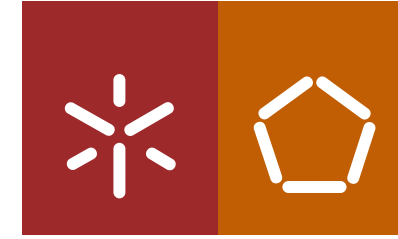


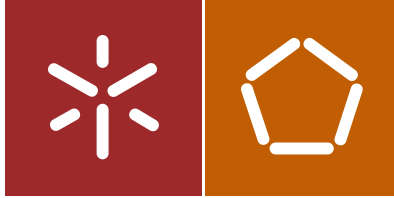


Sebastião Miguel Ferreira Barbosa

Estudo do Comportamento de Elementos de  
Betão Reforçados com Varões Entrançados  
em Material Compósito (BCR)

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Sebastião Miguel Ferreira Barbosa

Estudo do Comportamento de Elementos de  
Betão Reforçados com Varões Entrançados  
em Material Compósito (BCR)

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Internacional em  
Sustentabilidade do Ambiente Construído

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Raul Figueiro  
Professor Doutor Daniel Oliveira

maio de 2016

## AGRAGEDIMENTOS

Ao terminar este trabalho gostaria de deixar expresso o meu sincero agradecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente tornaram possível fazer acontecer mais este objetivo pessoal, nomeadamente:

- Agradeço à minha família, amigos e à minha namorada, pelo apoio, conforto e motivação que me proporcionaram ao longo de todo este trabalho.- Agradeço ao Professor Raúl Figueiro e Daniel Oliveira pela oportunidade concebida, por me terem orientado e possuir um papel importante no desenvolvimento da minha formação académica.

- Agradeço à equipa Fibrous Materials Research Group e Fibrenamics, por todas as sugestões, conselhos e apoio fornecido ao longo da dissertação.

- Agradeço ao meu amigo Joaquim Matos por ter sido o meu técnico de Laboratório, o amigo presente, o incentivo constante e a determinação durante os longos dias de ensaios, até à véspera de Natal.

- Agradeço aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em especial Carlos Jesus pelo apoio e contribuição fundamental prestada ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho experimental.

## RESUMO

As estruturas de betão armado são definidas como um bem fundamental à sobrevivência dos seres humanos e ao favorecimento da qualidade de vida dentro e fora das cidades. A investigação de medidas que visem a preservação, conservação e prolongamento do ciclo de vida destas estruturas continua a despertar interesse no seio da comunidade científica.

O conhecimento do funcionamento das estruturas de betão armado com aplicação do reforço tradicional em aço e dos danos que podem ocorrer pela deterioração deste material por corrosão das armaduras, conduz à necessidade de investigação de novos materiais que melhorem o desempenho das estruturas em termos de resistência e durabilidade.

A aplicação de materiais poliméricos reforçados com fibras FRPs (Fiber Reinforced Polymers) apresentam-se como uma solução credível de reforço das estruturas de betão armado. Contudo, o comportamento linear elástico e a rotura frágil, aliada à baixa rigidez destes varões e ausência ou insuficiente rugosidade dos mesmos, não satisfaz a direta substituição dos varões em aço.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta o estudo sobre a utilização de uma nova geração de varões FRP, designados por Braided Composite Rods (BCRs), no reforço de elementos de betão, comparando o seu desempenho mecânico com os de elementos reforçados por varões de aço convencionais, nas mesmas condições de análise.

No âmbito da atividade experimental desenvolvida em laboratório, os varões BCR e os varões de aço convencionais foram submetidos a ensaios de aderência (pull-out); modelos de viga construídos em laboratório à escala reduzida foram submetidos a ensaios de flexão. Foram produzidos varões BCR com três diferentes composições do núcleo usando a técnica de entrançamento, que permite a criação de uma estrutura exterior nervurada à volta das fibras introduzidas axialmente no núcleo de reforço.

Os resultados obtidos permitem concluir que quando sujeito a ensaios de pull-out a inovadora estrutura de revestimento dos varões BCR potencia uma aderência superior à verificada pelos varões de aço (mais de 60%), fornecendo bloqueio mecânico com o betão. Ao nível do comportamento das vigas de betão com armadura BCR verifica-se o bom desempenho estrutural em termos de pseudoductilidade, capacidade de absorção de energia e aderência entre armadura e o betão.



**Palavras-chave:** Reforço do Betão, Corrosão das armaduras, Varões Compósitos Têxteis (BCR), Aderência, Ductilidade.

## ABSTRACT

The reinforced concrete structures are defined as a fundamental asset for the survival of human beings and favouring the quality of life in and out of cities. The research of measures that aim the preservation, conservation and extension of the life cycle of these structures continues to arouse interest in the scientific community. The knowledge of the performance of reinforced concrete structures with application of traditional steel reinforcement and damage that may occur by the deterioration of this material by the corrosion of armatures, leads to the need for research into new materials to improve the performance of structures in terms of strength and durability.

The application of polymeric materials reinforced with FRP fibers (Fiber Reinforced Polymers) present as a credible solution for the strengthening of concrete structures. However, the linear elastic behaviour and the brittle failure, allied with the low rigidity of these rods and the absence or insufficient roughness thereof, does not satisfy the direct replacement of steel rods.

In this context, the present paper presents the study on the use of a new generation of FRP rods, called Braided Composite Rods (BCR), for reinforcement of concrete elements, comparing their mechanical performance with the performance of reinforced elements for conventional steel rods, in the same analysis conditions.

Under the scope of experimental activity carried out in the laboratory, BCR rods and conventional steel rods, were subjected to adhesion test (pull-out); beam models built in laboratory in reduced scale were subjected to bending tests. BCR rods were produced with three different core compositions using braiding technique, which enables the creation of a ribbed exterior around the fibers introduced axially in the reinforcing core.

The achieved results allow us to conclude that when subjected to pull-out testing, the innovative coating structure of BCR rods, enables a superior adhesion to the ascertained by steel rods (more than 60%), providing mechanical lock with concrete. In terms of behaviour of concrete beams with BCR armatures, we can verify a good structural performance in terms of pseudo-ductility, capability of energy absorption and adhesion between armature and concrete.

**Key words:** Concrete Reinforcement, Reinforcement Corrosion, Textile Composite Rods Braided Composite Rods (BCR), Adherence, Ductility.

## ABREVIATURAS

BCR: Varões compósitos enrançados;

FRP: Polímero reforçado com fibras;

GFRP: Polímero reforçado com fibra de vidro;

CFRP: Polímero reforçado com fibra de carbono;

LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

LVDT: Transdutor de diferencial linear variável;

### Notações:

f – resistência do material

$f_c$  – tensão de rotura do betão à compressão

$f_{ck}$  – tensão característica de rotura do betão à compressão

$f_{ct}$  – tensão de rotura do betão à tracção

$E_c$  – módulo de elasticidade do betão

$f_y$  – tensão de cedência do aço

$f_{yk}$  – tensão característica de cedência do aço

$f_u$  – tensão de rotura do aço

$E_s$  – módulo de elasticidade do aço

$\tau_d$  – Tensão de aderência

## INDICE GERAL

AGRAGEDIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ABREVIATURAS .....	v
INDICE GERAL.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE TABELAS .....	xv
INDICE DE EQUAÇÕES.....	xvi
1. CAP - INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO	
1.1 Introdução.....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.4 Método de investigação .....	4
2. CAP - ESTADO DA ARTE	
2.1 Introdução e contexto histórico .....	6
2.2 A utilização de FRP como elemento de reforço.....	10
2.3 A evolução do comportamento mecânico de varões FRP .....	17
2.4 Desempenho do FRP melhorado através da mistura de diferentes tipos de fibras .....	17
2.4.1 FRP Hibridação e características para monitorização.....	17
2.4.2 Manipulação da estrutura fibrosa do reforço.....	22
2.5 Incorporações materiais dúcteis em FRP 's.....	28
2.6 Balanço da evolução do comportamento mecânico de varões de FRP .....	33
2.7 Durabilidade dos varões FRP no reforço de betão .....	35
2.7.1 Influência do ambiente exterior .....	37
2.7.2 Efeitos do ambiente do betão.....	37

2.7.3	Efeitos em função do tempo .....	38
2.8	Disposições de projeto para a durabilidade .....	39
2.9	Tecnologia Braided Composite Rods (BCRs) .....	40
3.	CAP III – ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CARATERIZAÇÃO DO BETÃO	
3.1	Introdução.....	45
3.2	Composição do material.....	45
3.2.1	Estudo curva granulométrica dos agregados.....	46
3.2.2	Recolha da amostra.....	46
3.2.3	Peneiração e pesagem dos agregados.....	46
3.2.4	Caraterização dos agregados .....	48
3.3	Metodologia .....	49
3.4	Realização das amassaduras.....	50
3.4.1	Procedimento .....	50
3.4.2	Betonagem e cura dos provetes .....	50
3.5	Estudo do módulo de elasticidade.....	51
3.5.1	Metodologia.....	51
3.5.2	Amassadura, betonagem e cura.....	52
4.	CAP IV – MATERIAL DE REFORÇO	
4.1	Introdução.....	53
4.2	Composição do material de reforço BCR.....	53
4.2.1	Fibras.....	55
4.2.2	Matriz.....	55
4.3	Composição do aço.....	55
4.4	Metodologia para produção do material de reforço BCR .....	56
4.5	Técnica de entrançamento .....	56
4.5.1	Estrutura nervurada.....	57

