoductility, two techniques were explored, namely: (a) pseudoductility from the incorporation of fibrous materials with different mechanical properties (elongation at break); (b) pseudoductility from the use of ductile materials (steel) in combination with fiberglass and Basalt. Thus, it was possible to conclude that from fibers with different elongations at break, it is possible to induce a pseudo-ductile behavior in BCR's.

With regard to self-sensing, the objective was to study the following techniques: (a) introduction of intrinsically conductive filaments; (b) functionalization of glass filaments with conductive materials, namely carbon nanotubes. Within the scope of this study, it was possible to develop new functionalizations with regard to BCR in order to enable them to have piezoresistive properties in cyclic tensile tests.

Keywords: Pseudoductility, self-sensing, composite rods, masonry

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da tese.....	3
2	Estado do conhecimento.....	4
2.1	Introdução	4
2.2	Polímeros reforçados por fibras	7
2.2.1	Argamassas reforçadas por materiais fibrosos (TRM).....	7
2.2.2	Varões compósitos entrançados (BCR-RW).....	10
2.3	Ductilidade em polímeros reforçados por fibras.....	17
2.3.1	Ductilidade e pseudoductilidade em materiais fibrosos - incorporação de materiais dúcteis.....	18
2.3.2	Ductilidade e pseudoductilidade em materiais fibrosos - utilização de diferentes tipos de fibras com extensões na rotura distintas.....	19
2.3.3	Ductilidade e pseudoductilidade em materiais fibrosos, através da manipulação das estruturas fibrosas de reforço.....	21
2.4	Monitorização em compósitos poliméricos reforçados por fibras.....	22
2.5	Considerações finais.....	27
3	Produção de Varões Compósitos Entrançados (BCR): materiais e métodos	28
3.1	Técnica de desenvolvimento de varões compósitos BCR	28
3.1.1	Fase 1 – Alimentação de fibras.....	30
3.1.2	Fase 2 – Impregnação das fibras	32
3.1.3	Fase 3 – Entrançamento	33

3.1.4	Fase 4 – Cura	34
3.1.5	Fase 5 – Tiragem.....	34
3.2	Caracterização mecânica dos varões compósitos à tração	35
3.2.1	Desenvolvimento de um sistema de ancoragem	36
3.2.2	Ensaio de tração uniaxial	40
3.2.3	Ensaio para avaliação da piezoresistividade	43
3.3	Materiais e métodos para o design do BCR com pseudoductilidade	44
3.3.1	Materiais para exploração da pseudoductilidade de varões compósitos – materiais fibrosos de origem polimérica.....	44
3.3.2	Soluções de varões compósitos com fibras poliméricas.....	48
3.3.3	Materiais para exploração da pseudoductilidade de varões compósitos – materiais com comportamento intrinsecamente dúctil.....	51
3.4	Design de BCR’s com capacidade de monitorização.....	53
3.4.1	Introdução de fibras intrinsecamente condutoras.....	53
3.4.2	Funcionalização de filamentos de fibra de vidro com nanotubos de carbono.....	55
4	<i>Comportamento de varões compósitos entrançados com pseudoductilidade – Análise de resultados</i>	59
4.1	Pseudoductilidade a partir da incorporação de materiais fibrosos com diferentes propriedades mecânicas.....	59
4.1.1	BCR com 100% fibra de carbono no núcleo de reforço	60
4.1.2	BCR com 100% fibra de Vidro no núcleo de reforço	61
4.1.3	BCR com 100% fibra de Basalto no núcleo de reforço	62
4.1.4	BCR_H1 (25% Vidro; 25% Carbono; 25% PP; 25% Dynema®).....	63
4.1.5	BCR_H2 (33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular)	64

4.1.6	BCR_H3 (33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polipropileno)	65
4.1.7	BCR_H4 (33%Vidro; 33% Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular; 33%Polipropileno).....	66
4.1.8	Análise e discussão dos resultados.....	67
4.2	Pseudoductilidade a partir da incorporação de materiais dúcteis	74
4.2.1	BCR's com fibra de vidro e aço	74
4.2.2	Resultados dos BCR's com fibra de basalto e filamento de aço.....	77
4.2.3	Análise e discussão dos resultados.....	80
4.2.4	Considerações finais.....	86
5	<i>Varões compósitos com capacidade de monitorização.....</i>	88
5.1	Estudo da Piezoresistividade em Filamentos condutores (Aço e Carbono).....	88
5.2	Piezoresistividade em Varões compósitos com filamentos condutores.....	90
5.3	Piezoresistividade em filamentos de fibra de vidro funcionalizada com nanotubos de carbono.....	92
5.4	Resultados dos ensaios de Piezoresistividade para varões compósitos com fibra de vidro funcionalizada com nanotubos de carbono	103
5.5	Conclusão	107
6	<i>Conclusões e futuros desenvolvimentos.....</i>	109
6.1	Principais conclusões	109
6.2	Futuros desenvolvimentos	111
7	<i>Bibliografia</i>	112

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 PROBLEMÁTICA, DANOS TÍPICOS E PREVENÇÃO DOS SISMOS EM ALVENARIAS (KAVEH, ET AL., 2020).	4
FIGURA 2 EVOLUÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA AO LOGO DAS ÚLTIMAS DÉCADAS (CUNHA, ET AL., 2011).	5
A FIGURA 3 APRESENTA EXEMPLOS DE COLAPSO DE PAREDES COM LIGAÇÕES DEFICIENTES OU INEXISTENTES À ESTRUTURA DE BETÃO ARMADO (ABREU, 2011)	6
FIGURA 4 DIAGRAMA DA CARGA-EXTENSÃO EM TRAÇÃO (LARRINAGA, ET AL., 2013).	9
FIGURA 5 ARQUITETURA DA MALHA DE FIBRA DE CARBONO (PAPANICOLAOU, ET AL., JANUARY 2008).	10
FIGURA 6 SOLUÇÃO COMERCIAL DA S&P (GÓMEZ, 2012)	11
FIGURA 7 SOLUÇÃO COMERCIAL DA MAPEGRID (GÓMEZ, 2012)	11
FIGURA 8 SOLUÇÃO COMPÓSITA DESENVOLVIDA (GÓMEZ, 2012)	11
FIGURA 9 RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO: DIAGRAMAS FORÇA-DESLOCAMENTO (GÓMEZ, 2012)	13
FIGURA 10 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ÁREA DE ADERÊNCIA DE UM VARÃO ENTRANÇADO (CUNHA, ET AL., 2014).	14
FIGURA 11 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM BCR-RW, SIMPLES SEM RUGOSIDADE (0EVMIN E 0EVMAX) (MARTINS, 2013).	15
FIGURA 12 FORÇAS DE ARRANCAMENTO PARA CADA TIPO DE VARÃO COMPÓSITO (BCR-RW) (MARTINS, 2013)	16
FIGURA 13 FORÇAS MÁXIMAS MÉDIAS OBTIDAS PARA CADA TIPO DE MALHA (MARTINS, 2013).	16
FIGURA 14 IMAGENS OBTIDAS ATRAVÉS DE MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO DA AMOSTRA DE CONTROLO E DAS AMOSTRAS ENSAIADAS À TRAÇÃO (CUNHA, ET AL., 2014).	17
FIGURA 15- CORTE TRANSVERSAL DE UM VARÃO HÍBRIDO (A) E DIAGRAMA TENSÃO VS EXTENSÃO DO VARÃO HÍBRIDO (B) (CUI, ET AL., 2008)	19
FIGURA 16 DIAGRAMA TENSÃO-EXTENSÃO IDEALIZADO PARA COMPÓSITOS HÍBRIDOS (WU, 2005)	20
FIGURA 17 ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO DA ESTRUTURA ENTRANÇADA UTILIZADA (HARRY G HARRIS, 2000).	21
FIGURA 18 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA E DA DEFORMAÇÃO NUM CARREGAMENTO CÍCLICO (FANGUEIRO & GODINHO-PEREIRA, 2011).	23

FIGURA 19 - EXEMPLIFICAÇÃO DA DISPERSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE NANOPARTICULAS (MONTAGNA, 2010).	25
FIGURA 20 VISTA TRANSVERSAL DO VARÃO COMPÓSITO	29
FIGURA 21 ILUSTRAÇÃO DA VISTA TRANSVERSAL DE UM VARÃO COMPÓSITO	29
FIGURA 22 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS (BCR).....	30
FIGURA 23 FASE DE ALIMENTAÇÃO NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS (BCR)	32
FIGURA 24 FASE DE IMPREGNAÇÃO NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS (BCR)	32
FIGURA 25 FASE DE ENTRANÇAMENTO NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS (BCR).....	33
FIGURA 26 FASE DE CURA NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS (BCR)	34
FIGURA 27 FASE DE TIRAGEM NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS (BCR)	35
FIGURA 28 ASPETO DO VARÃO NA FASE INICIAL DO PROCESSO DE DESGASTE (ESQUERDA); ASPETO FINAL DO VARÃO APÓS O DESGASTE (DIREITA).....	36
FIGURA 29 DETALHES DO SISTEMA DE ANCORAGEM DOS VARÕES FRP, DE ACORDO COM O REGULAMENTO ACI 440.3R-04 (MORAIS, 2005)	37
FIGURA 30 PROCESSO DE LIMPEZA DO INTERIOR DOS TUBOS DE AÇO.....	38
FIGURA 31 PROCESSO DE DESGASTE DO INTERIOR DOS TUBOS DE AÇO.	38
FIGURA 32 (A) TUBOS COLOCADOS DE FORMA ORDENADA NO XPS; (B) ROTURA DA ZONA DE ANCORAGEM DUM BCR POR AÇÃO DE FORÇAS DE CORTE.....	39
FIGURA 33 (A) MISTURA DE COLA PREPARADA E ANTES DE SER INTRODUZIDA NO INTERIOR DOS TUBOS; (B) INTRODUÇÃO DOS VARÕES NO INTERIOR DOS TUBOS COM COLA, (C) AMOSTRAS A ENSAIAR COM ANCORAGEM MONTADA NUMA DAS SUAS EXTREMIDADES.	40
FIGURA 34 AMOSTRAS FINAIS PARA OS ENSAIOS À TRAÇÃO.	40
FIGURA 35 DIMENSÕES DAS PLACAS METÁLICAS PARA O SISTEMA DE ANCORAGEM DO ENSAIO DE TRAÇÃO DOS VARÕES: (A) SUPERIOR FIXA AO EQUIPAMENTO, (B) IXA À AMOSTRA.	41
FIGURA 36 SISTEMA DE ANCORAGEM FINAL ESQUEMÁTICO (ESQUERDA) E REAL (DIREITA) USADO PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO.	42

FIGURA 37 ILUSTRAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DESEJADO PARA O VARÃO COMPÓSITO ENTRANÇADO. (EM QUE 1, 2, 3 E 4, É A REPRESENTAÇÃO TEÓRICA DE CADA UM DOS MATERIAIS A INTRODUIZIR COMO NÚCLEO DE REFORÇO.)	45
FIGURA 38 ILUSTRAÇÃO DO COMPORTAMENTO PSEUDO-DUCTIL DOS BCR'S	47
FIGURA 39 COMPARAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E CUSTO DOS DIFERENTES TIPOS DE VARÕES (AÇO, GFRP E HÍBRIDO). (CUI, ET AL., 2008)	52
FIGURA 40 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO POR DIP-PAD-DRY	57
FIGURA 41 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR100% CARBONO.	61
FIGURA 42 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR 100% VIDRO.	62
FIGURA 43 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR 100% BASALTO	63
FIGURA 44 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR_H1.	64
FIGURA 45 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR_H2.	65
FIGURA 46 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR_H3.	66
FIGURA 47 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR_H4.	67
FIGURA 48 ASPETO FINAL DE UM VARÃO COM NÚCLEO DE FIBRA DE CARBONO APÓS O ENSAIO DE TRAÇÃO..	69
FIGURA 49 EXPLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DA PSEUDODUCTILIDADE SEGUNDO A METODOLOGIA DE (FULLER & WISNOM, 2014)	70
FIGURA 50 RESULTADOS DA ϵ_p - DEFORMAÇÃO PSEUDODUCTILIDADE DA AMOSTRA BCR_H4	73
FIGURA 51 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR COM FIBRA DE VIDRO E AÇO (1,6MM).....	74
FIGURA 52 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR COM FIBRA DE VIDRO E AÇO (2 MM).....	75
FIGURA 53 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR COM FIBRA DE VIDRO E AÇO (2,5 MM).....	76
FIGURA 54 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR COM FIBRA DE BASALTO E FILAMENTO AÇO (1,6 MM).	77
FIGURA 55 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR COM FIBRA DE BASALTO E AÇO (2 MM).....	78
FIGURA 56 DIAGRAMA DE TENSÃO VS EXTENSÃO DO BCR COM FIBRA DE BASALTO E FILAMENTO DE AÇO (2,5 MM).	79

FIGURA 57 RELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ENERGIA E A QUANTIDADE DE AÇO	82
FIGURA 58 COMPARAÇÃO GRÁFICA DO VALOR DA ϵ_p - DEFORMAÇÃO PSEUDODUCTILIDADE DAS AMOSTRAS: BCR: 100% VIDRO (SUPERIOR ESQUERDO); BCR: GLASS + STEEL (1,6 MM) (SUPERIOR DIREITO); BCR: GLASS + STEEL (2 MM) (INFERIOR ESQUERDO); BCR: GLASS + STEEL (2,5 MM) (INFERIOR DIREITO).....	84
FIGURA 59 COMPARAÇÃO GRÁFICA DO VALOR DA ϵ_p - DEFORMAÇÃO PSEUDODUCTILIDADE DAS AMOSTRAS: BCR: 100% BASALTO (SUPERIOR ESQUERDO); BCR: BASALTO + STEEL (1,6 MM) (SUPERIOR DIREITO); BCR: BASALTO + STEEL (2 MM) (INFERIOR ESQUERDO); BCR: BASALTO + STEEL (2,5 MM) (INFERIOR DIREITO)	85
FIGURA 60 EFEITO DA INSERÇÃO DE AÇO NAS AMOSTRAS BCR COM VIDRO E BASALTO, NA ϵ_p - DEFORMAÇÃO PSEUDODUCTILIDADE (%).....	86
FIGURA 61. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA FRACIONAL DE FILAMENTOS DE AÇO, SUBMETIDAS A TRAÇÃO CÍCLICA, COM MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA, APLICADA A UMA EXTENSÃO DE 0,5% E 1%. ...	89
FIGURA 62. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE FILAMENTOS DE FIBRA DE CARBONO, SUBMETIDAS A TRAÇÃO CÍCLICA, APLICADA UMA EXTENSÃO DE 0,5% E 1%.....	89
FIGURA 63. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA FRACIONAL DE VARÕES COMPÓSITOS FUNCIONALIZADOS COM UM FILAMENTO DE AÇO INOX, SUBMETIDAS A TRAÇÃO CÍCLICA, APLICADA UMA EXTENSÃO DE 0,5% E 1%. .	91
FIGURA 64. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA FRACIONAL DE VARÕES COMPÓSITOS FUNCIONALIZADOS COM UM FILAMENTO DE FIBRA DE CARBONO, SUBMETIDAS A TRAÇÃO CÍCLICA, APLICADA UMA EXTENSÃO DE 0,5% E 1%.	91
FIGURA 65 ASPETO VISUAL DAS FIBRAS IMPREGNADAS SEM (À ESQUERDA) E COM (À DIREITA) APLICAÇÃO DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE PRÉVIO ÀS MESMAS.	93
FIGURA 66 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS COM E SEM TRATAMENTO ALCALINO.	94
FIGURA 67 ANÁLISE FTIR AO ESPECTRÓMETRO DE FILAMENTOS DE FIBRA DE VIDRO; (A) COM TRATAMENTO ALCALINO; (B) SEM TRATAMENTO ALCALINO	94
FIGURA 68 RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS AMOSTRAS FUNCIONALIZADAS COM A FORMULAÇÃO B, SUBMETIDAS A TRAÇÃO CÍCLICA, A EXTENSÕES DE 0,5 E 1%.	98
FIGURA 69 RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS AMOSTRAS FUNCIONALIZADAS COM A FORMULAÇÃO C, SUBMETIDAS A TRAÇÃO CÍCLICA, A EXTENSÕES DE 0,5% E 1%.	100
FIGURA 70. PREPARAÇÃO DOS VARÕES PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO CÍCLICA.	103

FIGURA 71. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA E DA EXTENSÃO DOS VARÕES COMPÓSITOS COM FILAMENTO DE FIBRA DE VIDRO FUNCIONALIZADO COM A FORMULAÇÃO B, SEM PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO, SUBMETIDO A TRAÇÃO CÍCLICA, A EXTENSÕES DE 0,5% E 1%. 104

FIGURA 72. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA E DA EXTENSÃO DOS VARÕES COMPÓSITOS COM FILAMENTO DE FIBRA DE VIDRO FUNCIONALIZADO COM A FORMULAÇÃO B, COM PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO, SUBMETIDO A TRAÇÃO CÍCLICA, A EXTENSÕES DE 0,5% E 1%. 105

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1 PROPRIEDADES DA FIBRA DE BASALTO (LARRINAGA, ET AL., 2013).....	8
QUADRO 2 PROPRIEDADES DA MALHA DE REFORÇO (LARRINAGA, ET AL., 2013)	8
QUADRO 3 PROPRIEDADES DA MALHA COMERCIAL DA S&P	12
QUADRO 4 PROPRIEDADES DA MALHA COMERCIAL DA MAPEGRID	12
QUADRO 5 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS (MARTINS, 2013).....	15
QUADRO 6 - BREVE RESUMO SOBRE AS TÉCNICAS DE DISPERSÃO.....	25
QUADRO 7 DIMENSÕES DOS TUBOS EM AÇO PARA ANCORAMENTO DOS VARÕES.....	37
QUADRO 8 PROPRIEDADES FÍSICAS DA COLA SIKADUR 32-EF®	39
QUADRO 9 MATERIAIS FIBROSOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS (CUNHA, ET AL., 2014).	46
QUADRO 10 MATERIAIS POLIMÉRICOS USADOS NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS.	48
QUADRO 11 MATERIAIS FIBROSOS UTILIZADO NO DESENVOLVIMENTO DOS VARÕES DE REFERÊNCIA.	49
QUADRO 12 APRESENTAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DOS BCR'S HÍBRIDOS	50
QUADRO 13 COMPOSIÇÃO DOS BCR'S HÍBRIDOS.....	50
QUADRO 14 CARACTERÍSTICA DA RESINA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS HÍBRIDOS.....	51
QUADRO 15 MATERIAIS FIBROSOS UTILIZADO NO DESENVOLVIMENTO DOS VARÕES ENTRANÇADOS COM A INCORPORAÇÃO DE AÇO.	53
QUADRO 16 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE FILAMENTOS CONDUTORES UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE VARÕES COMPÓSITOS ENTRANÇADOS.....	54
QUADRO 17 MATERIAIS FIBROSOS UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DOS VARÕES ENTRANÇADOS COM A INCORPORAÇÃO DE FILAMENTOS CONDUTORES.....	54
QUADRO 18 MATERIAIS UTILIZADOS PARA A FUNCIONALIZAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO.....	58
QUADRO 19 MATERIAIS UTILIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE BCR'S COM AS FORMULAÇÕES B E C.....	58
QUADRO 20 APRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS VARÕES COM PSUDUCTILIDADE.....	60

QUADRO 21 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR 100% CARBONO.	61
QUADRO 22 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR 100% VIDRO.	62
QUADRO 23 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR 100% BASALTO.	63
QUADRO 24 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR_H1.	64
QUADRO 25 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR_H2.	65
QUADRO 26 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR_H3.	66
QUADRO 27 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR_H4.	67
QUADRO 28 RESUMO DAS PROPRIEDADES DO BCR'S EM MONOMATERIAL NO NÚCLEO.	68
QUADRO 29 VALORES DE ϵ_P - DEFORMAÇÃO PSEUDODUCTILIDADE (%), PARA AS AMOSTRAS DE BCR: 100% CARBONO, 100% VIDRO E 100% BASALTO	70
QUADRO 30 RESUMO DAS PROPRIEDADES DO BCR'S HÍBRIDOS NO NÚCLEO	71
QUADRO 31 VALORES DE ϵ_P - DEFORMAÇÃO PSEUDODUCTILIDADE (%), PARA AS AMOSTRAS DE BCR_1, BCR_2, BCR_3 E BCR_4.	72
QUADRO 32 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR COM FIBRA DE VIDRO E AÇO (1,6MM).	75
QUADRO 33 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR COM FIBRA DE VIDRO E FILAMENTO DE AÇO (2MM).	76
QUADRO 34 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR COM FIBRA DE VIDRO E AÇO (2,5MM).	77
QUADRO 35 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR COM FIBRA DE BASALTO E FILAMENTO DE AÇO (1,6MM). ..	78
QUADRO 36 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR COM FIBRA DE BASALTO E FILAMENTO DE AÇO (2 MM). ...	79
QUADRO 37 PROPRIEDADES DETALHADAS DO BCR COM FIBRA DE BASALTO E FILAMENTO DE AÇO (2,5 MM). ..	80
QUADRO 38 RESUMO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BCR'S DESENVOLVIDOS COM A INCORPORAÇÃO DE AÇO NO NÚCLEO DE REFORÇO	81
QUADRO 39 ϵ_P - DEFORMAÇÃO PSEUDODUCTILIDADE (%) DOS BCR'S DE VIDRO E BASALTO COM AÇO.	83
QUADRO 40 GAUGE FACTOR DETERMINADO PARA OS FILAMENTOS DE AÇO E FIBRA DE CARBONO.	90
QUADRO 41 GAUGE FACTOR DETERMINADO PARA OS VARÕES COM A INCORPORAÇÃO DE FILAMENTOS DE AÇO E FIBRA DE CARBONO.	92

QUADRO 42 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO DOS FILAMENTOS DE FIBRA DE VIDRO FUNCIONALIZADOS.	95
QUADRO 43 RESISTÊNCIA ELÉTRICA, MEDIDA COM DISTÂNCIA ENTRE ELÉTODOS DE 1CM, DE FILAMENTOS FUNCIONALIZADOS DE VIDRO.	96
QUADRO 44 GAUGE FACTOR DETERMINADO PARA OS FILAMENTOS DE FIBRA DE VIDRO FUNCIONALIZADOS COM CNTS, PARA A FORMULAÇÃO B.	100
QUADRO 45 GAUGE FACTOR DETERMINADO PARA OS FILAMENTOS DE FIBRA DE VIDRO FUNCIONALIZADOS COM CNTS, PARA A FORMULAÇÃO C.	101
QUADRO 46 GAUGE FACTOR DETERMINADO PARA OS VARÕES COM OS FILAMENTOS DE FIBRA DE VIDRO FUNCIONALIZADOS COM CNTS, PARA A FORMULAÇÃO B, COM PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO.	106
QUADRO 47 GAUGE FACTOR DETERMINADO PARA OS VARÕES COM OS FILAMENTOS DE FIBRA DE VIDRO FUNCIONALIZADOS COM CNTS, PARA A FORMULAÇÃO B, SEM PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO.	106

1 Introdução

Os sismos ocorridos nos últimos tempos têm demonstrado que os painéis de alvenaria de enchimento continuam a não ser alvo da devida atenção na resposta das estruturas de edifícios de betão armado. Tal como demonstrado recentemente nos diferentes edifícios afetados por este fenómeno, as alvenarias podem ser largamente afetadas, podendo a sua reparação ou substituição apresentar custos elevados.

Um evento sísmico é considerado um fenómeno natural extremo, não pode ser previsto e frequentemente conduz a danos significativos em estruturas de engenharia civil, nomeadamente edifícios de betão armado que não foram devidamente dimensionados para a ação sísmica. Os sismos ocorridos na Turquia (Kocaeli 1999, Duzce 1999, Bingol 2003 e Van 2011), Itália (L´Aquila 2009) e Espanha (Lorca 2011), revelaram em particular a vulnerabilidade de paredes de alvenaria existentes em edifícios de betão armado com o desenvolvimento de dano significativo ou mesmo colapso completo.

De forma a solucionar as consequências anteriormente referidas, têm sido desenvolvidos sistemas de reforço mais eficientes no sentido de prevenirem o colapso das paredes de alvenaria. O reboco armado e em particular as argamassas reforçadas com fibras têxteis, designadas em língua inglesa por *textile reinforced mortar (TRM)* têm sido alvo de trabalhos de investigação recentes no que respeita ao melhoramento do comportamento sísmico de paredes de alvenaria não estrutural em edifícios de betão armado (S.Kouris & C.Triantafillou, 2018). Contudo, estes reforços ainda apresentam algumas lacunas do ponto de vista do seu desempenho.

Um aspeto inovador no que respeita a esta solução de reforço consiste na possibilidade de ser possível efetuar monitorização de deformações associadas à ocorrência de sismos de reduzida intensidade que possam provocar algum dano não visível. A monitorização estrutural consiste num aspeto interessante e que poderá fornecer informação importante para avaliação do desempenho desta tipologia de reforço em paredes de alvenaria de tijolo. No entanto, as soluções de monitorização atuais não permitem detetar anomalias no material de reforço (Kima, et al., abril, 2020). Para além disso, soluções de reforço que simultaneamente permitam fazer monitorização de deformações podem apresentar custos avultados e incompatíveis com a sua utilização prática.

O desenvolvimento de sistemas de reforço em paredes de alvenaria continua a ser uma área de investigação em aberto, com possibilidades de melhoramento do desempenho e introdução de novas possibilidades, nomeadamente ao nível de monitorização. O desenvolvimento de uma solução de reforço

para paredes de alvenaria sujeitas à ação sísmica consiste no principal tópico deste trabalho, quer do ponto de vista de monitorização, quer do ponto de vista de mecânico.

1.1 Motivação

O Centro de Investigação sobre a Epidemiologia dos Desastres (CRED) da Universidade de Lovaina (Bélgica), revelou que na última década os terremotos foram responsáveis por 60% das mortes ocorridas em catástrofes naturais. Parte destas mortes deve-se não só ao colapso de edifícios, mas também pelo colapso de paredes de elementos não estruturais como o caso das paredes de alvenaria de tijolo de vedação em edifícios de betão armado. O melhoramento do comportamento mecânico de paredes sujeitas a ações sísmicas a partir da utilização de polímeros reforçados por materiais fibrosos, assume-se como um tema atual e que poderá ser importante para o desenvolvimento de soluções de reforço para estruturas de alvenaria. O desenvolvimento da capacidade de monitorização poderá ser um avanço no que respeita à monitorização de deformações induzidas por sismos de pequena intensidade e diferenciador em relação a soluções existentes.

Desta forma, os materiais compósitos e em particular os polímeros reforçados por fibras têm demonstrado possuir características mecânicas que podem ser exploradas em aplicações estruturais e não estruturais, onde naturalmente, surge o reforço de alvenarias.

Neste particular, houve também avanços significativos na ciência e tecnologia dos materiais que podem agora ser utilizados neste domínio para minimizar os riscos anteriormente identificados.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um novo tipo de polímeros reforçados por fibras para utilização em soluções de reforço para estruturas de alvenaria, nomeadamente Varões Compósitos Entrançados (BCR). A partir de resultados preliminares obtidos em vários trabalhos de investigação no âmbito de reforço de paredes de alvenaria de tijolo, pretende-se melhorar o desempenho mecânico dos varões entrançados, nomeadamente ao nível da capacidade de deformação. Adicionalmente pretende-se dotar estes elementos de reforço com capacidade de monitorização. Assim,

a presente tese centra-se no desenvolvimento de BCR's com pseudoductilidade e de BCR's com monitorização.

Para o desenvolvimento de BCR's com pseudoductilidade serão exploradas duas técnicas, nomeadamente: (a) pseudoductilidade a partir da incorporação de materiais fibrosos com diferentes propriedades mecânicas (alongamento na rotura); (b) pseudoductilidade a partir da utilização de materiais dúcteis em combinação com fibras de Vidro e Basalto.

No que diz respeito à monitorização, o objetivo foi estudar as seguintes técnicas: (a) introdução de filamentos intrinsecamente condutores; (b) funcionalização de filamentos de vidro com materiais condutores, nomeadamente nanotubos de carbono.

1.3 Estrutura da tese

A presente tese encontra-se segmentada em seis capítulos distintos, no sentido de proporcionar uma organização científica do trabalho efetuado. Assim, o Capítulo 1 é dedicado à Introdução onde são apresentadas as motivações, objetivos e organização da tese. De seguida é apresentado um segundo capítulo com uma revisão crítica do estado-da-arte no que se refere à incorporação de pseuductilidade e de capacidade de monitorização em materiais compósitos poliméricos de reforço fibroso. Segue-se um capítulo 3 onde se apresenta o trabalho técnico-científico realizado acerca dos métodos e técnicas dedicado às métodos e técnicas para desenvolver pseudoductilidade e Capacidade de monitorização aos varões entrançado (BCR's). Os capítulos 4 e 5 são dedicados à apresentação dos resultados obtidos na avaliação do desempenho dos BCR's em termos de da pseudoductilidade e capacidade de monitorização, respetivamente. De seguida, com base nos resultados obtidos, serão apresentadas as conclusões do presente trabalho e citadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

2 Estado do conhecimento

2.1 Introdução

Conforme referido no enquadramento do presente documento, os sismos têm-se revelado um fenómeno natural extremamente destrutivo, não apenas de bens materiais, mas também com influência ao nível das perdas humanas. Ainda que exista um mapa da sismicidade mundial e sismicidade esteja razoavelmente caracterizada na grande maioria dos países, os sismos consistem num fenómeno de origem natural, apresenta uma grande imprevisibilidade e ocorre, por isso, sem aviso prévio. A ocorrência de sismos traduz-se na maioria dos casos em consideráveis perdas económicas devido ao elevado nível de dano induzido em estruturas existentes, particularmente em edifícios de alvenaria não armada e mesmo em alvenarias não estruturais, como é o caso das paredes de vedação construídas em estruturas em betão armado. Em particular, no caso das paredes de alvenaria de vedação/enchimento, a melhoria do seu comportamento sísmico deverá passar por soluções de reforço que visem o melhoramento do comportamento no plano e fora do plano das paredes, ver Figura 1.

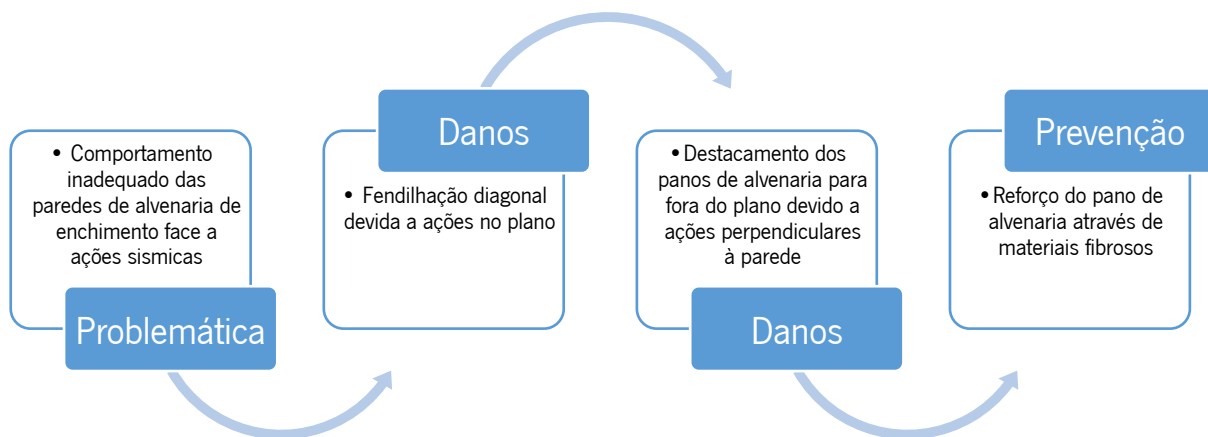


Figura 1 Problemática, danos típicos e prevenção dos sismos em alvenarias (Kaveh, et al., 2020).

A alvenaria consiste num material composto resultante da associação de unidades de alvenaria (tijolos, blocos, pedras, entre outras) ligadas entre si com recurso a argamassa, que permite a uniformização e transferência de tensões (Roque & Lourenço, 2003). As paredes de alvenaria sofreram ao longo das últimas décadas uma evolução desde a alvenaria de pedra, ainda utilizada como elemento estrutural, até

às alvenarias não estruturais que passaram a ser construídas em estruturas de betão armado, como por exemplo paredes de vedação ou divisórias.

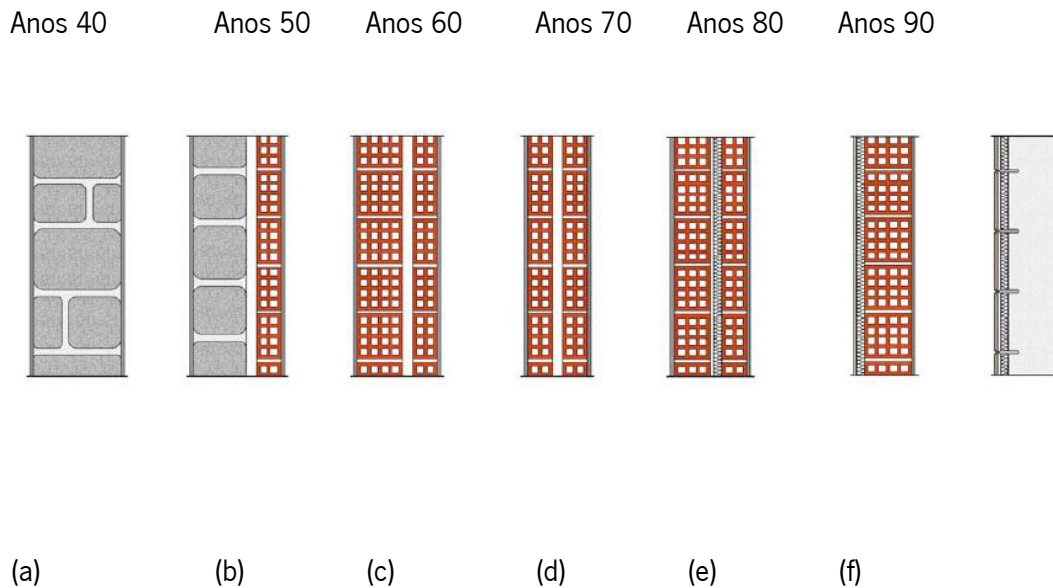


Figura 2 Evolução das paredes de alvenaria ao longo das últimas décadas (Cunha, et al., 2011).

Na Figura 2, apresenta-se a evolução das paredes de alvenaria desde a década de 40 até aos anos 90 (Cunha, et al., 2011), em que:

- (a) Anos 40: Paredes simples de alvenaria de pedra (função estrutural);
- (b) Anos 50: Paredes de pedra com pano interior de tijolo com furação horizontal e eventual caixa-de-ar;
- (c) Anos 60: Paredes de tijolo de pano duplo e caixa-de-ar, como pano interior de maior espessura;
- (d) Anos 70: Paredes de tijolo de pano duplo com panos de espessura igual nos panos;
- (e) Anos 80: Paredes de tijolo de pano duplo com isolamento térmico, preenchendo total ou parcialmente a caixa-de-ar;

- (f) Anos 90: Paredes tijolo de pano simples ou betão com isolamento térmico pelo exterior.

Os painéis de alvenaria de enchimento são suscetíveis à aceleração induzida pela ação sísmica, de modo que no caso de paredes de pano duplo, as ligações entre os panos e a ligação das paredes aos pórticos seja importante para garantir roturas para fora do plano de acordo com o que indica na A Figura 3 (Cunha, et al., 2011) . Por outro lado, as paredes de alvenaria de enchimento alteram significativamente o comportamento global do edifício em betão armado quando submetido à ações do sismos, por exemplo ao nível da rigidez. Quando as paredes estão aderentes aos pórticos, verifica-se a transferência de forças horizontais de corte dos pilares para as paredes resultando frequentemente na concentração de tensões ao longo da diagonal das paredes, que se for ultrapassada pela resistência da alvenaria resulta em fendilhação diagonal (Abreu, 2011).



A Figura 3 apresenta exemplos de colapso de paredes com ligações deficientes ou inexistentes à estrutura de betão armado (Abreu, 2011)

Neste contexto, têm vindo a ser desenvolvidas diversas técnicas de reforço com o objetivo de melhorar o comportamento de paredes de alvenaria de enchimento à ação sísmica, nomeadamente através da adoção de materiais fibrosos.

2.2 Polímeros reforçados por fibras

Atualmente, os materiais mais utilizados como reforço de alvenaria são os polímeros reforçados por fibras (FRP), podendo ser aplicados através de diversas técnicas (Ammad Hassan, et al., 2020). Um FRP é caracterizado por apresentar uma boa resistência mecânica, permitindo desta forma a sua utilização no reforço, e por possuir uma elevada resistência à corrosão quando comparado com os materiais de reforço tradicionais, como, por exemplo, o aço (Aveen, et al., 2021). Esta vantagem leva a que a sua otimização e aplicação na construção sejam tópicos bastante atuais no seio da comunidade científica. Por outro lado, e porque se trata de materiais compósitos reforçados por fibras, a relação entre a resistência mecânica e o seu peso é consideravelmente elevada, podendo atingir o valor de 0,18, comparativamente com a verificada no aço, na ordem dos 0,05 (Zhang, et al., 2021). Contudo, este material apresenta também algumas desvantagens, como por exemplo um comportamento frágil na rotura, quando comparado com o elemento de excelência nesta área, o aço. Além disso, e no caso particular do alvenarias reforças sujeitas à flexão, estes materiais apresentam ainda como desvantagem a delaminação em relação à argamassa de revestimento onde estão embebidos (Mosallam & Nasr, 2017).

O reforço à flexão de paredes de alvenaria pode ser promovido pela introdução de material fibroso de reforço, na forma de filamentos ou varões na alvenaria (Raza, et al., 2020). Para este efeito, pode ser utilizada a técnica de colagem de mantas de fibra (*Externally Bonded Reinforcement* – EBR) ou a técnica de introdução de varões de FRP em ranhuras efetuadas na parede de alvenaria (*Near Surface Mounted* – NSM) (Martins, 2013). Porém, fruto de uma evolução contínua das técnicas de reforço, promovida pela integração de materiais fibrosos, foi desenvolvida posteriormente técnica de reforço de alvenaria denominada de reboco armado, que consiste numa técnica em que materiais fibrosos dispostos em malha são embebidos na argamassa de reboco. Na literatura inglesa esta técnica é conhecida por TRM (*Textile Reinforced Mortar*) (Torres, et al., 2021).

2.2.1 Argamassas reforçadas por materiais fibrosos (TRM)

As argamassas reforçadas por materiais fibrosos (TRM) resultam, como indicado anteriormente, da evolução de tendências e conhecimentos adquiridos ao longo dos tempos sobre técnicas de reforço de sistemas construtivos na área da engenharia civil, com o intuito de se obterem estruturas cada vez mais seguras e sustentáveis (Ernest, et al., 2013). Assim, a técnica TRM é baseada em materiais compósitos

utilizados no reforço de alvenarias e estruturas de betão. Esta técnica consiste na conceção de uma estrutura fibrosa, através da orientação de fibras de alto desempenho, em diferentes direções, as quais são envolvidas por uma matriz inorgânica, como por exemplo argamassa (Papanicolaou, et al., 2007).

De forma a ser possível tirar o melhor partido das características intrínsecas dos materiais fibrosos, assumem particular relevo as áreas de modelação e design da estrutura de reforço (Larrinaga, et al., 2013). De modo concreto, isto quer dizer que mais importante do que introduzir materiais fibrosos de alto desempenho mecânico em argamassas, é fundamental compreender a orientação mais adequada destes materiais fibrosos na alvenaria (Cunha, et al., 2014).

A título de exemplo, (Larrinaga, et al., 2013) apresentou um trabalho onde é estudada a utilização de fibra de basalto para o desenvolvimento de uma solução de reforço. No Quadro 1 estão apresentadas as características da fibra de basalto utilizada para a conceção da malha de reforço. As propriedades da malha de fibra de basalto estão apresentadas no

Quadro 2 (Larrinaga, et al., 2013).

Quadro 1 Propriedades da fibra de basalto (Larrinaga, et al., 2013)

Fibra de basalto	Valores
Tensão de rotura	2100 MPa
Módulo de elasticidade	89 GPa
Extensão de rotura	3,15%
Massa volúmica	2,75 g/cm ³

Quadro 2 Propriedades da malha de reforço (Larrinaga, et al., 2013)

Malha de reforço	Valores
Espessura	0,0349 mm
Distância entre fibras (0°/90°)	25 x 25 mm
Massa por unidade de superfície	233 g/m ²
Tensão de rotura	1160 MPa
Força Máxima	4040 N
Extensão de rotura	1,82%
Módulo de elasticidade	67 GPa

A malha de reforço apresentada no

Quadro 2, foi condicionada em atmosfera controlada (temperatura de 18°C com uma humidade relativa de 60%) durante 21 dias e posteriormente introduzida numa matriz cementícia. Este estudo teve o objetivo de avaliar a utilização da fibra de basalto como base de reforço de uma matriz cementícia. A utilização da fibra de basalto surge como alternativa à fibra de carbono, uma vez que se tem verificado que os produtores de fibra de carbono não conseguem, frequentemente, fornecer adequadamente a indústria da construção, em particular no que respeita aos FRP. Desta forma, atualmente tem vindo a ser testada a sua viabilidade na técnica TRM. Este estudo teve ainda como objetivo a integração de várias camadas da malha de reforço na mesma matriz cementícia, sendo possível observar que o aumento da quantidade de reforço se traduz no aumento da resistência mecânica à tração, ver Figura 4.

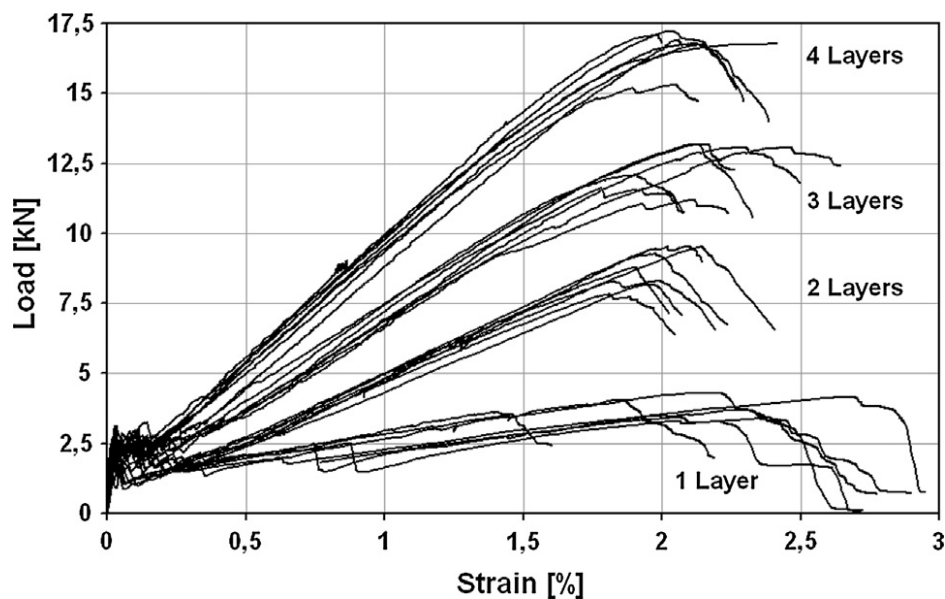


Figura 4 Diagrama da carga-extensão em tração (Larrinaga, et al., 2013).

Uma das dificuldades encontradas pelos autores foi o manuseamento da malha de reforço, uma vez que estavam a lidar com fibras bastante resistentes à tração direta mas bastante frágeis quando sujeitas à flexão. Por outro lado, vários autores apontam a fraca aderência do material de reforço à argamassa como uma desvantagem deste tipo de solução.

Também (Papanicolaou, et al., January 2008) demonstrou que a técnica TRM pode ser considerada como alternativa aos tradicionais materiais compósitos em lâminas de CFRPs (polímeros reforçados por carbono). No estudo realizado foram construídos 12 provetes de alvenaria de tijolo que foram sujeitos a ensaios de flexão. Neste estudo foram utilizados materiais fibrosos de fibra de carbono orientados bidireccionalmente embebidos em argamassa, conforme se indica na Figura 5, e varões de FRP colados

na superfície do material (fibra de carbono numa matriz epóxida, em que a fração mássica é de 40/60 %, respetivamente e com módulo de elasticidade do varão de 225 GPa).

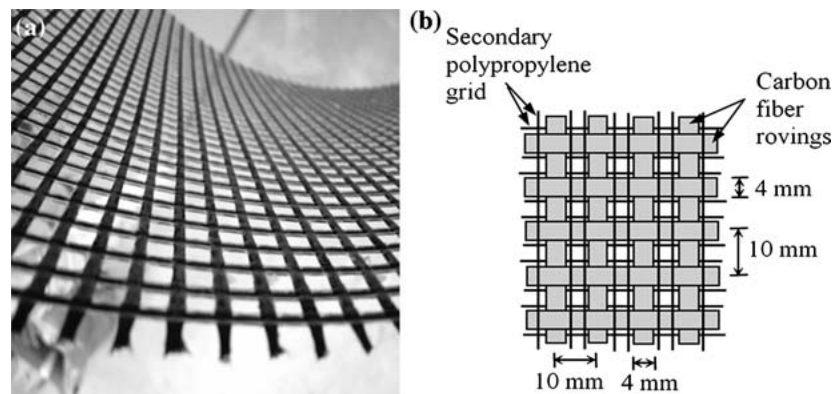


Figura 5 Arquitetura da malha de fibra de carbono (Papanicolaou, et al., January 2008).

Com este estudo, concluiu-se que a estrutura fibrosa usada na técnica TRM fornece aumento substancial na resistência e deformabilidade da alvenaria. Verificou-se ainda que a técnica TRM pode resultar geralmente numa maior eficácia, quer em termos de força, quer em termos de deformabilidade. Os varões de CFRP oferecem menor resistência, mas maior deformabilidade, devido à delaminação verificada entre a argamassa e o varão. A partir dos resultados obtidos neste estudo, verificou-se que a técnica TRM consiste numa solução extremamente promissora para o reforço de alvenaria.

2.2.2 Varões compósitos entrançados (BCR-RW)

A técnica de reforço baseada em argamassas reforçadas por materiais fibrosos tem vindo a ser alvo de estudos aprofundados por parte da comunidade científica com o objetivo de melhorar o desempenho das estruturas de alvenaria sujeitas à ação sísmica. Desta forma, novos materiais fibrosos para reforço de alvenarias baseados em varões compósitos entrançados. Estes varões consistem numa estrutura entrançada fibrosa exterior e um núcleo com fibras de reforço (por exemplo carbono, vidro, basalto).

Neste âmbito foram realizados vários estudos focados no reforço de alvenaria de tijolo de furação horizontal representativo das paredes de enchimento utilizados em edifícios de betão armado desde os anos 60. O trabalho apresentado por (Gómez, 2012) focou-se em comparar o desempenho de malhas comerciais de reforço (Figura 6, Figura 7, Quadro 1,) com malhas compostas por varões entrançados, na sequência do trabalho efetuado por (Abreu, 2011), onde se identificaram debilidades do reforço

fibroso, dificuldades de tensionamento e estabilidade da estrutura. Foi ainda identificada a possibilidade de diminuir o espaçamento dos varões compostos de 10 cm para um espaçamento de 3 e 6 cm, como forma a aumentar a quantidade de material fibroso por metro quadrado, e consequentemente a sua capacidade de carga. Também a aderência entre o reforço e a argamassa se revelou um fator de estudo com potencial de melhoria. Por outro lado, e sob o ponto de vista da otimização do reforço, verificou-se que seria importante centrar esforços na combinação de diferentes percentagens de fibras de carbono e de vidro, usualmente utilizadas, criando assim reforços híbridos, tornando, desta forma, a solução mais económica e, por conseguinte, mais viável.

Com base nestas oportunidades de melhoria (Gómez, 2012) verificou que para resolver o problema de tensionamento e estabilidade, seria necessário aplicar uma matriz de base polimérica inorgânica através de uma resina poliéster na superfície do material fibroso (entrançado). A aplicação da matriz polimérica, além de resolver problemas de tensionamento, tem a capacidade de suportar e distribuir as cargas aplicadas nas fibras de reforço (Moura, et al., 2005), ver Figura 8.

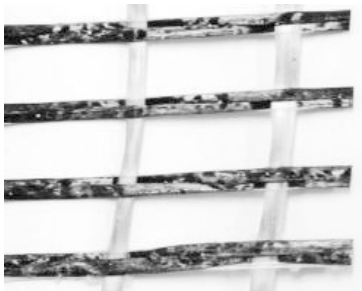


Figura 6 Solução comercial da S&P (Gómez, 2012)

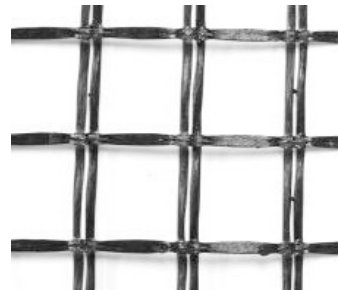


Figura 7 Solução comercial da Mapegrid (Gómez, 2012)

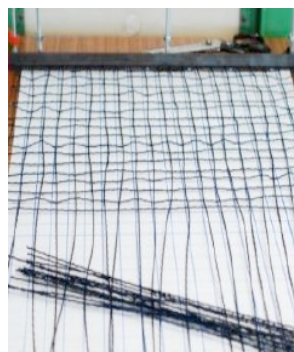


Figura 8 Solução compósita desenvolvida (Gómez, 2012)

Quadro 3 Propriedades da malha comercial da S&P

Malha de reforço S&P	Valores
Matéria-prima	Fibra de carbono
Distância entre fibras (0°/90°)	25 x 25 mm
Massa por unidade de superfície	200 g/m ²
Resistência à flexão	93,6 kN/m
Extensão de rotura	1,75%

Quadro 4 Propriedades da malha comercial da Mapegrid

Malha de reforço Mapegrid	Valores
Matéria-prima	Fibra de vidro
Distância entre fibras (0°/90°)	25 x 25 mm
Massa por unidade de superfície	225 g/m ²
Resistência à flexão	45 kN/m
Extensão de rotura	3%

Os provetes de alvenaria, reforçadas com as malhas foram sujeitas a um ensaio de flexão. Na Figura 9 é apresentado o diagrama da força-deslocamento para diferentes tipos de provete:

- SP consiste em provetes com reforço comercial (fibra de carbono) com uma massa por unidade de superfície de 200 g/m², com um espaçamento de 20 mm, com uma capacidade de tração de 57.1 kN;
- Mapei consiste em provetes com reforço comercial (fibra de vidro) com uma massa de 225 g/m², com um espaçamento de 25 mm, com uma capacidade de tração de 27.45 kN;
- 4g6 consiste em provetes com reforço em malha de varões entrançados com núcleo fibroso com uma massa de 114 g/m², com um espaçamento de 60 mm, com uma capacidade de tração de 11.97 kN;
- 2g3 consiste em provetes com reforço em malha de varões entrançados com núcleo fibroso 114 g/m², com um espaçamento de 30 mm, com uma capacidade de tração de 18.44 kN;
- 2g6 consiste em provetes com reforço em malha de varões entrançados com núcleo fibroso com uma massa de 57 g/m², com um espaçamento de 60 mm, com uma capacidade de tração de 9.22 kN;

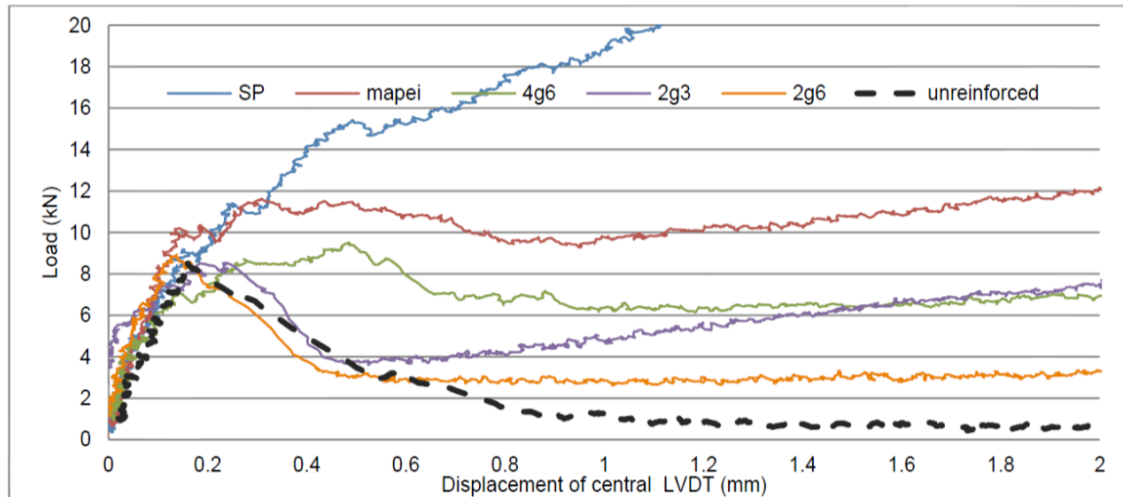


Figura 9 Resultados do ensaio de flexão: diagramas força-deslocamento (Gómez, 2012)

Os autores verificaram que a solução de reforço composto por uma malha comercial de fibra de vidro (Mapei) promove uma maior ductilidade em relação às restantes amostras testadas. Por outro lado, é possível observar que o provete reforçado com compósito “4g6” apresenta um comportamento semelhante ao reforço comercial com fibra de vidro, ainda que a carga de rotura seja inferior. Esta malha de reforço, conjuntamente com a malha 2g3 apresentam melhor comportamento comparativamente com a malha 2g6, o que se justifica pela maior quantidade de reforço. No provete reforçado com a malha de varões compósitos 2g6, não se verifica um comportamento muito diferente do provete não reforçado.

Também neste trabalho se verificou existir uma elevada margem de progressão para o aperfeiçoamento em termos de aderência entre as malhas de reforço e a argamassa uma vez que se verificou deslizamento das malhas de reforço em relação à argamassa. Assim, houve necessidade de integrar posteriormente o estudo de aderência entre o material fibroso e argamassa bem como a durabilidade do reforço ao longo do tempo.

A aderência entre o material de reforço e a argamassa de revestimento é um aspeto fundamental no seu desempenho, para a qual um comprimento de ancoragem suficiente deve ser garantido de modo a permitir a total mobilização da resistência do reforço TRM (Barros & Costa, 2010). Desta forma, foi levada a cabo uma campanha experimental para avaliação da aderência dos varões entrançados e argamassa (Martins, 2013). Para este efeito, desenvolveram-se diferentes varões compósitos entrançados para o reforço de provetes de alvenarias (BCR-RW). As modificações introduzidas das diferentes soluções BCR-RW relacionaram-se com a rugosidade superficial no sentido de melhorar a aderência e assim as

condições de amarração da malha de reforço. Para este efeito as alterações de processo consistiram em criar nervuras, a partir dos filamentos fibrosos que compõem a camada externa do entrançado.

Tal como se pode verificar na Figura 10, existe uma zona amarela que constitui a representação da área teórica de aderência entre a argamassa e a superfície do compósito. A distância X , entre nervuras representa o comprimento de contacto entre a estrutura do entrançado formado com oito fios que vai ser responsável pelo espaçamento entre os filamentos e a letra Y representa a altura dessa mesma estrutura (rugosidade). Estas propriedades dependem sempre das propriedades estruturais do entrançado, como o ângulo de entrançamento, diâmetro do núcleo e número de fios utilizados para conceber a rugosidade (Cunha, et al., 2014).

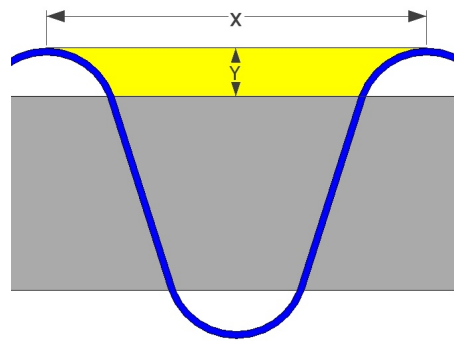


Figura 10 Representação esquemática da área de aderência de um varão entrançado (Cunha, et al., 2014).

No seguimento deste estudo preliminar, (Martins, 2013) desenvolveu um estudo aprofundado sobre o efeito da rugosidade dos varões entrançados na aderência com a argamassa. Desta forma introduziu alterações no processo de produção dos entrançados compósitos, nomeadamente ao nível do diâmetro da matéria-prima dos alimentadores, do número de alimentadores alterados e da velocidade de tiragem do material. No Quadro 5 podem ser observadas as diferentes amostras produzidas.

De forma a caracterizar a aderência os materiais compósitos produzidos (Quadro 5) embebidos na argamassa foram realizadas duas campanhas experimentais distintas: (a) uma campanha de ensaios de aderência utilizando varões embebidos em cilindros de argamassa (diâmetro de 50mm e altura de 100mm (série 1) e diâmetro de 90mm e altura e 180mm (série 2)); (b) campanha experimental para simulação de condições mais reais com aplicação do reboco armado em tijolos cerâmicos.

Quadro 5 Descrição das amostras (Martins, 2013).

Designação da amostra	Descrição da amostra	Velocidade (m/min)
0evmin	1 a 16 multifilamento de poliéster com 11 tex	0,54
0evmax		1,07
1evmax_8	1-Entraçado constituído por 8 multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
1evint_8		0,8
1evmin_8	2 a 16- multifilamentos de poliéster de 11 tex	0,54
2evmax_8	1 e 9 - Entraçado constituído por 8 multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
2evint_8		0,8
2evmin_8	2 a 8 e 10 a 16 - multifilamentos de poliéster de 11 tex	0,54
1evmax_16	1-Entraçado constituído por 16 multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
1evint_16		0,8
1evmin_16	2 a 16- multifilamentos de poliéster de 11 tex	0,54
2evmax_16	1 e 9 - Entraçado constituído por 16 multifilamentos de poliéster de 11 tex; 2 a 8 e 10 a 16 - multifilamentos de poliéster de 11 tex	1,07
2evint_16		0,8
2evmin_16		0,54

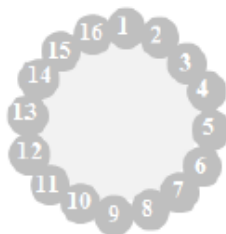


Figura 11 Representação esquemática de um BCR-RW, simples sem rugosidade (0evmin e 0evmax) (Martins, 2013).

Os tijolos possuíam as dimensões de 150 mm de espessura, 200 mm de largura e 300 mm de comprimento, em que a malha foi embebida em cerca de 200 mm de comprimento e 100 mm de largura, numa matriz de argamassa com espessura de 20 mm. Tijolos cerâmicos de furação horizontal com estas dimensões foram também usados na caracterização do comportamento de provetes de alvenaria com reboco armado sujeitos à flexão (Martins, 2013). De forma a caracterizar o seu comportamento foram realizadas duas tipologias de malhas de reforço, 1evmin8 e 0evmin. Para comparar os resultados obtidos nas malhas de varões entrançados foram ainda analisadas duas malhas comerciais, S&P e Mapei, Figura 6e Figura 7, respetivamente.

Através dos resultados obtidos em cilindros foi possível verificar que em relação ao padrão de arrancamento do varão, não se registou um comportamento padronizado nem repetitivo. Assim, com o aumento do destacamento do varão, verificou-se uma desagregação da argamassa e/ou deslizamento do varão ao longo da interface do varão com a argamassa (Martins, 2013). Os resultados dos ensaios de aderência das malhas embebidas na argamassa de reboco em tijolos estão ilustrados na Figura 13.

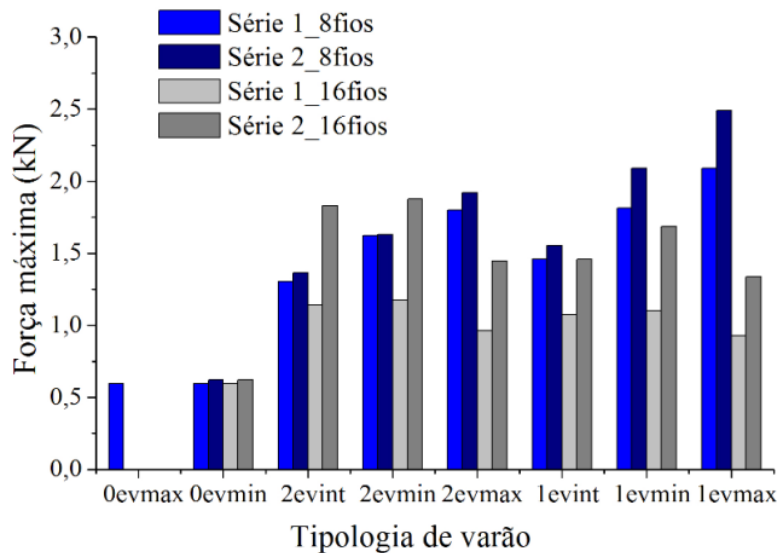


Figura 12 Forças de arrancamento para cada tipo de varão composto (BCR-RW) (Martins, 2013)

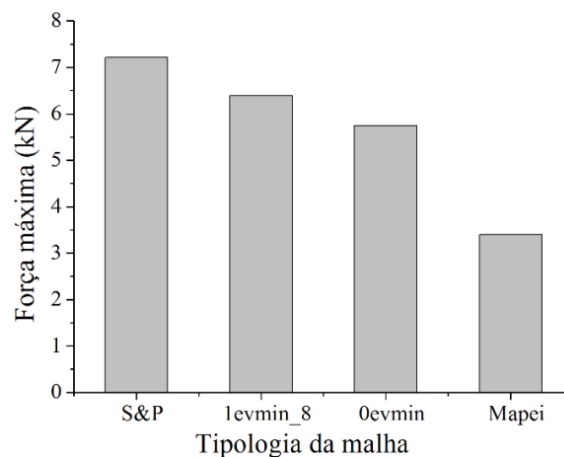


Figura 13 Forças máximas médias obtidas para cada tipo de malha (Martins, 2013).

(Cunha, et al., 2014) verificaram ainda que para as amostras analisadas a aderência da argamassa aos BCR-RW depende essencialmente da resistência da argamassa e do rompimento das fibras superficiais, da camada superficial, do BCR-RW. Relativamente ao segundo fator, o mesmo pode ser visualizado através da análise em microscopia eletrônica de varrimento (MEV) efetuada às amostras, antes (Figura 14 (a)) e depois do ensaio tração (Figura 14 (b), (c) e (d)).

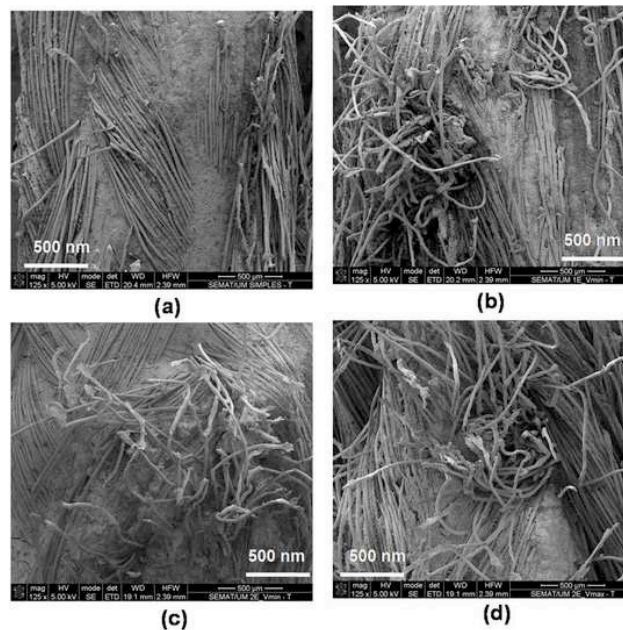


Figura 14 Imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varrimento da amostra de controlo e das amostras ensaiadas à tração (Cunha, et al., 2014)

Desta forma, e segundo os estudos supramencionados (figura 13) ao longo deste sub capítulo é possível concluir que, em termos de aderência, a estrutura BCR-RW apresenta uma aderência superior é a “1evmax”. Assim, para se obter um efeito de imbricamento ótimo, os BCR-RW, deverão assumir esta forma, isto é: entrançado elaborado através da alimentação de 16 bobines, onde 15 bobinas irão conter um multifilamento de poliéster com uma massa linear de 11 tex (11g/km) e uma bobina com uma estrutura entrançada por 8 multifilamentos de poliéster de 11 tex. A velocidade de produção será de 1,07 m/min.

2.3 Ductilidade em polímeros reforçados por fibras

Nos últimos vinte anos, tem-se assistido ao desenvolvimento de estruturas de reforço com elevada a capacidade de deformação até atingirem a rotura. Estas estruturas, em geral, são concebidas com materiais que possuem uma ductilidade elevada intrínseca. De acordo com (Janeiro, 2007), a ductilidade pode ser entendida como uma boa medida da capacidade de deformação inelástica que uma estrutura consegue suportar sem ocorrer perda significativa da sua integridade estrutural. A ductilidade de materiais de reforço é importante na medida em que permite (Morais, 2005): (a) que exista um aviso prévio da rotura do material devido às grandes deformações verificadas; (b) a criação de um mecanismo

de transferência de esforços das zonas mais solicitadas para as zonas menos solicitadas. Este mecanismo permite aumentar o nível de confiança nos materiais de reforço; (c) dissipar a energia quando sujeita a carregamentos cíclicos, por exemplo no caso de sismos.

Os materiais compósitos (FRP), onde se incluem os BCR's, possuem em geral, um comportamento elástico linear até à rotura, sem o típico patamar de plasticidade do aço e podem apresentar rotura frágil. Neste contexto, surgiu a necessidade de se introduzir uma nova tipologia nos materiais compósitos com pseudoductilidade. A pseudoductilidade pode ser conseguida através do desenvolvimento de compósitos híbridos, utilizando mais do que uma tipologia de material fibroso (Wang & Belarbi, 2010), por variação do material utilizado, bem como da sua estrutura.

Assim, existem essencialmente três metodologias a seguir de forma a conferir pseudoductilidade aos varões entrançados de material compósito (BCR), recorrendo para isso aos materiais fibrosos que o compõem, nomeadamente:

1- Através da utilização de materiais que intrinsecamente já possuem comportamento dúctil, ou seja, materiais que possuem uma elevada capacidade de deformação plástica. Contudo, esta não é uma característica usualmente verificada nos materiais fibrosos, uma vez que tipicamente apresentam um comportamento frágil.

2- Através da utilização de diferentes tipos de fibras (núcleo de reforço) com extensões de rotura distintas, de forma a obter um rompimento sequencial das mesmas. Assim, através da utilização de diferentes percentagens de fibra e de diferentes tipos de fibras, é possível obter diferentes níveis de ductilidade.

3- Através da manipulação das estruturas fibrosas de reforço inserindo diferentes estruturas fibrosas num só material de reforço, criando desta forma um mecanismo em que diferentes estruturas fibrosas apresentam alongamentos diferenciados para a carga aplicada num determinado momento.

2.3.1 Ductilidade e pseudoductilidade em materiais fibrosos - incorporação de materiais dúcteis

Diversos autores utilizaram esta técnica para criar materiais de reforço compósito dúcteis, através da incorporação de aço na composição do FRP (Kar & Pattnaik, 2019). Desta forma, é possível conferir comportamento dúctil a materiais que por natureza apresentam comportamento frágil. A Figura 15 ilustra

a secção transversal de um varão híbrido e o diagrama tensão vs extensão obtido num ensaio de tração. A incorporação de aço na composição de uma estrutura fibrosa compósita influencia o comportamento mecânico, nomeadamente na obtenção de um patamar de deformação plástica. Verifica-se igualmente que o comportamento mecânico final do varão compósito é dado por duas fases distintas: numa primeira fase (até cerca de 0,25% de deformação) as fibras garantem a absorção das cargas, sendo depois transferidas para o aço, recriando desta forma uma ductilidade desenvolvida no varão. Verifica-se ainda que a rotura não é frágil, muito devido a heterogeneidade do núcleo de reforço do varão.

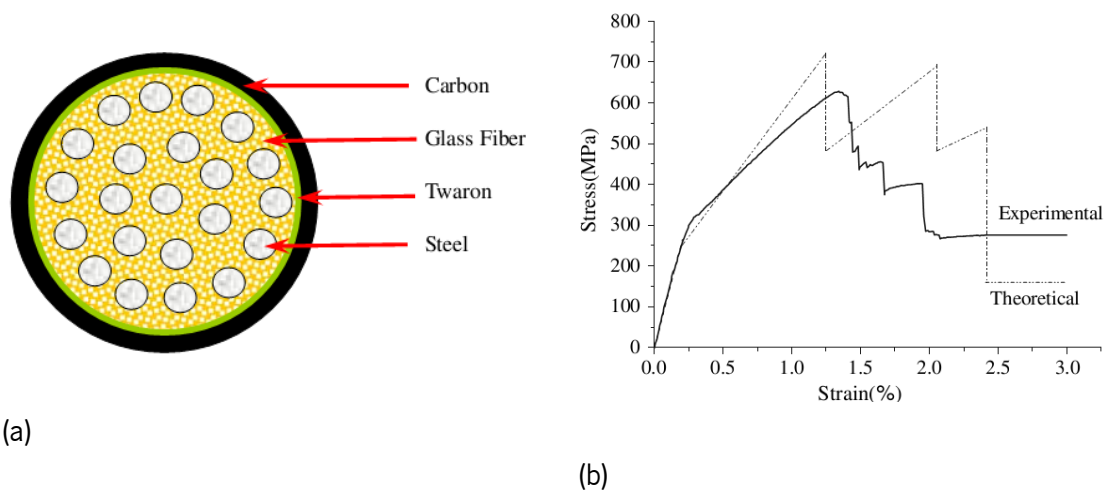


Figura 15- Corte transversal de um varão híbrido (a) e diagrama tensão vs extensão do varão híbrido (b) (Cui, et al., 2008)

2.3.2 Ductilidade e pseudoductilidade em materiais fibrosos - utilização de diferentes tipos de fibras com extensões na rotura distintas.

A obtenção de ductilidade e pseudoductilidade em materiais fibrosos recorrendo à utilização de diferentes tipos de fibras com extensões de rotura distintas tem vindo também a ser alvo de estudos por parte da comunidade científica (Fotouhi, et al., 2019). Tal como referido anteriormente, este mecanismo de conferir pseudoductilidade tem como princípio a utilização simultânea de diferentes tipos de fibra com extensões de rotura diferentes. Esta característica resulta na rotura progressiva do reforço e consequentemente em diversos patamares de rotura correspondentes à rotura de cada uma das fibras que compõem o material compósito, conforme ilustrado na Figura 16.

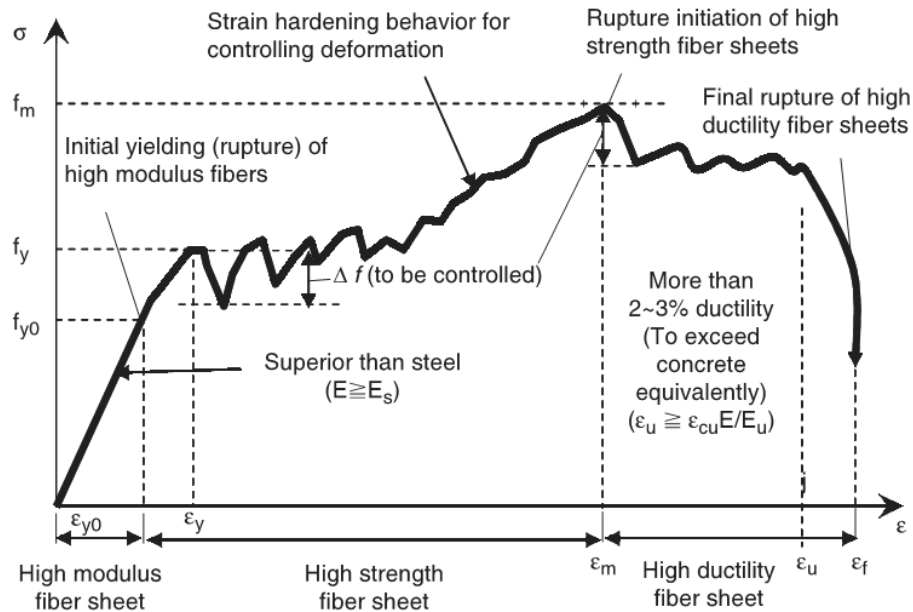


Figura 16 Diagrama tensão-extensão idealizado para compósitos híbridos (Wu, 2005)

No material compósito, para o qual se ilustra o comportamento em tração na Figura 16, foram utilizados três tipos de materiais fibrosos, um tipo de fibra de alto módulo ou ultra alto módulo de elasticidade (HM e UHM), outra fibra de alta resistência e uma outra fibra mais resistente e com extensão de rotura elevada. Cada uma destas fibras assume as seguintes funções (Wu, 2005):

- As fibras de alto módulo de elasticidade fornecem ao material compósito grande parte da rigidez e resistência necessária em serviço;
- As fibras de alta resistência têm a função de contribuir para resistência para cargas em serviço, mas após a rotura fibras de alto módulo, assumem o papel de contribuir para que material compósito não perca resistência, ocorrendo um comportamento semelhante ao endurecimento do aço;
- As fibras de grande extensão servem para adicionar ductilidade ao material compósito, garantido a rotura do material compósito para extensões elevadas.

Do ponto de vista teórico e design do comportamento dos varões compósitos, as curvas expectáveis resultantes da hibridização podem ser teoricamente obtidas através da lei das misturas, de acordo com a fração em volume de cada fibra. Num material constituído por três tipos de fibras distintos, com uma distribuição volumétrica de fibras correta e com diferentes extensões de rotura, são identificáveis os diferentes patamares em que as fibras de reforço assumem a sua função.

2.3.3 Ductilidade e pseudoductilidade em materiais fibrosos, através da manipulação das estruturas fibrosas de reforço.

Os varões designados por FRP híbridos dúcteis, em literatura inglesa denominados por “Ductile hybrid FRP (D-H-FRP)”, foram desenhados para, através da “hibridização” de diferentes fibras, apresentarem uma curva tensão-extensão semelhante aos varões de aço, seja com um módulo de elasticidade da ordem dos 200 GPa, seja com um patamar posterior à carga de cedência que simulasse a ductilidade do aço.

No desenvolvimento deste varão, duas técnicas de processamento poderão ser utilizadas, nomeadamente: entrançamento (*braiding*) e torção (*twisting*). O varão é composto essencialmente por 2 fases: uma estrutura tubular oca exterior, construída através da técnica de entrançamento, e um núcleo posicionado no interior do varão, composto por fibras alinhadas a 0° com a direção axial ou ligeiramente torcidos. Desta forma, podem-se alcançar determinadas características mecânicas, seja através da escolha dos materiais ou pela alteração da arquitetura do entrançado exterior e do núcleo. A técnica de entrançamento permite, quando aplicada para tal, criar uma estrutura entrançada exterior com saliências, importante na criação de aderência entre o betão e o varão (Harry G Harris, 2000), conforme ilustrado na Figura 17. O comportamento em tração apresenta uma fase elástica e após a cedência inicial, existe um progressivo endurecimento, ainda que acompanhado por sucessivas cedências, seguidas por redistribuição de tensões, resultantes em acréscimos de resistência e deformação.

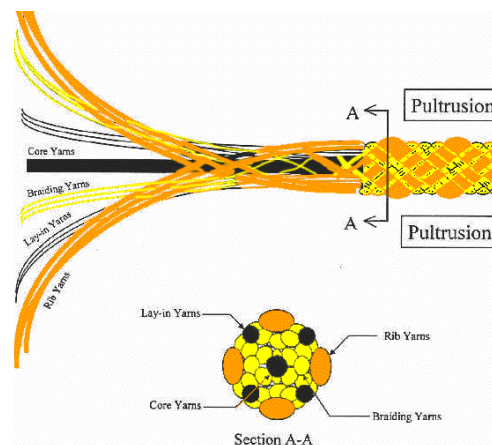


Figura 17 Esquema exemplificativo da estrutura entrançada utilizada (Harry G Harris, 2000).

2.4 Monitorização em compósitos poliméricos reforçados por fibras

Na área da engenharia civil, a monitorização permite acompanhar o comportamento de um edifício ou de qualquer outra estrutura ao longo das fases de construção, utilização ou em situações de acidente. Neste contexto, a grande motivação para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitorização baseia-se na possibilidade de acompanhamento do comportamento estrutural, o que auxilia na salvaguarda da segurança da estrutura e que pode ser útil do ponto de vista económico (Félix, 2004). Desta forma, a monitorização assume um papel principal no aumento da durabilidade e na garantia do bom desempenho das construções. A monitorização surge como meio eficaz para alertar, em tempo útil, a necessidade de eventuais ações de conservação e reabilitação (Marques, 2007).

Atualmente, sob o ponto de vista técnico-científico, existem vários métodos de monitorização em estudo. Dos diferentes métodos/técnicas destacam-se a monitorização através da análise de vibrações, a monitorização com base em materiais piezorresistivos e a monitorização com base no comportamento ótico dos materiais (ex: fibra ótica).