4.5.2	Enrançamento dos varões BCR.....	58
4.6	Processo de produção dos varões BCR.....	59
4.6.1	Modelo teórico.....	59
4.6.2	Modelo experimental.....	60
4.7	Reforço BCR.....	62
5.	CAP V - CARATERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO MATERIAL DE REFORÇO	
5.1	Introdução.....	64
5.2	Caraterização individual do material de reforço .....	64
5.2.1	Metodologia.....	65
5.2.2	Comportamento à tração do material de reforço.....	65
5.2.3	Preparação dos provetes de BCR para ensaio .....	65
5.2.4	Preparação dos provetes de ensaio em aço.....	69
5.3	Caraterização do comportamento de aderência do reforço ao betão .....	70
5.3.1	Metodologia.....	70
5.3.2	Definição do comprimento de aderência.....	70
5.3.3	Ensaio de aderência (Pull – out).....	72
5.3.4	Preparação varões Pull - out.....	72
5.3.5	Amassadura, betonagem e cura dos provetes pull – out.....	74
5.4	Caraterização do comportamento de elementos de betão - vigas.....	76
5.4.1	Metodologia.....	77
5.4.2	Definição da geometria da secção das vigas.....	78
5.4.3	Armadura de flexão em aço .....	78
5.4.4	Armadura de flexão em BCR.....	79
5.4.5	Armadura de esforço transversal.....	80
5.4.6	Moldagem das armaduras .....	81
5.4.7	Amassadura, betonagem e cura dos provetes .....	83

## 6. CAP VI - RESULTADOS e ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1	Caraterização do betão em estado fresco.....	85
6.1.1	Metodologia.....	85
6.1.2	Procedimento de ensaio .....	86
6.1.3	Resultados.....	86
6.2	Caraterização do betão em estado endurecido .....	86
6.2.1	Metodologia.....	86
6.2.2	Procedimento de ensaio de compressão .....	87
6.2.3	Resultados de ensaios de compressão .....	87
6.2.4	Procedimento de ensaio módulo elasticidade .....	89
6.2.5	Resultados de ensaios módulo de elasticidade .....	91
6.3	Caraterização do reforço em aço A400NR .....	92
6.3.1	Metodologia.....	92
6.3.2	Procedimento de ensaios varões de aço A400NR .....	92
6.3.3	Resultados dos ensaios de tração do aço A400NR .....	93
6.4	Caraterização do reforço em material compósito BCR.....	95
6.4.1	Metodologia.....	95
6.4.2	Procedimento de ensaio .....	95
6.4.3	Resultados dos ensaios de tração em BCRs .....	96
6.5	Caraterização do material de reforço por ensaio de pull out .....	101
6.5.1	Metodologia.....	101
6.5.2	Procedimento de ensaio pull out .....	102
6.5.3	Resultados dos ensaios de Pull - out .....	103
6.6	Caraterização do comportamento de elementos de betão por ensaios de flexão .....	105
6.6.1	Metodologia.....	105
6.6.2	Procedimento de ensaio em vigas à flexão .....	106

6.6.3	Resultados dos ensaios de flexão em vigas.....	108
7.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	
7.1	Ensaio de aderência – Pull-Out .....	118
7.2	Ensaio de flexão em vigas .....	122
7.2.1	Ensaio destrutivo de flexão em vigas .....	127
7.3	Trabalhos futuros .....	128
8.	REFERÊNCIAS .....	130
9.	ANEXOS	
9.1	Informação sobre cálculos preliminares .....	139
9.2	Informação técnica acerca de materiais utilizados.....	143

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - As consequências estruturais de corrosão em estruturas de betão armado (Bertolini, et al, 2005). .....	6
Figura 2 - Classificação quanto à origem das fibras (Anon., 2006). .....	7
Figura 3 - Curvas tensão – extensão das fibras de reforço típicas: a) de carbono (alto módulo); b) de carbono (de alta resistência); c) de aramida (Kevlar 49); d) Vidro - S; e) Vidro - E; f) basalto (Fib, 2007). .....	9
Figura 4 - Curva tensão - extensão do varão GFRP, testado em tração (Bank, 2006). .....	11
Figura 5 - Curvas teóricas momento - curvatura para secções com varões de aço / FRP (Committee 440 ACI, 2006) .....	12
Figura 6 - Momento - curvatura de vigas de betão armado com: aço (ST5 eST6) e com barras de GFRP (ISO6, ISO7, ISO8, KD5, KD6) (Benmoktane, et al., 1995). .....	12
Figura 7 - Varão Isorod da pultrall® (Pultrall, 2015). .....	13
Figura 8 - Varão Arapree, (Nordin, 2003) (Nordin, 2005). .....	13
Figura 9 - Varão Technora™, (Karbhari, 1988). .....	13
Figura 10 – varões Leadline™ (Bank, 2006) (Nordin, 2003) (Nordin, 2005). .....	14
Figura 11 - Exemplo de varão CFCC™ para longos vãos (Bank, 2006) (Nordin, 2003) (Karbhari, 1988). .....	14
Figura 12 - Varões Fibra™ e cabo (Committee, 440 ACI, 2002) (Nanni, A., et al., 1993). .....	15
Figura 13 - Fotografias de secções transversais da barra FRP híbrida (Bakis, et al., 2001). .....	18
Figura 14 - Idealizado comportamento tensão- extensão dos compósitos híbridos (Wu, 2005)..	19
Figura 15 - Compósito híbrido composto por fibra de Dyneema, fibra de alta resistência (C1) e fibra carbono, alto módulo (C7) (Wu, 2005). .....	20
Figura 16 - Teórica curva tensão - extensão de uma barra híbrida (Cui, et al., 2008). .....	20
Figura 17 - Modelo elétrico e mecânico da barra híbrida de CFRP, curva carga-extensão e $\Delta R / R_0$ – extensão (Yang,C., Wu, Z., Ye, L. P. , 2006) (Wu, Z., Yang, C.,Takahashi, T., 2003). .....	21
Figura 18 - Forma e seção transversal da barra híbrida FRP (Sim, J.S., et al, 2005). .....	22
Figura 19 - Entrançado 1),fibra 2), resina (Tepfers, R., et al, 1996). .....	23
Figura 20 - Medição tensão-deformação do entrançado de aramida com núcleo de carbono (Tepfers, R., et al, 1996). .....	23
Figura 21 - Processo braidtrusion dúctil híbrido FRP (DH-FRP) (Somboonsong, et al., 1998). ...	24



Figura 22 - Esquema de produção no processo “braitrusion” (Lam, Hoa., et al, 1999). .....	25
Figura 23 - Efeito dos fios de nervura na geometria do tecido entrançado (Pastore & Ko, 1999) (Lam, Hoa., et al, 1999). .....	25
Figura 24 - Hierarquia estrutural de conjuntos fibrosos (Somboonsong, et al., 1998). .....	26
Figura 25 - Curva tensão-extensão barra DH-FRP 5mm e comparação barra de aço (Hampton, et al., 1999). .....	27
Figura 26 - Carga – deformação, ensaio cíclica (esquerda) e momento - curvatura (direita) por vigas com armadura DH-FRP 5mm e aço (Harris, et al., 1998). .....	27
Figura 27 - Diagrama da barra híbrida e curva tensão - extensão: experimental e teórica, Kevlar-aço (K96) e Vinylon - aço (V96), com barra aço diâmetro 9.2mm (Henneke, 1993). .....	29
Figura 28 - Varão híbrido e curva de tensão – extensão (Saikia, B., et al, 2005). .....	29
Figura 29 - Secção transversal compósito tradicional (esquerda) e no modelo compósito híbrido (Cui, et al., 2008). .....	30
Figura 30 - Lei das misturas e relação teórica da curva de tensão - extensão da barra de reforço híbrida (Cui, et al., 2008). .....	31
Figura 31 - Relação curva tensão - extensão barra híbrida (Cui, et al., 2008). .....	31
Figura 32 - Comparação ganho de peso e resistência à tração do varão híbrido e GFRP (Cui, et al., 2008). .....	32
Figura 33 - Comparação da rigidez, resistência e custo de diferente armadura de reforço (Cui, et al., 2008). .....	32
Figura 34 - Configuração do produto SFCB (Aramid, 2015). .....	33
Figura 35 - Curva típica da extensão durante a deformação em fluência, (Reis, 2009). .....	38
Figura 36 - BCR de hoje ao futuro .....	41
Figura 37 - Processo produção BCR (Fangueiro, et al., 2011). .....	41
Figura 38 - BCR curva tensão – extensão (Fangueiro, et al., 2011). .....	42
Figura 39 - BCR curva carga – deflexão vigas de betão (Fangueiro, et al., 2011). .....	43
Figura 40 - Ensaio de flexão (à esquerda), o deslocamento, mudança de resistência e tempo de resposta BCR (núcleo 77% de vidro e 23% de carbono) (Zdraveva, 2010). .....	44
Figura 41 – (a) Série de peneiros areia 0/4mm; (b) Acumulados retidos areia 0/4mm. ....	47
Figura 42 - Curva granulométrica agregados .....	48
Figura 43 - (a) Betonagem provetes; (b) População de Provetes. ....	51
Figura 44 - Organigrama produção varões entrançados compósitos entrançados .....	54

Figura 45 - Representação em corte transversal BCR, (Cunha, 2012) .....	54
Figura 46 - Reforço tipo A400NR.....	56
Figura 47 - Bobinagem (a); Fabrico da rugosidade (b) .....	58
Figura 48 - Esquema do processo de produção utilizado, (Patinha, et al., 2014) .....	59
Figura 49 - Alinhamento das fibras (a); Impregnação das fibras (b); Entrançamento (c).....	61
Figura 50 - Cura (a) e Tiragem (b).....	62
Figura 51 - Varão com núcleo em fibra de vidro e vidro/carbono (a) e Varão híbrido vidro/aço (b) .....	63
Figura 52 - Remoção do entrançado .....	66
Figura 53 - Enrolamento manta fibra de vidro.....	67
Figura 54 - Zona enchimento provete (a) e Orientação centrada do varão (b) .....	67
Figura 55 - Selagem provetes com cola quente .....	68
Figura 56 - Estrutura de impregnação (a), Enchimento com resina epóxida (b) .....	69
Figura 57 - Provetes para caracterização desempenho mecânico BCR.....	69
Figura 58 - Especificação das dimensões usadas no método pull - out, (SILVA, et al., 2013). ...	70
Figura 59 – Moldagem da zona de aderência, Pull – out .....	73
Figura 60 – Moldagem da zona de ancoragem, pull – out BCR (a), pull – out aço (b),.....	73
Figura 61 - Molde pull – out e posicionamento do varão .....	74
Figura 62 - Betonagem provetes pull – out.....	75
Figura 63 - Provetes de ensaio pull – out .....	76
Figura 64 - Estrutura da composição das vigas de betão .....	78
Figura 65 - Representação teórica de tensões - extensões em elementos de betão armado .....	79
Figura 66 - Material de reforço, a) aço A400NR; b) BCR.....	82
Figura 67 - Corte do aço e moldagem dos estribos .....	82
Figura 68 - Moldagem de armadura para vigas.....	83
Figura 69 - Betonagem vigas.....	84
Figura 70 – a) Vigas BCR1 e BCR2, b) BCR3 e Aço A400NR .....	84
Figura 71 - a) Tipos de rotura satisfatórios provetes cilíndricos (NP EN 12390-3, 2009); b) Amostra rotura experimental ensaio aos 28 dias betão_2 .....	88
Figura 72 - Ensaio do módulo elasticidade .....	90
Figura 73 - Módulo elasticidade do betão .....	91
Figura 74 – Ensaio de tração do aço A400NR (a), Posicionamento Clip Gauge (b) .....	92

Figura 75 - Relação tensão-extensão para varões de aço A400NR.....	93
Figura 76 - Ensaio de tração em varões de aço.....	94
Figura 77 - Setup ensaio tração BCR (a), Posicionamento Clip Gauge (b).....	96
Figura 78 - Relação tensão-extensão para os varões BCR e aço.....	97
Figura 79 - Representação gráfica do módulo de elasticidade por tipo de varão.....	98
Figura 80 - Representação gráfica da tensão máxima alcançada por tipo de varão.....	99
Figura 81 - Representação gráfica das tensões máximas de tração por tipo de varão.....	101
Figura 82 - Setup ensaio Pull - out.....	103
Figura 83 - Posicionamento régua metálica (a), LVDT deslocamento vertical (b).....	107
Figura 84 - Desempenho estrutural das vigas referência armadas com aço.....	109
Figura 85 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de aço (a-fase plástica; b - fase elástica; c - esmagamento betão). .....	110
Figura 86 - Desempenho estrutural das vigas armadas com BCR1 - Fibras de vidro.....	111
Figura 87 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de armadura BCR1 (a - primeira fissura; b - pré-esmagamento do betão; c - esmagamento do betão). .....	112
Figura 88 - Desempenho estrutural das vigas armadas com BCR2 - Fibras de vidro e carbono.....	113
Figura 89 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de armadura BCR2 (a - primeira fissura; b - pré-esmagamento do betão; c - esmagamento do betão). .....	114
Figura 90 - Desempenho estrutural das vigas armadas com BCR3 - Fibras de vidro e fio de aço.....	115
Figura 91 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de armadura BCR3 (a - primeira fissura; b - pré-esmagamento do betão; c - esmagamento do betão). .....	116
Figura 92 - Tensão de aderência máxima, pull - out.....	119
Figura 93 - Comportamento dos varões por ensaio de aderência, pull - out.....	119
Figura 94 - Pormenor interior provete pull - out com varão BCR.....	120
Figura 95 - Varões arrancados do betão, BCR e aço.....	121
Figura 96 - Conclusões dos ensaios de flexão em vigas força - deslocamento.....	124
Figura 97 - Conclusões dos ensaios de flexão em vigas, flecha - momento fletor.....	126
Figura 98 - rotura total de viga à flexão.....	128

## INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das fibras e os custos relativos (Marques, 2011).....	9
Tabela 2 - Propriedades das resinas de matrizes termoendurecíveis (Fib, 2007).....	10
Tabela 3 - Dados dos fabricantes de varões FRP, Arapree, Technora, Leadline, CFCC (Nordin, 2003) (Nordin, 2005).....	15
Tabela 4 - Combinação de materiais para desenvolvimento do reforço composta híbrida (Cui, et al., 2008).....	31
Tabela 5 – Resumo do Estado da Arte – Estudos de ignição no conhecimento desenvolvido ....	34
Tabela 6 - Efeitos da temperatura em barras GFRP expostas ambiente alcalino, betão e água (Fib, 2007).....	35
Tabela 7 - Influência dos agentes ambiente do betão (Ceroni, et all, 2006).....	37
Tabela 8 - Série de efeitos dependentes do tempo, (Ceroni, et all, 2006). ....	38
Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas de varões FRP (CNR, 2007) (Committee 440 ACI, 2006) (Fib, 2007).....	40
Tabela 10 - Fatores de redução da capacidade de tração dos varões FRP, por ações ambientais e carga constante (Committee 440 ACI, 2006) (CNR, 2007) (JSCE, 1997).....	40
Tabela 11 - BCR composição e resultados dos ensaios de tração (Fangueiro, et al., 2011). ....	42
Tabela 12 - Análise granulométrica .....	48
Tabela 13 - Composição das misturas de betão, (Pereira, 2014) .....	49
Tabela 14 - Propriedades dos materiais utilizados na produção dos varões .....	54
Tabela 15 - Propriedades do aço A400NR, (LNEC, 2010).....	56
Tabela 16 - Caraterísticas físicas e mecânicas teóricas dos varões .....	63
Tabela 17 - Composição da amostra ensaio de tração e tipo de reforço .....	66
Tabela 18 - Composição da amostra Pull – out e tipo de reforço.....	74
Tabela 19 - Composição da amostra flexão e tipo de reforço .....	81
Tabela 20 - Caraterização do abaixamento dos betões (NP EN 206-1, 2007).....	86
Tabela 21 - Resultados ensaios de compressão.....	88
Tabela 22 - Estudo módulo elasticidade do betão, (LNEC E397, 1993).....	91
Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração de varões de aço A400NR.....	93
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de tração em varões de aço A400NR .....	94
Tabela 25 - Módulo elasticidade teórico e laboratorial dos varões BCR.....	98

Tabela 26 - Gráficos ensaios de pull – out, tensão - deslizamento .....	104
Tabela 27 - Resultados numéricos ensaios de pull - out .....	104
Tabela 28 - Conclusões ensaios de flexão em vigas, força – eslocamento .....	125
Tabela 29 - Conclusões ensaios de flexão em vigas, flecha - momento fletor .....	126

## INDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Módulo do compósito híbrido .....	19
Equação 2 - Tensão do compósito híbrido .....	19
Equação 3 - Tensão de aderência .....	102

## 1. CAP - INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO

### 1.1 Introdução

Os polímeros reforçados com fibras FRPs (Fiber Reinforced Polymers), são materiais compósitos desenvolvidos após a 2ª Guerra Mundial, tendo sido introduzidos na indústria da construção nos últimos 30 anos. Os FRPs utilizados em aplicações estruturais são essencialmente uma combinação de fibras sintéticas de alto desempenho, com uma matriz de base termoendurecível. Desta forma, os FRPs podem ser produzidos por diferentes métodos, sendo que no caso particular de varões de FRP, o processo mais utilizado é a pultrusão, (Balaguru, et al., 2008) (Bank, 2006).