Estes diferentes métodos/técnicas são aplicados em diferentes situações:

-Monitorização de vibrações consiste na avaliação da resposta estrutural a um estímulo vibracional. Esta técnica exige que os materiais a monitorizar não estejam confinados a outros materiais (Haj-Ali, et al., 2013).

-Monitorização através do comportamento ótico dos materiais é efetuada por fibra ótica, havendo já soluções existentes no mercado. Este método permite leituras da tensão, extensão, temperatura e aceleração instantânea. Contudo apresenta custos avultados que é compatível com a sua aplicação como solução standard em estruturas convencionais. (Haj-Ali, et al., 2013)

-Monitorização através de materiais piezoresistivos que possibilitam a combinação das propriedades de reforço com as características piezoelétricas (Haj-Ali, et al., 2013). Os materiais piezoelétricos apresentam a capacidade de alterar a sua resistência elétrica ou condutividade em função do estado de tensão e deformação a que estão sujeitos, sendo esta relação (resistência elétrica e tensão) proporcional. Desta forma, é possível utilizar o mesmo material de reforço para simultaneamente desempenhar as funções de reforço e de monitorização.

A monitorização com base em materiais piezoresistivos apresenta-se como a técnica mais vantajosa para aplicar em materiais de reforço. Os materiais piezoresistivos têm vindo a ser alvo de vários estudos por parte da comunidade científica para utilização em monitorização na área da construção. Os materiais compósitos reforçados por fibras e nanofibras de carbono são exemplos de materiais piezoresistivos. Estas fibras podem apresentar-se sobre a forma de multifilamentos contínuos, fibras cortadas, nanofibras e nanotubos. A partir da sua capacidade intrínseca de condutividade elétrica pretende-se explorar o comportamento piezoresistivo através da alteração da resistividade elétrica em função de uma deformação.

Vários estudos têm vindo a ser conduzidos com o intuito de explorar o comportamento piezoresistivo deste tipo de material. De acordo com (Todoroki & Yoshida, 2004) a tensão aplicada longitudinalmente aumenta a resistividade. No trabalho realizado por (Abry, et al., 1999) foi estudado o reforço uniaxial recorrendo a diferentes percentagens de fibra de carbono através de ensaios de carregamento monotónico e cíclico. Também os testes biaxiais efetuados com corrente AC (corrente alternada) e DC (corrente contínua) (Abry, et al., 2001) demonstraram que a corrente alternada (AC) deve ser utilizada para monitorizar a rotura da fibra, enquanto a corrente contínua (DC) deve ser utilizada para detetar o modo de rotura da matriz.

(Fangueiro & Godinho-Pereira, 2011) desenvolveram um varão em material compósito, reforçado por fibras de carbono e de vidro (BCR) para o reforço e monitorização de betão. Além das propriedades mecânicas foi também estudada a capacidade de monitorizar, através das propriedades piezoresistivas das fibras de carbono utilizadas no reforço do betão. Os resultados obtidos demonstram uma relação clara entre a deformação do varão e a sua resistividade elétrica conforme é possível verificar na Figura 18.

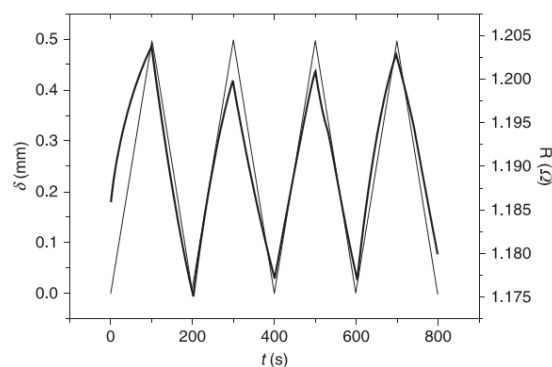


Figura 18 Variação da resistência elétrica e da deformação num carregamento cíclico (Fangueiro & Godinho-Pereira, 2011).

Outra importante conclusão deste estudo consiste na variação da capacidade de monitorização com a percentagem de fibra de carbono utilizada no varão. A sensibilidade do varão na monitorização aumenta com a redução da quantidade de fibra de carbono.

No que se refere à monitorização de alvenarias, não foi possível identificar um desenvolvimento que contemplasse este tipo de solução integrada, recorrendo ao mesmo material para efetuar simultaneamente o reforço e a monitorização. Apenas foram identificados estudos com polímeros reforçados por fibras de carbono (CFRP) para reforço com a utilização de sensores óticos acoplados para monitorização (Bastianini, et al., 2005).

Através da análise ao estado da arte no domínio deste trabalho, verifica-se que é possível contribuir para o avanço do conhecimento no que diz respeito à monitorização de paredes de alvenaria através da utilização de materiais inovadores. Assim, o potencial dos materiais fibrosos com características piezoresistivas para reforço e monitorização deverá ser explorada e validada. Uma solução desta natureza, quando comparada com as soluções de monitorização ótica existentes e comumente utilizadas, deverá oferecer uma maior versatilidade na sua aplicação, uma vez que o próprio material de reforço consegue ser utilizado como sensor para fornecer informações sobre o estado de deformação. Por outro lado, permite ainda baixar o custo da sua aplicação “*in situ*” uma vez que, para se obter a monitorização de uma estrutura não é necessário a montagem de sensores externos (Nanni, et al., 2007).

Uma das áreas que se preme explorar, além da introdução de materiais fibrosos com capacidade de piezoresistividade será a funcionalização destes materiais fibrosos com nanomateriais. A funcionalização, neste caso em particular, será realizada através da introdução de nanotubos de carbono (CNT). Os CNT devem apresentar uma dispersão e distribuição homogéneas na matriz polimérica. A dispersão está associada à existência (ou não) de aglomerados na matriz, enquanto que a distribuição está relacionada com a homogeneidade da amostra. Uma distribuição e dispersão não homogéneas das CNTs podem atuar negativamente nas propriedades dos varões compósitos, comprometendo assim o desempenho final do material. Se a dispersão não for adequada para a finalidade do compósito, não existirá uma relação favorável da interface da matriz com a área superficial dos CNTs, o compósito irá apresentar aglomerados e, conseqüentemente o material apresentará defeitos (Montagna, 2010). A Figura 19 ilustra esquematicamente a distribuição e dispersão de nanomateriais como CNTs sobre a matriz com os seguintes aspetos (Abreu, 2015); (Montagna, 2010)):

- (a) – Existe uma distribuição homogénea sobre a matriz mas não existe uma dispersão homogénea dos CNTs;
- (b) – Não existe uma dispersão nem uma distribuição homogénea sobre a matriz;
- (c) – Existe uma dispersão homogénea mas a distribuição sobre a matriz não é homogénea;
- (d) – Existe dispersão e distribuição homogéneas dos CNTs sobre a matriz.

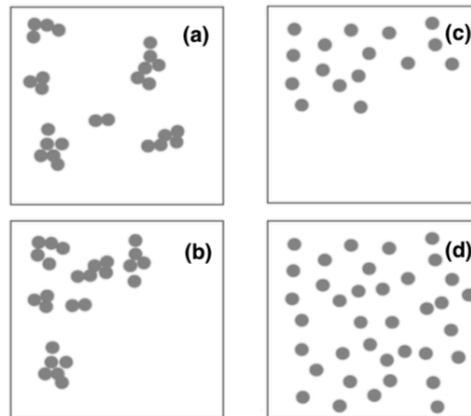


Figura 19 - Exemplificação da dispersão e distribuição de nanopartículas (Montagna, 2010).

Assim, para que não existam problemas associados à possível aglomeração dos CNTs são utilizadas técnicas de dispersão e de funcionalização. As técnicas de dispersão mais utilizadas são o banho de ultrassons, o moinho de rolos e a agitação mecânica. Estas técnicas consistem na quebra dos aglomerados para facilitar a dispersão de CNTs sobre a matriz polimérica.

As técnicas de funcionalização físicas e químicas consistem na modificação superficial através da adição de grupos funcionais com o objetivo de promover ligações mais fortes entre as nanopartículas e a matriz. Relativamente à funcionalização química, destaca-se a possibilidade de ocorrência de danos (ou até destruição) da estrutura dos CNTs, enfraquecendo, deste modo, as propriedades dos compósitos (Silva, 2017).

No Quadro 6, são demonstradas as várias técnicas de dispersão, assim como o seu funcionamento.

Quadro 6 - Breve resumo sobre as técnicas de dispersão.

Técnica de dispersão	Funcionamento
----------------------	---------------

<p>Banho de ultrassons</p>	<p>O banho de ultrassons consiste na utilização de energia ultrassónica (através da propagação de vibrações) para separar os aglomerados de CNTs.</p> <p>Aspetos a considerar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frequência (Hz); • Tempo de utilização.
<p>Moinho de rolos</p>	<p>A matriz com CNTs é colocada no moinho de rolos onde é submetida a diferentes condições de processamento. Estes processamentos consistem na variação da distância entre os rolos, a velocidade de rotação dos rolos, o número de vezes que a matriz com as NPs passa pelo rolo e a temperatura a que é realizado este ensaio (Lopes, 2016) (Ma, et al., 2010)</p>
<p>Funcionalização química</p>	<p>A funcionalização química consiste na modificação da superfície de CNTs com a finalidade de melhorar a interação/compatibilidade das CNTs com a matriz. Esta modificação da superfície é realizada através da ligação covalente entre os átomos de carbono dos CNTs com grupos funcionais. Assim, esta técnica de funcionalização reduz a formação de aglomerados.</p> <p>Existem várias técnicas de funcionalização química, como a oxidação, a fluoração, a hidrogenação, a introdução de moléculas poliméricas, entre outras (Kharisov, et al., 2014) (Moura, 2015).</p> <p>Aspetos a considerar:</p> <p>Esta técnica é destrutiva, ou seja, a modificação da superfície quando não é realizada com cuidado, pode levar à destruição da estrutura de CNTs. Assim, influencia negativamente as propriedades do compósito (Silva, 2017).</p>

Funcionalização física	A funcionalização física, ao contrário da funcionalização química, não apresenta características destrutivas na estrutura dos CNTs. Este método de dispersão consiste na adsorção de moléculas não covalentes, tais como polímeros, na superfície das nanopartículas (CNTs) (Mitchell, et al., 2002); (Silva, 2017)).
-------------------------------	---

Para alcançar uma dispersão mais eficiente e estável, poderão ser utilizados vários métodos simultaneamente (Ma, et al., 2010); (Morange, et al., 2015).

2.5 Considerações finais

Face a estado da arte apresentado, o trabalho a desenvolver pretende aportar avanços científicos e técnicos relevantes no domínio dos materiais compósitos para construção e, em particular, no reforço de alvenarias. Estes avanços serão preconizados através do desenvolvimento de uma nova geração de varões compósitos inteligentes possuindo capacidade de monitorização e de pseudoductilidade.

Assim, pretende contribuir para o avanço do conhecimento no que diz respeito às seguintes dimensões:

- Técnica de desenvolvimento de varões compósitos com capacidade de monitorização e pseudoductilidade;
- Capacidade de monitorização a partir de fibras condutoras e não condutoras (fibra de vidro);
- Capacidade de conferir pseudoductilidade ao varão compósito explorando duas técnicas distintas: a partir da utilização de fibras de aço e a partir de fibras com diferentes valores de alongamento na rotura.

3 Produção de Varões Compósitos Entrançados (BCR): materiais e métodos

No presente capítulo apresentam-se os métodos e técnicas para o desenvolvimento de varões compósitos entrançados com pseudoductilidade e monitorização. Assim, este capítulo encontra-se segmentado em três subcapítulos, incluindo: Técnica de desenvolvimento de varões compósitos (BCR's); Design dos BCR's; e Métodos de ensaio.

3.1 Técnica de desenvolvimento de varões compósitos BCR

Ao longo dos últimos anos têm sido realizados diversos estudos para desenvolver e otimizar uma técnica para o desenvolvimento de uma solução alternativa à pultrusão de varões compósitos.

Assim, tem sido explorada uma nova solução para suprimir as lacunas anteriormente identificadas, ao nível da ductilidade e da capacidade de monitorização, através da realização de diversos trabalhos de investigação de mestrado e doutoramento. Os varões compósitos inovadores são designados por BCR, na língua inglesa *Braided Composite Rods*, designando em português Varões Compósitos Entrançados. Os varões compósitos entrançados resultam de uma técnica que contempla a hibridização da técnica de pultrusão com a técnica de desenvolvimento de estruturas fibrosas entrançadas. O desenvolvimento desta técnica foi alvo de registo de uma patente nacional (PT103581). Este material compósito pode aplicar-se em argamassa de reboco de paredes com o objetivo de reforçar paredes de alvenaria e melhorar o seu desempenho mecânico.

O varão compósito desenvolvido a partir desta técnica é composto por três elementos apresentados na Figura 20 e Figura 21: (1) camada externa (1); (2) núcleo de reforço e (3) matriz.

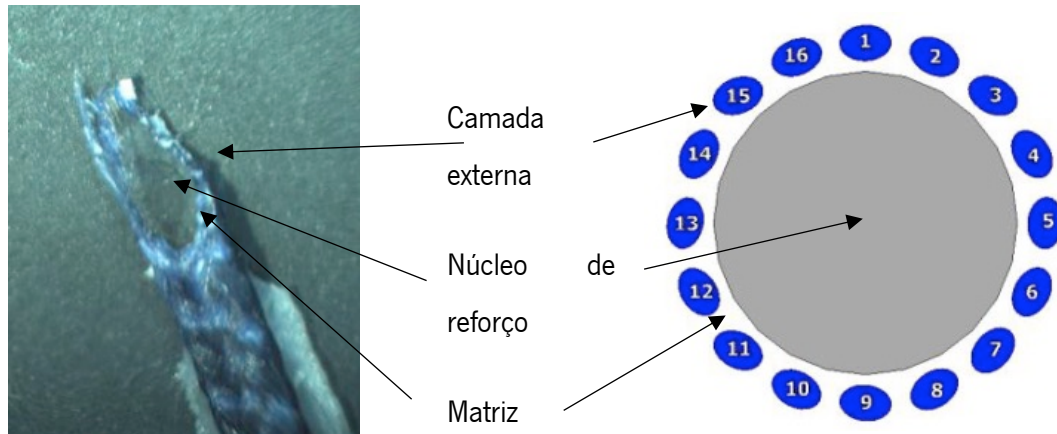


Figura 20 Vista transversal do varão compósito

Figura 21 Ilustração da vista transversal de um varão compósito

(1) A camada externa é responsável pela proteção do núcleo de reforço durante o seu manuseamento e aplicação, funcionando igualmente como uma camada de proteção dos materiais utilizados contra os ataques físico-químicos, promovendo igualmente veículo para garantir a aderência do compósito com a argamassa de reboco. Por outro lado, terá ainda a responsabilidade de confinar as fibras que compõem o núcleo de reforço no seu interior. Para satisfazer os requisitos apresentados para a camada externa, nomeadamente capacidade de aderência e proteção, esta estrutura externa resulta da tecnologia de entrançamento de estruturas fibrosas, uma vez que, é uma tecnologia que permite obter uma estrutura tubular oca, onde, ao longo do processo, é permissível a introdução do núcleo de reforço no seu interior.

(2) O núcleo de reforço é responsável pelo comportamento mecânico do varão compósito, BCR, uma vez que é neste núcleo que são introduzidas as fibras responsáveis pelo desempenho mecânico do compósito. Por outro lado, este será também o veículo utilizado para estudar a monitorização do BCR. Com esta abordagem será possível desenvolver núcleos de reforços previamente dimensionados que, para além de garantirem o adequado reforço da alvenaria, terão a capacidade de funcionarem como sensores para a monitorização.

(3) A matriz terá como responsabilidade garantir a estabilidade dimensional do compósito, assim como assegurar a distribuição eficiente de carga pelas fibras que se encontram no núcleo de reforço e ainda oferecer proteção à superfície do compósito.

Tal como referido anteriormente, os varões compósitos entrançados contemplam a integração de duas técnicas distintas, nomeadamente a técnica de pultrusão e a técnica de entrançamento. A integração das duas técnicas faz com que o material resultante, para além de inovador, seja totalmente customizado e otimizado para aplicação no reforço de alvenarias.

O processo de desenvolvimento contínuo de varões compósitos para o reforço de alvenarias (BCR), pode ser observado na Figura 22, e contempla cinco fases, distintas entre si, como se pode observar na Figura 22: Fase 1-Alimentação de fibras; Fase 2-Impregnação de fibras; Fase 3-Entrançamento; Fase 4-cura e Fase 5-Tiragem.

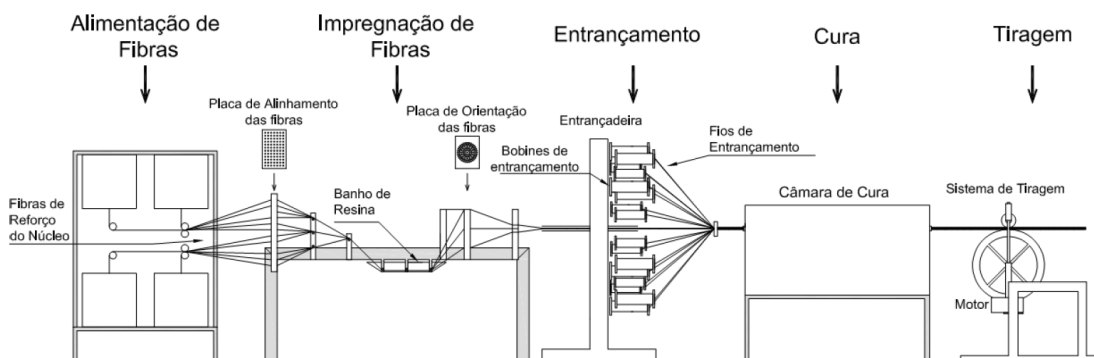


Figura 22 Processo de produção de varões compósitos (BCR)

3.1.1 Fase 1 – Alimentação de fibras

A primeira fase do processo centra-se no cálculo da quantidade (fração) (teor) do material fibroso que constituirá o núcleo de reforço do varão, ou seja, define-se exatamente as quantidades de fibra a utilizar para cada um dos varões compósitos. Nesta fase, são selecionados os materiais fibrosos a utilizar de acordo com os requisitos da aplicação. Assim, para a definição dos materiais fibrosos são consideradas as seguintes propriedades: módulo de elasticidade das fibras, alongamento na rotura, tensão máxima, resistência química, densidade, massa linear, entre outros.

O diâmetro dos varões é calculado através de alguns parâmetros, nomeadamente da área de secção do varão, calculada através da seguinte equação:

$$A_{secção} = \frac{n_{rovings} \times Massa\ Linear \times 10^{-5}}{\delta} \times 10^2 \quad (1)$$

Em que:

$n_{rovings}$ é o valor final do diâmetro teórico deve ser calculado posteriormente, através da equação:

$$\varnothing_{BCR} = \sqrt{\left[\left(\frac{A_{secc\tilde{a}o}}{1 - V_{Matriz}} \right) \times \frac{4}{\pi} \right]} \quad (2)$$

Em que:

\varnothing - É o diâmetro do vão compósito (BCR);

$A_{secc\tilde{a}o}$ - área de sessão transversal do varão;

V_{Matriz} - Volume ocupado pela matriz

Um roving é constituído por um conjunto de filamentos contínuos de fibras, sem torção, e devem ser conservados nesse estado até ao seu processamento, de forma a não promover a separação dos filamentos. Assim, é essencial que todas as superfícies em contato com as mechas de filamentos estejam corretamente polidas e isentas de quaisquer poeiras ou detritos, de forma a não criar possíveis pontos de fragilidade na interface com o material de matriz. Para tal, existe uma estrutura metálica para a armazenamento das fibras e respetiva condução, através da passagem em olhais cerâmicos, tal como pode ser observado na Figura 23.

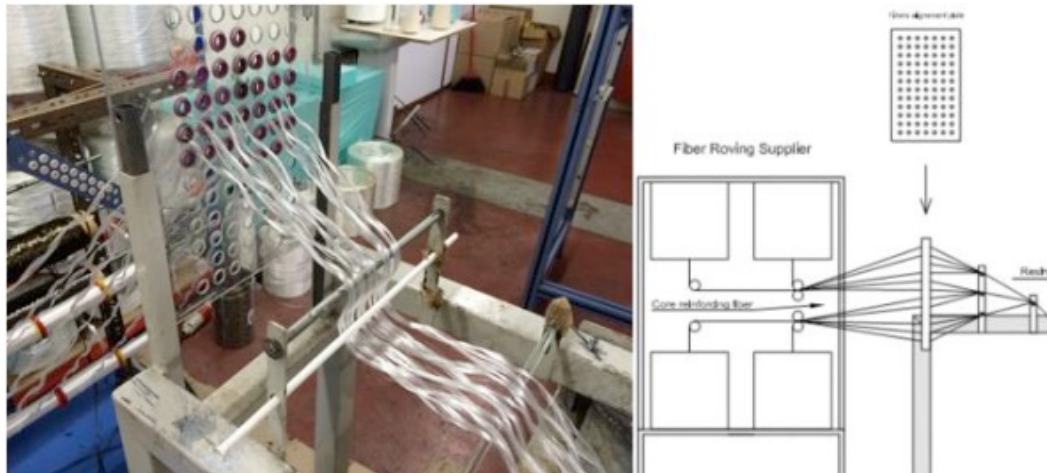


Figura 23 Fase de alimentação na produção de varões compósitos (BCR)

3.1.2 Fase 2 – Impregnação das fibras

Após a alimentação das fibras, sob a forma de roving, as mesmas são submetidas a um processo de impregnação. Este sistema de impregnação consiste num banho de resina, previamente preparada, no qual as fibras serão continuamente embebidas, tal como pode ser observado na Figura 24. De salientar que, antes da preparação da resina é necessário aplicar um desmoldante em todas as superfícies de contacto com esta, pois a resina adere a qualquer tipo de superfície após a cura. Desta forma assegura-se a sua eliminação sem qualquer tipo de dificuldade no final do processo de produção.

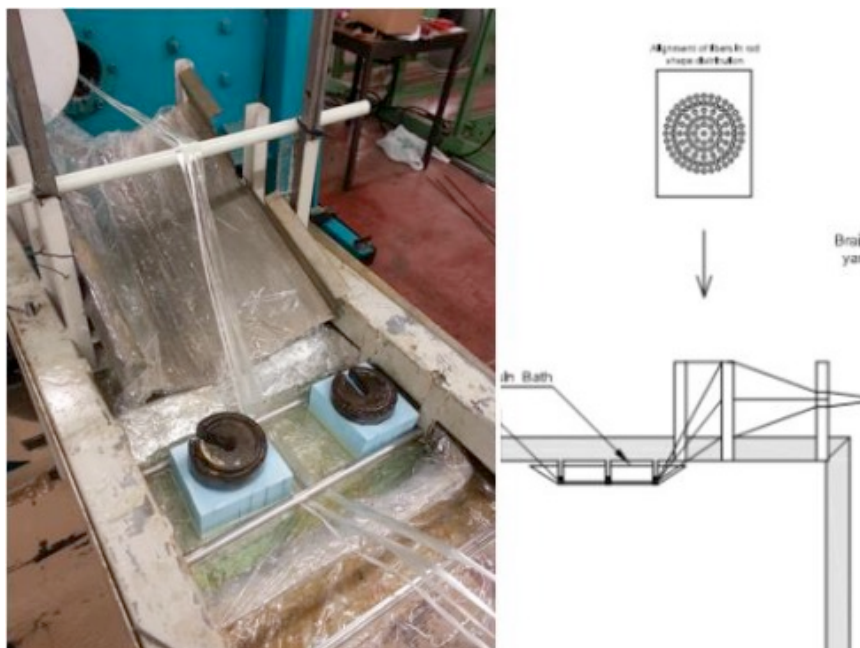


Figura 24 Fase de impregnação na produção de varões compósitos (BCR)

3.1.3 Fase 3 – 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 42 bobines de fio de poliéster, sendo utilizada sempre a sua capacidade completa, que permitem a obtenção da camada externa do entrançado do varão, tal como pode ser observado na Figura 25. Após a colocação das bobines, são colocados os multifilamentos nos fusos onde posteriormente serão puxados até à zona onde ocorre o entrançamento. O núcleo de fibras proveniente da fase anterior é então coberto pelo entrançado exterior de poliéster gerado pela movimentação circular dos fusos com bobines, tal como se pode observar na Figura 25. 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 à câmara de cura para reaproveitamento no balseiro. Este mecanismo de entrançamento possui também um controlador de velocidade.

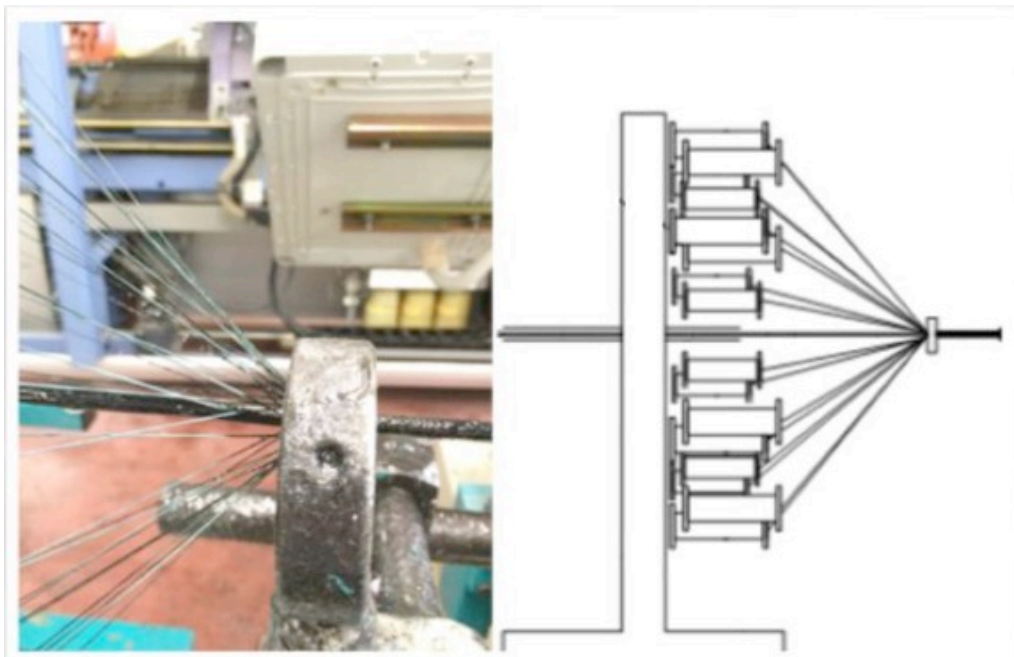


Figura 25 Fase de entrançamento na produção de varões compostos (BCR)

3.1.4 Fase 4 – Cura

A Fase 4 consiste na cura dos varões entrançados, que é realizada na câmara de cura, ilustrada na Figura 26. A câmara de cura tem dimensões de 2×0,50×0,50 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 colocados perfis metálicos galvanizados de 25×25 mm aparafusados. No interior, a câmara 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. A câmara tem como objetivo principal promover a cura ou polimerização da resina através do fornecimento de temperatura, para acelerar o pico exotérmico da polimerização, utilizando-se para este efeito uma temperatura de cerca de 150 °C. Este nível de temperatura pretende não danificar a camada exterior do entrançado. Como fonte de calor usam-se duas resistências elétricas, emitindo radiação no espectro dos infravermelhos com 1200 W e termóstato. Para o controlo da temperatura, é utilizado um equipamento com função on/off, o qual permite regular a temperatura através de uma sonda colocada no interior da câmara.

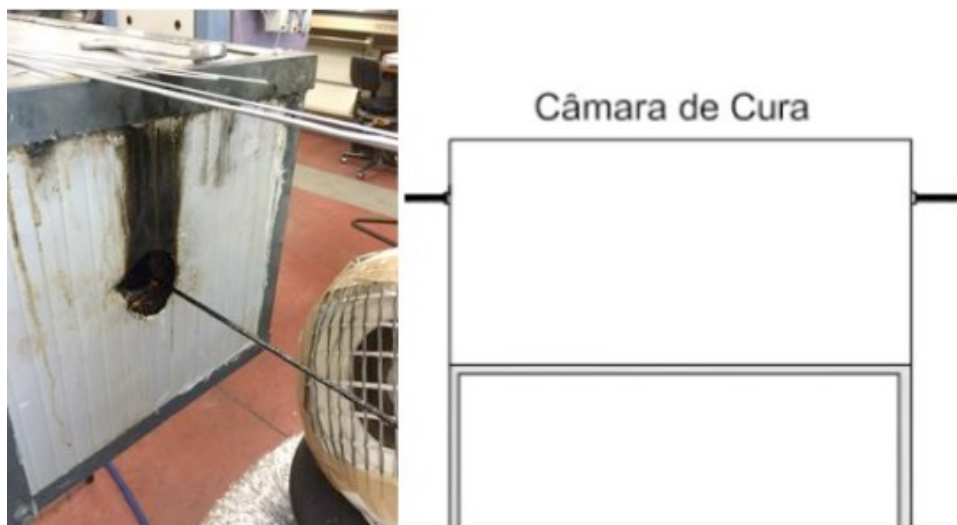


Figura 26 Fase de cura na produção de varões compósitos (BCR)

3.1.5 Fase 5 – Tiragem

O processo de tiragem é o último procedimento do sistema produtivo de varões compósitos em contínuo, ilustrado na Figura 27. Nesta fase, efetua-se a tiragem do material através de maxilas que funcionam de forma pneumática e que garantem a sua tração em contínuo a uma velocidade constante (aproximadamente 7,4 m/s). O sistema de tiragem situa-se a jusante da câmara de cura. Quando da

passagem do varão já curado nas roldanas dentadas, a tiragem do mesmo é realizada sem dano da superfície exterior do mesmo.

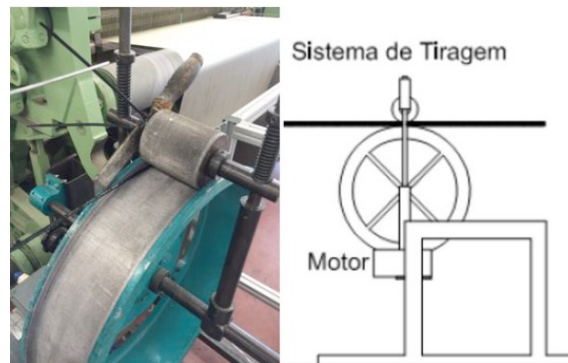


Figura 27 Fase de tiragem na produção de varões compósitos (BCR)

3.2 Caracterização mecânica dos varões compósitos à tração

Uma das características mecânicas chave dos varões compósitos consiste no comportamento à tração, dado que é essencialmente para resistir a estes esforços que se dimensionam estes varões.

Vários estudos têm revelado que quando submetidos a esforços de tração, os varões compósitos entrançados (BCRs) que incorporam apenas matriz termoendurecível apresentam comportamento linear elástico antes de atingirem a rotura. São, por isso, normalmente considerados materiais frágeis, ou seja, que apresentam baixa deformação até atingirem a rotura e não apresentam, por isso, resistência após a carga máxima ser atingida.

Os ensaios monotónicos de tração ou ensaios de tração cíclicos são dois métodos experimentais que permitem a caraterização do comportamento mecânico dos varões sujeitos a esforços de tração. Uma das dificuldades identificadas na realização destes ensaios consiste no deficiente sistema de ancoragem das extremidades dos varões, o que pode resultar em deslizamento, havendo por isso necessidade de melhorar previamente as extremidades para evitar este fenómeno.

3.2.1 Desenvolvimento de um sistema de ancoragem

A necessidade de se desenvolver um novo sistema de ancoragem surgiu pelo facto de se ter verificado que o sistema de amarras usado nos ensaios de tração em varões de aço não se adequa para os materiais compósitos. A inadequação das amarras resulta do aperto excessivo das amostras, que leva à sua rotura prematura por esmagamento [1].

A preparação dos provetes para os ensaios de tração foi executada em 4 etapas. Numa primeira etapa procedeu-se à retificação das extremidades do varão na zona de ancoragem de comprimento de aproximadamente 25 cm.

O desgaste dos varões torna-se necessário para evitar que durante a tração axial do varão não se verifique o escorregamento interno entre as camadas externas de poliéster e o núcleo. Na prática, se houver deslizamento, pode-se correr o risco de se estar apenas a ensaiar a camada externa de poliéster e não o varão completo, onde o núcleo tem uma importância fundamental no comportamento do material..

Na operação de desgaste pode ser usada primeiramente uma rebarbadora com o objetivo de remover as nervuras da camada externa do varão. Por este tipo de ferramenta ser demasiado agressiva e, por isso, poder facilmente danificar o varão, utilizou-se, numa segunda fase, uma lixa para conferir melhor acabamento à superfície desbastada. A lixa permite controlar melhor a percentagem de desgaste e evitar a formação de danos nas extremidades dos varões. O desgaste com a lixa deve concluir-se logo que se torne visível o núcleo do varão. A Figura 28 mostra o aspeto que os varões apresentam antes e após o desgaste. Na imagem do lado esquerdo consegue-se distinguir perfeitamente o núcleo num varão desgastado e, na do lado direito, ver a diferença entre um varão desgastado e outros acabados de produzir.



Figura 28 Aspeto do varão na fase inicial do processo de desgaste (esquerda); Aspeto final do varão após o desgaste (direita).

Concluída a preparação das extremidades das amostras, iniciou-se a preparação dos tubos de aço a serem utilizados na ancoragem dos varões. Segundo o regulamento do Instituto Americano para o betão, ACI 440.3R -04 B-2 , que fornece recomendações para ensaios de materiais reforçados com fibras a serem utilizadas no reforço de estruturas de betão, ambas as extremidades dos varões devem ser inseridas em tubos de aço (ver Figura 29). Para isso, o interior dos tubos deve ser completamente limpo antes que o varão seja introduzido no seu interior. Para este efeito, utilizaram-se tubos com as dimensões constantes no Quadro 6.

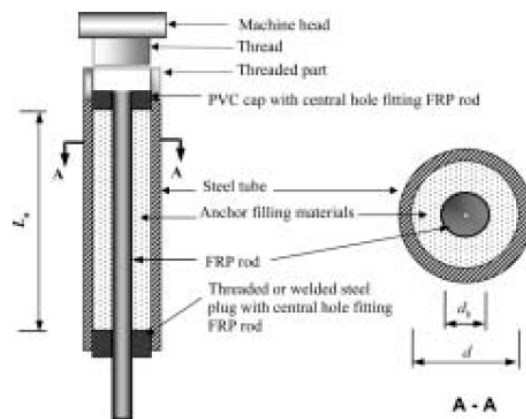


Figura 29 Detalhes do sistema de ancoragem dos varões FRP, de acordo com o regulamento ACI 440.3R-04 (Morais, 2005)

Quadro 7 Dimensões dos tubos em aço para ancoramento dos varões

Material		Dimensões	
Aço	Comprimento (cm)	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)
	25	10,25	14,25

Sabendo-se que os tubos de aço apresentam normalmente uma quantidade razoável de óleo no seu interior que pode resultar em escorregamentos indesejáveis dos materiais durante o ensaio de tração, removeu-se a sujidade no seu interior com o auxílio de um escovilhão para tubos previamente mergulhados em acetona (Figura 30). A acetona ajudou a remover toda a sujidade, assegurando que o interior dos tubos se encontrava em condições para ser aplicado no sistema de ancoragem.

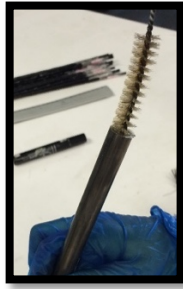


Figura 30 Processo de limpeza do interior dos tubos de aço.

No final, e para garantir melhor adesão entre a cola e o interior do tubo, utilizou-se uma lima circular para desgastar ligeiramente o interior do tubo, criando alguma rugosidade no seu interior melhor uma ligação mecânica entre os materiais (Figura 31).



Figura 31 Processo de desgaste do interior dos tubos de aço.

Efetuiu-se seguidamente a colocação e fixação ordenada dos tubos nos orifícios previamente executados em blocos de poliestireno expandido de modo a assegurar o seu deslocamento (Figura 31) Este procedimento, como se verificará adiante, é fundamental para assegurar a qualidade de ancoragem das amostras. Além disso, foi necessário preparar a cola e colocar o-rings na superfície dos varões que se encontra exposta. Torna-se necessário utilizar um o-ring em cada extremidade do varão de aço de forma a garantir uma adequada concentricidade entre o varão e o tubo de aço e assim assegurar o alinhamento da carga de tração. Se o alinhamento não for assegurado, verificar-se-á o desenvolvimento de esforços de corte na zona de ancoragem do varão que podem distorcer os resultados obtidos ou mesmo causar a rotura nessa zona (Figura 32).

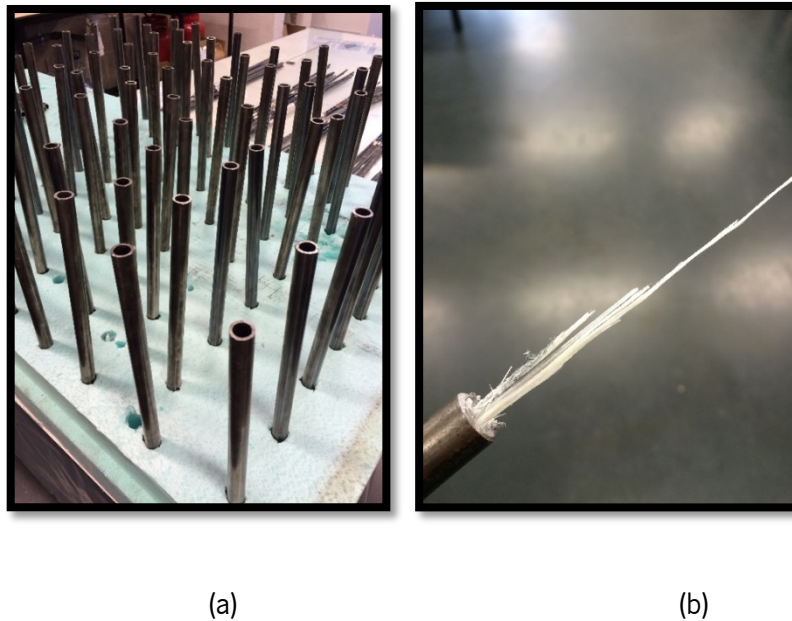


Figura 32 (a) Tubos colocados de forma ordenada no XPS; (b) Rotura da zona de ancoragem dum BCR por ação de forças de corte.

A cola para ligar o varão composto ao varão de aço foi um adesivo epóxico da Sika, designada por Sikadur 32-EF®. Este adesivo estrutural com dois componentes é resistente à humidade, suporta bem uma gama de temperatura entre os 10 e 30°C e é normalmente formulado na seguinte proporção: 66% de resina epóxi e 33% de endurecedor com cargas à base de sílica. O Quadro 8 apresenta algumas propriedades deste adesivo.