Grande parte do mercado dos FRPs, na construção, prende-se com a sua utilização como elemento de reforço em diferentes tipos de estruturas, tais como: betão, metal, madeira e alvenaria (Balseiro, 2007) (Shaat, 2007) (Tinazzi & Nanni, 2000). Isto deve-se às suas várias vantagens, tais como: baixo peso / alta resistência, grande variedade de formas (varões, barras, perfis e outros...), excelente resistência aos agentes de degradação ambiental, como ciclos de congelamento e descongelamento, ataque químico, variações de temperatura e ainda resistência à corrosão (Waldron, 2004).

Desta forma, os varões de FRP têm sido utilizadas em estruturas de betão como substituição dos tradicionais varões de aço de reforço para betão armado, a fim de evitar a corrosão do aço, induzida pelo dióxido de carbono presente na atmosfera ou cloretos no ambiente de exposição. O fenómeno de corrosão pode conduzir a um número elevado de graves consequências, como, deterioração prematura de aço e, conseqüentemente, degradação do betão, a redução do desempenho estrutural e risco de colapso, com perda de vidas. Além disso, a redução do tempo de vida das estruturas afetadas tem também um grande impacto económico na adaptação ou substituição de estruturas, como são exemplo as estruturas junto ao mar (Eamon; et al, 2012).

## 1.2 Motivação

Os últimos anos do conhecimento científico sobre as potencialidades dos materiais FRP, foram pautados por desenvolvimentos muito acentuados de tecnologias que potenciam os pontos fortes e minimiza os pontos fracos na utilização destes materiais, como substitutos diretos dos varões de aço. Desta forma, novas estruturas foram construídas com FRPs, diferentes empresas estão a produzir e vender varões de FRP em todo o mundo e existem códigos de projeto orientadores, criados nos EUA, UE e Ásia, a fim de servirem de guia de boas práticas ao dimensionamento estrutural.

No entanto, continuam a existir questões que estão a causar dificuldades na aplicação em larga escala destes produtos:

- Os varões compostos por um único tipo de fibra têm um comportamento linear elástico e rutura frágil, sem exibir aviso ou qualquer ductilidade antes da rutura. Assim, as teorias de projeto e códigos de projeto FRP, obrigam ao uso de altos coeficientes de segurança, com finalidade de evitar ruturas frágeis do reforço, ou em vez disso, a rutura da secção de betão pela falha dúctil da lâmina de betão comprimida. Por outro lado, são necessárias maiores quantidades de reforço, o que conduz ao desaproveitamento da elevada resistência do FRP (Balendran, R.V., et al, 2002) (Fib, 2007);
- Uma alternativa para os tradicionais FRPs são as barras híbridas FRP, compostas por diferentes fibras com extensão de rutura diferente para obter um comportamento pseudodúctil. No entanto, ainda não são uma boa opção, apesar dos interessantes resultados observados, mas alguns inconvenientes não foram resolvidos: após a rutura das primeiras fibras, as perdas de carga verificadas ainda não são bem controlados, e pode ser perigoso para a aplicação estrutural;
- Para melhorar a rigidez das barras de FRP construídas a partir da fibra de carbono, são usados alguns tipos especiais de fibras de carbono com alto módulo (HM) e ultra - alto módulo (UHM). Essas fibras têm altos valores de módulo de elasticidade (ainda maiores do que o aço), mas economicamente inviáveis, transformando essas barras de CFRP em materiais sem custo competitivo;

- O vínculo/aderência dos varões FRP ao betão é um dos grandes desafios da comunidade científica. Essa aderência é muito importante para que a estrutura funcione como um todo, uma vez que é responsável para fornecer bloqueio mecânico com o betão, introduzindo ductilidade e transferência de cargas ao núcleo, com a possibilidade de produção industrial da tecnologia implementada.

O processo de pultrusão é a técnica mais utilizada na produção de varões de FRP, conduzindo a um produto final flexível e de acabamento liso, características desinteressantes para uma alternativa ao varão tradicional em aço. Atualmente têm-se verificado desenvolvimentos para se encontrar uma técnica que consiga suprimir as lacunas do processo de pultrusão. Assim, a tecnologia de entrançamento tem vindo a ser explorada com sucesso pela comunidade científica de forma a introduzir melhorias significativas no processo produtivo. Desta forma, esta técnica de baixo custo, permite a criação de uma camada externa à volta das fibras introduzidas axialmente no núcleo de reforço. A técnica de entrançamento ainda permite a produção de estruturas nervuradas com melhor comportamento, no que se refere à sua aderência com o betão. Além disso, a grande variedade de propriedades mecânicas pode ser alcançada, adaptando a composição do núcleo e da estrutura entrançada. A estrutura entrançada atua mesmo como uma camada de proteção para o núcleo, melhorando a durabilidade das estruturas reforçadas, (Fangueiro, et al., 2011) (Lees, 2001) (Ayranci & Carey, 2008) (Pereira & al, 2010) (Ahmadi & Johari, 2009).

### 1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e execução de um programa experimental, para caraterizar e avaliar o comportamento estrutural de vigas de betão reforçadas por nova geração de varões FRP, designados por Braided Composite Rods (BCRs) e comparar com a armadura tradicional em aço. Com isto, pretende-se representar e identificar as potencialidades da utilização de reforço BCR na eliminação de um dos maiores problemas que afeta a durabilidade do betão durante o ciclo de vida, corrosão do aço. No entanto, é também relevante estudar a rugosidade equivalente com o aço de referência e incorporar na matriz do reforço BCR, verificando aderência e transferência de cargas entre o material compósito BCR e o material compósito betão.

Por outro lado, avaliar a pseudoductilidade que se pretende introduzir na composição do núcleo do varão BCR, para que a rotura das fibras seja caraterizada por dois tramos distintos (fase elástica



e fase plástica), à semelhança do reforço tradicional em aço, ou que aconteça de forma progressiva a diferentes extensões de rotura.

Com isto, os objetivos específicos deste trabalho incluem os seguintes estudos:

- I. O comportamento mecânico do elemento estrutural, vigas, à flexão, por aplicação de carregamento monotónico (ensaio estático);
- II. O comportamento betão/varão com ensaio de aderência (pull - out).

Desta forma, explorar e compreender as vantagens e desvantagens das potenciais características dos varões compósitos BCR, capazes de influenciar a durabilidade do betão, incrementando leveza estrutural e maior resistência ao estado limite último de carregamento.

#### **1.4 Método de investigação**

O método de investigação aplicado neste trabalho foi desenvolvido segundo a aplicação de 3 diferentes fases:

##### **1 Fase: Revisão da literatura**

A primeira fase foi das mais importantes do presente plano de tese de mestrado e visa o estudo, identificação e descrição do conhecimento e técnicas desenvolvidas até ao momento na produção e utilização de materiais compósitos no reforço de elementos de betão. O conhecimento sobre as potencialidades e problemas dos materiais compósitos na aplicação como reforço no betão, fundamenta o objetivo do trabalho proposto no desenvolvimento do conhecimento do material Braided Composite Rods (BCRs);

##### **2 Fase: Modelo do programa experimental**

Nesta fase foram definidas as estratégias que conduziram ao resultado pretendido, ou seja, o desenvolvimento do conhecimento sobre a utilização de armadura BCR no reforço de elementos de betão armado. Este trabalho foi desenvolvido tendo em consideração as exigências que se pretendem ver correspondidas pelo material BCR comparativamente com o aço tradicional (reforço do betão), tendo como ponto de partida o conhecimento teórico e experimental existente;

##### **3 Fase: Validação do comportamento da armadura BCR**

Esta fase foi principalmente experimental e teve início com a implementação do programa experimental. Foi nesta fase que foram avaliadas as propriedades mecânicas da combinação de reforço BCR e betão, e se possuía capacidade para resolver os problemas e fraquezas descritas. Para isto, foram ensaiados elementos de betão com diferente composição de armadura BRC, mas o mesmo betão.

Os resultados alcançados por este programa experimental foram analisados de forma a retirar conclusões com vista à mitigação das fraquezas identificadas: comparação dos valores reais obtidos com os modelos teóricos, comparação dos resultados das diferentes variáveis de armadura, compreender comportamento mecânico e principais aspetos na validação dos modelos propostos.

Esta fase foi concluída com a redação final da tese de Mestrado.

## 2. CAP - ESTADO DA ARTE

### 2.1 Introdução e contexto histórico

Desde o início da humanidade, o homem tenta misturar materiais, a fim de conseguir materiais inovadores com melhor desempenho. Tomando as vantagens das propriedades particulares de cada um dos componentes, tem sido possível criar sinergias capazes de revolucionar a indústria da construção. Um exemplo disto, é o próprio betão reforçado com aço. Combinando betão e varões de aço, numa única peça estrutural, duas propriedades diferentes, ficam juntas e potenciam as fragilidades de ambos: compressão e resistência à tração, o que resulta num enorme avanço do conhecimento no tempo, que, mesmo um século depois do seu desenvolvimento, ainda é um dos materiais estruturais mais utilizados (Waldron, 2004) (Karbhar, 2007).

No entanto, além do betão reforçado com aço ser uma excelente combinação de materiais, existe um grande e grave problema que afeta a sua durabilidade e tempo de vida estimado, a corrosão do aço. A corrosão do aço ocorre quando a camada fina de óxido protetora, produzido durante a hidratação do cimento, é destruída. A destruição desta camada pode ocorrer, essencialmente, de duas maneiras: a corrosão induzida por carbonatação, originada pelo dióxido de carbono presente no ar, e a corrosão por cloretos, próximo de ambientes marinhos ou quando exposta a muito altos níveis de cloretos. Com o início da propagação da corrosão, e se nada for feito, podem acontecer diferentes danos, afetando o desempenho da estrutura e, conseqüentemente, a sua capacidade de carga e segurança (Figura 1) (Waldron, 2004) (Moreno, et al., 2004) (Bertolini, et al, 2005).

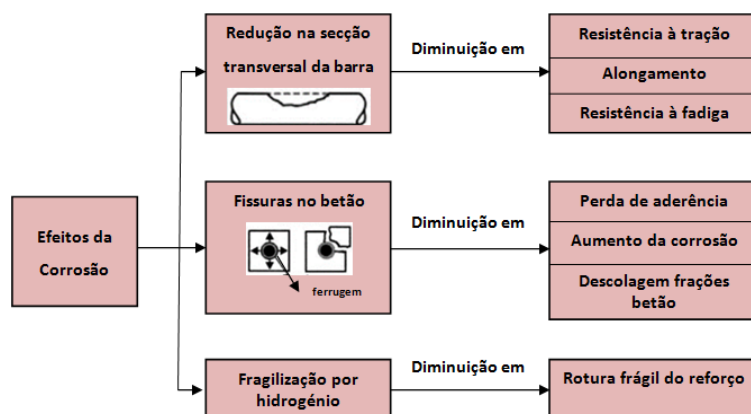


Figura 1 - As conseqüências estruturais de corrosão em estruturas de betão armado (Bertolini, et al, 2005).

Desta forma, para resolver o problema, têm sido propostos vários métodos, tais como: aumentar o recobrimento do betão sobre o reforço de aço, utilizar barras de aço revestido de resina epóxida, aplicar revestimentos sobre as barras de aço, usar inibidores de corrosão em betão, proteção catódica, entre outros (Waldron, 2004). Outra solução apresentada, que manteve a atenção dos engenheiros para opções de futuro, foi a aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibras (FRP) como reforço de elementos de betão armado.

O FRP foi desenvolvido na década de 50 pela indústria aeroespacial, e consiste na combinação de fibras de alta resistência e rigidez, com um polímero termoendurecível de alto desempenho. Este polímero pode ainda ser aditivado com enchimentos ou aditivos para alcançar outras propriedades se necessário. As combinadas fases de reforço (fibras) e a matriz (resina), cria novos materiais com inegáveis vantagens: alta resistência para baixo peso, baixo coeficiente de expansão térmica axial, excelentes características de fadiga (baixo peso), resistência à corrosão, potencialmente de alta durabilidade e electromagneticamente transparente.

O elemento responsável pelo reforço são as fibras. Estas tem por missão resistir essencialmente a esforços de tração. Atualmente, existe uma grande variedade de materiais fibrosos disponíveis no mercado, sendo que podem ser classificadas de acordo com sua origem. Primeiramente, as fibras podem ser de origem natural (derivadas diretamente da natureza) fibras como juta, sisal, coco, entre outros, ou de origem não naturais, ou seja, são manipuladas pelo homem.

Dentro destas, as fibras dividem-se em orgânicas, caso das fibras de aramida (Kevlar), e as fibras inorgânicas, para fibras de vidro, de carbono e de basalto, como se demonstra na (Figura 2) (Anon., 2006).

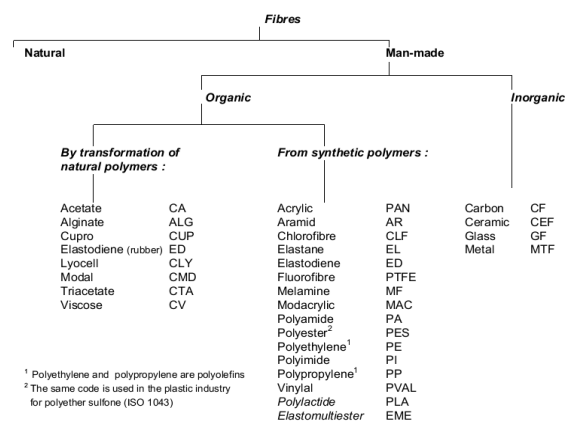


Figura 2 - Classificação quanto à origem das fibras (Anon., 2006).

Das fibras anteriormente identificadas, nem todas apresentam propensão para serem utilizadas em varões de FRP, muito devido às suas características de durabilidade e de resistência mecânica.

Assim as fibras mais comuns são:

- **As fibras de vidro:** As fibras de vidro são atualmente o reforço mais utilizado em compósitos, devido às características intrínsecas de alta resistência, apresentando características de processamento otimizadas. Estas fibras são produzidas desde o início do século XX, e são principalmente provenientes de sílica (Bunsell, 2009);
- **As fibras de carbono:** Existem três tipos de fibras de carbono: Rayon, Pitch e PAN (poliacrilonitrilo). As com base em Rayon são produzidas a partir de fibras de celulose, sendo assim um material produzido através de um recurso renovável e com elevado potencial para ser um material sustentável no futuro. As do tipo Pitch são produzidos a partir de resíduos da indústria de petróleo e siderurgia. Por seu lado, as do tipo PAN são produzidos a partir da carbonização do monómero de acrilonitrilo (Bunsell, 2009);
- **As fibras de aramida (A):** Apresentam elevada ductilidade quando sujeitas à compressão, tendo a capacidade de absorver energia, o que lhes confere uma boa resistência ao impacto, exibindo também elevada plasticidade em compressão quando sujeitas à flexão. São ainda resistentes à fadiga e exibem reduzida fluência. Contudo, a resistência e o módulo de elasticidade diminuem linearmente com o aumento da temperatura, são sensíveis à radiação UV e na presença de uma elevada percentagem de humidade, as fibras tendem a fendilhar internamente (Shaath, 2007) (Fib, 2007).
- **As fibras de Basalto (B):** Estas fibras são produzidas por fusão de material de basalto que é encontrado em rochas vulcânicas, originado pelo arrefecimento da lava (Quagliarini, et al., 2012).

As propriedades mecânicas destas fibras são demonstradas na (Figura 3) e na Tabela 1. As fibras de carbono e aramida são anisotrópicas com diferentes valores de características mecânicas e propriedades térmicas nas principais direções, enquanto as fibras de vidro são isotrópicas, bem como fibras de basalto (Fib, 2007).

Contudo, os varões de FRP são anisotrópicos, apresentando elevada resistência e rigidez na direção das fibras, sendo relativamente frágeis na direção transversal, o que significa importante influência para a direção do carregamento no desempenho estrutural dos varões (Reis, 2009).

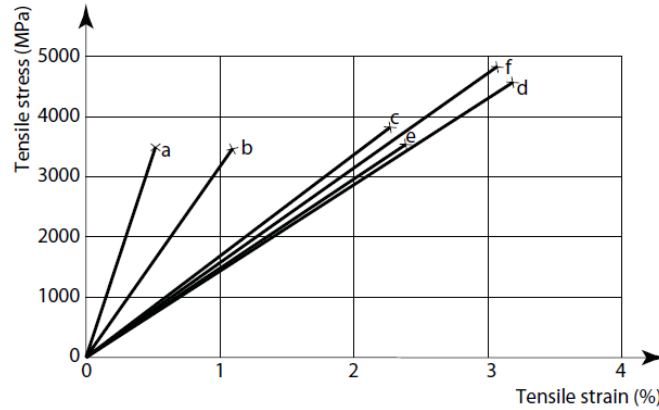


Figura 3 - Curvas tensão – extensão das fibras de reforço típicas: a) de carbono (alto módulo); b) de carbono (de alta resistência); c) de aramida (Kevlar 49); d) Vidro - S; e) Vidro - E; f) basalto (Fib, 2007).

Tabela 1 - Propriedades das fibras e os custos relativos (Marques, 2011).