Quadro 8 Propriedades físicas da cola *Sikadur 32-EF*®.

Sikadur 32-EF®	Propriedade	Valor	Condições
	Massa volúmica (g/cm ³)	1,5	23°C
	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tração	14 dias a +23°C
		Flexão	
		Compressão	

Foi sempre preparada uma quantidade fixa de 225g cola, isto é, uma mistura de 150g de resina com 75g de endurecer, para promover uma cura em poucos minutos (Figura 33a). Foram usadas seringas para fazer a mistura e colocá-la no interior dos tubos. Após a colocação da cola dentro dos tubos até um nível máximo previamente definido para evitar desperdícios, introduziu-se o varão de forma muito lenta e deixando-o deslizar sobre a cola no interior do tubo (Figura 33 b). Enquanto este deslizava, procurou-se

sempre reaproveitar qualquer eventual excesso de cola resultante da diminuição do volume dentro do tubo para compensar a sua falta de cola noutros tubos. Depois de concluída a introdução de cola e varões no interior dos tubos, aguardou-se 24h para se garantir a cura total da cola (Figura 33 c).

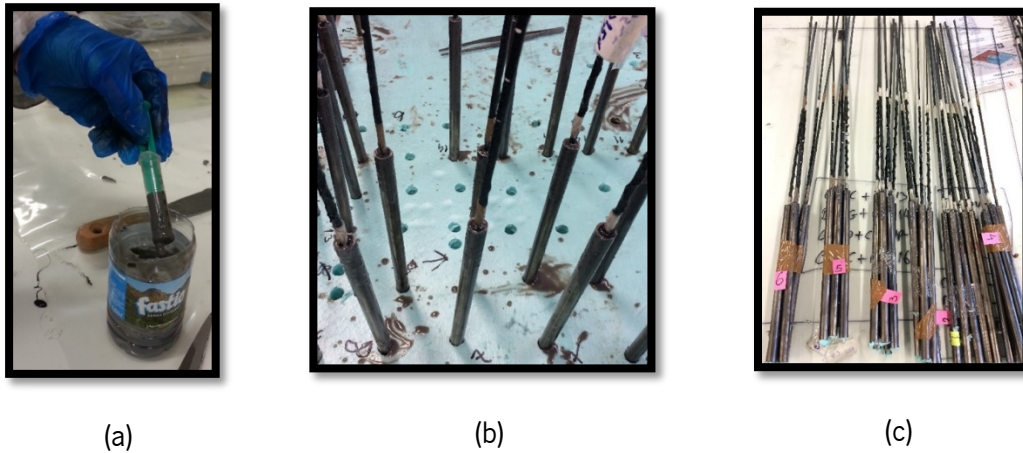


Figura 33 (a) Mistura de cola preparada e antes de ser introduzida no interior dos tubos; (b) introdução dos varões no interior dos tubos com cola, (c) amostras a ensaiar com ancoragem montada numa das suas extremidades.

Concluída a montagem da ancoragem numa das extremidades do varão o processo anterior foi repetido para a extremidade oposta do varão (ver Figura 34).

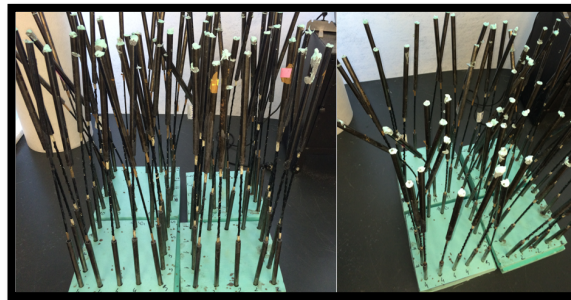


Figura 34 Amostras finais para os ensaios à tração.

3.2.2 Ensaios de tração uniaxial

Os ensaios dos varões compostos à tração realizaram-se numa máquina de tração universal, com uma célula de carga com 50kN de capacidade, que teve de ser adaptado para o efeito, por possuir amarras em aço não adequadas ao sistema de amarração que teve de ser usado. Como as amarras em aço

existentes não permitiam fixar objetos curvos, tiveram que ser desenvolvidas quatro peças metálicas independentes para serem montadas nos cabeçotes superior e inferior do equipamento para se garantir a adequada amarração dos cones metálicos. As Figura 35 e representa duas das quatro peças desenvolvidas, constituídas por placas de aço com as dimensões de 200 x 115mm, que permitiram ancorar adequadamente cada uma das extremidades dos varões. O orifício central na placa da Figura 35a destina-se à fixação do dinamómetro e o rasgo existente na placa da Figura 35a da destina-se à introdução lateral do varão. Ambas as placas apresentam quatro orifícios com 18mm de diâmetro.

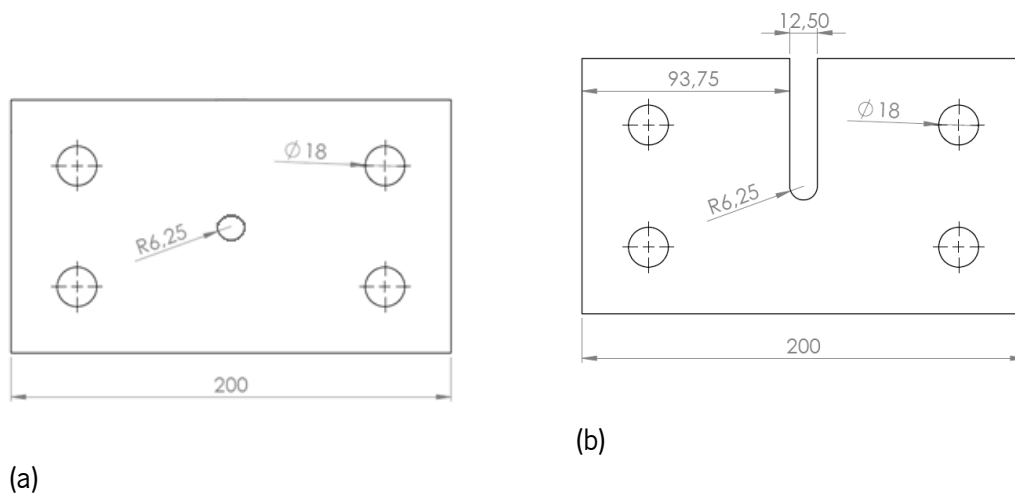


Figura 35 Dimensões das placas metálicas para o sistema de ancoragem do ensaio de tração dos varões: (a) superior fixa ao equipamento, (b) fixa à amostra.

Como se pode ver na Figura 36 duas das placas com orifício central foram ligadas ao equipamento e ligadas às outras duas placas com rasgo central através de quatro varões metálicos roscados de M16 e respectivas porcas de aperto. As 2 placas ligadas aos 2 cabeçotes do equipamento foram fixadas através de um parafuso passante no orifício central e respetiva porca.

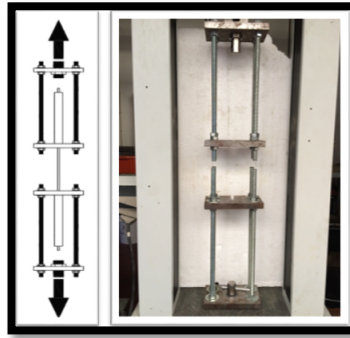


Figura 36 Sistema de ancoragem final esquemático (esquerda) e real (direita) usado para os ensaios de tração.

A tensão máxima de tração instalada nos varões compostos (σ) foi obtida dividindo a força máxima obtida na rotura pela área da secção transversal do provete:

$$\sigma = \frac{\text{Força}_{rotura} (F_{rot})}{\text{Área} (A)} \quad (7)$$

A deformação na rotura (ε) foi determinada no ponto de rotura do material e corresponde ao valor de deslocamento máximo do varão, Δl , dividido pelo seu comprimento inicial, l_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \text{ (\%)} \quad (8)$$

O módulo de Young (E) foi calculado como a razão entre a tensão e a deformação na zona de regime linear elástico da curva tensão/deformação. Esse valor representa o módulo de elasticidade do material normalmente definido por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (9)$$

3.2.3 Ensaios para avaliação da piezoresistividade

De forma a avaliar o comportamento eletromecânico dos provetes e avaliar o seu potencial de utilização para efeitos de monitorização de danos mecânicos de estruturas compósitas sujeitas a esforços de tração, é necessário efetuar ensaios de piezoresistividade.

A piezoresistividade define-se como a variação da resistência elétrica do material quando este é sujeito a uma deformação mecânica ou devido a alterações geométricas do material. Para que os materiais a desenvolver sejam monitorizáveis, a curva da variação da resistência elétrica resultante do ensaio piezoresistivo deve ser relativamente linear e acompanhar tendência verificada na curva da deformação mecânica. Desta forma, aplicando ao material uma diferença de potencial pode-se avaliar a sua resistência elétrica e relacionar estas alterações com as deformações induzidas no material por um determinado estado de tensão.

A piezoresistividade é caracterizada pelo *Gauge Factor* (GF) sendo este também denominado de fator do sensor da deformação em função da resistência elétrica:

$$GF = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (10)$$

em que ΔR corresponde ao aumento da resistência elétrica causada pela aplicação de uma deformação, R_0 a resistência elétrica inicial ou resistência quando $\varepsilon = 0$, ε a deformação mecânica.

O valor do GF depende do tipo de material e pode ser negativo ou positivo. Para materiais metálicos varia entre 2 e 4. Um *Gauge Factor* com valor positivo exprime uma piezoresistividade positiva e um GF negativo traduz uma piezoresistividade 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 tensão e diminui linearmente com carga aplicada sob compressão.

3.3 Materiais e métodos para o design do BCR com pseudoductilidade

3.3.1 Materiais para exploração da pseudoductilidade de varões compósitos – materiais fibrosos de origem polimérica

Os materiais poliméricos reforçados por fibras (FRP) têm um comportamento elástico linear até à rotura, e por isso não apresentam o patamar de plasticidade que é característico dos materiais metálicos como o aço. Este comportamento consiste numa desvantagem no reforço de estruturas e em particular nas estruturas de alvearia sendo, portanto, importante encontrar estratégias para aumentar a capacidade de deformação dos materiais compósitos e evitar a sua rotura frágil. Para este efeito, pretende-se que a rotura do material compósito possa ser sequencial, que deverá resultar simultaneamente em maior capacidade de deformação e maior capacidade para absorver energia durante o processo de dano induzido por ações exteriores. Para atingir este objetivo, será necessário dotar os varões compósitos de pseudoductilidade, associada à rotura sequencial do material. A metodologia a seguir consiste na hibridização dos varões compósitos entrançados, nomeadamente ao nível do núcleo de reforço, explorando diferentes materiais fibrosos. Para materiais fibrosos, poder-se-á utilizar as fibras de vidro, carbono, aramida e varões de Aço. As propriedades destes materiais diferem entre si na resistência, alongamento na rotura e módulo de elasticidade. Consegue-se incorporar pseudoductilidade no núcleo de reforço (BCRs), utilizando fibras com diferentes alongamentos na rotura e diferentes valores de módulo de elasticidade, ver Figura 37. A ideia consiste então em controlar o comportamento do material considerando o comportamento mecânico diferenciado de cada um dos seus constituintes (fibras), assumindo que para o mesmo nível de carga aplicado cada um dos materiais apresenta níveis de deformação diferentes. Através das propriedades intrínsecas de cada uma das fibras, nomeadamente o módulo de elasticidade, tensão de rotura e alongamento, pretende-se desenhar um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 37.

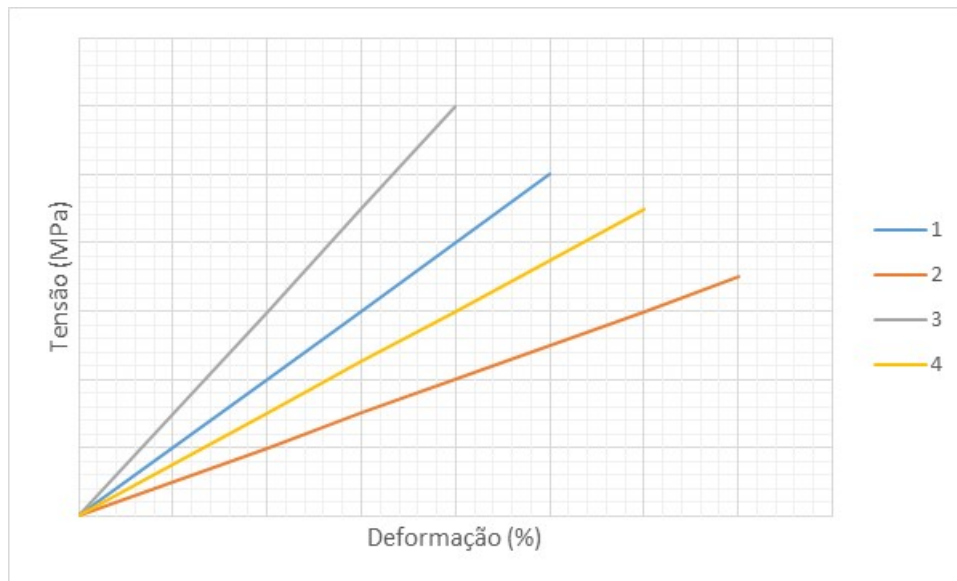


Figura 37 Ilustração do comportamento mecânico desejado para o varão composto entrançado. (em que 1, 2, 3 e 4, é a representação teórica de cada um dos materiais a introduzir como núcleo de reforço.)

Para o desenvolvimento dos varões compostos entrançados com a incorporação de diferentes valores do alongamento na rotura, utilizadas fibras de vidro, carbono, basalto, polietileno de alto peso molecular e polipropileno, cujas propriedades mecânicas são apresentadas no Quadro 8. De salientar que todos os materiais fibrosos foram utilizados sob forma de “*roving*” (mechas contínuas), visto que a técnica de processamento utilizada é muito semelhante à pultrusão. A comparação das características dos materiais fibrosos a utilizar no núcleo de reforço dos BCR’s permite verificar que são bastante distintas, no que diz respeito à deformação na rotura, que varia entre 1,8 e 21%, dependendo da origem do material fibroso.

A fibra de vidro apresenta uma boa relação desempenho mecânico/custo, tornando-a muito vantajosa para a maioria das aplicações comerciais comparando com outros tipos de fibras sintéticas, como as fibras de carbono ou de aramida, que apresentam custos muito mais elevados. Desta forma, a fibra de vidro será o elemento comum no que se refere ao estudo das alterações pretendidas, funcionando igualmente como elemento de referência.

Quadro 9 Materiais fibrosos utilizados na produção de varões compósitos (Cunha, et al., 2014).

Material Fibroso	Referência	Resistência à tração (MPa)	Deformação na rotura (%)	Módulo Young (GPa)
Vidro	PULSTRAND™ 4100 SINGLE-END ROVING	3330	4,4	73
Carbono	Tenax®-E STS40 E13	4300	1,8	250
Basalto	Basfiber®	4500	3,1	86 – 90
Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	2650	3,5	89
PP	--	550 – 700	21	3,5 – 6,8

A fibra de carbono trata-se de uma fibra muito utilizada para aplicações que exigem um elevado desempenho mecânico devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como a elevada rigidez, permitindo-lhe equiparar-se às ligas metálicas, como é o caso do aço, possuindo a vantagem de ser muito mais leve. No entanto, e contrariamente ao aço e também à fibra de vidro, esta fibra apresenta ainda um custo de aquisição bastante elevado, sendo este uma das suas grandes desvantagens. O interesse no uso desta fibra no desenvolvimento destes varões passa por analisar de que forma é possível obter BCRs com módulos de elasticidade próximos dos varões obtidos unicamente com esta fibra.

No que diz respeito à fibra de basalto, à semelhança da fibra de vidro, é uma fibra de baixo custo, de fácil obtenção e com propriedades mecânicas muito favoráveis. É uma fibra que vai sendo aposta no mercado dos FRP, a par da fibra de vidro. Assim, esta fibra também é considerada no processo de manufatura de varões híbridos com o objetivo de superar as propriedades obtidas pelas tipologias compostas pela fibra de vidro.

A fibra de polietileno de ultra alto peso molecular, é uma fibra polimérica muito utilizada, por exemplo, em cabos de sustentação para estações petrolíferas. É uma fibra que apresenta elevada tenacidade e uma boa rigidez, mas apresenta ainda um elevado custo de aquisição, sendo por isso descartada para aplicações ligadas ao ramo da construção. A aplicação desta fibra no reforço de estruturas ainda não foi alvo de estudo e, por esse motivo, ainda não foi explorada no desenvolvimento de FRPs. Por esta razão, a introdução desta fibra no desenvolvimento de BCRs tornou-se revelante de forma a permitir analisar a compatibilidade entre elas (fibras) e a matriz epóxi utilizada, assim como verificar as propriedades mecânicas do varão composto.

Por fim, as fibras de polipropileno apresentam um custo bastante inferior ao das anteriores fibras de polietileno mas as suas propriedades mecânicas são inferiores. A introdução destas fibras, bem como as anteriores, no núcleo dos varões, tem como objetivo aumentar a deformação destes e, assim, permitir a incorporação de maior pseudoductilidade.

Na Figura 38 encontra-se ilustrado o comportamento que se pretende que apresente um varão composto submetido a esforços de tração uniaxial. Sendo o núcleo constituído por fibras poliméricas com propriedades de deformação distinta será possível obter a rotura sequencial do varão quando a deformação de rotura de cada uma das fibras é atingida e assim aumentar consideravelmente a sua capacidade de deformação última e a dissipação de energia. Este comportamento pressupões a redistribuição progressiva de esforços entre as fibras que ainda se encontram ativas.

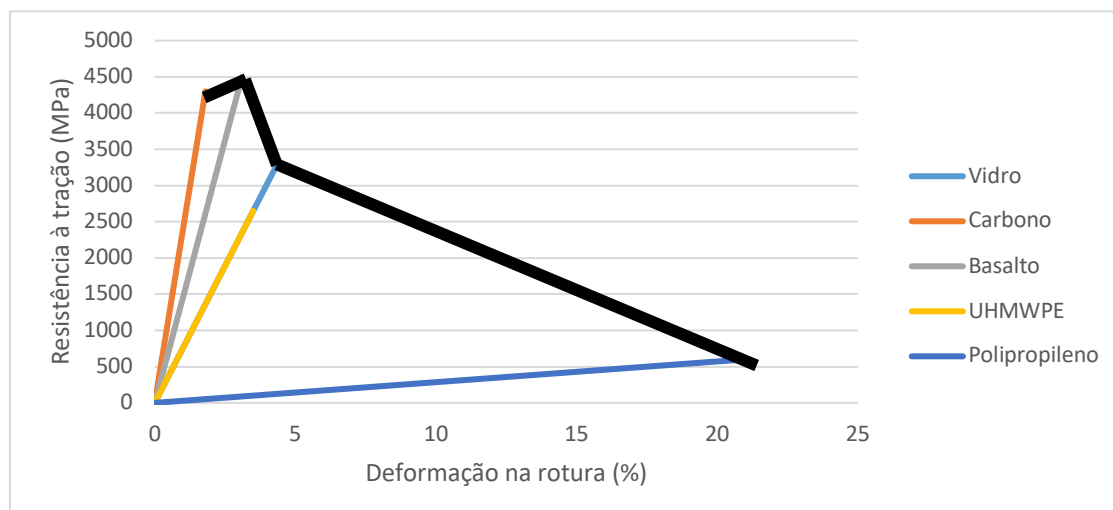


Figura 38 Ilustração do comportamento pseudo-ductil dos BCR's

Além dos materiais fibrosos, como indicado anteriormente, para a produção de BCR's é também necessária uma matriz polimérica, responsável por ligar os materiais fibrosos durante o processo de produção do varão entrançado. Para além de manter as fibras na posição desejada e permitir a obtenção da forma pretendida, a matriz polimérica promove a transferência de cargas para o núcleo. Adicionalmente confere proteção ao compósito durante o fabrico e ainda a proteção relativamente a ambientes tão agressivos como os alcalinos (quando os varões são embebidos em argamassa de cimento ou cal). De entre os vários tipos de materiais poliméricos existentes, as resinas epóxicas consistem no material apropriado para produzir varões "GFRP" por apresentarem excelentes propriedades mecânicas e possuírem elevada resistência a ataques químicos, o que se torna fundamental para varões muitas vezes sujeitos à forte exposição a ambientes agressivos. Por esse motivo, a resina epóxida Biresin® da Sika será o material usado como constituir a matriz do varão. Para garantir a sua cura são normalmente adicionados mais dois elementos à resina, nomeadamente o endurecedor e o acelerador. Assim, para a preparação da respetiva matriz polimérica serão utilizados os seguintes componentes:

- Matriz epóxi Biresin® CR144, indicada para o processo de Pultrusão, que se caracteriza por possuir baixa viscosidade, o que permite ter uma fácil impregnação da fibra, ser translúcida, apresentar elevado alongamento e uma temperatura de transição vítrea de cerca de 155 °C;
- Endurecedor Biresin® CH 141, que consiste num anidrido carboxílico transparente;
- Acelerador Biresin® CA144, que consiste numa amina.

No Quadro 10 apresentam-se as propriedades mecânicas da matriz utilizada.

Quadro 10 Materiais poliméricos usados na produção de varões compósitos.

Material polimérico	Referência	Resistência à tração (MPa)	Deformação na rotura (%)	Módulo Young (GPa)
Matriz Epóxi	Biresin® CR144	90	5,4	2,75

3.3.2 Soluções de varões compósitos com fibras poliméricas

Inicialmente, decidiu-se produzir varões com diâmetro externo aproximado de 4mm, considerando unicamente o diâmetro do núcleo e não da camada externa. Para se atingir esse valor, calculou-se a quantidade necessária de filamentos para cada fibra que deveria ser incorporada para o desenvolvimento

Desenvolvimento de materiais fibrosos inteligentes para o reforço de alvenarias de enchimento sujeitas à ação sísmica

dos varões, tendo em consideração a massa linear (tex) de cada tipo, o teor de fibras ($\approx 60\%$) e resina ($\approx 40\%$) a usar, a densidade das fibras e matriz utilizadas.

A obtenção do diâmetro dos varões deve ser feita através do cálculo de alguns parâmetros, entre eles a área de secção do varão, calculada através das equações 1 e 2.

Os primeiros BCR's desenvolvidos continham no núcleo 100% do material fibroso de Vidro, Carbono e Basalto. Estes primeiros BCR's foram desenvolvidos nestas configurações para se poder estudar o comportamento de cada um dos materiais fibrosos de forma isolada.

O Quadro 11 apresenta o teor em fibra usado no desenvolvimento dos primeiros BCR's, obtido a partir dos cálculos realizados, segundo a metodologia anteriormente apresentada.

Quadro 11 Materiais fibrosos utilizado no desenvolvimento dos varões de referência.

	Material fibroso	Nº de rovings	Massa linear (g/km)	Massa volúmica (g/cm ³)	Área secção (mm ²)	Área secção total (mm ²)	Ø BCR (mm)
100% Carbono	Carbono	2	1600	1,78	1,8	8,99	4
		4	3200		7,19		
100% Vidro	Vidro (E)	2	9600	2,56	7,5	11,34	4,09
		2	4800		3,78		
100% Basalto	Basalto	6	4800	2,63	8,89	8,89	4,26

Posteriormente, e de forma a analisar a influência da utilização de diferentes materiais fibrosos no núcleo do varão com diferentes propriedades mecânicas, foram hibridizados, a partir do núcleo de reforço, diferentes tipologias de BCR. Desta forma será possível analisar a pseudoductilidade que se pretende incorporar no varão com núcleo fibroso híbrido. Assim, será analisada a influência da combinação de materiais com níveis de rigidez diferenciados, a influência da fibra de carbono e a influência da utilização de materiais com elevada extensão máxima. No Quadro 12, indica-se o teor em fibra utilizado em cada um dos BCR's Híbridos.

Com base na distribuição de material fibroso no núcleo dos varões híbridos apresentada no Quadro 12, foram efetuados os cálculos do número de fibras de cada material fibroso a inserir no núcleo de reforço.

Quadro 12 Apresentação da composição dos BCR 's Híbridos

Fibra	Tipologia				Diâmetro-Ø
	BCR_H1	BCR_H2	BCR_H3	BCR_H4	
Vidro (E)	25%	33%	33%	33%	≈ 4mm
Carbono	25%	33%	33%	-	
Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	25%	33%	-	33%	
Polipropileno	25%	-	33%	33%	

Assim, no Quadro 13, indica-se com detalhe a composição de cada um dos BCR 's hibridizados.

Quadro 13 Composição dos BCR 's híbridos

Tipologia	Fibra	Nº rovings	Massa linear (g/km)	δ (g/cm ³)	Asecção (mm ²)	Area secção total (mm ²)	Ø BCR (mm)
BCR_H1	Vidro (E)	1	4800	2,56	1,89	9	4
		1	1200		0,47		
	Carbono	2	1600	1,78	1,81		
		2	400		0,45		
	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	3	704	0,97	2,18		
PP	2	1000	0,91	2,01			
BCR_H2	Vidro (E)	2	4800	2,56	3,78	9,38	4,09
		1	554		0,22		
		2	1200		0,94		
	Carbono	2	1600	1,78	1,81		
		2	400		0,45		
Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	3	704	0,97	2,18			
BCR_H3	Vidro (E)	1	9600	2,56	3,78	9,16	4,04
		1	1200		0,47		
	Carbono	3	1600	1,78	2,71		
	PP	2	1000	0,91	2,2		
BCR_H4	Vidro (E)	1	9600	2,56	3,78	9,06	4,02
		2	554		0,44		
		1	1200		0,47		
	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	3	1600	1,78	2,18		
	PP	2	1000	0,91	2,2		

3.3.3 Materiais para exploração da pseudoductilidade de varões compósitos – materiais com comportamento intrinsecamente dúctil

Tal como referido anteriormente, uma outra forma de aumentar a ductilidade em varões com rotura frágil, consiste na introdução no seu núcleo de materiais com comportamento intrinsecamente dúctil e com elevada resistência mecânica, como é o caso do aço habitualmente empregue em estruturas de betão armado.

Esta abordagem tem vindo a ser explorada em varões híbridos entrançando helicoidalmente fibras de vidro sobre uma barra em aço de secção transversal circular que constitui o núcleo. Para garantir a adesão entre os dois materiais, e de modo a evitar a existência de folgas e o escorregamento entre ambos, a adição de uma resina epóxida torna-se igualmente fundamental no processo (Dong, et al., 15 July 2016,).

A combinação de materiais compósitos poliméricos com aço permite aportar ductilidade a estes materiais, obviando umas das principais desvantagens apontadas a estes materiais, fazendo com que, os mesmos adquiram elevado potencial de aplicação no mercado, como possíveis substitutos de soluções baseadas unicamente em aço, devido à sua pseudoductilidade.

É ainda importante salientar que a estrutura entrançada e a resina epóxida (Quadro 13) aplicadas nestes varões garantem uma eficaz proteção do núcleo em aço sujeito a possíveis ataques de agentes corrosivos.

Quadro 14 Característica da resina utilizada na produção de varões compósitos híbridos.

Material polimérico	Resistência à tração (MPa)	Deformação na rotura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Resina Epóxida	91	8.4	32

Na Figura 39, pode ser observado o comportamento mecânico expectável de varões desenvolvidos a partir da combinação deste tipo de materiais (vidro e aço) de acordo com (Cui et al. 2008).

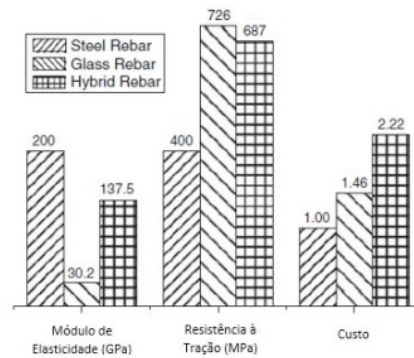


Figura 39 Comparação entre o módulo de elasticidade, resistência à tração e custo dos diferentes tipos de varões (aço, GFRP e híbrido). (Cui, et al., 2008)

Assim, apresenta-se nesta secção o estudo da incorporação de pseudoductilidade em varões entrançados a partir da integração de materiais dúcteis no núcleo. Para este efeito, foram produzidos BCR's com uma base de fibra de Vidro e fibra de Basalto às quais foram adicionados varões de aço. Assim, para o desenvolvimento deste estudo, foi necessário assegurar um tipo de aço que pudesse ser introduzido no processamento dos varões híbridos. Entre os varões de aço ou os cabos/fios de aço existentes no mercado, optou-se pelos cabos/fios de secção transversal circular, pelo facto de apresentarem fácil moldagem (deformar longitudinalmente) e por possuírem superfície exterior lisa. Neste sentido, optou-se por um tipo de aço galvanizado com 3 diâmetros distintos, para que fosse possível estudar a influência da incorporação de diferentes percentagens de aço no desempenho mecânico do varão compósito.

Numa primeira fase, os varões de aço foram estirados num torno mecânico utilizado para a maquinação de ligas metálicas, tendo-se procedido à sua utilização posterior no sistema de alimentação no equipamento de produção de varões entrançados. No Quadro 15, apresenta-se o teor de fibra usada para a produção de 6 tipologias de varões, obtida a partir dos cálculos realizados anteriormente.

Quadro 15 Materiais fibrosos utilizado no desenvolvimento dos varões entrançados com a incorporação de aço.

Amostra	Fibra	Ø Aço (mm)	Nº rovings	Massa linear (g/km)	Densidade	Área secção (mm ²)	Área secção total (mm ²)	Ø BCR (mm)
Glass + Steel (1,6 mm)	Vidro (E)	-	2	9600	2,56	7,56	9,57	4,13
	Aço	1,6	1	-	7,8	2,01		
Glass + Steel (2 mm)	Vidro (E)	-	1	9600	2,56	3,78	9,73	4,09
			1	4800		1,89		
			2	1200		0,92		
	Aço	2	1	-	7,8	3,14		
Glass + Steel (2,5 mm)	Vidro (E)	-	1	9600	2,56	3,78	9,6	4,14
			2	1200		0,92		
	Aço	2,5	1	-	7,8	4,91		
Basalt + Steel (1,6 mm)	Basalto	-	4	4800	2,63	7,3	9,31	4,07
	Aço	1,6	1	-	7,8	2,01		
Basalt + Steel (2 mm)	Basalto	-	4	4800	2,63	7,3	10,44	4,31
	Aço	2	1	-	7,8	3,14		
Basalt + Steel (2,5 mm)	Basalto	-	3	4800	2,63	5,48	10,38	4,3
	Aço	2,5	1	-	7,8	4,91		

3.4 Design de BCR´s com capacidade de monitorização

No âmbito do presente estudo, pretende-se desenvolver a capacidade de monitorização em varões compósitos (BCR´s) Assim, a introdução da funcionalidade de monitorização em BCR´s é desenvolvida através de duas técnicas. Numa primeira abordagem, é testada a introdução de filamentos intrinsecamente condutores no processo de produção dos varões. Numa segunda abordagem é estudada a funcionalização de filamentos de vidro com materiais condutores, nomeadamente nanotubos de carbono. Esta segunda abordagem representa um avanço muito significativo ao nível do estado da arte. Assim, nesta secção serão descritos ambos os conceitos e métodos desenvolvidos.

3.4.1 Introdução de fibras intrinsecamente condutoras

3.4.1.1 Conceito

No âmbito desta abordagem, o objetivo consiste na introdução de elementos fibrosos contínuos condutores para explorar o comportamento piezoresistivo através da alteração da resistividade elétrica em função de uma deformação, no sentido de conferir capacidade de monitorização a varões compósitos

entrançados. Assim, o principal intuito consiste em estudar os níveis de condutividade destes elementos no núcleo dos varões compósitos e a variação da sua resistividade elétrica em função da carga aplicada. Desta forma, pretende-se compreender o seu nível de sensibilidade e uniformidade de medição, utilizando duas matérias-primas distintas.

3.4.1.2 Materiais e métodos utilizados

Para o desenvolvimento de varões compósitos com capacidade de monitorização, foram selecionados filamentos à base de carbono e de aço inoxidável, por apresentarem valores de condutividade compatíveis com o objetivo pretendido, nomeadamente entre 3–84 Ω/cm (Xi & Chung, 2019). As características técnicas dos filamentos selecionados estão indicadas no Quadro 16. O Quadro 17 apresenta o teor em fibra usado para a produção desta tipologia de varões.

Quadro 16 Condutividade elétrica de Filamentos condutores utilizados para a produção de varões compósitos entrançados.

Filamento condutor	Referência	Condutividade elétrica (Ω/cm)
Carbono	Tenax®-E STS40 E13	10
Aço inoxidável	Bekaert Bekinox® VS 12	84

Quadro 17 Materiais fibrosos utilizados no desenvolvimento dos varões entrançados com a incorporação de filamentos condutores.

Amostra	Material Fibroso	nº fios	Massa Linear (Tex)	Massa volumica (g/cm ³)	A _{secção} (mm ²)	V _{Fibra/fibras} (%)	V _{resin} (%)	Ø _{BCR} (mm)
BCR com aço INOX	Fibra de Vidro de reforço	11	4800	2,54	20,787	0,999	30	5,87
	Inox	1	200	7,8	0,026	0,001		
BCR com Carbono	Fibra de Vidro de reforço	11	4800	2,54	20,787	0,995		5,88
	Carbono	1	200	1,77	0,113	0,005		

3.4.2 Funcionalização de filamentos de fibra de vidro com nanotubos de carbono

3.4.2.1 Conceito

Através desta abordagem, o principal objetivo consiste na funcionalização de filamentos de vidro convencionais, semelhantes aos utilizados na conceção dos restantes varões entrançados. Com este processo de funcionalização, pretende-se torná-los condutores ao longo do seu comprimento, ao ponto de serem capazes de monitorizarem deformações mecânicas a partir da introdução de filamentos fibrosos intrinsecamente condutores. Posteriormente os filamentos funcionalizados, serão utilizados em varões compósitos para se aferir a sua capacidade de monitorização.

3.4.2.2 Pré-tratamento da fibra de vidro

Uma vez que os materiais fibrosos apresentam na sua superfície grupos polares e impurezas como parafinas, ceras ou gorduras, que conferem a esta uma reduzida capacidade de molhabilidade, a sua compatibilidade na interface com materiais poliméricos é assim reduzida. Este facto reduz consideravelmente o grau de compatibilidade e adesão das soluções de funcionalização na superfície dos materiais fibrosos de vidro, parâmetro fundamental para o sucesso desta abordagem. Assim, vários tipos de tratamentos podem ser aplicados para limpar e modificar a superfície das fibras e desta forma aumentar a sua compatibilidade com outros materiais. Estes tratamentos de modificação de superfície podem ser físicos, químicos ou biológicos, tendo como objetivo comum a quebra de ligações de átomos de alguns grupos funcionais na superfície das fibras de forma a permitir que estas possam ser funcionalizadas.

No caso particular deste estudo aplicaram-se tratamentos químicos alcalinos à superfície dos materiais fibrosos com o objetivo de promover a sua limpeza e quebra de ligações químicas na estrutura molecular. Desta forma, é aumentado o número de locais ativos na superfície da fibra onde os materiais piezoresistivos e poliméricos se podem posteriormente interligar, promovendo o aumento da rugosidade da superfície. O tratamento permite um incremento da área de superfície disponível para a combinação com os materiais referidos. A aplicação deste tratamento consistiu na imersão das fibras numa solução aquosa de hidróxido de sódio (NaHO), com a concentração de 4 w/v %, durante uma hora, à temperatura ambiente, em agitação contínua a 350 rpm. Posteriormente, os materiais fibrosos foram lavados em

água corrente, com o objetivo de remover todos os resíduos do tratamento aplicado, e secos na estufa durante 2 horas a 80°C.

3.4.2.3 Materiais e métodos para funcionalização da fibra de vidro

Posteriormente ao pré-tratamento de superfície dos materiais fibrosos de vidro, procedeu-se à sua funcionalização para a sua posterior utilização como elemento condutor no desenvolvimento de varões entrançados com capacidade de monitorização.

Para a impregnação dos filamentos de fibra de vidro foram estudadas três formulações distintas, nomeadamente:

- Formulação A: dispersão de nanotubos de carbono (CNT's) em frações entre 0,5 w/v % e 2,5 w/v % em resina epóxida Biresin® CR141 (Parte A 100%; Parte B 90%; Parte C 2%), com recurso a acetona (75 v/w % da Parte A da resina), através de agitação mecânica (durante 1h) seguido de agitação em banho em ultrassons (durante 1h).

Na conceção da formulação A, o principal propósito consistiu na dispersão dos CNT's diretamente no mesmo tipo de material polimérico, resina epóxida, utilizado posteriormente no desenvolvimento dos varões entrançados, de forma a aumentar a compatibilidade futura dos filamentos fibrosos funcionalizados com os restantes materiais. A utilização de acetona como solvente teve como principal objetivo aumentar a taxa de dispersão dos nanotubos de carbono na solução polimérica, uma vez que os mesmos são propensos a formar aglomerados.

- Formulação B: dispersão de CNT's, em frações entre 0,5 w/v % e 2,5 w/v %, em solução pré-preparada de clorofórmio com 6 w/v % de ácido polilático (PLA), através de agitação mecânica (durante 1h) seguido de agitação em banho em ultrassons (durante 1h).

Na conceção da formulação B, o principal propósito consistiu na utilização de ácido polilático (PLA) como veículo de incorporação dos nanotubos de carbono na superfície das fibras para aumentar a taxa de elasticidade dos filamentos funcionalizados e posteriormente permitir um melhor nível da medição da deformação quando introduzidos nos varões compósitos entrançados.

De modo a obter-se uma impregnação o mais homogénea possível, utilizou-se o método de Dip-Pad-Dry, recorrendo ao uso do Foulard Mathis e da estufa Memmert UNE 800. Neste método de impregnação das fibras por foulardagem, o material fibroso, sob diferentes formas, é imerso repetidamente na solução, sendo de seguida passado entre dois rolos de compressão, com o objetivo de remover os excessos de solução resultantes da imersão, como representando no esquema da Figura 40. Após a impregnação dos materiais fibrosos no Foulard Mathis, os mesmos são submetidos a uma etapa de secagem, realizada em estufa à temperatura de 80°C durante 2 horas.

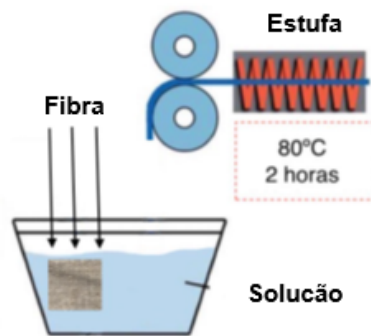


Figura 40 Representação esquemática do processo de impregnação por Dip-pad-dry.

- Formulação C: semelhante à formulação B, mas com a aplicação posterior de um revestimento de resina epóxida, Biresin® CR141.