Fibre	Property	Specific weight (Mg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Specific modulus	Specific strength	Rupture strain (%)	Coefficient of thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /°C)	*Relative cost per kg
<b>Glass</b>									
E		2.54	70	2200	27.6	866	3-3.5	3-5	1
R		2.5	86	3200	34.4	1280	3.5-4	4	4-6
S		2.53	86	3500	33.9	1383	4.1		6-8
A		2.7	75	1700	27.7	666			0.75
<b>Aramidic</b>									
Kevlar® 29		1.44	59	2640	41	1833	3-5	-3 to -3.5	25-40
Kevlar® 49		1.45	130	2900	89.7	2000	1.5-3	-2 to -5	60-75
Kevlar® 149		1.47	146	2410	99.3	1639	1-2	-4 to -2	70-180
<b>Carbon</b>									
HS		1.80	230	4500	128	2500	2.0	-0.1	65-80
IM		1.76	290	3100	165	1761	1.1	-0.5	120-150
HM		1.86	380	2700	204.3	1452	0.7	-1.2	
UHM		1.94	588	3920	303	2021	0.7	-0.9	
<b>Natural fibres</b>									
Jute		1.4-1.6	6.0-6.5	120-145	3.75-4.3	75-100	1.5-2.5	20-30	0.3-1.5
Sisal		1.4-1.6	15-30	400-800	9.5-21	250-570	1.5-4.0	18-30	0.5-0.6
Flax		1.45-1.5	9.0-20	450-550	6-14	300-380	0.5-3	16-30	1.5-4
Hemp		1.4-1.5	5-20	500-900	3.33-14	333-640	0.5-2.5	15-25	0.6-2

\*Reference cost 1 has been allocated to E glass fibre

A matriz utilizada neste tipo de varões compósitos tem por missão, numa primeira fase, distribuir de uma forma uniforme as cargas mecânicas para as fibras de reforço utilizadas no núcleo e por outro lado funcionar como elemento responsável por conferir rigidez ao compósito. Desta forma, a matriz é vulgarmente constituída por resinas termoendurecíveis, de entre as quais se podem destacar (Bank, 2006) (Marques, 2011):

- **Resina de poliéster:** Esta resina é usada principalmente para a produção de materiais FRP industriais, devido ao seu baixo preço e fácil manipulação. Esta resina é utilizada para a produção de perfis estruturais e algumas barras de FRP. Quando é necessário uma maior proteção aos agentes externos, maior extensão de rutura e menos contração de secagem, as resinas Viniléster ou epóxida são as escolhidas;
- **Resina de Viniléster:** É a resina mais utilizada para produzir perfis e barras de FRP, devido a uma boa resistência à corrosão, à facilidade de processamento e de alta resistência ao ambiente alcalino. A resina viniléster tem mais resistência à rotura do que as resinas poliéster e caracterizam-se por uma boa ligação quando reforçado com fibras de vidro. As propriedades da resina de viniléster são uma boa combinação das resinas de epóxida e poliéster, o que a torna uma escolha de referência para a produção de compósitos FRP, mais ainda, exhibe características das resinas epóxidas como resistência química e resistência à tração, bem como as da resina poliéster, com viscosidade e endurecimento rápido.
- **Resina Epóxida:** Estas, são as resinas tendencialmente usadas na produção de barras FRPs para reforço estrutural. As principais características são: maior módulo de elasticidade tangível, maior resistência à tração, grande resistência à corrosão, é a resina com menor retração por secagem, maior resistência à quebra quando exposto a altas temperaturas, resistência a altas temperaturas e boa ligação com diferentes tipos de fibras.

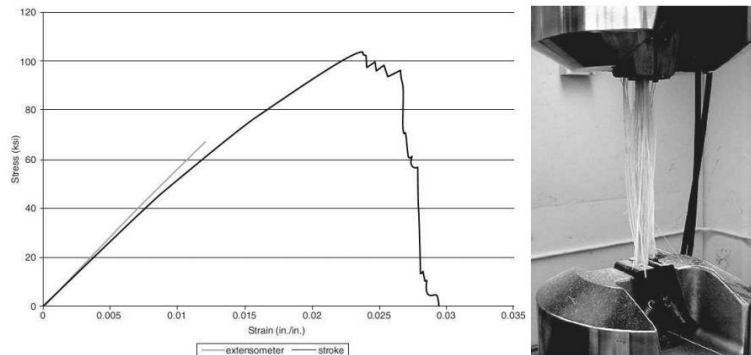
Tabela 2 - Propriedades das resinas de matrizes termoendurecíveis (Fib, 2007).

Propriedades	Matriz		
	Poliéster	Epóxida	Viniléster
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1200 - 1400	1200 - 1400	1150 - 1350
Resistência tração (MPa)	34,5 - 104	55 - 130	73 - 81
Módulo Elasticidade (GPa)	2,1 - 3,45	2,75 - 4,10	3,0 - 3,5
Coefficiente Poisson	0,35 - 0,39	0,38 - 0,40	0,36 - 0,39
Coefficiente de expansão térmico (10 <sup>-6</sup> /°C)	55 - 100	45 - 65	50 - 75
Teor Humidade (%)	0,15 - 0,60	0,08 - 0,15	0,14 - 0,30

## 2.2 A utilização de FRP como elemento de reforço

Desde os anos 60 que a corrosão em estruturas de aço existentes, passou a ser um problema visível em estruturas especiais e importantes, mas apenas na década de 70 e 80 o estudo de varões de FRP ganhou importância, com o intuito de resolver este problema. Na altura, foi desenvolvido algum trabalho pioneiro utilizando varões de FRP de pequeno diâmetro (6 mm),

tentando reforçar elementos de betão armado e pré-esforçado. Assim, algumas empresas a nível mundial começaram a desenvolver o primeiro varão Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP), para incorporar no reforço do betão, (Figura 4) (Bank, 2006).



**Figura 4 - Curva tensão - extensão do varão GFRP, testado em tração (Bank, 2006).**

No final da década de 80 o problema de corrosão introduz outro impulso nos materiais de FRP, e a indústria de compósitos aparece com mais desenvolvimentos com a produção de barras FRP através do processo de pultrusão. Nesta altura, a fibra de vidro era a mais usada e as resinas utilizadas foram viniléster e poliéster. Para reforçar a ligação entre a barra de reforço FRP e o betão, foram utilizadas diferentes estratégias por forma a garantir a melhor aderência, nomeadamente, areia no revestimento do FRP, induzida deformação na superfície exterior e superfícies em espiral com enrolamento helicoidal.

Os anos 90, trouxeram a introdução da fibra de carbono no reforço das barras FRP, criando-se assim varões CFRP e seguidamente, muitos estudos foram realizados sobre o comportamento de elementos de betão armado com reforço de barras FRP, nomeadamente, nos Estados Unidos, Japão e Europa (Bank, 2006) (Benmoktane, et al., 1995) (Committee, 440 ACI, 2002).

O modo de rotura das vigas de betão armado com FRP, ilustrado na (Figura 5), apresenta normalmente um comportamento com acentuada deformação da secção depois da abertura da primeira fenda quando esgotada a capacidade de resistência à tração do betão, originado pelo baixo módulo de elasticidade do FRP, baixa rigidez, no início da solicitação mecânica. Com o aumento da carga, a peça responde com um comportamento linear elástico até à rotura, comportamento característico do reforço FRP, não existindo à semelhança do aço, nenhuma deformação plástica como acontece quando este atinge a extensão de cedência (Reis, 2009) (Committee 440 ACI, 2006).



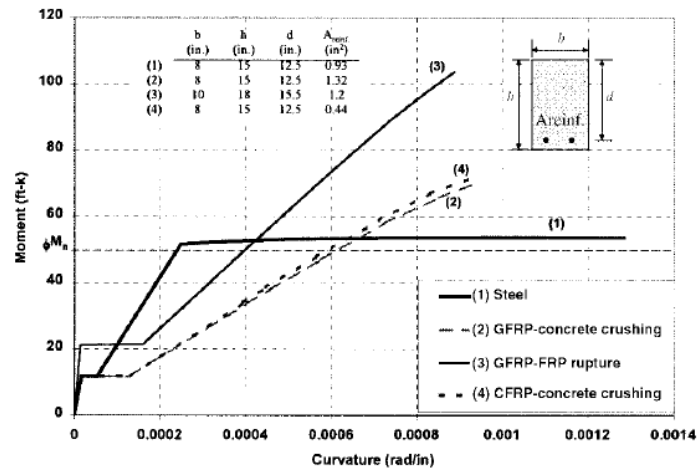


Figura 5 - Curvas teóricas momento - curvatura para secções com varões de aço / FRP (*Committee 440 ACI, 2006*)

Nesta altura, havia um maior conhecimento do comportamento das secções de betão reforçadas com FRP, onde era evidente o comportamento elástico do material sem deformação plástica. Este comportamento, muito diferente do reforço tradicional em aço tinha implicações como menos ductilidade e frágil resposta do reforço do betão ao limite elástico (Figura 6) (*Benmoktane, et al., 1995*).

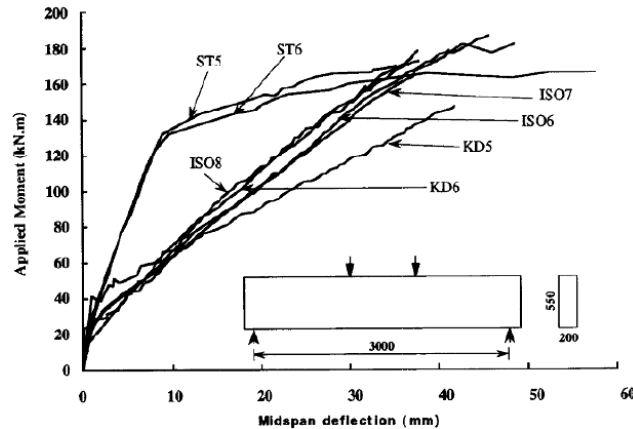


Figura 6 - Momento - curvatura de vigas de betão armado com: aço (ST5 e ST6) e com barras de GFRP (ISO6, ISO7, ISO8, KD5, KD6) (*Benmoktane, et al., 1995*).

No final da década de 90, a produção e comercialização dos varões de FRP a nível mundial tinha sofrido um exponencial crescimento, com a disponibilidade de um grande número de soluções, como:

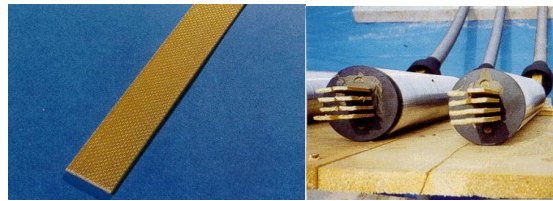
- **Varão Isorod da Pultrall®:** Uma barra produzida por pultrusão, composta por fibra de vidro e resina de poliéster. A superfície pultruda é de acabamento liso e para melhorar a aderência com o betão, apresenta enrolamento helicoidal de fibra de vidro em torno da

barra e também por meio de um revestimento de partículas de areia com uma granulometria e distribuição específica dos grãos. Estas características de acabamento do varão confere-lhe um mecanismo de aderência do tipo friccional, do que de efetiva aderência mecânica ao betão. Esta tecnologia de produção FRP conduz a uma ruína parcial do betão com danos superficiais no FRP, ocorrendo o contrário quando utilizado aço, existindo esmagamento do betão entre as nervuras e melhor desempenho de aderência (Bank, 2006) (Pultrall, 2015), (Figura 7).



**Figura 7 - Varão Isorod da pultrall® (Pultrall, 2015).**

- Arapree™ foi uma barra de FRP Europeia composta por fibras de aramida impregnadas em resina de epóxida usando o processo de pultrusão constituído por 45% de fibras e 55% de volume de matriz (Nordin, 2003) (Nordin, 2005), (Figura 8).



**Figura 8 - Varão Arapree, (Nordin, 2003) (Nordin, 2005).**

- Technora™ é um varão FRP, fabricado pela Sumitomo Constrution e Teijin (indústria têxtil), por pultrusão, e consiste em fibras de aramida impregnadas em linha reta com resina vinyléster, e um fio em espiral na superfície, para melhorar a ligação ao betão (Nordin, 2003) (Karbhari, 1988), (Figura 9).



**Figura 9 - Varão Technora™, (Karbhari, 1988).**

- Leadline™ é outro tipo de FRP em cabo de carbono, destinado a ser usado para pré e pós-tensão produzido pela Mitsubishi Chemical. Apresenta vários diâmetros, com os inferiores (a) a caracterizarem-se por uma superfície lisa e a diâmetros superiores (b e c) com deformações/nervuras na superfície exterior (Committee, 440 ACI, 2002) (Nordin, 2003) (Nordin, 2005) (Karbhari, 1988), (Figura 10).

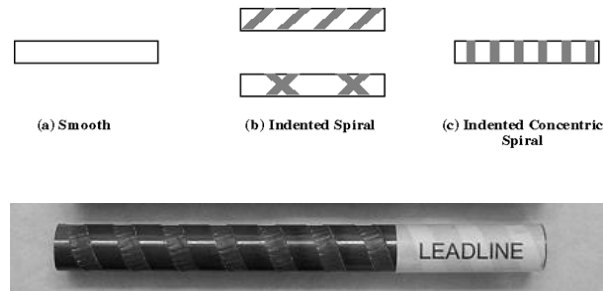


Figura 10 – varões Leadline™ (Bank, 2006) (Nordin, 2003) (Nordin, 2005).

- CFCC™ é um cabo entraçado produzido pela Tokyo Rope, composto por 7, 19 ou 37 fibras de carbono entraçadas com resinas termoendurecíveis (epóxida), (Figura 11).

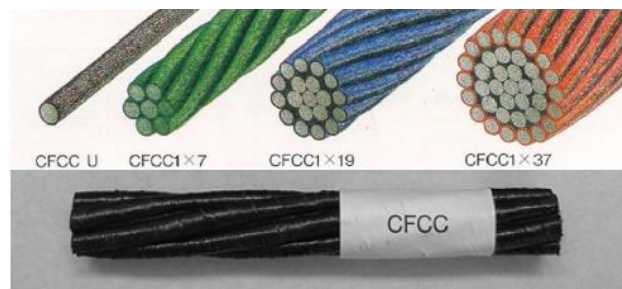


Figura 11 - Exemplo de varão CFCC™ para longos vãos (Bank, 2006) (Nordin, 2003) (Karbhari, 1988).

- Fibra™ é um material à base de fibra de aramida, produzidos pelo processo de entraçamento e impregnado por uma resina epóxida. O processo de entraçamento torna possível a produção de barras com grande variedade de diâmetros, entre 3 e 20 mm e uma superfície de configuração naturalmente deformada, melhorando a interligação mecânica com betão. Está disponível no mercado em forma de varões rígidos ou em forma de cabo flexível (Committee, 440 ACI, 2002) (Nanni, A., et al., 1993), (Figura 12).



Figura 12 - Varões Fibra™ e cabo (Committee, 440 ACI, 2002) (Nanni, A., et al., 1993).

Tabela 3 - Dados dos fabricantes de varões FRP, Arapree, Technora, Leadline, CFCC (Nordin, 2003) (Nordin, 2005).

Tendon	Nominal diameter [mm]	Cross-section [mm <sup>2</sup> ]	Mean tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Ultimate strain [%]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Poisson's ratio
Arapree-8	7.5	44.2	1506	62.5	2.40	1.25	0.38
Technora	8	50.2	2140	54	3.70	1.30	0.35
Leadline	7.9	46.1	2550	150	1.30	1.67	n.a.
CFCC	7.5	30.4	2120	137.3	1.57	2.10	n.a.

O principal objetivo destes tipos de varões/cabos é trabalhar a pré e pós-tensão interna ou externa, posicionando-se como uma excelente solução para reabilitação e reforço estrutural, porque adiciona baixo peso e incrementa alta resistência à estrutura original, é de fácil aplicação e com reduzida perturbação aos utilizadores e pode permitir a monitorização da estrutura, de acordo com as características do FRP aplicado. A eficiência deste tipo de varões em soluções de tensão como reforço externo, tratando-se de um material anisotrópico, está relacionado com a capacidade do sistema de ancoragem garantir a rigidez continuada do cabo no tempo. Os ensaios do sistema de ancoragem cónico estudado mostra uma diminuição da tensão de aderência ao longo do comprimentos de amarração, pelo que se apresenta como o maior desafio a solucionar para a eficiência e segurança de toda a solução (Nordin, 2003) (Committee, 440 ACI, 2002) (Karbhari, 1988).

Com a finalidade de potenciar e regulamentar a utilização de uma nova técnica, tecnológica FRP para o betão armado, foram desenvolvidos diferentes códigos de projeto FRP, através do conhecimento atingido por ensaios normalizados ao produto, adotando critérios de dimensionamento. Com vista ao projeto e construção, diferentes países apresentam propostas enumeradas cronologicamente de seguida (Reis, 2009):

- Japan Society of Civil Engineers (JSCE) - Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials (Japão) (JSCE, 1997);
- Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) - ISIS Design Manual No. 3: Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers (Canadá) (ISIS, 2001);
- American Concrete Institute (ACI) - 440.3R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (Estados Unidos da América) (ACI, 2004);
- American Concrete Institute (ACI) - 440.1R-06: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (Estados Unidos da América) (ACI, 2006);
- Federation Internationale de Beton (Fib) - fib bulletin nº40: FRP Reinforcement in RC Structures (versão provisória) (Europa) (Fib, 2007);
- Italian National Research Council (CNR) - CNR-DT 203/2006: Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fibre-Reinforced Polymer Bars (Itália) (CNR, 2007).