Na conceção da formulação C, o principal propósito consistiu em procurar tirar partido de ambas as vantagens enunciadas nas formulações anteriores, nomeadamente o aumento da deformação na rotura para melhor monitorização dos filamentos de vidro, pela utilização do PLA (Formulação B), e pela compatibilidade do filamento funcionalizado com o restante material polimérico a ser utilizado posteriormente na conceção dos varões compósitos entrançados (Formulação A).

No Quadro 18 apresenta-se um resumo dos materiais utilizados para a funcionalização dos filamentos de fibra de Vidro. Para cada formulação foram utilizadas diferentes percentagens de nanotubos de forma a avaliar a quantidade deste material no desempenho final de monitorização.

Quadro 18 Materiais utilizados para a funcionalização da fibra de Vidro.

Nomenclatura	Massa linear do filamento	Funcionalização	
		% de nanotubos	Agente de dispersão
Formulação A	100 tex	0,5	Bioepoxida + Acetona
		1	
		1,5	
		2	
		2,5	
Formulação B	100 tex	0,5	PLA + Clorofórmio
		1	
		1,5	
		2	
		2,5	
Formulação C	100 tex	0,5	PLA + Clorofórmio + Bioepoxida
		1	
		1,5	
		2	
		2,5	

Dos resultados obtidos das três formulações apenas duas formulações demonstraram viabilidade de ser utilizadas nos BCR's, nomeadamente Formulação B e C, conforme demonstrado no capítulo 5, face aos resultados apresentados.

Desta forma, são apresentados no Quadro 19 os materiais utilizados para o desenvolvimento dos BCR's com as formulações B e C com capacidade de monitorização de deformações.

Quadro 19 Materiais utilizados para o desenvolvimento de BCR's com as formulações B e C

Amostra	%	Material Fibroso	Tipo de Funcionalização	nº fios	Massa Linear (Tex)	Massa volumica (g/cm3)	A _{secção} (mm ²)	V _{Fibra/fibras} (%)	V _{resin} (%)	Ø _{BCR} (mm)
BCR com Formulação B	1,5	Fibra de vidro de reforço	-	11	4800	2,54	20,787	0,998	30	5,87
		Fibra de vidro funcionalizada	B - 1,5%	1	100	2,62	0,038	0,002		
	2	Fibra de vidro de reforço	-	11	4800	2,54	20,787	0,998		
		Fibra de vidro funcionalizada	B - 2%	1	100	2,62	0,038	0,002		
	2,5	Fibra de vidro de reforço	-	11	4800	2,54	20,787	0,998		
		Fibra de vidro funcionalizada	B - 2,5%	1	100	2,62	0,038	0,002		
BCR com Formulação C	1,5	Fibra de vidro de reforço	-	11	4800	2,54	20,787	0,998		
		Fibra de vidro funcionalizada	C - 1,5%	1	100	2,62	0,038	0,002		
	2	Fibra de vidro de reforço	-	11	4800	2,54	20,787	0,998		
		Fibra de vidro funcionalizada	C - 2%	1	100	2,62	0,038	0,002		
	2,5	Fibra de vidro de reforço	-	11	4800	2,54	20,787	0,998		
		Fibra de vidro funcionalizada	C - 2,5%	1	100	2,62	0,038	0,002		

4 Comportamento de varões compósitos entrançados com pseudoductilidade – Análise de resultados

A pseudoductilidade dos varões compósitos entrançados será analisada seguindo as recomendações de trabalhos desenvolvidos por (Fuller & Wisnom, 2014). Assim, a análise da Pseudoductilidade é efetuada a partir da diferença entre a deformação obtida na tensão de rotura (valor teórico) e a deformação obtida experimentalmente, nesse mesmo valor.

Esta propriedade é característica de alguns materiais, como o caso dos metais. Devido à sua importância, apresenta-se neste capítulo o estudo efetuado para incorporar esta capacidade em materiais poliméricos reforçados por fibras, e em particular nos BCR.

Para alcançar o comportamento mecânico desejado é necessário incorporar nos BCRs aquilo que se denomina de pseudoductilidade, isto é, obrigar o material a apresentar um comportamento mecânico pseudodúctil, ou seja, deformação plástica apreciável na curva tensão-deformação obtida durante os ensaios em tração. Isto significa que a incorporação de pseudoductilidade permite converter um material compósito com um comportamento mecânico frágil em pseudodúctil.

4.1 Pseudoductilidade a partir da incorporação de materiais fibrosos com diferentes propriedades mecânicas

Nesta secção apresentam-se os resultados dos ensaios de tração efetuados nos varões compósitos entrançados considerando o núcleo com materiais fibrosos com diferentes propriedades mecânicas, nomeadamente diferentes níveis de deformação correspondente à tensão de rotura. Os ensaios de tração foram realizados seguindo os procedimentos descritos no Capítulo 3. Os varões de referência são constituídos por fibra de vidro, carbono e basalto (100%Vidro; 100%Carbono; 100%Basalto) e os varões híbridos apresentam o núcleo constituído por diferentes percentagens de materiais fibrosos (BCR_H1; BCR_H2; BCR_H3; BCR_H4), como se pode verificar no Quadro 20. A análise do desempenho mecânico dos diferentes tipos de varões compósitos é efetuada a partir dos diagramas tensão-extensão obtidos nos ensaios de caracterização, com particular destaque para os resultados de absorção de energia e tensão de rotura. Esta última propriedade, de certa forma, irá permitir avaliar o grau de pseudoductilidade que cada um dos BCR's possui.

Quadro 20 Apresentação das características dos varões com pseudoductilidade

Fibra	Tipologia				Diâmetro-Ø
	BCR_H1	BCR_H2	BCR_H3	BCR_H4	
Vidro (E)	25%	33%	33%	33%	≈ 4mm
Carbono	25%	33%	33%	-	
Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	25%	33%	-	33%	
Polipropileno	25%	-	33%	33%	

4.1.1 BCR com 100% fibra de carbono no núcleo de reforço

Na Figura 41 apresentam-se os diagramas de Tensão vs Extensão para cinco amostras de BCR com 100% de carbono no núcleo de reforço. Por sua vez, no Quadro 21, podem ser analisadas em detalhe as propriedades, nomeadamente tensão de rotura e deformação correspondente, módulo de elasticidade e tenacidade, calculada através da área abaixo do gráfico.

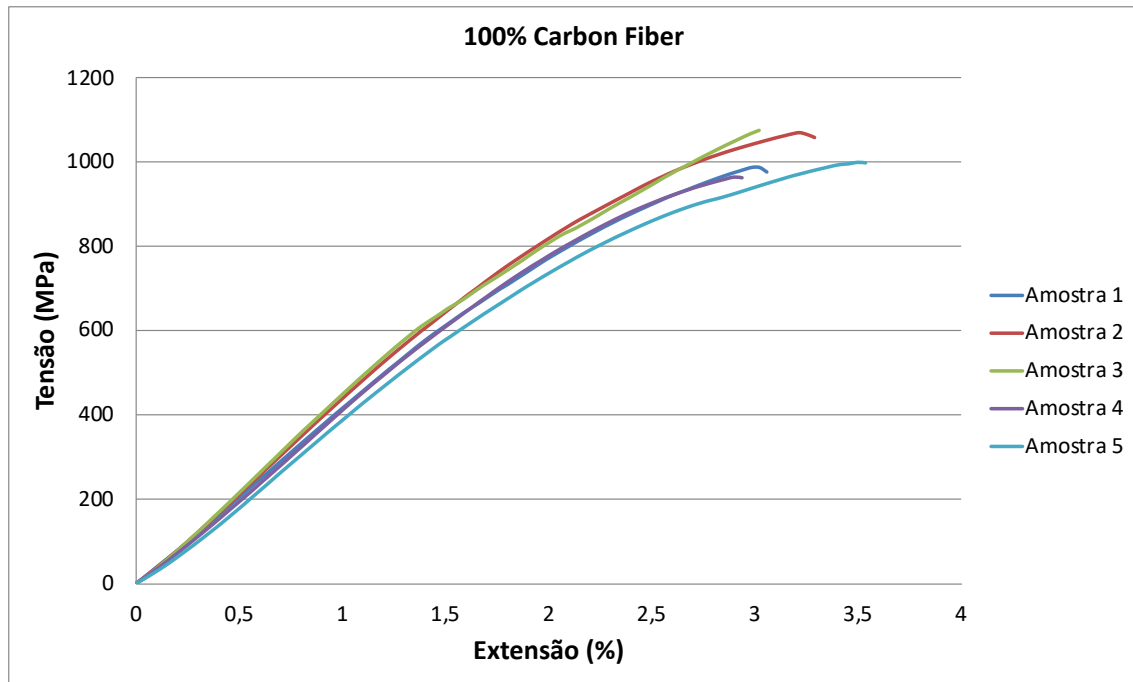


Figura 41 Diagrama de tensão vs extensão do BCR100% Carbono.

Quadro 21 Propriedades detalhadas do BCR 100% carbono.

Amostra	Tensão (MPa)	Extensão (%)	E (GPa)	Energia (J)
1	987,2	3,1	424,5	85,6
2	1069,3	3,3	455,4	96,6
3	1074,7	3	469,5	96,6
4	964	2,9	423,6	106,7
5	998,9	3,5	420,8	103,7
Média	1018,8	3,2	438,8	97,8
DP	42,5	0,2	19	5,9
CV (%)	4%	6%	4%	6%

4.1.2 BCR com 100% fibra de Vidro no núcleo de reforço

Na Figura 42 apresenta-se o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de fibras de vidro no núcleo de reforço. No Quadro 13, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR composto por 100% Vidro.

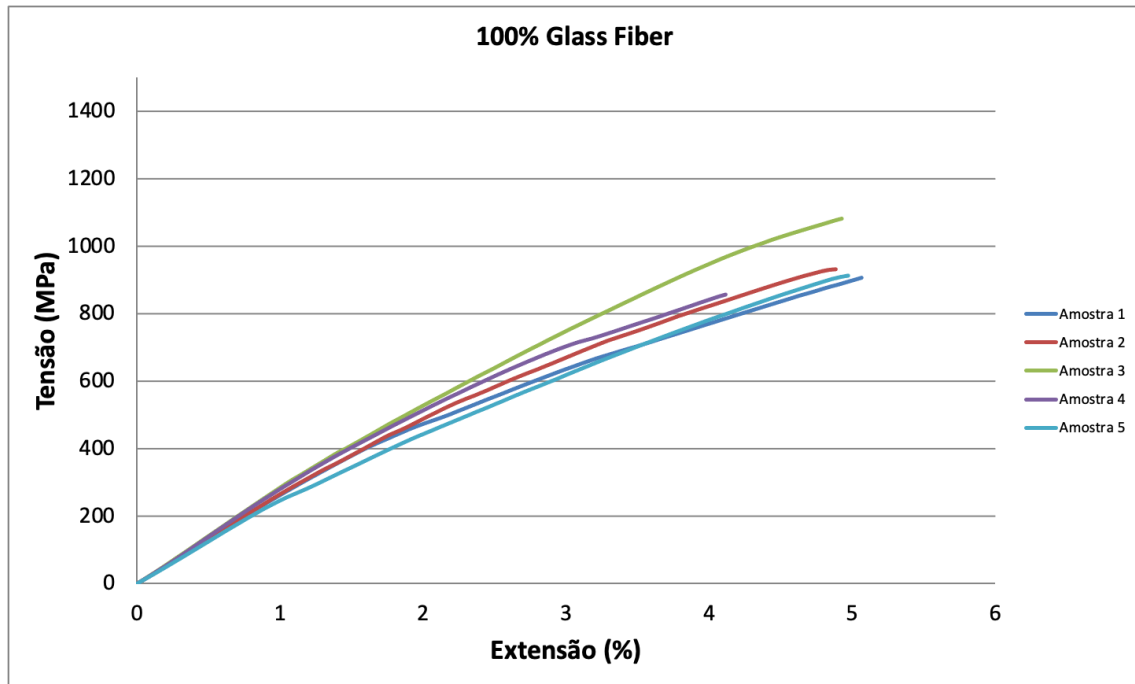


Figura 42 Diagrama de tensão vs extensão do BCR 100% Vidro.

Quadro 22 Propriedades detalhadas do BCR 100% Vidro.

Amostra	Tensão (MPa)	E (%)	E (MPa)	Energia (J)
1	976,8	5,3	265,5	89,7
2	1009	5,4	271,3	98,4
3	1147,9	5,3	289,1	99,6
4	931,6	4,6	290,2	78,2
5	987,2	5,4	249,9	105,8
Média	1010,5	5,2	273,2	94,4
DP	55	0,2	13,2	8,3
CV	5%	5%	5%	9%

4.1.3 BCR com 100% fibra de Basalto no núcleo de reforço

Na Figura 43, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de apenas fibras de basalto no núcleo de reforço.

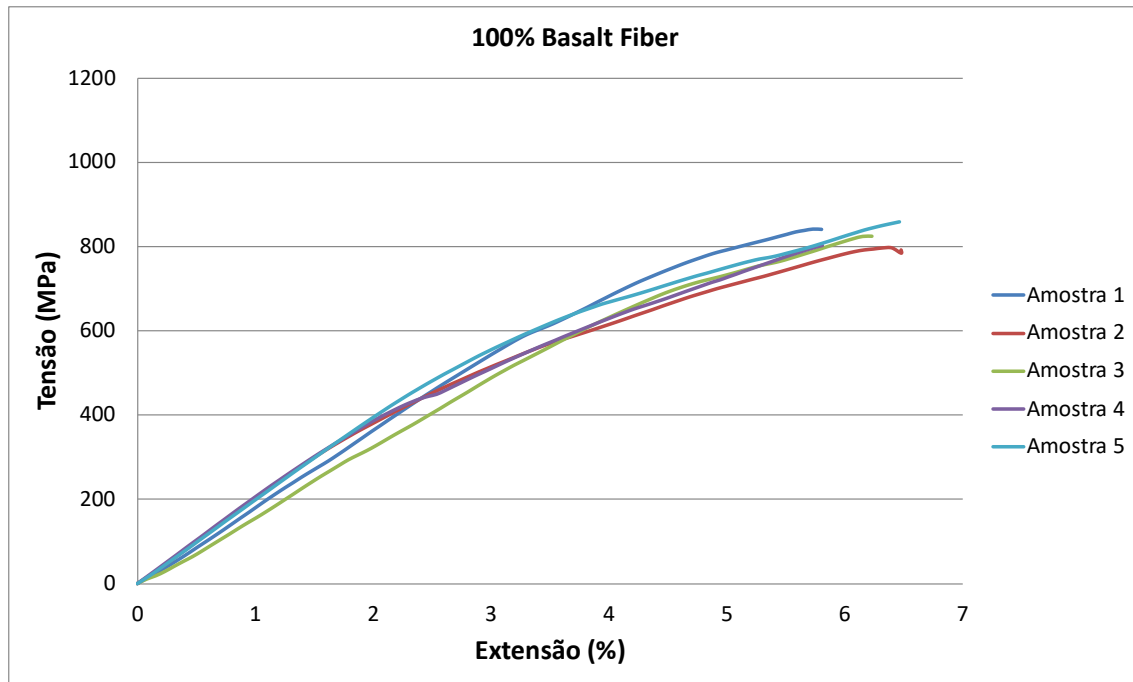


Figura 43 Diagrama de tensão vs extensão do BCR 100% Basalto

No Quadro 23, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR composto por 100% Basalto

Quadro 23 Propriedades detalhadas do BCR 100% Basalto.

Amostra	Tensão (MPa)	E(%)	E (Gpa)	Energia (J)
1	841	5,8	192,8	179
2	796,4	6,5	201,4	182
3	824,3	6,2	180,5	190
4	803	5,8	199,8	135,1
5	859,4	6,5	200,9	152,9
Média	824,8	6,2	195,1	167,8
Des. Pad.	20,3	0,3	6,7	19
CV	2%	5%	3%	11%

4.1.4 BCR_H1 (25% Vidro; 25% Carbono; 25% PP; 25% Dynema®)

Na Figura 44, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da hibridização de fibras no núcleo de reforço (25% Vidro; 25% Carbono; 25% PP; 25% Dynema®).

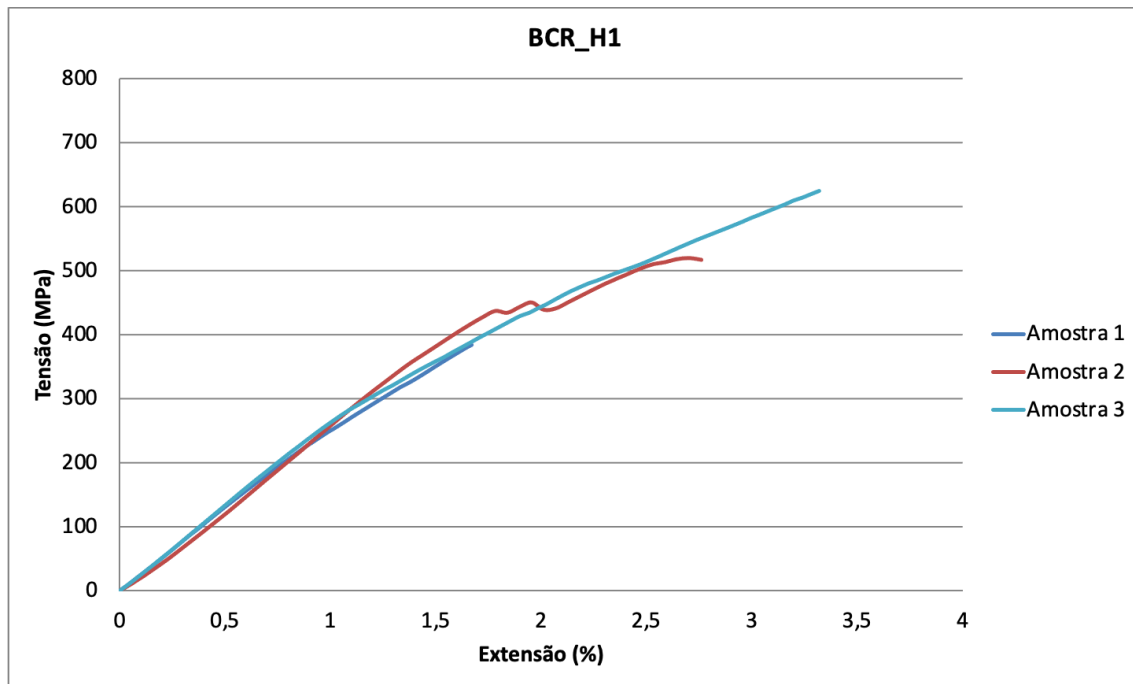


Figura 44 Diagrama de tensão vs extensão do BCR_H1.

No Quadro 24 podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR híbrido composto por: 25% Vidro; 25% Carbono; 25% PP; 25% Dynema®.

Quadro 24 Propriedades detalhadas do BCR_H1.

Amostra	Tensão (MPa)	E (%)	E (GPa)	Energia (J)
1	384,1	1,7	269,3	16,6
2	519,7	2,8	255,7	33,9
3	624,6	3,3	269,6	44,2
Média	509,4	2,6	264,9	31,6
Desp	83,6	0,6	6,1	10
CV	16%	24%	2%	32%

4.1.5 BCR_H2 (33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular)

Na Figura 45, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da hibridização de fibras no núcleo de reforço (33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular).

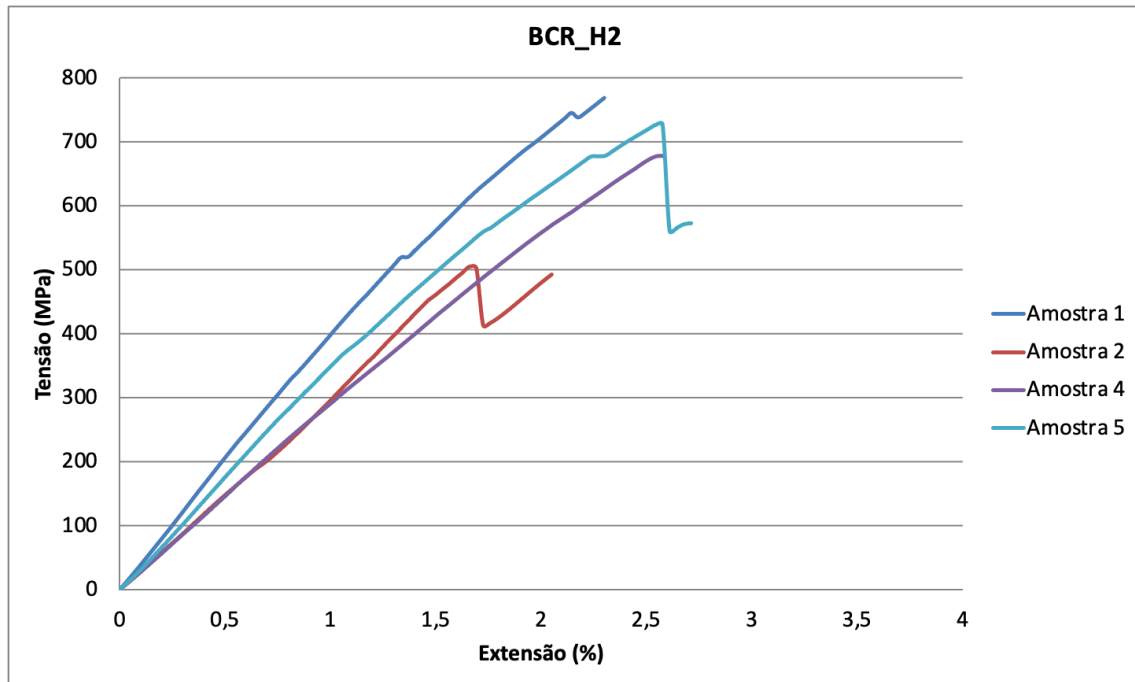


Figura 45 Diagrama de tensão vs extensão do BCR_H2.

No Quadro 25, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR híbrido composto por: 33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular.

Quadro 25 Propriedades detalhadas do BCR_H2.

Amostra	Tensão (MPa)	E (%)	E (GPa)	Energia (J)
1	8516,9	504,8	296,6	36,7
2	12990,9	678	294,7	39,1
3	12637,7	727,3	356,4	70,6
Média	11381,8	636,7	315,9	48,8
Desp	1910	87,9	27	14,5
CV	17%	14%	9%	30%

4.1.6 BCR_H3 (33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polipropileno)

Na Figura 46Figura 45, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da hibridização de fibras no núcleo de reforço (33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polipropileno).

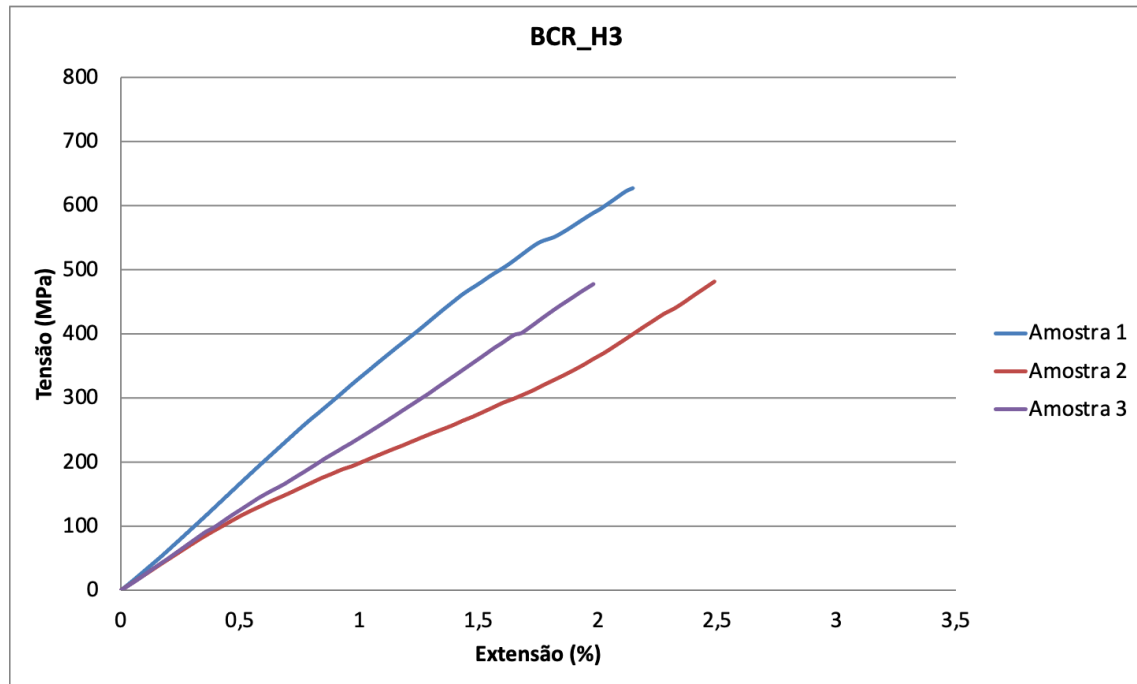


Figura 46 Diagrama de tensão vs extensão do BCR_H3.

No Quadro 26, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR híbrido composto por: 33%Vidro; 33%Carbono; 33%Polipropileno.

Quadro 26 Propriedades detalhadas do BCR_H3.

Amostra	Tensão (MPa)	E(%)	E (GPa)	Energia (J)
1	627,2	2,1	329,3	31,7
2	481,5	2,5	240	26,7
3	477,6	2	258,8	25
Média	528,8	2,2	276	27,8
Desp	65,6	0,2	35,5	2,6
CV	12%	9%	13%	9%

4.1.7 BCR_H4 (33%Vidro; 33% Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular; 33%Polipropileno)

Na Figura 47, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da hibridização de fibras no núcleo de reforço (33%Vidro; 33% Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular; 33%Polipropileno).

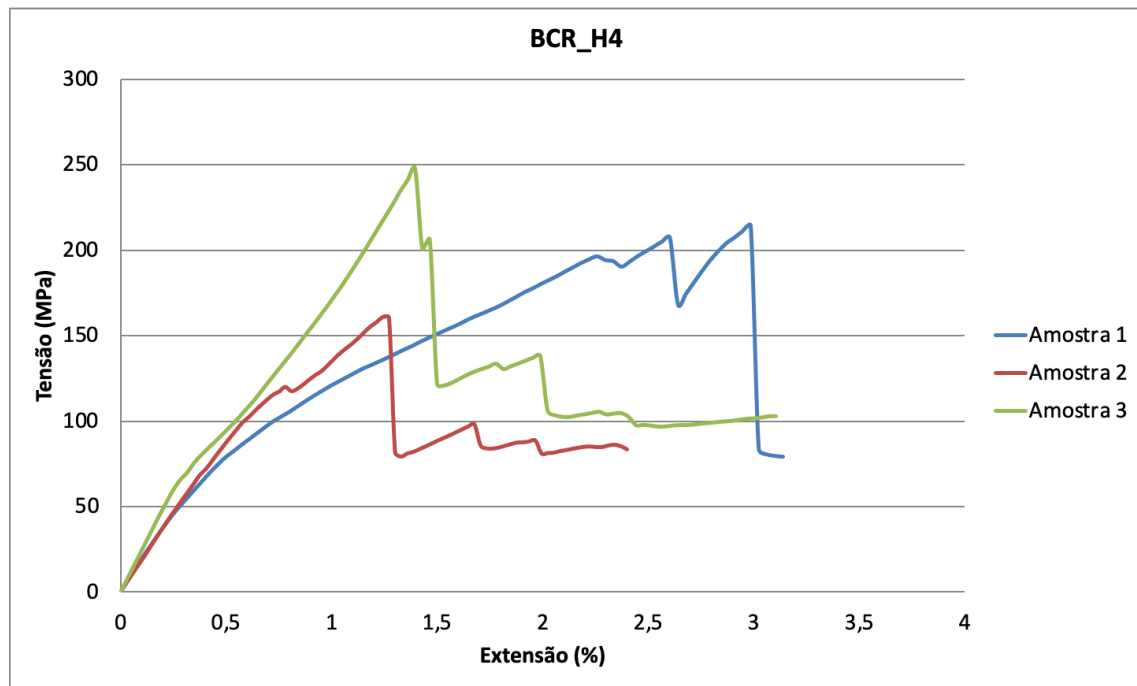


Figura 47 Diagrama de tensão vs extensão do BCR_H4.

No Quadro 27, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR híbrido composto por: 33% Vidro; 33% Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular; 33% Polipropileno.

Quadro 27 Propriedades detalhadas do BCR_H4

Amostra	Tensão (MPa)	E(%)	E (GPa)	Energia (J)
1	214,4	3,1	165,3	38,5
2	160,9	2,4	185,3	16,3
3	247,8	3,1	234,2	23,9
Média	207,7	2,9	194,9	26,2
Desp	31,2	0,3	26,2	8,2
CV	15%	11%	13%	31%

4.1.8 Análise e discussão dos resultados

Nesta secção analisam-se aos resultados obtidos, nomeadamente em relação à influência da utilização de diferentes materiais fibrosos no núcleo de reforço com o objetivo claro de se conferir um comportamento pseudodúctil. Naturalmente, e do ponto de vista teórico, é expectável que os resultados obtidos se assemelhem a um comportamento ilustrado na Figura 37. Para uma maior compreensão dos resultados serão segmentados em duas partes: (1) uma parte direccionada para a discussão dos BCR's

com monomaterial no núcleo de reforço e (2) uma segunda parte orientada para a análise de BCR's híbridos.

4.1.8.1 Análise e discussão de resultados dos BCR's com monomaterial no núcleo de reforço

Esta discussão de resultados será iniciada pela análise das propriedades dos BCR em que apenas foi utilizada uma tipologia de material fibroso no núcleo do varão compósito, nomeadamente: carbono, vidro e basalto. Assim, de forma a facilitar a interpretação dos resultados obtidos são apresentados no Quadro 28, os resultados médios das propriedades de cada um dos três BCR's.

Quadro 28 Resumo das propriedades do BCR's em monomaterial no núcleo.

BCR	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Energia (J)	Módulo de elasticidade (GPa)
Carbono	1018,8	3,2	97,8	438,8
Vidro	1010,5	5,2	94,4	273,2
Basalto	824,8	6,2	167,8	195,1

Assim, verifica-se que o BCR produzido contendo fibra de carbono no núcleo apresentou o valor mais elevado de tensão, tal como expectável, contudo ainda fica aquém do valor teórico para este tipo de composição. Tendo em consideração as propriedades da fibra de carbono, seria expectável que a tensão fosse cerca de quatro vezes superior e o alongamento cerca de duas vezes inferior. Este comportamento deve-se ao facto das fibras de carbono se apresentarem com um alinhamento imperfeito no sentido longitudinal, não sendo garantida uma tração uniforme no varão compósito quando sujeito a forças de tração. Para além disso, deve ter-se em consideração a provável rotação a que o filamento de carbono está sujeito aquando a sua inserção no núcleo de reforço, podendo traduzir-se numa perda de propriedades em tração, uma vez que desta forma está sujeito a cargas de corte internas. Estes fatores conjugados traduzem-se numa rotura sequencial das fibras e não numa rotura simultânea de todos os filamentos, tal como se pode ser observado na Figura 48, onde se ilustra a zona de rotura do BCR com fibra de carbono no núcleo.



Figura 48 Aspecto final de um varão com núcleo de fibra de carbono após o ensaio de tração.

Comportamento semelhante verifica-se no BCR de fibra de basalto, em que a tensão máxima fica aquém do expectável, devido ao não alinhamento das fibras no núcleo de reforço e à delaminação da interface fibra/matriz. A delaminação das fibras resulta ainda numa extensão superior à expectável.

No que diz respeito aos BCR com fibra de Vidro, apesar das propriedades não serem as teoricamente previstas as mesmas encontram-se dentro de uma gama expectável para este tipo de material compósito, não se verificando delaminações consideráveis, uma vez que a resistência da interface fibra-polímero é superior.

Assim, verifica-se que todos os BCR 's apresentam uma extensão mais elevada do que seria expectável, sendo estes valores justificáveis pela delaminação interna dos rovings de fibra no núcleo de reforço. Verifica-se igualmente que a delaminação é resultante da capacidade limitada com que a matriz transfere as cargas para e ao longo do núcleo de reforço.

Um outro aspeto importante que merece uma análise mais aprofundada diz respeito à absorção de energia. A absorção de energia até à rotura está diretamente relacionada com tenacidade do material, verificando-se que o BCR com fibra de basalto no núcleo de reforço apresenta um valor muito superior quando comparado com os restantes. Este valor deve-se ao facto da extensão apresentada ser mais elevada quando comparada com o BCR de fibra de carbono, apesar da tensão ser ligeiramente inferior.

A análise da pseudoductilidade é efetuada a partir da diferença entre a deformação obtida na tensão de rotura e a deformação obtida, nesse mesmo valor, no limite teórico elástico, tal como demonstra a figura seguinte (Figura 49). Este valor da deformação que caracteriza a pseudoductilidade assume a nomenclatura de ϵ_p .

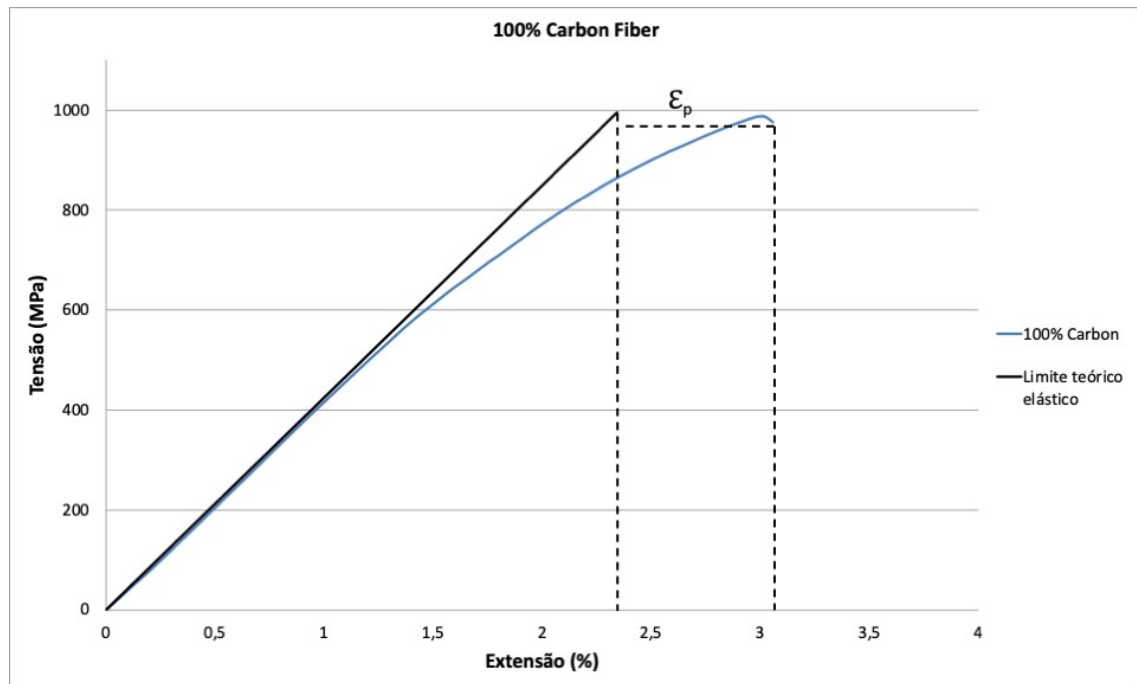


Figura 49 Explicação da metodologia de análise da Pseudoductilidade segundo a metodologia de (Fuller & Wisnom, 2014)

Os valores da variação da extensão entre a deformação na rotura e a deformação elástica teórica (ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%)), para os BCR's reforçados no núcleo com 100% Carbono, 100% Vidro e 100% Basalto, estão apresentadas no Quadro 29.

Quadro 29 Valores de ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%), para as amostras de BCR: 100% Carbono, 100% Vidro e 100% Basalto

BCR	ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%)
100% Carbono	0,75
100% Vidro	1,37
100% Basalto	1,39

Através dos resultados obtidos, verifica-se que os valores apresentados pelos BCR's de fibra de carbono estão próximos dos valores teóricos do limite elástico, uma vez que é um material que apresenta um comportamento rígido. Por outro lado, verifica-se que os BCR's de fibra de basalto e de vidro apresentaram um valor ligeiramente superior, muito devido ao facto de também apresentarem uma maior deformação na rotura e ao facto de ocorrerem delaminações internas no núcleo do varão.

4.1.8.2 Análise e discussão de resultados dos BCR's Híbridos

Nesta secção apresenta-se a discussão de resultados obtidos nos ensaios de tração em BCR's híbridos. Neste âmbito, importa refletir sobre a influência da utilização de um núcleo híbrido, naquilo que é o comportamento pseudoductil e na sua capacidade de absorção de energia. No Quadro 30 apresenta-se um resumo das propriedades obtidas.

Quadro 30 Resumo das propriedades do BCR's Híbridos no núcleo

BCR	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Energia (J)
100% Vidro	1010,5	5,2	273,2	94,4
BCR_H1	509,4	2,6	264,9	31,6
BCR_H2	1381,8	2,4	315,9	48,8
BCR_H3	528,8	2,2	276	27,8
BCR_H4	207,7	2,9	194,9	26,2

De uma forma geral, verificou-se uma variação acentuada das propriedades, o que é justificado pela própria hibridização (diferentes materiais) e pelo facto de existirem diferentes mecanismos de compatibilização entre a fibra e matriz, nomeadamente, no que diz respeito às pontes de ligação entre as moléculas. Este facto, associado à delaminação mais acentuada no núcleo de reforço, traduz-se nesta elevada variabilidade dos resultados.

Assim, no que diz respeito à tensão na rotura, verifica-se um decréscimo claro face ao BCR de referência (BCR 100% Vidro), particularmente no BCR_H4. A tensão de rotura dos varões BCR's _H1 e H3 é aproximadamente 50% do valor médio do varão de referência. Esta redução justifica-se pela menor percentagem de fibra de vidro no núcleo de reforço, casos em que apenas é utilizada uma percentagem de cerca de 25% de fibra de Vidro, tal como se pode observar nas diversas composições do BCR's Híbridos apresentados no Quadro 12.

Assim, importa sobretudo analisar a utilização de diferentes materiais fibrosos no núcleo de reforço e as suas propriedades. Verifica-se que no que diz respeito à hibridização, o BCR_H 2 apresentou o valor mais elevado de tensão máxima, face à introdução de 33% de fibra de Vidro e 33% de fibra de carbono no núcleo. Por outro lado, a ausência de fibra de carbono no núcleo de reforço, traduz-se numa queda abrupta das propriedades mecânicas, tal como é verificado no composto BCR_H4. Neste caso, a

ausência de fibra de carbono leva a uma diminuição da tensão máxima de cerca de 25%, quando comparado com as amostras que contêm fibra de carbono no núcleo de reforço. Verifica-se ainda que esta amostra (BCR_H4) apresenta o valor maior de extensão pelo facto de se utilizar duas fibras termoplásticas no núcleo de reforço, o que é visível no diagrama de tensão vs extensão das amostras testadas e apresentado na Figura 47. Contudo, verifica-se ainda que estas fibras termoplásticas, quando combinadas, não resultam no melhor desempenho no que diz respeito à absorção de energia, sendo mesmo observado o valor mais reduzido nesta configuração.

No que diz respeito à absorção de energia o melhor valor foi obtido pelo BCR_H2, justificável pela incorporação de fibra de vidro, carbono e polietileno de ultra alto peso molecular. Este comportamento pode ser justificado pela melhor compatibilidade das fibras de polipropileno com a matriz de epóxida, o que traduz um efetivo aproveitamento das suas propriedades.

Do ponto de vista de comportamento mecânico verifica-se que as amostras BCR_H2 e BCR_H3 e BCR_H4 apresentam uma redistribuição de cargas sequenciais entre as fibras, numa primeira fase de carbono e depois a fibra de vidro. Este facto demonstra que do ponto de vista mecânico consegue-se obter uma transferência de cargas sequencial, tal como era o objetivo. Contudo, na amostra BCR_3, esta transferência de cargas sequencial é mais dissimulada não estando bem assinalado esse comportamento. Provavelmente este fenómeno poderá estar associado à delaminação da interface entre as diferentes fibras e a matriz.

No que diz respeito à Pseudoductilidade, apresentam-se no Quadro 31 os resultados da deformação que a caracteriza (ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade) para cada uma das amostras.

Quadro 31 Valores de ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%), para as amostras de BCR_1, BCR_2, BCR_3 e BCR_4

BCR	ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%)
100% Vidro	1,37
BCR_H1	1,01
BCR_H2	1,12
BCR_H3	0,51
BCR_H4	2,65

Pela análise dos resultados obtidos verifica-se que apenas é possível concluir que a introdução de fibra de vidro, polietileno de ultra alto peso molecular e polipropileno, em semelhantes percentagens, resulta

num comportamento pseudoductil. Através da análise da Figura 50, é possível identificar a transferência sequencial de cargas em função da capacidade de resistência de cada uma das fibras que compõem o núcleo de reforço. Assim, a zona 1 diz respeito à fibra de vidro, seguindo-se a fibra de polipropileno, representado pela zona 2, e depois, a zona 3, da responsabilidade do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular. No que diz respeito aos valores ϵ_p , estes também demonstram a capacidade de induzir pseudoductilidade ao BCR_H4 pela introdução de fibras com extensão de rotura distintas, tendo-se mesmo obtido um valor de 2,65%, o que é bastante elevado face às restantes amostras. Na prática, verifica-se que este BCR tem a capacidade de estar sujeito a um alongamento de 2,65% além da extensão na tensão de cedência, ou seja, é capaz de desenvolver um patamar associado a deformações plásticas. Verifica-se ainda que cada uma das fibras possuiu um contributo distinto para o comportamento pseudoductil, nomeadamente a fibra de vidro em cerca de 9%; a fibra de polipropileno em cerca de 28% e a fibra de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular cerca de 63%.

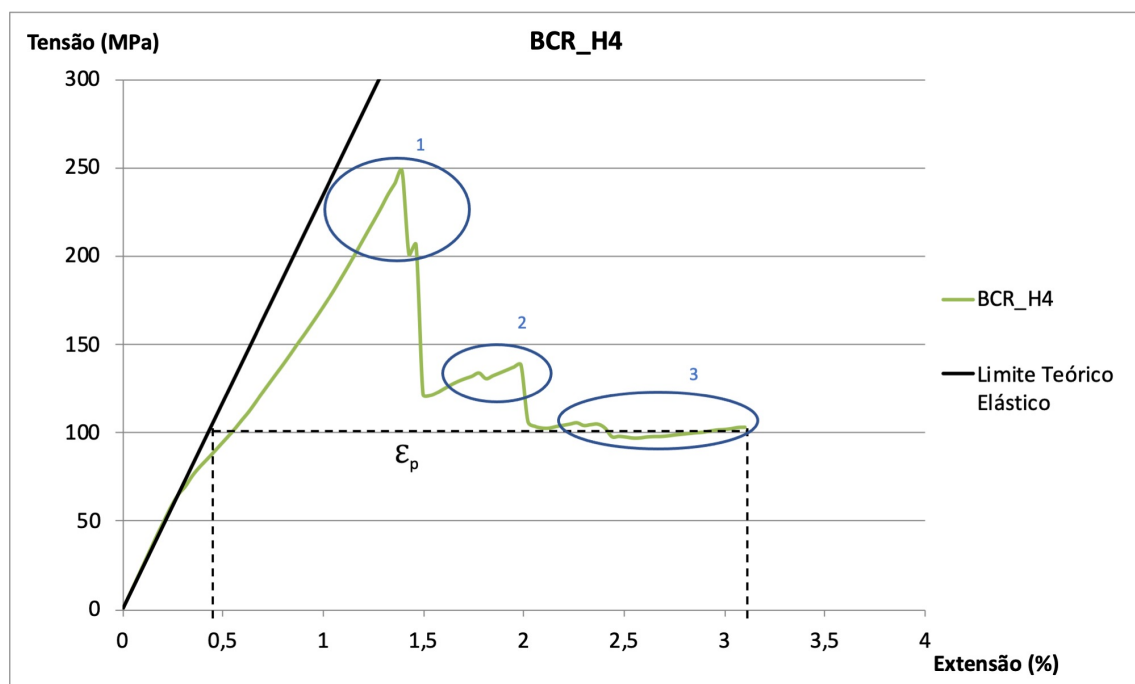


Figura 50 Resultados da ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade da amostra BCR_H4

As restantes amostras (BCR_1 a BCR_3) o facto de possuírem, por um lado, fibra de carbono juntamente com fibra de vidro faz com que este comportamento seja difícil de verificar. Este facto deve-se ao valor reduzido de alongamento máximo que estas fibras suportam.

4.2 Pseudoductilidade a partir da incorporação de materiais dúcteis

No decorrer desta secção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na campanha experimental de ensaios de tração em varões compósitos com núcleo constituído por materiais dúcteis, nomeadamente com fibra de vidro e aço e fibra de basalto com aço.

4.2.1 BCR's com fibra de vidro e aço

Na Figura 51 é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de Vidro e filamento de Aço com 1,6 mm de diâmetro.

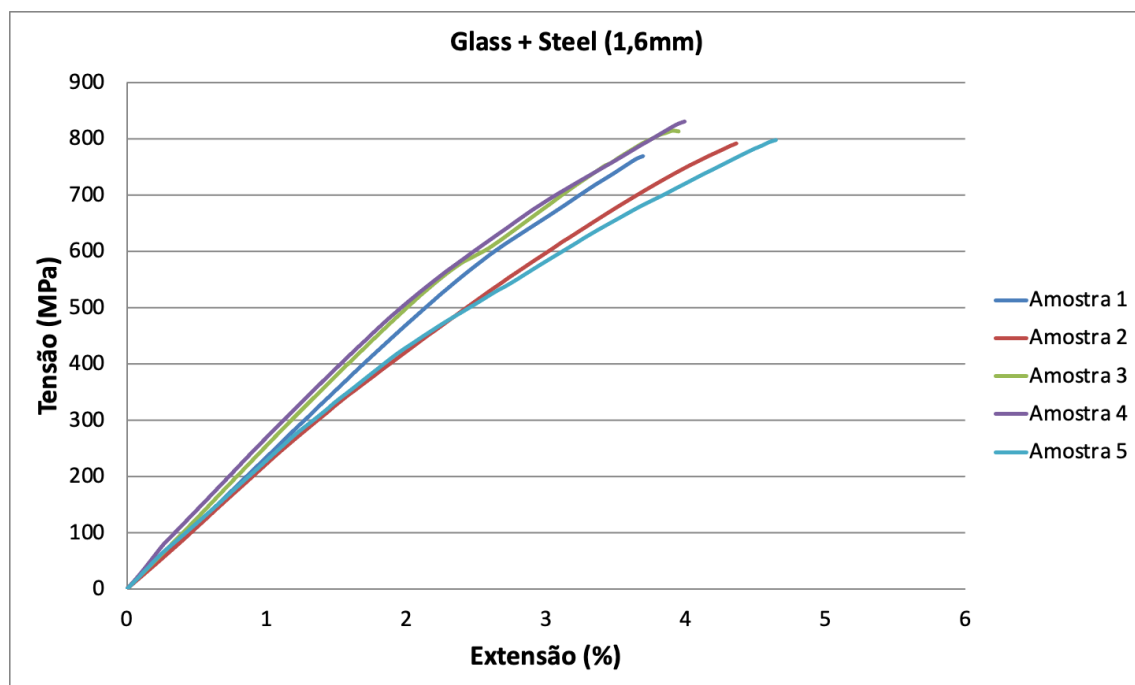


Figura 51 Diagrama de tensão vs extensão do BCR com Fibra de Vidro e Aço (1,6mm).

No Quadro 32, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de Vidro e Aço com 1,6 mm de diâmetro.

Quadro 32 Propriedades detalhadas do BCR com Fibra de Vidro e Aço (1,6mm).

Amostra	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Energia (J)
1	769,2	3,7	223,1	61,7
2	791,8	4,4	215,3	73,8
3	814,5	3,9	245,1	60,8
4	830,8	4	313,1	68
5	797,9	4,6	258,3	77
Média	800,8	4,1	251	68,3
DP	17,4	0,3	27,8	5,7
CV	2%	7%	11%	8%

Na Figura 52 é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de Vidro e filamento de aço com 2 mm de diâmetro.

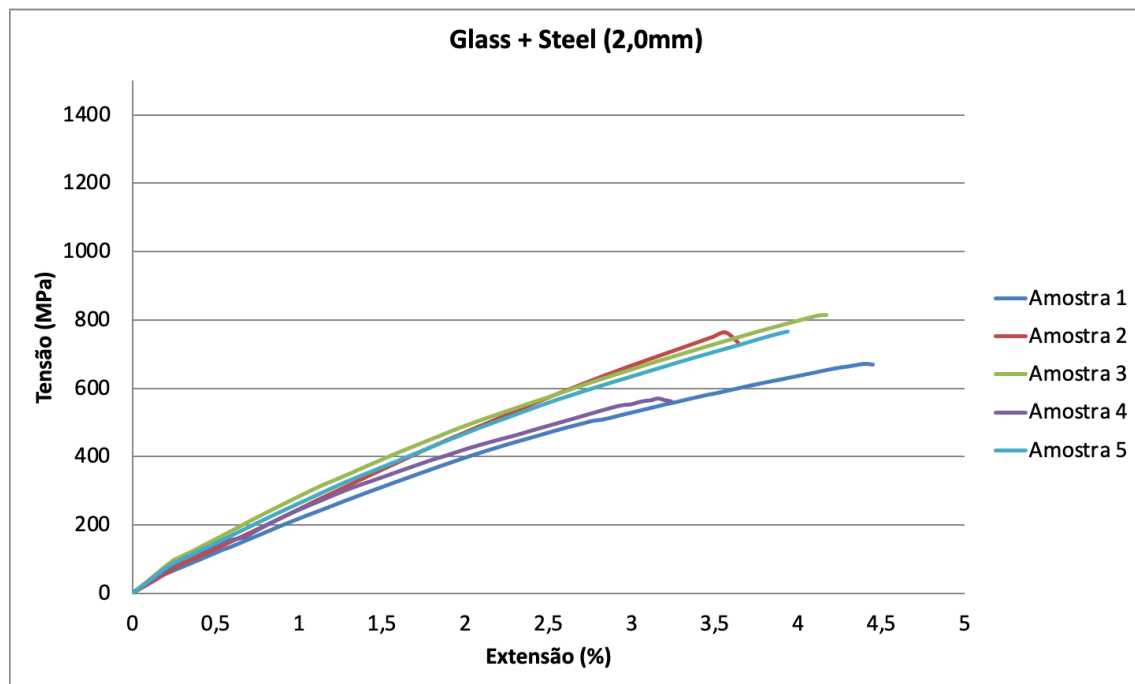


Figura 52 Diagrama de tensão vs extensão do BCR com Fibra de Vidro e Aço (2 mm).

No Quadro 32, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de Vidro e Aço com 2 mm de diâmetro.

Quadro 33 Propriedades detalhadas do BCR com Fibra de Vidro e filamento de Aço (2mm).

Amostra	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Energia (J)
1	672,3	4,4	204,8	64,7
2	763,2	3,6	267,1	63,5
3	815,3	4,2	342,6	62,1
4	570,6	3,2	326,8	39
5	766,7	3,9	269,8	59,5
Média	717,6	3,9	282,2	57,8
DP	76,9	0,4	42	7,5
CV	11%	9%	15%	13%

Na Figura 53, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de Vidro e Aço com 2,5 mm de diâmetro.

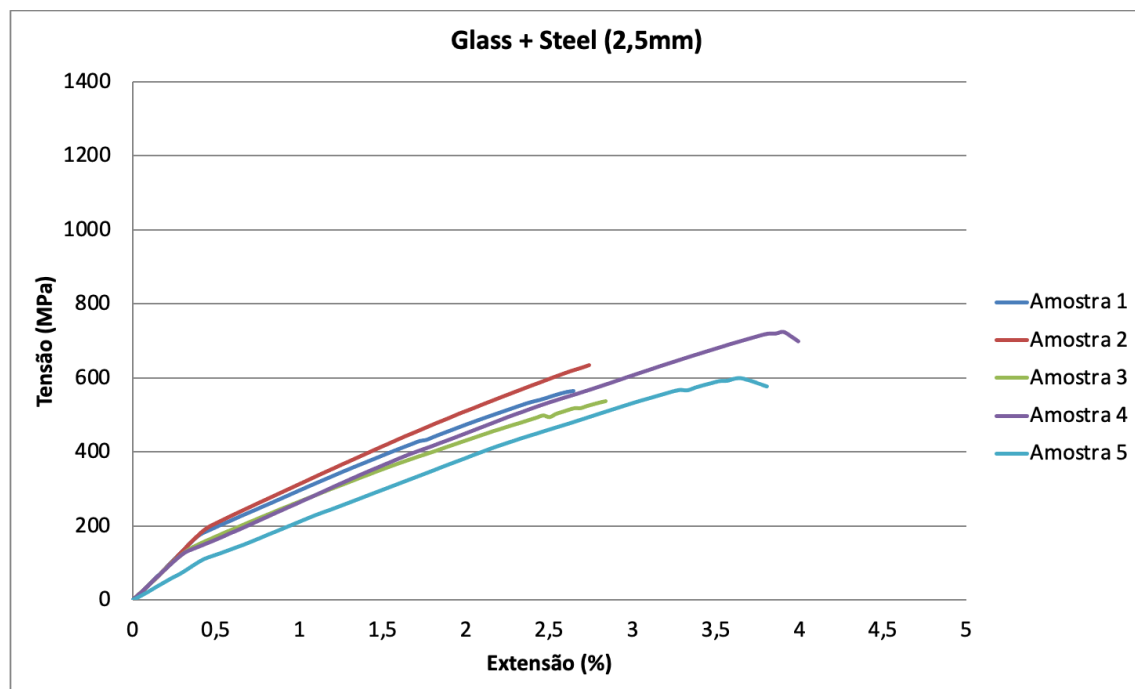


Figura 53 Diagrama de tensão vs extensão do BCR com Fibra de Vidro e Aço (2,5 mm).

No Quadro 34, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de Vidro e Aço com 2,5 mm de diâmetro.

Quadro 34 Propriedades detalhadas do BCR com Fibra de Vidro e Aço (2,5mm).

Amostra	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Energia (J)
1	563,5	2,6	450,8	30,8
2	634,6	2,7	452,8	39,3
3	537,7	2,8	438	32,3
4	724,7	4	425,1	54,4
5	597,2	3,8	269,3	59,2
Média	611,5	3,2	407,2	43,2
DP	54,5	0,6	55,2	10,9
CV	9%	17%	14%	25%

4.2.2 Resultados dos BCR´s com fibra de basalto e filamento de aço

Ao longo do presente subcapítulo serão apresentados os diversos diagramas de tensão vs extensão dos BCR desenvolvidos com a incorporação de basalto e filamento de aço, em que neste último são utilizados três diâmetros, respetivamente 1,6; 2 e 2,5 mm.

Assim, na Figura 54, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de basalto e filamento de aço com 1,6 mm de diâmetro.



Figura 54 Diagrama de tensão vs extensão do BCR com fibra de basalto e filamento aço (1,6 mm).

No Quadro 35, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de basalto e filamento de aço com 1,6 mm de diâmetro.

Quadro 35 Propriedades detalhadas do BCR com fibra de basalto e filamento de aço (1,6mm).

Amostra	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Energia (J)
1	721,78	5,66	207,55	110,75
2	693,94	5,21	191,76	111,79
3	852,63	3,78	264,04	82,56
4	886,21	6,45	246,13	125,02
Média	788,64	5,28	227,37	107,53
DP	80,78	0,78	27,71	12,48
CV	10%	15%	12%	12%

Na Figura 55 é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de basalto e filamento de aço com 2 mm de diâmetro.

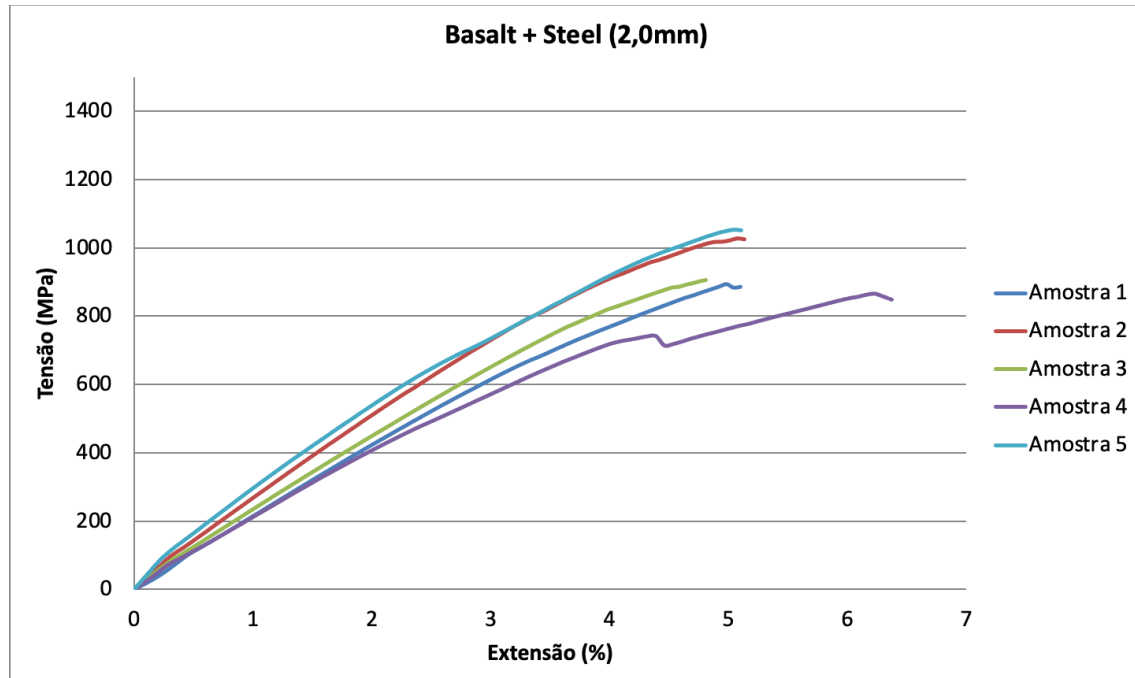


Figura 55 Diagrama de tensão vs extensão do BCR com Fibra de Basalto e Aço (2 mm).

No Quadro 36, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de basalto e filamento de aço com 2 mm de diâmetro.

Quadro 36 Propriedades detalhadas do BCR com fibra de basalto e filamento de aço (2 mm).

Amostra	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (Mpa)	Energia (J)
1	893,7	5,1	255,3	96,5
2	1027,5	5,1	323,9	98,6
3	906,9	4,8	248,3	97,1
4	866,8	6,4	209	128,9
5	1053,5	5,1	363,2	90,5
Média	949,7	5,3	279,9	102,3
Desp	72,6	0,4	50,9	10,6
CV	8%	8%	18%	10%

Na Figura 56, é apresentado o diagrama de Tensão vs Extensão do BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de basalto e filamento de aço com 2,5 mm de diâmetro.

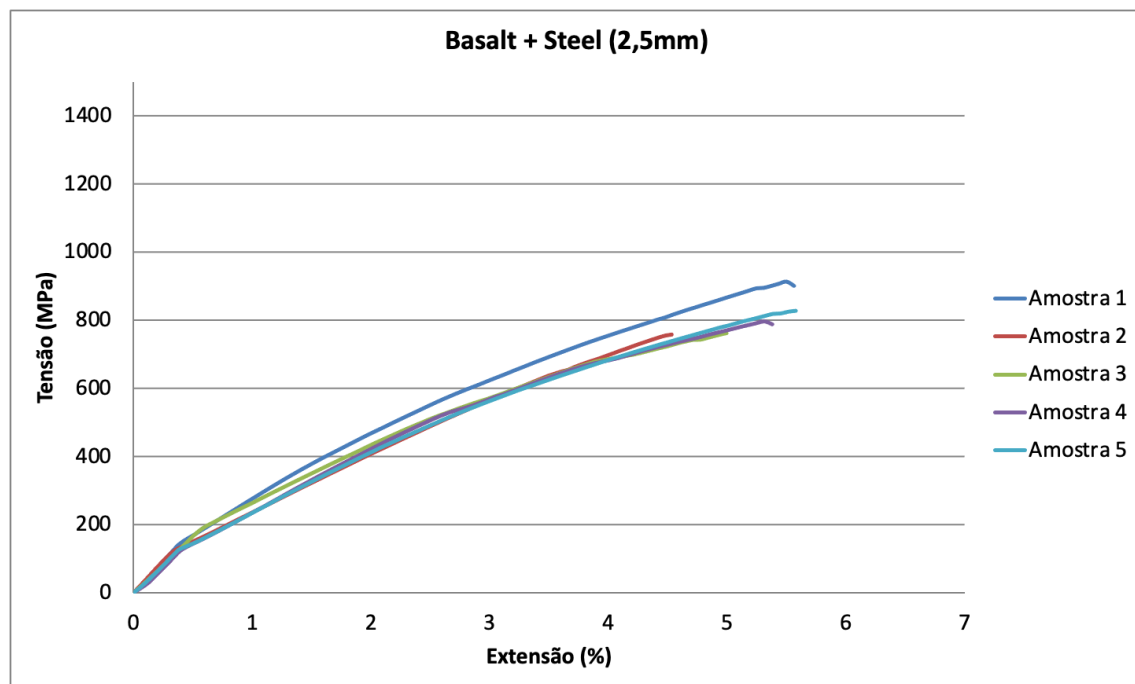


Figura 56 Diagrama de tensão vs extensão do BCR com fibra de basalto e filamento de aço (2,5 mm).

No Quadro 29, podem ser analisadas em detalhe as propriedades das várias amostras de BCR desenvolvido a partir da integração de fibra de basalto e filamento de aço com 2,5 mm de diâmetro.

Quadro 37 Propriedades detalhadas do BCR com fibra de basalto e filamento de aço (2,5 mm).

Amostra	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Energia (J)
1	913,1	5,6	391,9	91,2
2	757,8	4,5	368,7	61,9
3	762	5	334,9	73,8
4	796,4	5,4	357,4	95,8
5	827,5	5,6	351,7	96,8
Média	811,4	5,2	360,9	83,9
DP	47,2	0,4	15,5	12,8
CV	6%	7%	4%	15%

4.2.3 Análise e discussão dos resultados

Com a análise dos resultados obtidos nos diferentes materiais pretende-se responder a questões relacionadas com o desempenho dos BCR's desenvolvidos e procurar respostas para à questão relacionada com a forma como o aço induz um comportamento pseudoductil e uma maior absorção de energia nos BCR's com Vidro e Basalto.

Para responder a esta questão é importante numa primeira fase analisar os diversos resultados obtidos no decorrer da caracterização dos BCR's. De forma a facilitar a leitura e interpretação é apresentado um quadro resumo das propriedades obtidas (Quadro 38 Resumo das propriedades mecânicas dos BCR's desenvolvidos com a incorporação de aço no núcleo de reforço).

Através da análise dos resultados é possível verificar que no caso dos BCR's com fibra de vidro e aço introduzidos no núcleo de reforço, existe uma perda da resistência máxima com o aumento da percentagem de aço. Este facto deve-se à redução da quantidade de fibra em detrimento do aço, uma vez que a fibra de vidro possui um valor de tensão de rotura bastante superior ao aço, de aproximadamente sete vezes superior. A diferença de propriedades entre o aço e a fibra de vidro é menos acentuada quando os mesmos são utilizados em simultâneo no núcleo de reforço do BCR.

Quadro 38 Resumo das propriedades mecânicas dos BCR 's desenvolvidos com a incorporação de aço no núcleo de reforço

BCR	% de fibra	% de Aço	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Energia (J)
100% Vidro	100	0	1010	5,2	273,2	94,4
Vidro + Aço 1,6 mm	80	20	800,8	4,1	251	68,3
Vidro + Aço 2 mm	68	32	717,6	3,9	282,2	57,8
Vidro + Aço 2,5 mm	56	44	611,5	3,2	407,2	43,2
100% Basalto	100	0	824,8	6,2	195,1	167,8
Basalto + Aço 1,6 mm	79	21	788,6	5,28	227,4	107,5
Basalto + Aço 2 mm	70	30	949,7	5,3	279,9	102,3
Basalto+ Aço 2,5 mm	52	47	811,4	5,2	360,9	83,9

No que diz respeito à extensão, seria expectável que, à medida que a quantidade de aço fosse aumentando, o alongamento do BCR se aproximasse cada vez mais do aço, o que não se verifica. Este facto pode ser justificado pela delaminação (*debonding*) verificada no interior do núcleo de reforço, e em particular entre as fibras de vidro. No que diz respeito ao módulo de elasticidade verifica-se uma tendência para o seu aumento, em função do aumento da quantidade de aço introduzida. A tese de delaminação da fibras ganha ainda maior evidência quando se observa uma tendência crescente do módulo de elasticidade. Ou seja, um módulo de elasticidade superior representa uma maior efetividade na adesão dos diferentes componentes que constituem o núcleo (fibra+resina+aço).

Importa também analisar a capacidade de absorção de energia de cada um dos BCR 's desenvolvidos e na pseudoductilidade. Assim, estabeleceram-se correlações entre o teor em aço e a capacidade de absorção de energia dos varões que podem ser observadas na Figura 57.

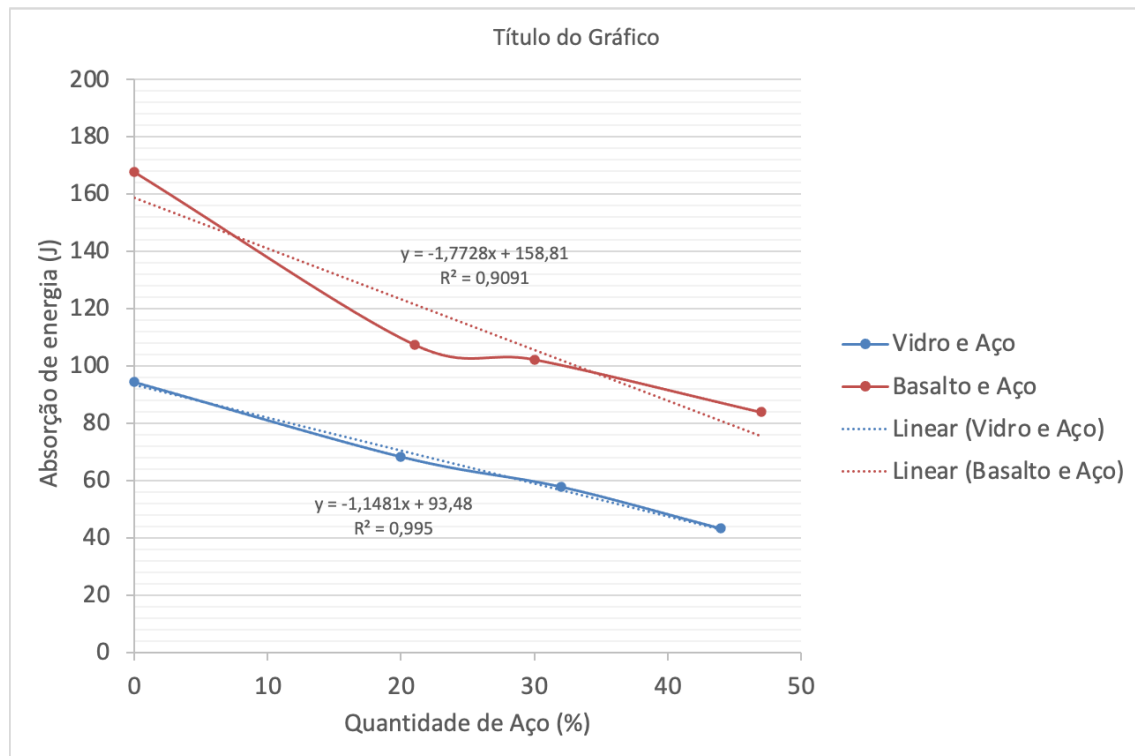


Figura 57 Relação entre a absorção de energia e a quantidade de aço

Como se pode verificar é importante analisar a capacidade absorção de energia e pseudoductilidade em duas perspetivas: (1) influencia da quantidade de aço combinado com a fibra de Vidro e a Fibra de Basalto (2) combinação das fibras de vidro e fibra de basalto gamas de BCR's.

No que diz respeito à influência do teor em aço na absorção de energia, verifica-se que a quantidade de aço influencia negativamente o valor da absorção de energia, variando de forma inversa à capacidade de absorção de energia. Esta relação resulta na regressão linear com proporcionalidade inversa com um valor de coeficiente de determinação r^2 superior a 0.9 e praticamente igual a 1 no caso do aço estar combinado com fibras de basalto e vidro respetivamente. Assim, verifica-se que o facto de se introduzir aço no núcleo de reforço não aumenta a absorção de energia do BCR. Este resultado pode resultar do decréscimo da extensão plástica e com a redução da resistência à tração.

Em segundo lugar é importante compreender que a absorção de energia é maior nas amostras em que as fibras de basalto são combinadas com o aço devido ao valor da extensão na rotura ser superior ao da fibra de vidro em cerca de 1%. Este aumento traduz-se num alongamento maior para praticamente o mesmo nível de carga.

Quando se efetua uma comparação do valor da absorção de energia dos BCR's desenvolvidos apenas com basalto no interior e os BCR's com a hibridização com aço, denota-se uma perda na capacidade de absorção de energia em cerca de 35% (relação do Quadro 23 e o Quadro 38). Resultado semelhante verifica-se no caso da fibra de vidro.

No que à Pseudoductilidade diz respeito foi utilizada a metodologia baseada em (Fuller & Wisnom, 2014), tal como mencionado anteriormente. Assim, o Quadro 33 apresenta os valores da ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade dos BCR's de Vidro e Basalto com aço.

Quadro 39 ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%) dos BCR's de Vidro e Basalto com aço.

BCR	ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%)
100% Vidro	1,37
Glass + Steel (1,6 mm)	1,53
Glass + Steel (2 mm)	1,76
Glass + Steel (2,5 mm)	2,33
100% Basalto	1,39
Basalt + Steel (1,6 mm)	2,24
Basalt + Steel (2 mm)	2,26
Basalt + Steel (2,5 mm)	2,35

Os resultados obtidos podem ser analisados em duas vertentes, nomeadamente, a influência da incorporação de aço em BCR's de fibra de vidro e nos BCR's com fibra de basalto.

No que diz respeito aos BCR's de fibra de vidro, verifica-se que a hibridização do núcleo com aço induz um efeito crescente da pseudoductilidade, ainda que de forma mais reduzida nos BCR's com aço de 1,6 mm de diâmetro, ou seja, com apenas 20% em relação à quantidade de fibra de vidro. A pseudoductilidade é mais acentuada no BCR com uma quantidade de cerca de 44% de aço, como era expectável dada a ductilidade intrínseca do aço e à menor quantidade de fibra de vidro. Na Figura 58 é possível avaliar a diferença de comportamento mecânico da amostra sem aço e com a introdução de aço no núcleo de reforço nas diferentes percentagens.

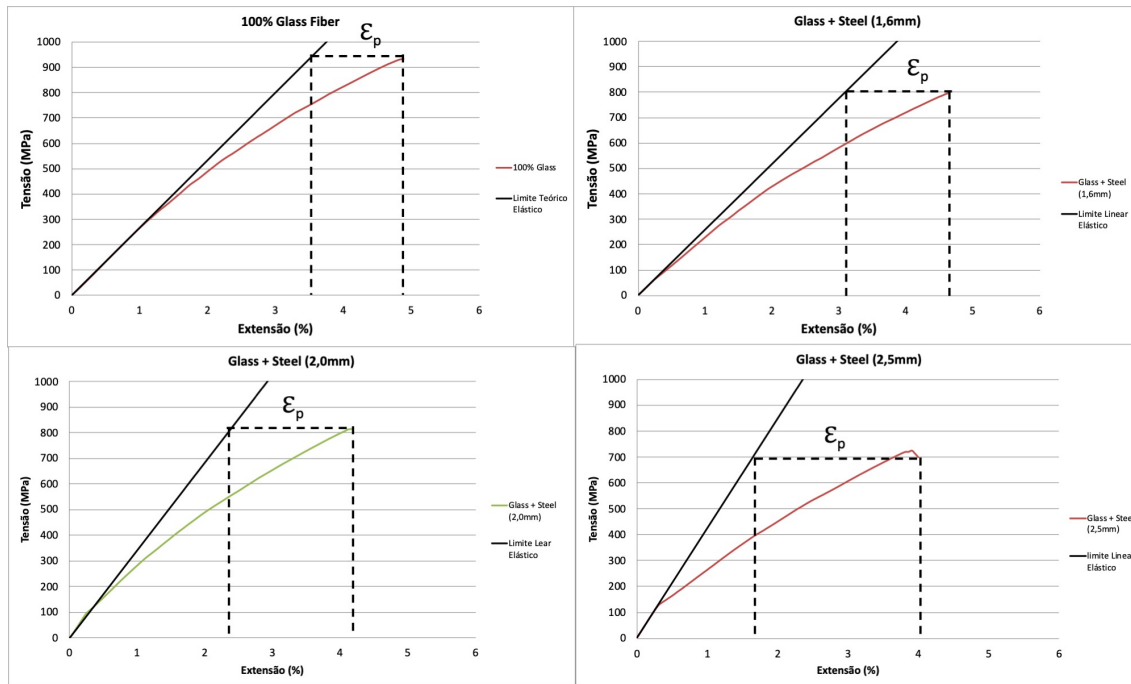


Figura 58 Comparação gráfica do valor da ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade das amostras: BCR: 100% Vidro (Superior Esquerdo); BCR: Glass + Steel (1,6 mm) (Superior Direito); BCR: Glass + Steel (2 mm) (Inferior esquerdo); BCR: Glass + Steel (2,5 mm) (Inferior Direito)

Verifica-se que o BCR com 44% de filamento de aço (BCR: Glass + Steel (2,5 mm)) induz no compósito final um comportamento dúctil, semelhante ao aço, onde se verifica que após a fratura dos filamentos de fibra de vidro, as cargas são transferidas para o aço que assume a capacidade de carga do compósito.

No que diz respeito aos BCR's com basalto e aço no núcleo de reforço verifica-se um comportamento semelhante, ou seja, quanto maior a quantidade de aço no núcleo de reforço, maior a deformação pseudoductilidade. A grande diferença, quando comparado com o BCR de fibra de vidro, é no efeito de introdução de quantidades reduzidas de aço. O comportamento pseudoductil desta tipologia aumenta consideravelmente entre a amostra 100% de basalto e a amostra com cerca de 21% de aço.

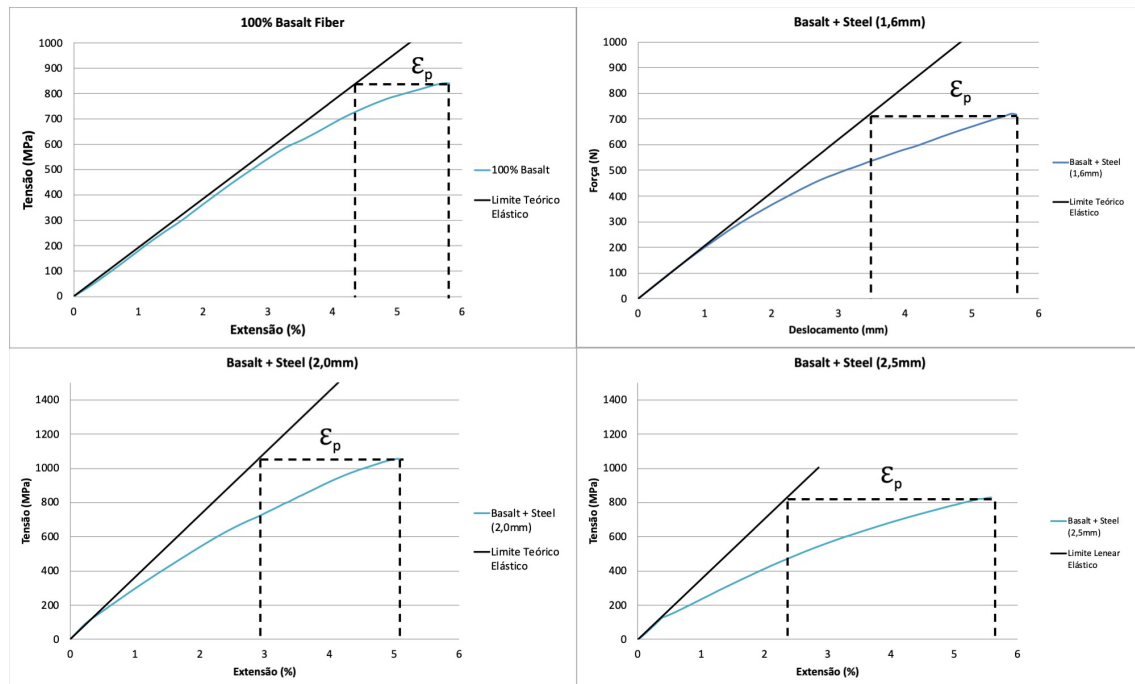


Figura 59 Comparação gráfica do valor da ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade das amostras: BCR: 100% Basalto (Superior Esquerdo); BCR: Basalto + Steel (1,6 mm) (Superior Direito); BCR: Basalto + Steel (2 mm) (Inferior esquerdo); BCR: Basalto + Steel (2,5 mm) (Inferior Direito)

Na Figura 50 avalia-se a correlação entre o teor de aço no BCR e pseudoductilidade a partir da deformação plástica, ϵ_p . Assim, verifica-se que a influencia da quantidade de aço no desenvolvimento da pseudoductilidade depende da fibra com que se combina (vidro ou basalto). No caso do BCR de Basalto, verifica-se um comportamento pseudoductil mais acentuado para quantidade de aço mais reduzidas, sendo marginal a melhoria que se observa após a adição de 21% de aço (5%). Por outro lado, o BCR reforçado no núcleo com fibra de vidro e filamento de aço, apresenta uma pseudoductilidade em crescente em função da quantidade de aço. Na Figura 60, podem ainda ser observadas as equações que podem traduzir o valor do comportamento pseudoductil em função da quantidade de aço, obtidas a partir das curvas de tendência dos valores obtidos experimentalmente. Estas curvas apresentam uma r próximo de 1, o que significa que pode representar uma metodologia de calculo fiável para a determinação da pseudoductilidade neste materiais, com base no número de amostras analisadas.

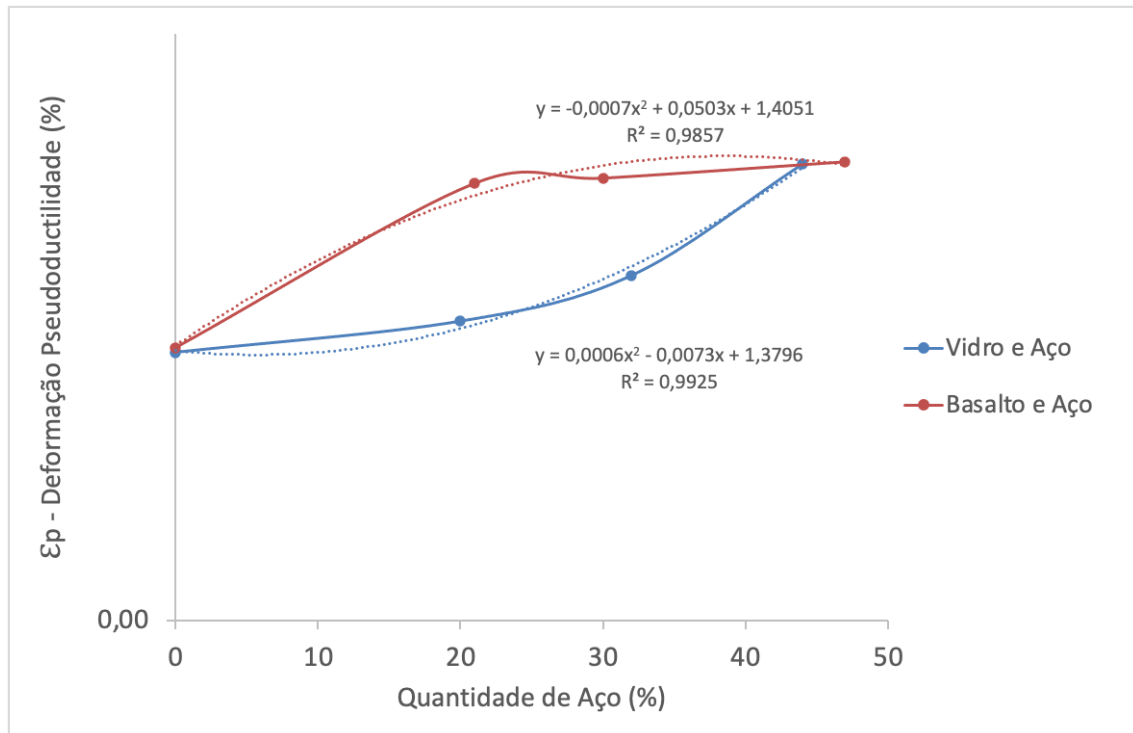


Figura 60 Efeito da inserção de aço nas amostras BCR com Vidro e Basalto, na ϵ_p - Deformação Pseudoductilidade (%)

4.2.4 Considerações finais

No decorrer do presente trabalho de desenvolvimento de BCR's híbridos com diferentes materiais fibrosos com diferentes alongamentos na rotura, foi possível retirar conclusões sobre a hibridização para induzir a pseudoductilidade e a capacidade de absorção de energia. Assim, foi possível concluir que a partir de fibras com diferentes alongamentos na rotura é possível induzir um comportamento pseudo-ductil em BCR's. Este comportamento é mais acentuado quando são utilizadas fibras que intrinsecamente já possuem um elevado alongamento na rotura, conseguindo-se transportar essa capacidade de alongamento para o BCR. Este comportamento é particularmente evidente quando se considera a combinação de fibras de vidro, polipropileno e polietileno de ultra alto peso molecular em igual volume.

Foi também possível concluir que a introdução de filamento de aço em BCR de fibra de vidro e BCR de basalto induz um comportamento pseudoductil. Foi possível concluir que o BCR com Vidro e o BCR com basalto apresentam comportamentos distintos, ao nível da pseudoductilidade, em função da quantidade de aço. No caso do BCR com fibra de vidro o aumento da pseudoductilidade é progressivo, ao contrário do BCR de basalto, caso em que a pseudoductilidade atinge um valor próximo do limite aos 21% de

incorporação de aço. No que diz respeito à absorção de energia foi possível concluir que a hibridização dos BCR's com de vidro e basalto com aço não aumenta a absorção de energia do BCR, pelo contrário, verifica-se um decréscimo da capacidade de absorção de energia. A perda da capacidade de absorção de energia é mais acentuada nos BCR's de fibra de vidro com filamento de aço.

5 Varões compósitos com capacidade de monitorização

De acordo com o referido anteriormente, a introdução da funcionalidade de monitorização em varões compósitos entrançados é, no âmbito do presente estudo, desenvolvida através de duas formas. Numa primeira abordagem, é estudada introdução de filamentos intrinsecamente condutores no processo de produção dos varões. Numa segunda abordagem é estudada a funcionalização de filamentos de vidro com materiais condutores, nomeadamente nanotubos de carbono.

Assim, ao longo do presente capítulo, são apresentados os resultados associados ao desenvolvimento, numa primeira fase dos filamentos e posteriormente o estudo dos filamentos funcionalizados nos varões compósitos, nomeadamente:

-5.1 são apresentados os resultados do estudo da piezoresistividade em filamentos condutores (Aço e Carbono);

-5.2 são apresentados os resultados da piezoresistividade em varões compósitos com filamentos condutores;

-5.3 são apresentados os resultados da piezoresistividade em filamentos de fibra de vidro funcionalizada com nanotubos de carbono;

-5.4 são apresentados os resultados da piezoresistividade em filamentos de fibra de vidro funcionalizada com nanotubos de carbono em diferentes percentagens;

-5.5 são apresentadas as conclusões.

5.1 Estudo da Piezoresistividade em Filamentos condutores (Aço e Carbono)

No âmbito deste capítulo são apresentados os resultados de determinação da variação da resistência elétrica dos filamentos condutores, individualmente, em função da extensão, no sentido de conferir a sua aptidão para serem introduzidos nos varões compósitos para efeitos de monitorização. Assim, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de avaliação do comportamento piezoresistivo em ensaios de tração cíclicos, dos filamentos condutores selecionados em carbono e em aço (Figura 61 e Figura 62).

Pela análise dos resultados obtidos, verifica-se que os filamentos de aço, à semelhança dos de fibra de carbono, apresentam baixa resistência elétrica (na ordem dos 0,8 e 3,4 Ω , respectivamente) e, portanto, elevada condutividade, fator que afeta a sua sensibilidade elétrica.

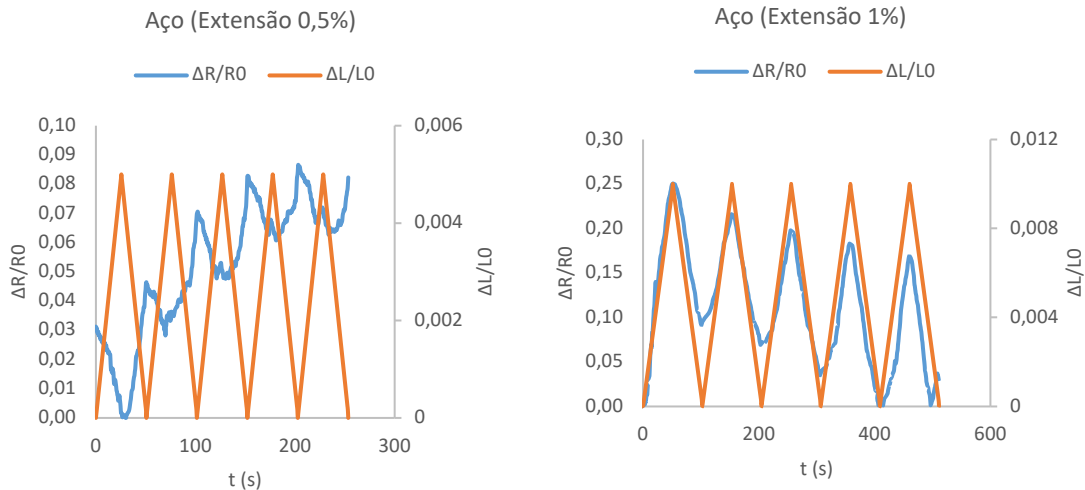


Figura 61. Variação da resistência fracional de filamentos de aço, submetidas a tração cíclica, com medição simultânea da resistência elétrica, aplicada a uma extensão de 0,5% e 1%.

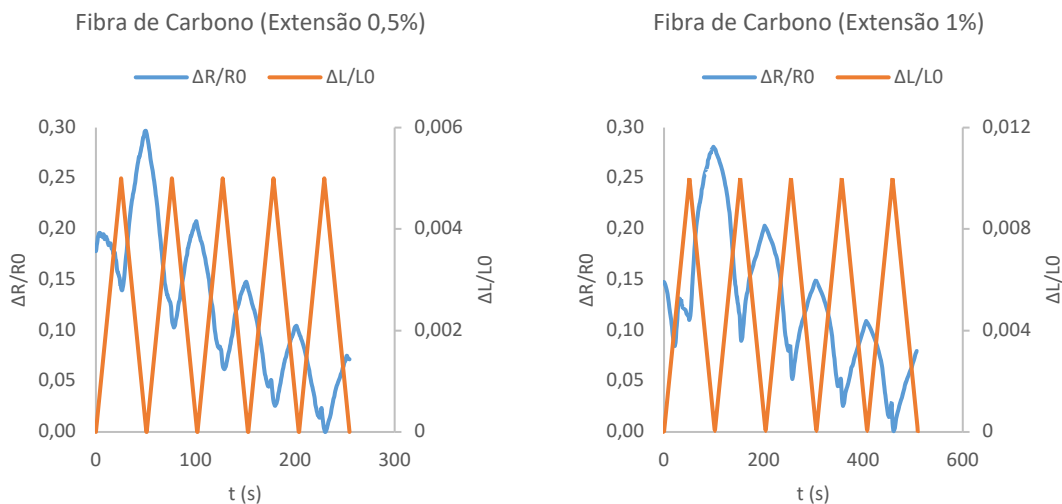


Figura 62. Variação da resistência elétrica de filamentos de fibra de carbono, submetidas a tração cíclica, aplicada uma extensão de 0,5% e 1%.

Contudo, destaca-se, ainda assim o filamento de aço, para uma extensão de 1%, que revelou uma capacidade de resposta em função da deformação bastante linear. Tal como se pode verificar no Quadro 40, o Gauge Factor determinado para estes filamentos revelou-se bastante elevado, comprovando assim

a reduzida sensibilidade deste tipo de soluções para efeito de monitorização. Dessa forma, não se antevê que aquando da introdução destes filamentos nos varões compósitos se verifiquem respostas lineares, e com a sensibilidade necessária para a função de monitorização, ou seja que seja possível correlacionar a resistência elétrica com a deformação mecânica.

Quadro 40 Gauge Factor determinado para os filamentos de aço e fibra de carbono.

Material	Deformação	
	0,5%	1,0%
Aço	11,6	18,3
Carbono	21,1	23,7

5.2 Piezoresistividade em Varões compósitos com filamentos condutores

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de avaliação do comportamento piezoresistivo em varões compósitos com filamentos condutores (Quadro 17) em ensaios de tração cíclicos. Os ensaios foram realizados em varões com distância entre amarras de 40 cm e distância entre eléctrodos de 50cm, sendo estes tracionados ao longo de 5 ciclos à velocidade de 2mm/min até à extensão de 0,5% e 1%.

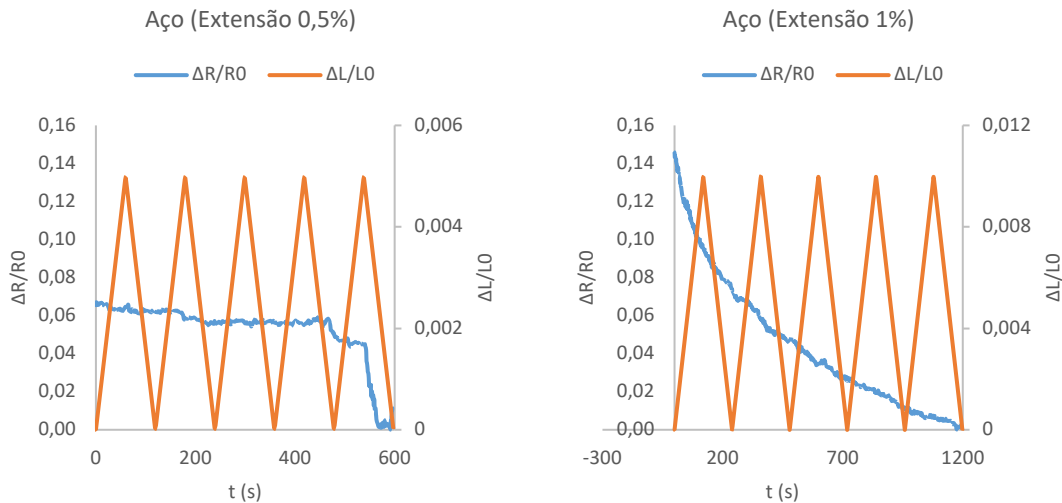


Figura 63. Variação da resistência fracional de varões compósitos funcionalizados com um filamento de aço inox, submetidas a tração cíclica, aplicada uma extensão de 0,5% e 1%.

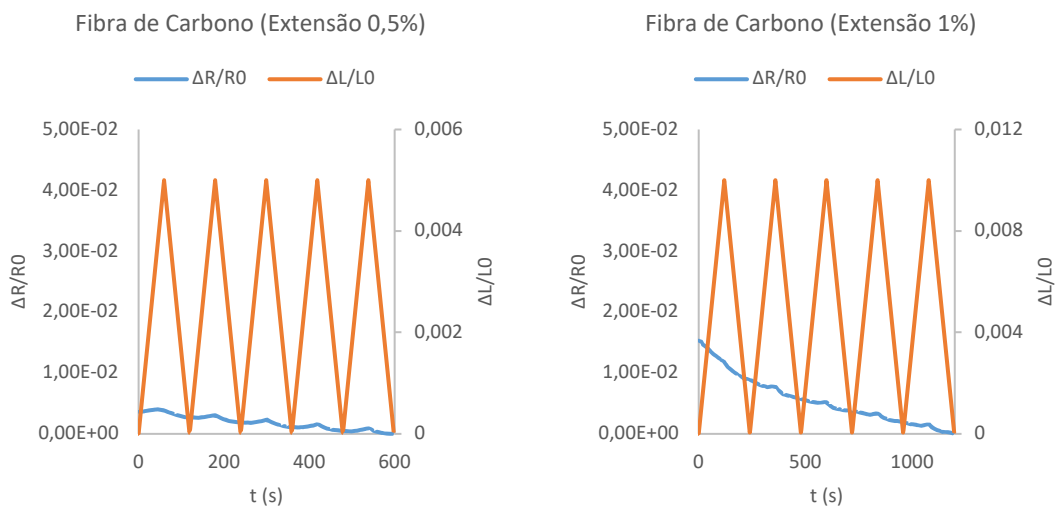


Figura 64. Variação da resistência fracional de varões compósitos funcionalizados com um filamento de fibra de carbono, submetidas a tração cíclica, aplicada uma extensão de 0,5% e 1%.

A incorporação dos filamentos condutores em varões compósitos entrançados, tal como expectável pelos resultados obtidos aos filamentos individualizados, não promoveu os resultados desejados, dada a baixa sensibilidade do material quando sujeito a forças de tração.

Quadro 41 Gauge Factor determinado para os varões com a incorporação de filamentos de aço e fibra de carbono.

Material	Deformação	
	0,5%	1,0%
Aço	0,2	1,4
Carbono	0,1	0,1

Deste modo, a partir deste estudo, verifica-se a não viabilidade de monitorização a partir da via da introdução de filamentos intrinsecamente condutores como elementos de monitorização, devido à elevada condutividade elétrica que os mesmos revelam. Esta conclusão é sustentada não apenas nos gráficos obtidos, como também nos valores de gauge factor determinados para os filamentos individualizados, quando submetidos a diferentes extensões.

Assim, uma vez que os materiais mais convencionais não apresentam resultados sustentáveis para o âmbito deste trabalho, pretende-se explorar a funcionalização de elementos fibrosos não condutores, nomeadamente a partir de nanotubos de carbono, dadas as suas características de condutividade. O objetivo consiste em avaliar o seu desempenho em termos da sua capacidade de monitorização. desempenhos, sobretudo no que à sensibilidade diz respeito.

5.3 Piezoresistividade em filamentos de fibra de vidro funcionalizada com nanotubos de carbono

No âmbito do presente subcapítulo são apresentados os resultados sobre o efeito do tratamento de superfície sobre a fibra de vidro. A presente análise é decomposta por uma análise de resistência elétrica medida à superfície e uma análise de FTIR.

A fim de avaliar preliminarmente a influência da aplicação dos pré-tratamentos da fibra de vidro, com recurso à formulação B descrita no Capítulo 3, que consiste na dispersão de 2 w/v % de CNT's, foi efetuada a impregnação de duas estruturas fibrosas orientadas, compostas pela mesma natureza de

fibra de vidro dos filamentos utilizados no âmbito do presente estudo. A partir da observação da Figura 65 é possível verificar a diferença entre as estruturas de fibra de vidro funcionalizadas com e sem a aplicação prévia dos pré-tratamentos de superfície. Comprova-se visualmente o aspeto mais homogêneo do tecido resultante da dispersão de CNT's nos materiais fibrosos.



Figura 65 Aspeto visual das fibras impregnadas sem (à esquerda) e com (à direita) aplicação do tratamento de superfície prévio às mesmas.

Além da avaliação visual das estruturas fibrosas, foi ainda avaliada a resistência elétrica de ambos os tipos de amostras, que consiste num critério fundamental para o sucesso do conceito de capacidade de monitorização. Na Figura 66, é possível verificar a influência do tratamento de superfície nas propriedades de condução elétrica dos materiais fibrosos. Após o tratamento de superfície, verifica-se uma maior homogeneidade nos valores condutividade elétrica medidos em vários pontos ao longo das amostras produzidas, em comparação com as medições realizadas nas amostras sem tratamento. Comprova-se ainda que sendo os valores de resistência elétrica são mais reduzidos, o tecido fibroso com tratamento superficial apresenta maior capacidade de condução elétrica das amostras pré-tratadas. Este resultado permite assim assumir uma maior probabilidade de as fibras se tornarem piezoresistivas.

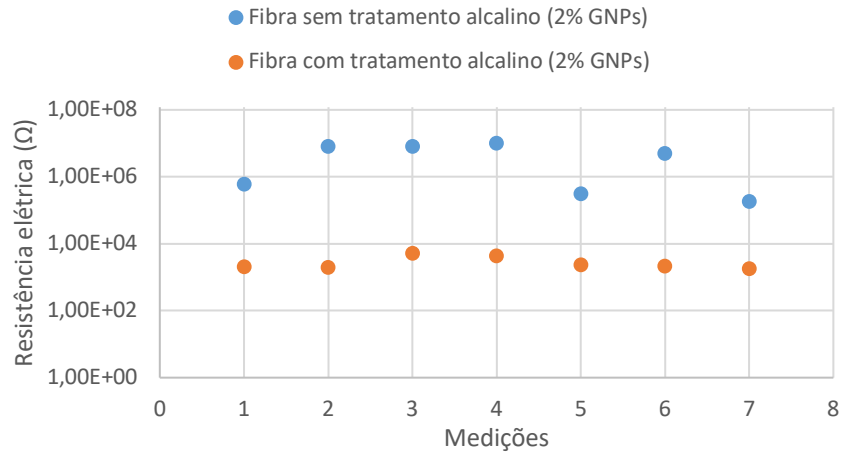
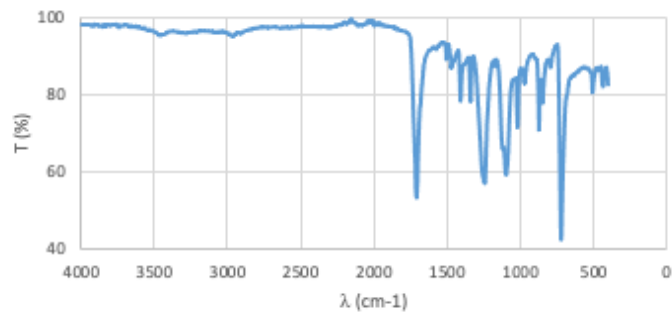
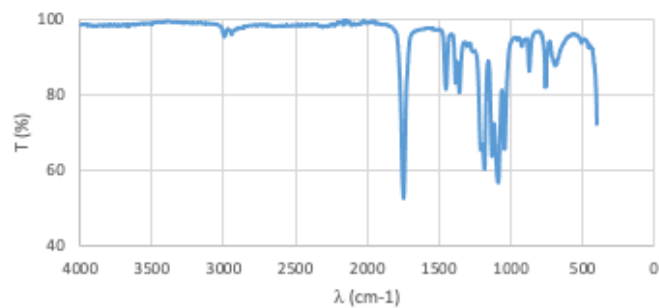


Figura 66 Gráfico comparativo de resistências elétricas com e sem tratamento alcalino.

Procedeu-se também à análise dos filamentos de fibra de vidro no espectrómetro FTIR entre o comprimento de onda de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} , para análise comparativa entre a constituição da fibra de vidro sem tratamento alcalino e com tratamento alcalino (Figura 67).



(a)



(b)

Figura 67 Análise FTIR ao espectrómetro de filamentos de fibra de vidro; (a) com tratamento alcalino; (b) sem tratamento alcalino

Comparativamente aos resultados encontrados na literatura, verifica-se que em ambos os casos é conservado um pico de absorção a cerca de 1750 cm^{-1} correspondente à ligação C=O; a cerca de 1050 cm^{-1} encontram-se ligações Si-O características da fibra de vidro bem como ligações C-O para comprimentos de onda na ordem dos 1200 cm^{-1} . A existência de um pico de absorção expressivo a cerca de 720 cm^{-1} (Figura 67a), impercetível na Figura 67b, correspondente ao grupo hidroxilo implementado pelo tratamento alcalino. Para a amostra sem tratamento alcalino, a existência de múltiplos picos de menores dimensões nessa zona do espectro a cerca de 750 cm^{-1} e 870 cm^{-1} corresponde aos grupos CH₂ e CO característico de ceras e parafina, respetivamente. Com a remoção destes grupos apolares, que promovem o isolamento das fibras de vidro, estas tornam-se assim mais recetíveis/suscetíveis a processos de funcionalização com grafeno, permitindo a incorporação do agente funcionalizador na matriz da fibra de vidro.

Após a funcionalização e preparação dos respetivos filamentos de fibra de vidro, os mesmos foram submetidos a ensaios de tração até à rotura, a fim de verificar a influência das diferentes formulações nas suas propriedades mecânicas de tração, as quais podem ser observadas no Quadro 42.

Quadro 42 Propriedades mecânicas de tração dos filamentos de fibra de vidro funcionalizados.

Formulação	Amostra	Força de Rotura (N)	Alongamento (%)
A	CR141	$85,1 \pm 2,9$	$14,5 \pm 0,5$
B	PLA	$72,0 \pm 4,6$	$23 \pm 0,5$
C	PLA+CR141	$56,9 \pm 7,0$	$13,0 \pm 1,3$

Verifica-se que a funcionalização a partir da formulação B com base em PLA, corrobora o fundamento teórico do maior alongamento deste material termoplástico, dada a elasticidade que apresenta atendendo ao alongamento máximo antes da rutura comparativamente às restantes amostras. Contudo a formulação A, baseada na funcionalização com resina epóxida CR141, termoendurecível, apresenta maior resistência mecânica em relação às restantes. A formulação C, baseada numa conjugação das duas abordagens de funcionalização, apresenta menor alongamento e menor força de rutura em relação à formulação A e B. Seria de esperar que os resultados das propriedades mecânicas para esta

funcionalização fossem delimitados pelos resultados da funcionalização A e B. Na origem desta divergência podem estar problemas de compatibilidade ao nível das interações entre estes dois agentes funcionalizadores.

Posteriormente, para averiguar o comportamento dos rovings de fibra de vidro funcionalizados através das diferentes formulações ao nível da resistência elétrica, foram colocados elétrodos a uma distância de 1cm e medida a respetiva resistência elétrica dos rovings utilizando um multímetro digital, Quadro 43.

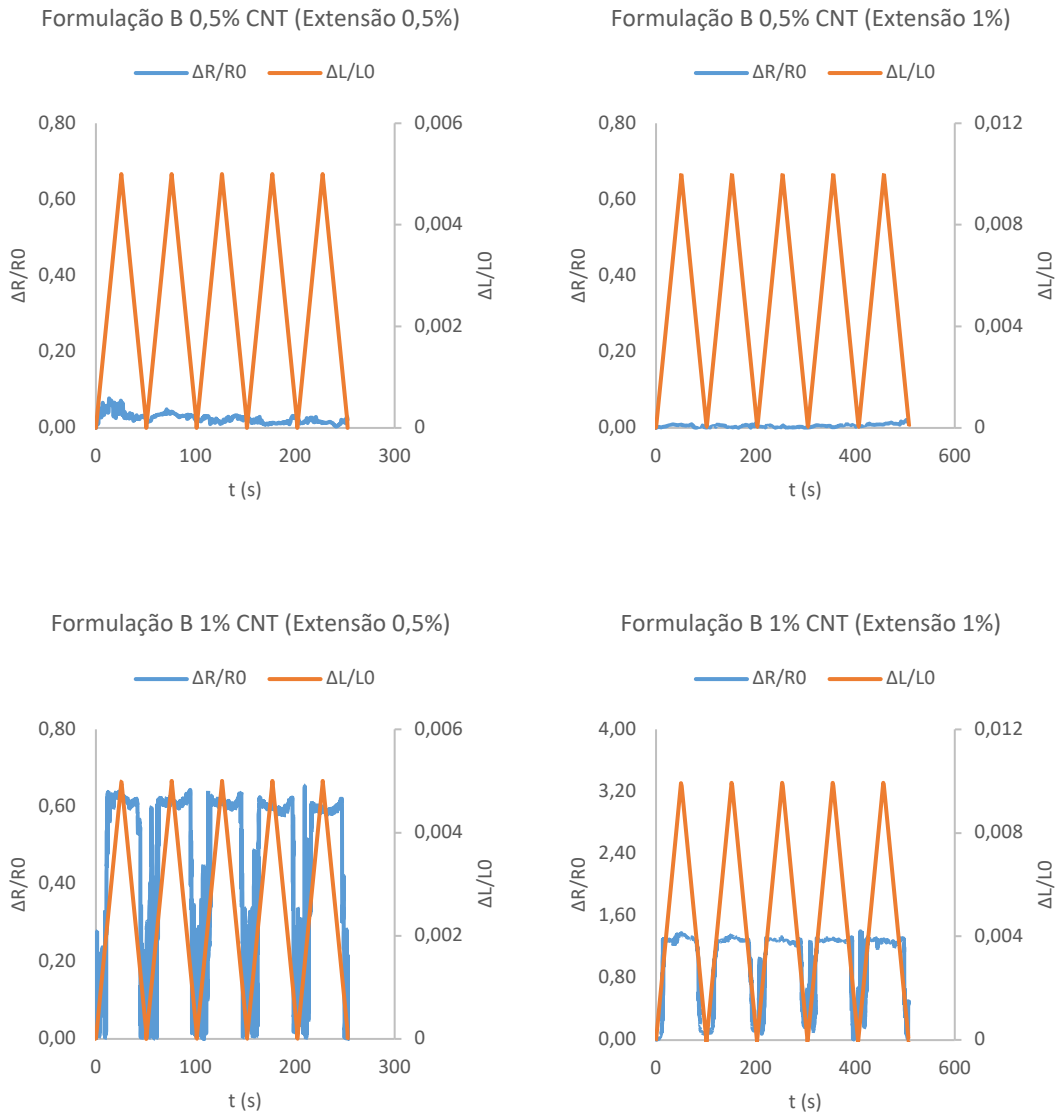
Quadro 43 Resistência elétrica, medida com distância entre elétrodos de 1cm, de filamentos funcionalizados de vidro.

% CNT (w/v)	R (Ω)		
	Formulação A (CR141)	Formulação B (PLA)	Formulação C (PLA + CR141)
0%	-	-	-
0,50%	5,52E+07	4,62E+06	6,26E+07
1,00%	1,36E+07	2,03E+04	2,37E+05
1,50%	4,27E+06	2,52E+03	2,83E+04
2,00%	2,07E+06	2,16E+03	7,45E+03
2,50%	3,24E+05	1,23E+03	1,43E+04

Os resultados obtidos apontam para uma maior resistência elétrica, e consequentemente menor condutividade elétrica, por parte da formulação A, comparativamente às restantes amostras. Dada a sua maior rigidez (CR141), o sinal elétrico tem maior dificuldade em percorrer a matriz de funcionalização. Desta feita, atendendo ao âmbito experimental, a viabilidade e sustentabilidade deste projeto converge com as formulações com recurso ao PLA. Das concentrações de CNT utilizadas, a concentração correspondente a 0,5% revela maior resistência elétrica, pelo que o intervalo ótimo está compreendido entre 1% e 2,5%, dada a proximidade ao limite de percolação do material.

Uma vez que a formulação A, apresenta valores de resistência elétrica consideravelmente elevados, mesmo para taxas de incorporação até 2,5 w/v %, em comparação com o verificado com as formulações B e C, conclui-se que a mesma não será a melhor opção para a funcionalização de varões compósitos.

Na Figura 68 e Figura 69, é possível observar o comportamento dos filamentos funcionalizados em ensaios de tração cíclicos, considerando os 2 tipos de formulações testadas e validadas (Formulação B e C), e para extensões em tração de 0,5 e 1%.



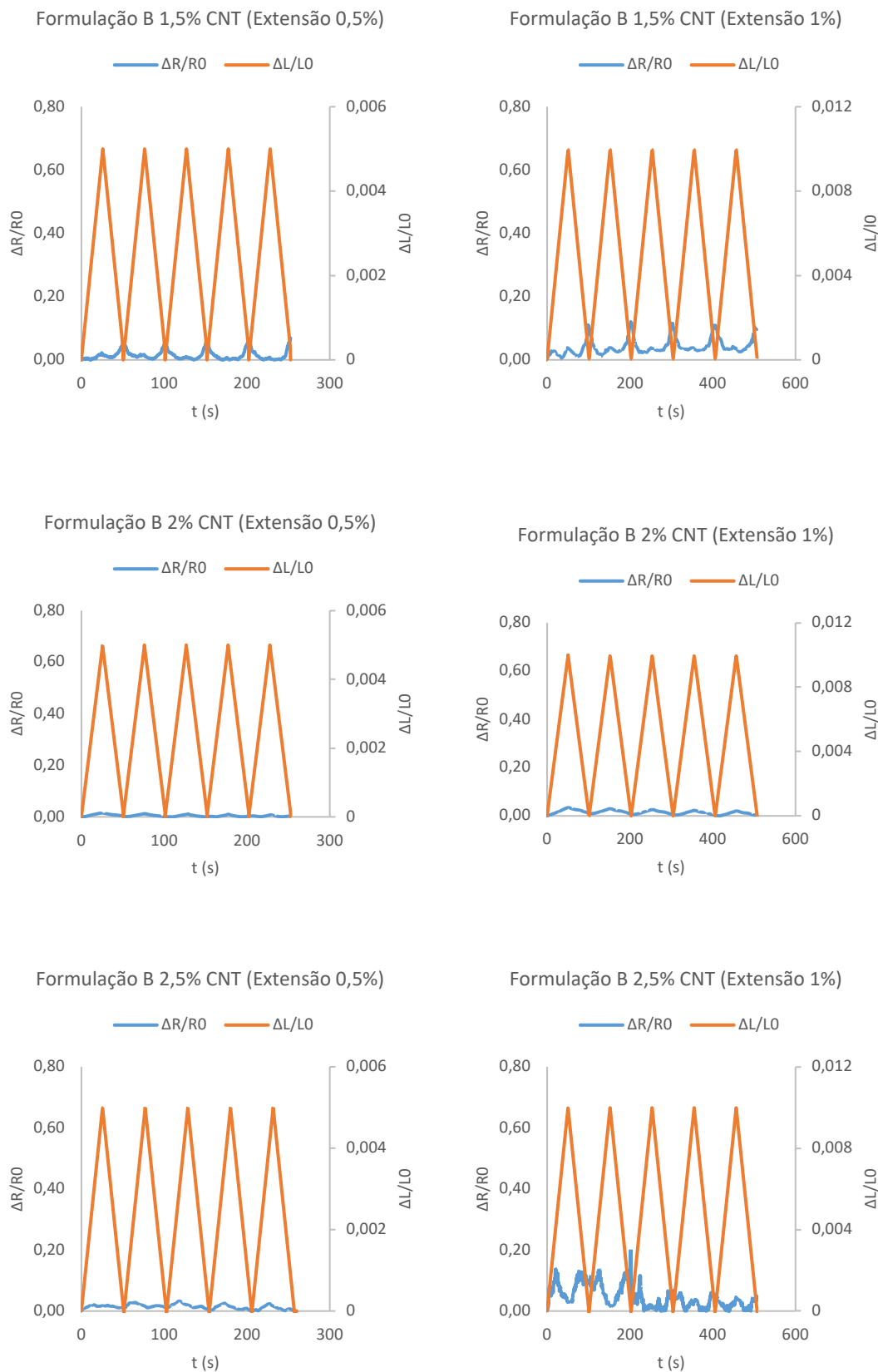
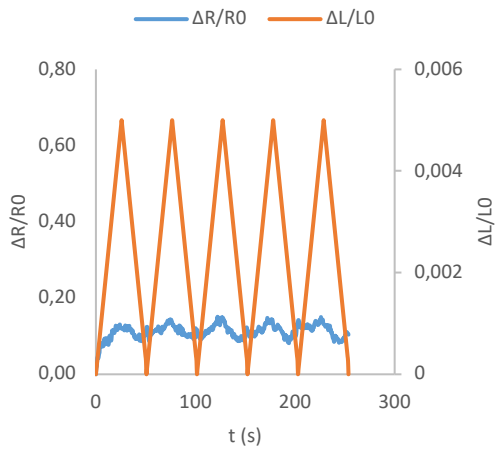
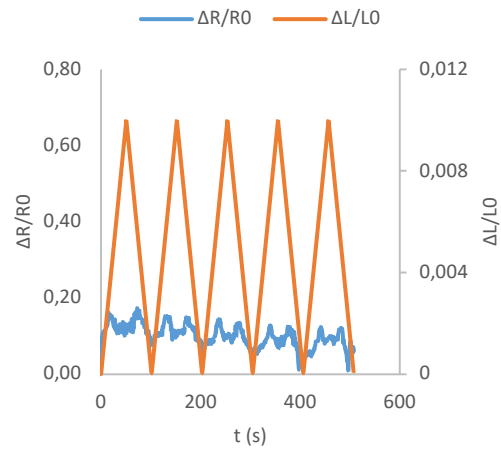


Figura 68 Resistência elétrica das amostras funcionalizadas com a formulação B, submetidas a tração cíclica, a extensões de 0,5 e 1%.

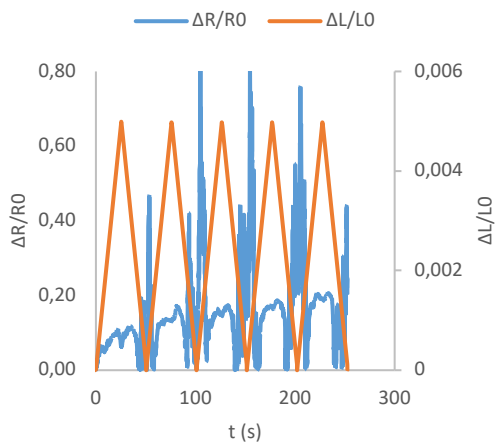
Formulação C 0,5% CNT (Extensão 0,5%)



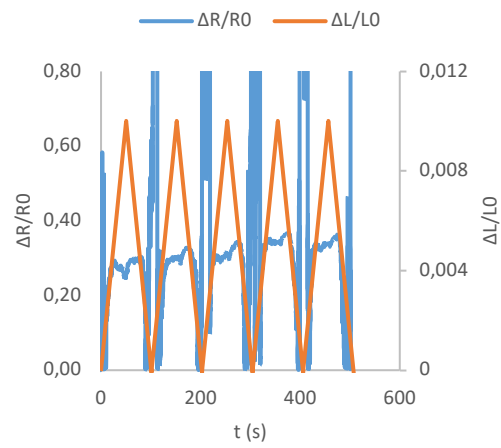
Formulação C 0,5% CNT (Extensão 1%)



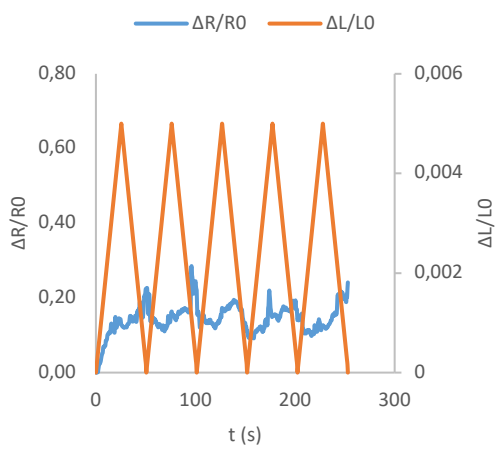
Formulação C 1% CNT (Extensão 0,5%)



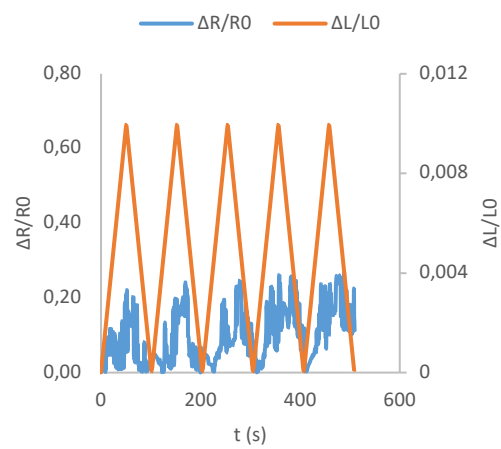
Formulação C 1% CNT (Extensão 1%)



Formulação C 1,5% CNT (Extensão 0,5%)



Formulação C 1,5% CNT (Extensão 1%)



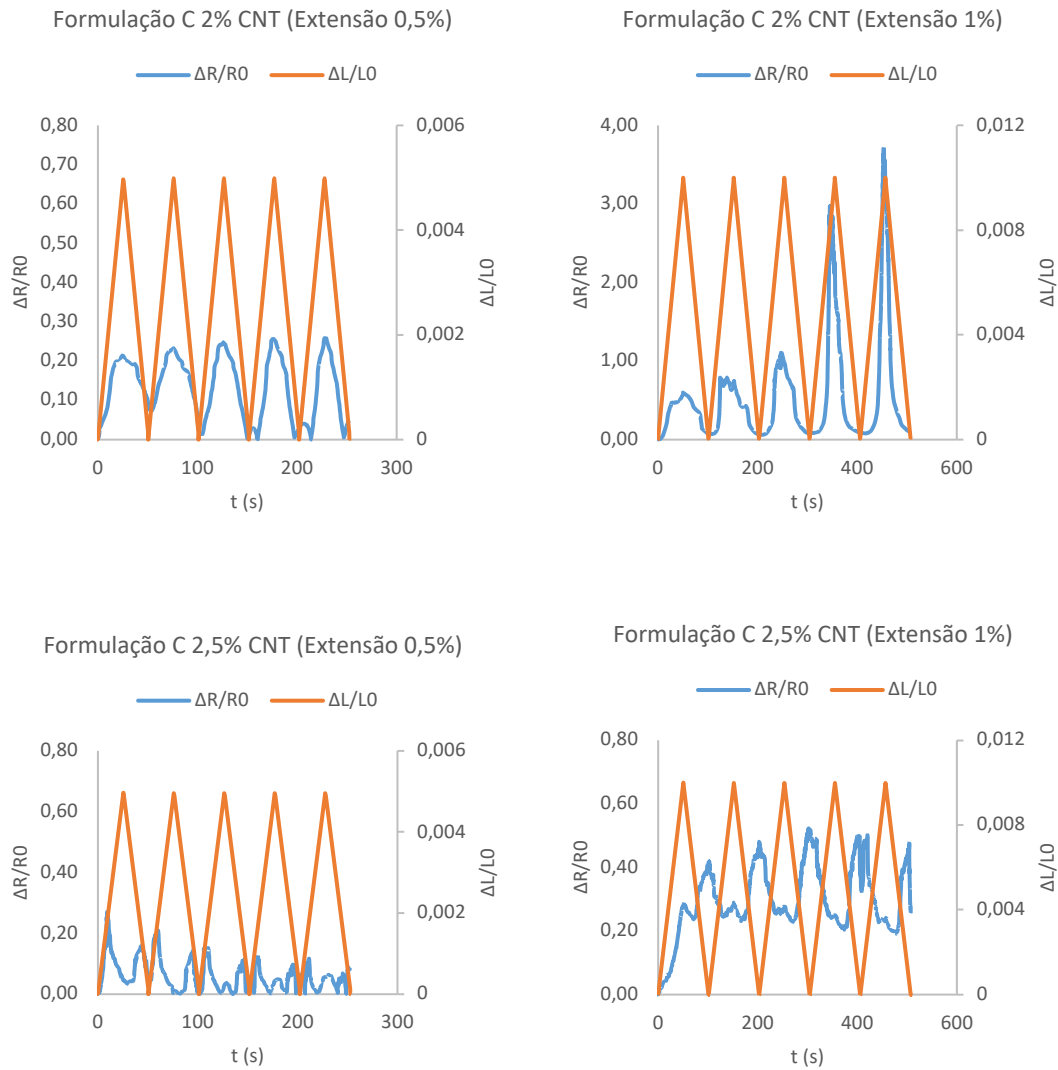


Figura 69 Resistência elétrica das amostras funcionalizadas com a formulação C, submetidas a tração cíclica, a extensões de 0,5% e 1%.

Quadro 44 Gauge Factor determinado para os filamentos de fibra de vidro funcionalizados com CNTs, para a formulação B.

(% w/v)	Deformação	
	0,50%	1,00%
0,5	2,5	0,3
1	267,2	131,6
1,5	10	5,1
2	2	2,3
2,5	8	17,7

Quadro 45 Gauge Factor determinado para os filamentos de fibra de vidro funcionalizados com CNTs, para a formulação C.

(% w/v)	Deformação	
	0,50%	1,00%
0,5	11,9	9,9
1	195,9	546,6
1,5	0,8	21,1
2	64,1	135,6
2,5	51,7	22

Analisando os resultados obtidos verifica-se em primeiro lugar que para funcionalizações inferiores a 1 w/v % não se verificam alterações significativas no nível da resistência elétrica. Este comportamento poderá ser devido ao facto de se tratarem de concentrações demasiado baixas ao ponto de não permitirem uma continuidade de condução ao longo do sentido longitudinal do filamento funcionalizado. Observando os valores de resistência referenciados no Quadro 43, verifica-se que a resistência elétrica para esta concentração de CNT's é muito elevada, impossibilitando a monitorização elétrica.

Analisando os gráficos obtidos, observam-se em primeiro lugar, respostas mais eficazes com a aplicação da formulação B, uma vez que as curvas de resistência elétrica apresentam menores graus de ruído, em comparação com as respostas verificadas com a formulação C. Esta tendência é também justificada pelos valores de gauge factor determinados para os casos da formulação C em comparação com os verificados na formulação B, considerando os mesmos valores funcionalização de CNT's e taxas de extensão aplicadas.

Relativamente às percentagens de funcionalização de CNTs, verifica-se igualmente que são obtidos melhores resultados para os casos de 2 w/v %, permitindo estabelecer uma relação linear entre a variação de resistência elétrica e variação de extensão, dado o comportamento linear e manutenção da amplitude do sinal.

No que diz respeito às formulações com 1 w/v % de CNTs, os ensaios de tração cíclica demonstram possuir alguma sensibilidade à extensão aplicada. Por outro lado, atendendo aos valores de resistência elétrica obtidos, verifica-se um período de relaxamento mais extenso aquando da extensão máxima para a amostra impregnada com a formulação B. Além disso, a formulação C apresenta múltiplos picos de sinal aquando da extensão máxima. Verifica-se ainda que, para a formulação C, à extensão de 0,5% existe

uma grande perda de sinal a nível da resistência elétrica, uma vez que a resistência elétrica deste material é de ordem superior à da formulação B assim como ao nível de rigidez da matriz. Quando é aplicada uma extensão menor, a rigidez da matriz não promove o incremento da distância dos nanotubos de carbono, pelo que a condução do sinal elétrico ao longo da matriz de funcionalização é então menos suscetível a variações. Desta forma, a formulação C necessita de uma maior concentração de CNT para apresentar resultados mais consistentes do ponto de vista da manutenção do sinal elétrico para diferentes extensões mecânicas. Esta tendência é também espelhada pelos resultados evidenciados no Quadro 43.

Relativamente às formulações com 1,5 w/v % de CNTs, de igual forma se verificam que os resultados obtidos denotam sensibilidade à extensão aplicada, sobretudo para a funcionalização com recurso à formulação B, cujo sinal é apresentado mais nitidamente nas figuras. No entanto, quando o filamento entra em relaxamento e no período de repouso, após aplicação da extensão, apresenta a maior variação de resistência. No que diz respeito à formulação C, esta revela agora maior sensibilidade para a extensão de 1% com o incremento da concentração de CNT's.

Analisando os resultados obtidos para as formulações com 2 w/v % de CNT's, as formulações sugerem sinais mais nítidos e consistentes, permitindo estabelecer uma correlação linear entre a variação de resistência elétrica e variação de extensão, dado o comportamento linear e manutenção da amplitude do sinal. Contudo verifica-se que em ambas existe uma menor amplitude para deformações inferiores, mais notória para a formulação C. A qualidade dos gráficos para além de permitir monitorização piezorresistiva, possibilita ainda a determinação do gauge factor o qual relaciona a variação de resistência elétrica por variação de extensão.

Por fim, relativamente aos resultados obtidos para as formulações com 2,5 w/v % de CNTs, verifica-se que as amostras funcionalizadas através da formulação B denotam alguma perda de sensibilidade, ao passo que as amostras funcionalizadas através da formulação A demonstram um aumento de sensibilidade., podendo este fator estar relacionado com a maior capacidade de fixação dos CNTs.

Assim, os dados obtidos sugerem que atendendo à rigidez dos materiais de funcionalização, verifica-se que para o PLA (material polimérico com menor rigidez) é necessária uma quantidade inferior de CNT para monitorizar a tração aplicada sob forma de resistência elétrica. Para o material polimérico de matriz de funcionalização, mais rígido, resina epóxi CR141, são necessárias maiores quantidades para se verificar comportamento piezoresistivo. Por outro lado, através dos resultados obtidos, verifica-se que as

amostras funcionalizadas através da formulação B denotam alguma perda de sensibilidade, bem como a nível da qualidade do comportamento piezoresistivo, especulando-se assim a proximidade ao limite de percolação do material pelo que o incremento de CNT's a partir de 2 w/v % prejudica os resultados obtidos, atendendo ao âmbito deste estudo.

Uma vez estabelecida a formulação B e a concentração ideal para funcionalizar os filamentos de fibra de vidro próximos de 2 w/v % CNT's, os estudos irão incidir sobre o efeito de tração cíclica de varões entrançados incorporando filamentos de fibra de vidro funcionalizados com intervalos de 1,5 a 2,5% de CNT's.

5.4 Resultados dos ensaios de Piezoresistividade para varões compósitos com fibra de vidro funcionalizada com nanotubos de carbono

No seguimento do estudo anterior, para as condições de ensaio e para os materiais utilizados a formulação B apresenta resultados mais promissores e como tal foi a formulação selecionada para funcionalizar o filamento que irá conferir ao varão compósito características de monitorização a nível piezoresistivo considerando as concentrações de 1,5%; 2% e 2,5% de CNT's. Dada as características físicas do varão que o dotam de grande resistência mecânica foi ainda feito um estudo comparativo das fibras de vidro com e sem tratamento alcalino para averiguar se o efeito da ausência de tratamento seria atenuado pelas propriedades do varão.



Figura 70. Preparação dos varões para ensaios de tração cíclica.

Os seguintes ensaios (Figura 71) de tração cíclica, para averiguar o comportamento de varões compósitos, foram realizados com distância entre amarras de 40cm e distância entre elétrodos de 50cm, sendo estes tracionados ao longo de 5 ciclos à velocidade de 2mm/min até à extensão de 0,5% e 1%.

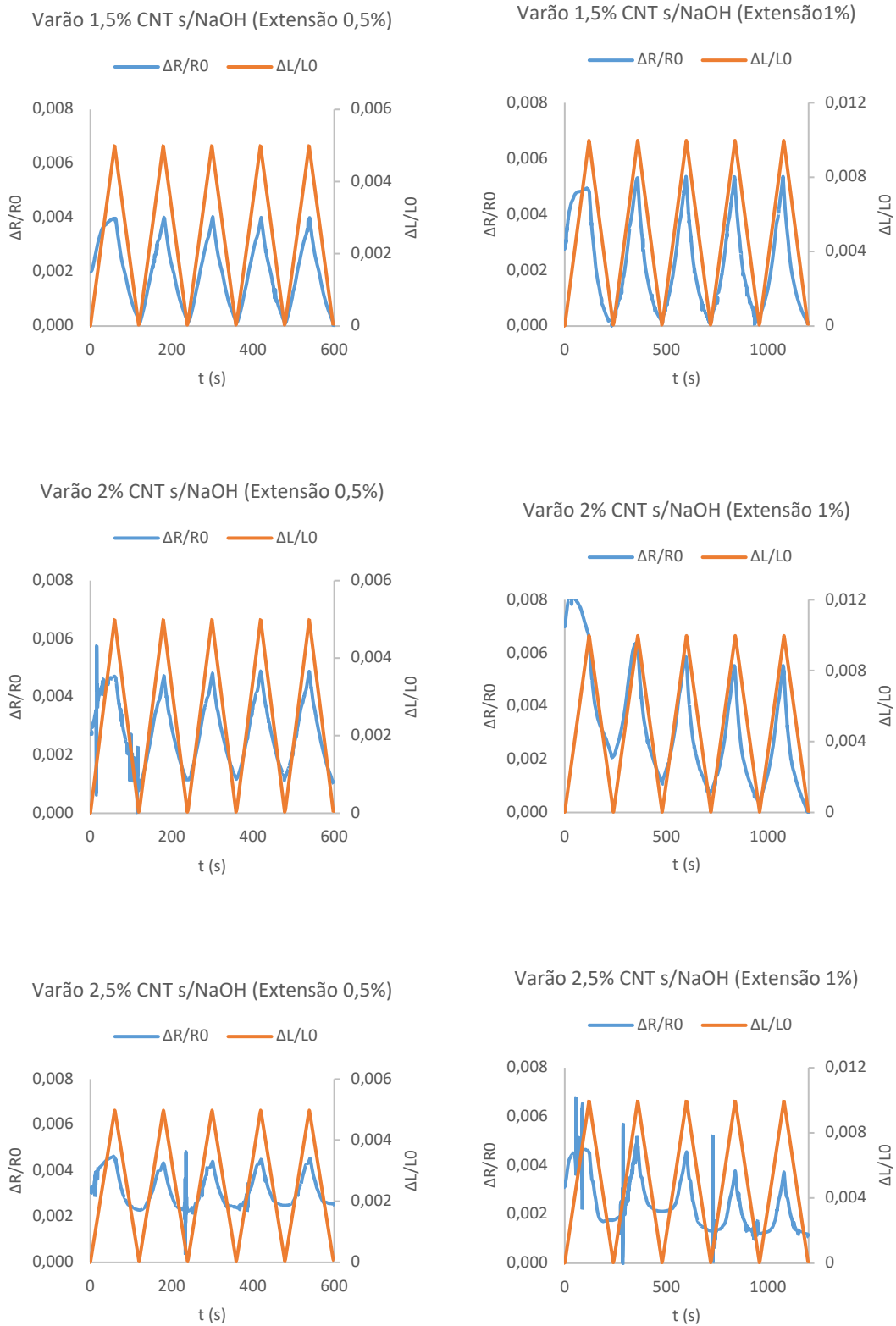


Figura 71. Variação da resistência elétrica e da extensão dos varões compostos com filamento de fibra de vidro funcionalizado com a formulação B, sem pré-tratamento alcalino, submetido a tração cíclica, a extensões de 0,5% e 1%.

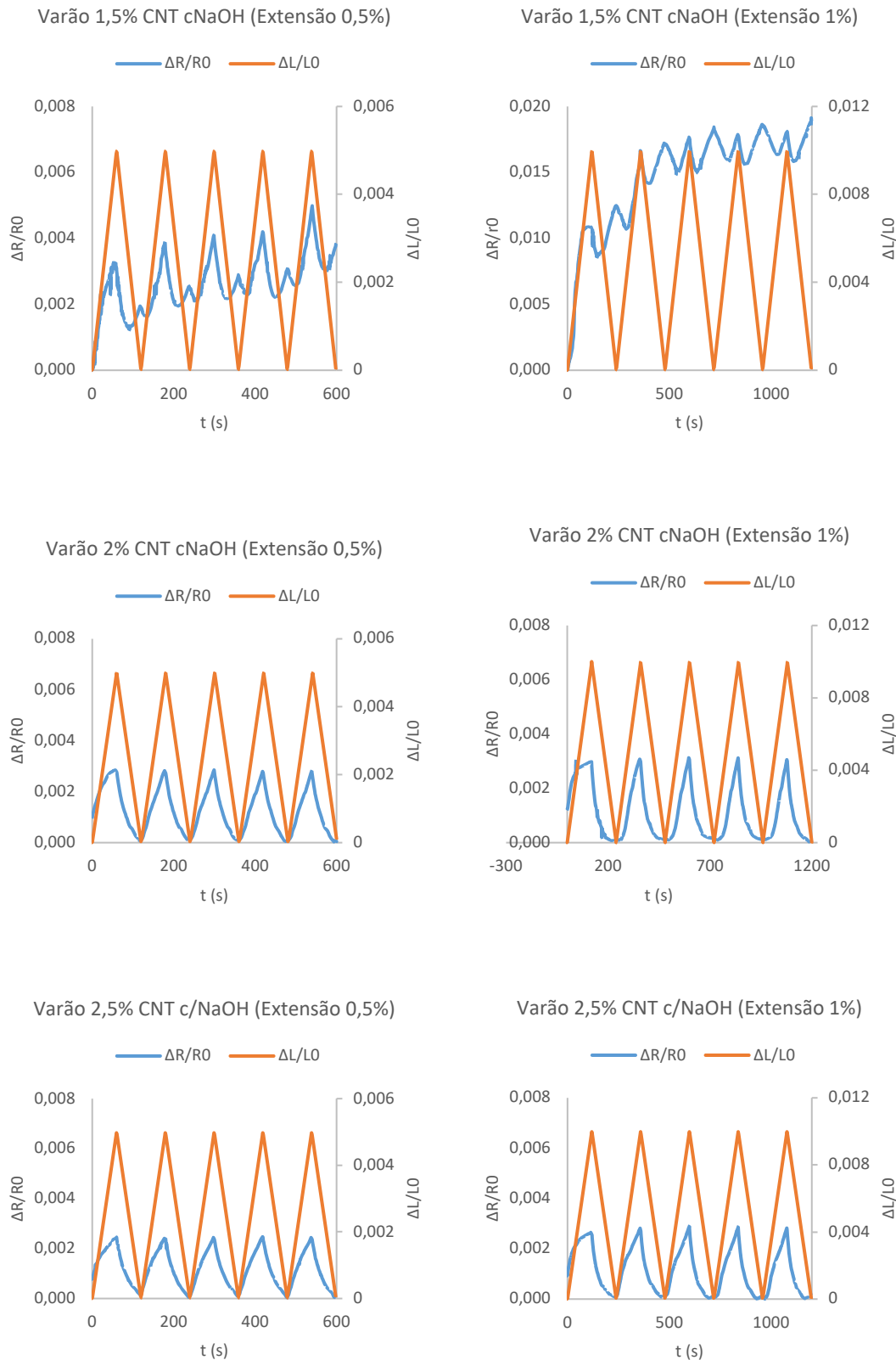


Figura 72. Variação da resistência elétrica e da extensão dos varões compósitos com filamento de fibra de vidro funcionalizado com a formulação B, com pré-tratamento alcalino, submetido a tração cíclica, a extensões de 0,5% e 1%.

Quadro 46 Gauge Factor determinado para os varões com os filamentos de fibra de vidro funcionalizados com CNTs, para a formulação B, com pré-tratamento alcalino.

(% w/v)	Deformação	
	0,50%	1,00%
1,5	0,61	0,59
2	0,62	0,62
2,5	0,52	0,47

Quadro 47 Gauge Factor determinado para os varões com os filamentos de fibra de vidro funcionalizados com CNTs, para a formulação B, sem pré-tratamento alcalino.

(% w/v)	Deformação	
	0,50%	1,00%
1,5	0,71	0,57
2	0,65	0,6
2,5	0,55	0,53

Através dos resultados obtidos, verifica-se uma capacidade de resposta bastante linear para formulações de funcionalização entre 1,5 e 2,5 w/v %, com particular destaque para os casos de 2 w/v %, validando os resultados previamente obtidos para os ensaios de tração cíclicos realizados aos filamentos de fibra de vidro. Além disso, verifica-se igualmente uma tendência para a aplicação do pré-tratamento alcalino promover uma resposta elétrica com menor ruído. Analisando os valores de gauge factor obtidos, verifica-se uma proximidade entre os valores obtidos para as diferentes composições de funcionalização, com tendência para menores extensões promoverem melhor gauge factor, parâmetro que contribuiu para uma melhor sensibilidade do varão para baixas deformações.

Para uma percentagem de 2% CNT de funcionalização com recurso à formulação B, apesar dos resultados serem semelhantes, aos demais, o valor de R0 (resistência elétrica mínima), para as amostras com filamento de fibra de vidro sem tratamento alcalino é resultado de picos anormais, dada a maior fragilidade das fibras. Podem, ainda, existir deslizamentos internos ou quebras de sinal elétrico presentes na origem do problema. As amostras com tratamento alcalino mantêm uma melhor qualidade de sinal elétrico, de igual modo às amostras com 1,5% de CNT a amplitude do sinal das fibras pré-tradas é menor.

Estes resultados entram em contradição com o fundamento teórico da facilidade de funcionalização conferida pelo tratamento, contudo, novamente, a variação em pontos múltiplos ao longo da fibra por ser maior na ausência de tratamento, o que pode explicar o sucedido.

Para uma percentagem de 2,5% CNT de funcionalização com recurso à formulação B, à semelhança do que acontece para 2% CNT também ocorrem anomalias com impacto no R0 das fibras sem tratamento alcalino. A amplitude do gráfico é também semelhante aos gráficos de 2% CNT, como referido anteriormente verifica-se a aproximação ao limite de percolação a nível da condutividade elétrica do filamento funcionalizado de fibra de vidro.

5.5 Conclusão

No âmbito do presente estudo foi possível estudar novas funcionalizações no que diz respeito aos BCR no sentido de os capacitar com propriedades piezoresistivas com base em resultados de ensaios de tração cíclicos. Neste sentido, por um lado, foram exploradas duas técnicas distintas, nomeadamente a obtenção de comportamento piezoresistivo através da inserção de filamentos que são intrinsecamente condutores. Por outro lado, foi explorada uma nova técnica de funcionalização de rovings de fibra de vidro no sentido de os dotar com a capacidade de condução elétrica necessária para a monitorização.

Verifica-se que nas condições estudadas não foi possível obter resultados lineares e com a sensibilidade necessária a partir da incorporação de filamentos intrinsecamente condutores como foram o caso do Carbono e do Aço.

No que diz respeito à funcionalização dos rovings de fibra de vidro, foram exploradas três técnicas, nomeadamente: Formulação A, dispersão de CNT na matriz; Formulação B, utilização de ácido polilático (PLA) como veículo de incorporação dos nanotubos de carbono na superfície do roving de fibra de vidro; Formulação C, utilização de ácido polilático (PLA) como veículo de incorporação dos nanotubos de carbono na superfície e posterior revestimento com matriz epóxi.

Verificou-se que a Formulação A não apresentou níveis de resistência elétrica compatíveis com o sistema de monitorização idealizado, ao contrário das formulações B e C.

As formulações B e C apresentaram níveis de resistência elétrica compatíveis para o efeito de monitorização pretendido. Os melhores resultados de monitorização foram conseguidos nas amostras

Desenvolvimento de materiais fibrosos inteligentes para o reforço de alvenarias de enchimento sujeitas à ação sísmica

com 2 % de CNT's, uma vez que se verificou o valor mais alto de sensibilidade (Gauge Factor), para ambas as deformações estudadas, 0,5 e 1%.

Por fim, é possível concluir que através deste trabalho inovador foi possível desenvolver BCR's (Varões compósitos) com capacidade de monitorização através da incorporação de fibra de vidro funcionalidade no núcleo de reforço.

6 Conclusões e futuros desenvolvimentos

No âmbito do presente capítulo pretende-se, numa primeira fase, efetuar uma reflexão sobre as conclusões dos tópicos em estudo, e posteriormente, apresentar os trabalhos futuros recomendados.

6.1 Principais conclusões

O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento uma nova classe de polímeros reforçados por fibras, nomeadamente Varões Compósitos Entrançados (BCR's), tendo em conta os resultados preliminares obtidos pelo autor no âmbito do reforço de paredes de alvenaria de tijolo sujeitas a ações sísmicas. Assim, o objetivo traçado para a presente tese centrou-se no desenvolvimento de BCR's com pseudoductilidade com vista, ao melhoramento do desempenho mecânico, e BCR's com monitorização que permita monitorizar deformações experimentadas pelo reforço quando solicitado por uma ação.

Para o desenvolvimento de BCR's com pseudoductilidade foram exploradas duas técnicas, nomeadamente: (a) pseudoductilidade a partir da incorporação de materiais fibrosos com diferentes propriedades mecânicas (alongamento na rotura); (b) pseudoductilidade a partir da utilização de materiais dúcteis em combinação com fibras de vidro e basalto.

Desta forma, foi possível concluir que a partir de fibras com diferentes alongamentos na rotura é possível induzir um comportamento pseudo-ductil em BCR's. Este comportamento é mais acentuado quando são utilizadas fibras que intrinsecamente já possuem um elevado alongamento na rotura, conseguindo-se transportar essa capacidade de alongamento para o BCR. Ainda nesta temática, foi possível concluir que a combinação de fibras de vidro, polipropileno e polietileno de ultra alto peso molecular em igual volume foi a que induziu um melhor comportamento pseudo-ductil.

Através dos resultados obtidos foi possível concluir ainda que a introdução de aço em BCR de Vidro e BCR de Basalto induz um comportamento Pseudoductil. Foi possível concluir que o BCR com núcleo de fibra de vidro e o BCR com núcleo de fibra de basalto apresentam comportamentos distintos, ao nível da Pseudoductilidade, em função da quantidade de aço. No caso do BCR com Fibra de Vidro o aumento da pseudoductilidade é progressivo, ao passo que no BCR de Basalto, a Pseudoductilidade atinge um valor

próximo do limite aos 21% de incorporação de aço. Em suma, através deste trabalho inovador foi possível desenvolver BCR's Híbridos com Pseudoductilidade, através da introdução do aço no núcleo de reforço como material dúctil.

No que diz respeito à monitorização, o objetivo foi estudar as seguintes técnicas: (a) introdução de filamentos intrinsecamente condutores; (b) funcionalização de filamentos de vidro com materiais condutores, nomeadamente nanotubos de carbono.

No âmbito do presente estudo foi possível desenvolver novas funcionalizações no que diz respeito aos BCR no sentido de as capacitar de propriedades Piezoresistivas em ensaios de tração cíclicos. Neste sentido, por um lado, foram exploradas duas técnicas distintas, nomeadamente a obtenção da propriedade piezoresistiva através da inserção de filamentos que intrinsecamente são condutores. Por outro lado, foi explorada uma nova técnica de funcionalização de rovings de fibra de vidro no sentido de os dotar com a capacidade de condução elétrica necessária para a monitorização.

A partir do presente estudo realizado, verifica-se a não viabilidade de monitorização a partir da via da introdução de filamentos intrinsecamente condutores como elementos de monitorização, devido à elevada condutividade elétrica que os mesmos revelam. Esta conclusão é sustentada não apenas nos resultados obtidos, como também nos valores de gauge factor determinados para os filamentos individualizados, quando submetidos a diferentes extensões.

No que diz respeito à funcionalização dos rovings de fibra de vidro, foram exploradas três técnicas, nomeadamente: (a) Formulação A, dispersão de CNT na matriz; (b) Formulação B, utilização de ácido polilático (PLA) como veículo de incorporação dos nanotubos de carbono na superfície do roving de fibra de vidro; (c) Formulação C, utilização de ácido polilático (PLA) como veículo de incorporação dos nanotubos de carbono na superfície e posterior revestimento com matriz epóxida.

Neste sentido verificou-se que a Formulação A, nas condições em estudo, não apresentou níveis de resistência elétrica compatíveis com o sistema de monitorização idealização, ao contrário das formulações B e C. No que diz respeito à formulação B e C as mesmas apresentam níveis de resistência elétrica compatíveis para o efeito de monitorização pretendido. No que diz respeito à formulação B e C os melhores resultados de monitorização foram conseguidos nas amostras com 2 % de CNT's, uma vez

que se verificou o valor mais alto de sensibilidade (Gauge Factor), para ambas as deformações estudadas, 0,5 e 1%.

Por fim, é possível concluir que através deste trabalho inovador foi possível desenvolver BCR's com a capacidade de possuir Pseudoductilidade e BCR's com Monitorização.

6.2 Futuros desenvolvimentos

No âmbito do desenvolvimento da presente tese de doutoramento foi possível desenvolver BCR's com a capacidade de possuir pseudoductilidade e BCR's com monitorização. Para a realização deste trabalho foram seguidas linhas de desenvolvimento, com base nas direções apontadas pelo estado da arte no momento. Considerando os resultados apresentados e face às oportunidades daí ocorridas, são deixadas algumas considerações para trabalhos futuros, nomeadamente:

-Validação do desempenho dos BCR's com monitorização e pseudoductilidade em alvenarias, validando os estudos apresentados aos varões em condições próximas das reais de utilização;

-No que diz respeito aos BCR's com comportamento pseudoductil seria importante em trabalhos futuros explorar a incorporação de novas fibras que permitam aumentar este comportamento pseudoductil, nomeadamente fibras com maior taxa de extensão;

- No que diz respeito aos BCR's com capacidade de monitorização seria interessante funcionalizar as fibras de vidro com grafeno para que se possa obter materiais mais condutores. Ainda no âmbito da funcionalização, seria igualmente importante utilizar polímeros condutores como veículo de funcionalização, garantindo a continuidade de condução elétrica desejada.

7 Bibliografia

Abreu, I. K., 2015. *Estudo dos efeitos da adição de copolímeros em blocos em nanocompósitos de matriz epoxidica reforçados com nanoplateletes de grafeno ou nanotubos de carbono.* , Santa Catarina, Brazil: Universidade do estado de santa catarina – udesc.

Abreu, S., 2011. *Metodologias de Reforço de paredes de alvenaria de enchimento*, Guimarães: Dissertação de mestrado.

Abry, J. et al., 1999. In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements.. Em: *Composites Science and Technology*. s.l.:s.n., pp. 925-935.

Abry, J. et al., 2001. In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements. Em: *Composites Science and Technology*. s.l.:s.n., p. 855–864..

Ammad Hassan, M. et al., 2020. Improving structural performance of timber wall panels by inexpensive FRP retrofitting techniques. *Journal of Building Engineering*, Volume Volume 27, p. 101004.

Aveen, K., V.Londe, N., G.AminImaad, G. & Shaikh, S., 2021. A review on the effects of input parameters & filler composition on delamination during machining of FRP composites. *Materialstoday: proceedings*, Volume 46, pp. 2607-2611 .

Barros, J. & Costa, I., 2010. *Avaliação do desempenho de ensaios de caracterização da ligação FRP-betão*. Lisboa, BE2010 – Encontro Nacional Betão Estrutural.

Bastianini, F., Corradi, M., Borri, A. & Tommaso, A. d., 2005. Retrofit and monitoring of an historical building using “Smart” CFRP with embedded fibre optic Brillouin sensors. Em: *Construction and Building Materials*. Italy: Elsevier, pp. 525-535.

Corria, L., 2016. *Varões em material compósito produzidos por BraidTrusion com propriedades sísmicas melhoradas para reforço de estruturas de construção civil*, Guimarães: Escola de Engenharia da Univeridade do Minho.

Cui, Y. et al., 2008. Development of ductile composite reinforcement bars for concrete structures. *Materials and Structures*, Volume 41, p. 1509–1518.

Cunha, F., 2012. Desenvolvimento de uma estrutura com materiais fibrosos para ser utilizada como reforço em paredes de alvenaria.

Cunha, F., Rana, S., Fanguerio, R. & Vasconcelos, G., 2014. Novel Surface Tailored Fibre Composite Rods with Excellent Bonding Behaviour with Cementitious Matrix. *Bulletin of Materials Science*.

Cunha, F., Vasconcelos, G., Fanguero, R. & Abreu, S., 2011. *A brief overview on the retrofitting possibilities of masonry infill walls*. Beira Interior, International conference on engineering ubi2011.

Dong, Z., Wu, G. & Xu, Y., 15 July 2016,. Experimental study on the bond durability between steel-FRP composite bars (SFCBs) and sea sand concrete in ocean environment. *Construction and Building Materials*, Volume Volume 115, pp. Pages 277-284.

Ernest, B., Lluís, G., Pere, R. & Christian, E., 2013. Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading. Em: *Construction and Building Materials*. s.l.:Elsevier Ltd, pp. 35-47.

Fanguero, R. & Godinho-Pereira, C., 2011. Fibrous materials reinforced composite for internal reinforcement of concrete structures. Em: *Fibrous and composite materials for civil engineering applications*. s.l.:Woodhead Publishing limited.

Félix, C., 2004. *Monitorização e análise do comportamento de obras de arte*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.

Fotouhi, M. et al., 2019. The high strain rate tension behaviour of pseudo-ductile high performance thin ply composites. *Composite Structures*, Volume 215, pp. 365-376.

Fuller, J. & Wisnom, M., 2014. Pseudo-ductility and damage suppression in thin ply CFRP angle-ply laminates. *Composites: Part A*, Volume 69, p. 64–71.

Gómez, J., 2012. *Innovative retrofitting materials for brick masonry infill walls*, Guimaraes: Erasmus Mundus Programme- Advanced masters in structural analysis of monuments and historical constructions.

Haj-Ali, R., Zemer, H., El-Hajjar, R. & Aboudi, J., 2013. Piezoresistive fiber-reinforced composites: A coupled nonlinear micromechanical–microelectrical modeling approach. Em: *International Journal of Solids and Structures*. Israel: Elsevier, pp. 491-503.

Harry G Harris, F. P. H. S. M. F. K. K., 2000. Cyclic behavior of a second generation ductile hybrid fiber. Em: s.l.:s.n.

janeiro, F., 2007. *Análise da influência das características da ação sísmica nas exigências de ductilidade*, Lisboa: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil- instituto superior técnico de Lisboa.

Kar, S. & Pattnaik, S. S. M., 2019. Development of Pseudo ductile behavior of carbon fiber reinforced composites-An Overview. *Materials today*, Volume 18, pp. 4315-4321.

Kaveh, A., Dadras Eslamlou, A. & Sheikhi, R., 2020. Seismic performance of steel structures retrofitted with optimal slack cable collapse prevention system. *Journal of Building Engineering*, Volume Volume 31, p. 101392.

Kharisov, B. I., Kharissova, O. V. & Méndez, U. O., 2014. Methods for dispersion of carbon nanotubes in water and common solvents.. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Volume 1700, p. 109–114..

Kima, M., Park, J. & Kim, D., abril, 2020. Characterizing the electro-mechanical response of self-sensing steel-fiber-reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, p. 117954.

Larrinaga, P., Chastre, C., Biscaia, H. C. & San-José, J. T., 2013. Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress. Em: *Materials and Design*. Spain: Elsevier.

Lopes, M. C. T. J. P. C. C. V. G. d. L. R. L. & S. G. G., 2016. Optimization of carbon nanotubes dispersion process in thermoset polyurethane. *Polímeros*, Volume 26, p. 81–91.

Ma, P. C., Siddiqui, N. A., Marom, G. & Kim, J. K., 2010. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 41, p. 1345–1367..

Marques, L., 2007. *Monitorização estática e dinâmica: Aplicações*, Guimarães: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Dissertação de Mestrado em Materiais e reabilitação da construção.

Martins, A., 2013. *Soluções de Reforço Sísmico de Paredes de Alvenaria de Enchimento*, Guimarães: Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Univeridade do Minho,.

Mitchell, C. A. et al., 2002. Dispersion of functionalized carbon nanotubes in polystyrene. *Macromolecules*, Volume 32, p. 8825–8830.

Montagna, L. S. ..., 2010. *Síntese de nanocompósitos de polipropileno/grafite obtidos por meio da polimerização in situ*, São José dos Campos, Brazil: (Universidade Federal de São Paulo.

Morais, M., 2005. *Dissertação de mestrado: Ductility of Beams Prestressed with FRP Tendons*, Englad: University of Cambridge.

Moriche, R. et al., 2015. Morphological changes on graphene nanoplatelets induced during dispersion into an epoxy resin by different methods. *Composites Part B: Engineering*, Volume 72, p. 199–205.

Mosallam, A. S. & Nasr, A., 2017. Structural performance of RC shear walls with post-construction openings strengthened with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, Volume 115, pp. 488-504.

Moura, M., 2015. *Melhoramento de dispersões de nanotubos de carbono para aplicação na estabilização química de solos*, Coimbra, Portugal: Universidade de Coimbra.

Moura, M., Morais, A. & Magalhães, A., 2005. *Materiais Compositos- Materiais, fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas.

Nanni, F., Ruscito, G., Forte, G. & Gusmano, G., 2007. Design, manufacture and testing of self-sensing carbon fibre–glass fibre reinforced polymer rods. Em: *Smart materials and structures*. italy: iop publishing, p. 2368–2374.

Papanicolaou, C., Karlos, K. & Triantafillou, T., January 2008. Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: Out-of-plane cyclic loading. *Materials and Structures*, Volume 41, pp. 143-157.

Papanicolaou, C., Triantafillou, T., Papathanasiou, M. & Karlos, K., 2007. Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls:out-of-plane cyclic loading. Em: s.l.:s.n., pp. 143-151.

Raza, A., Ali, B., Asad Nawaz, M. & Ahmed, I., 2020. Structural performance of FRP-RC compression members wrapped with FRP composites. *Structures*, Volume 27, pp. 1693-1709.

Roque, J. & Lourenço, P., 2003. *Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*. Lisboa, LNEC-Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, pp. 907-916.

S.Kouris, L. & C.Triantafillou, T., 2018. State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, Volume 188, pp. 1221-1233.

Silva, M., 2017. *Métodos De Dispersão E Funcionalização*. , Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP.

Todoroki, A. & Yoshida, J., 2004. Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load. *Jsm International Journal Series A*. Em: *Jsm International Journal Series A – Solid Mechanics and Solid Mechanics and Material Engineering*. s.l.:s.n., pp. 357-364.

Torres, B. et al., 2021. Textile reinforced mortars (TRM) for repairing and retrofitting masonry walls subjected to in-plane cyclic loads. An experimental approach. *Engineering Structures*, Volume 231, p. 111742.

Wang, H. & Belarbi, A., 2010. Ductility characteristics of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars. Em: *Construction and Building Materials*. USA: Elsevier, pp. 2391-2401.

Wu, Z., 2005. *Structural strengthening and integrity with hybrid FRP composites*. FRP composites in Civil Engineering - CICE 2004, Seracino.

Xi, X. & Chung, D., 2019. Capacitance-based self-sensing of flaws and stress in carbon-carbon composites, with reports of the electric permittivity, piezoelectricity and piezoresistivity. *Carbon*, Volume 146, pp. 447-461.

Zhang, H. et al., 2021. Numerical analysis of hybrid (bonded/bolted) FRP composite joints: A review. *Composite Structures*, Volume 262, p. 113606.