Contudo, todos os produtos atualmente existentes, empresas especializadas, guias de projeto e o trabalho contínuo de pesquisa sobre melhoria das características dos FRP, ainda não conseguiu resolver problemas de comportamento físico e mecânico que predominam nestes materiais. Como principais inconvenientes apresentam-se:

- Os varões compostos por um único tipo de fibra tem um comportamento elástico linear e rutura frágil, sem exibir aviso ou qualquer ductilidade antes da rutura. Desta forma, os códigos de projeto para dimensionamento de estruturas de betão armado com FRP, obrigam ao uso de fatores de redução elevados, a fim de evitar ruturas frágeis do reforço ou, alternativamente, a rutura da secção de betão por esmagamento dúctil da lâmina de betão comprimido. Com isto, são necessárias maiores proporções de reforço, e a alta resistência do FRP não é totalmente explorado (Balendran, R.V., et al, 2002) (Fib, 2007);
- A rigidez dos varões de FRP padrão, é muito mais baixa quando comparado com o aço. Em barras de fibra de vidro é aproximadamente 1/8, e em fibras de carbono padrão 1/2 do aço, 200GPa (Módulo de elasticidade). Isto provoca deformações maiores na aplicação estrutural (Cui, et al., 2008) (Wu, 2005);
- Ainda existem dúvidas sobre a real durabilidade dos varões FRP no interior do betão, especialmente em barras de fibra de vidro (GFRP), composta por fibra de vidro do tipo E,

que são degradados no ambiente alcalino. Outros aspetos de durabilidade são: a absorção de humidade no ambiente aquoso, efeito de congelamento e descongelamento, altas temperaturas, a radiação UV e de resistência ao fogo (Micelli & Nanni, 2004) (Ceroni, et al., 2006) (Wang, et al., 2007).

### **2.3 A evolução do comportamento mecânico de varões FRP**

Os últimos 20 anos foram pautados por uma extensa quantidade de estudos, com a finalidade de resolver os principais inconvenientes dos FRPs. Assim, as principais estratégias que têm vindo a ser seguidas são:

- O desenvolvimento de um comportamento dúctil ou pseudodúctil da barra FRP, com a utilização de diferentes tipos de fibras, a fim de se obter um definido limite de elasticidade e pseudo-deformação plástica, com o rompimento das fibras a diferentes extensões durante o carregamento (Wu, 2005) (Sim, J.S., et al, 2005);
  - A manipulação da estrutura fibrosa do reforço, através da criação de diferente arquitetura para a camada de revestimento do reforço, garantindo proteção do núcleo, diferentes patamares de deformação, melhoria da interação mecânica entre reforço/betão, com criação de comportamento plástico - elástico após a cedência elástica (Somboonsong, et al., 1998) (Hampton, et al., 1999);
  - Um método alternativo para permitir aviso precoce em caso de perigo estrutural sem ductilidade é o monitoramento das estruturas de betão, capaz de dar um alerta no caso de sinais importantes de carregamento (Bakis, et al., 2001);
  - Combinação de dois últimos (Bakis, et al., 2001);
  - Melhoria do comportamento FRP através da adição de aço na composição do FRP (Henneke, 1993);
- Introdução de novos tipos de fibras, caso da fibra de basalto (Quagliarini, et al., 2012).

## **2.4 Desempenho do FRP melhorado através da mistura de diferentes tipos de fibras**

### **2.4.1 FRP Hibridação e características para monitorização**

Na procura por um comportamento dúctil ou pseudodúctil dos FRP, durante os anos 90 (Bakis, E. C., Nanni, A., Terosky, J. A., 1996) iniciaram estudos para desenvolver um varão híbrido FRP composta por fibras de carbono e vidro, com o objetivo de alcançar o comportamento dúctil, onde

as barras produzidas e testadas em tensão mostram resultados de um comportamento pseudodúctil. As amostras foram produzidas pelo processo de pultrusão e eram compostas por fibras de vidro, aramida, e carbono, e impregnadas por poliéster insaturado ou resina viniléster, com 11mm de diâmetro. As fibras de carbono tiveram diferentes posicionamentos nas barras, com colocação no núcleo, na superfície ou dispersas (Bakis, et al., 2001). As barras foram testadas em tração, e os resultados mostram que para barras com menos quantidade de fibras de carbono dispersas (entre 6% a 13%), tinham maior capacidade de resistência depois da primeira falha, o que se traduz num melhor comportamento pseudodúctil. No entanto, a rigidez destas barras ainda estava entre os 40 e 60 GPa (Sim, J.S., et al, 2005) (Bakis, E. C., Nanni, A., Terosky, J. A., 1996).

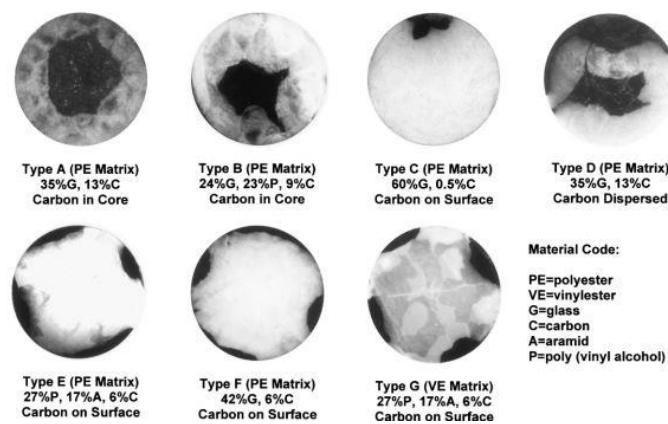


Figura 13 - Fotografias de secções transversais da barra FRP híbrida (Bakis, et al., 2001).

Um dos trabalhos mais completo nesta área foi conduzida por (Wu, 2005) onde é explicado como incorporar ductilidade e rigidez nas barras FRP pela hibridação do núcleo, e conseguir estabelecer uma gradual rotura do compósito com a fratura de fibras a diferentes extensões durante o carregamento. Foi idealizada uma curva tensão - extensão do compósito, composto por três tipos de fibra: alto módulo (HM), alta resistência (HS) e ductilidade das fibras (Figura 14). A relação entre a curva de tensão - extensão, determina a contribuição de cada uma dos três tipos de fibras neste comportamento de rotura progressiva. As fibras HM são utilizadas para garantir resistência e rigidez, enquanto as fibras HS podem ser utilizadas em conjunto com as de HM para garantir um comportamento de endurecimento por deformação até à rotura das fibras de alta resistência, garantindo o controlo da deformação estrutural com o restabelecimento de um bom desempenho. O comportamento dúctil obtido pela hibridação com fibras de alta ductilidade, garantiu comportamento pseudo-plástico durante a elevada extensão de rotura atingida.

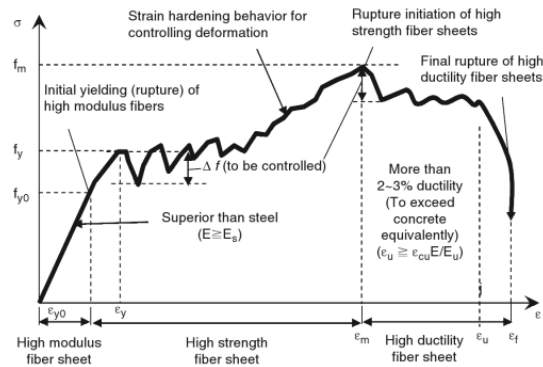


Figura 14 - Idealizado comportamento tensão- extensão dos compósitos híbridos (Wu, 2005).

Ao longo do trabalho foram produzidos e ensaiados diferentes compósitos híbridos, com diferentes combinações e diferentes quantidades de fibras, e a previsão da curva tensão - extensão para cada combinação. O autor previu a curva esperada, carga - extensão do compósito híbrido aplicando a regra das misturas, de acordo com o módulo de elasticidade (E) e a fração da área (A) de cada componente, de forma a obter o módulo do compósito híbrido, (Equação 1). O cálculo da tensão do compósito híbrido, com o tipo e quantidades de fibra a utilizar, como a seleção do comportamento pretendido, pode ser obtido pela derivada da fórmula da regra das misturas, (Equação 2) (Cui, et al., 2008) (Wu, 2005).

#### Equação 1 - Módulo do compósito híbrido

$$E_{FRP} = (E_1 A_1 + E_2 A_2 + E_3 A_3) / A_{total}$$

#### Equação 2 - Tensão do compósito híbrido

$$\sigma_{FRP} = \Sigma(E_i A_i) / A_{total}$$

As fibras utilizadas foram: fibra de carbono de alta resistência (C1), fibra de carbono de alto módulo (C7), fibras de PBO, vidro-E e fibra de polietileno (Dyneema), impregnadas em resina epóxida (Wu, 2005). A (Figura 15) demonstra maior quantidade da fibra de alta ductilidade e a forma como ajuda no controlo da rotura ao carregamento das fibras C1 e C7, introduzindo um comportamento superior de ductilidade.



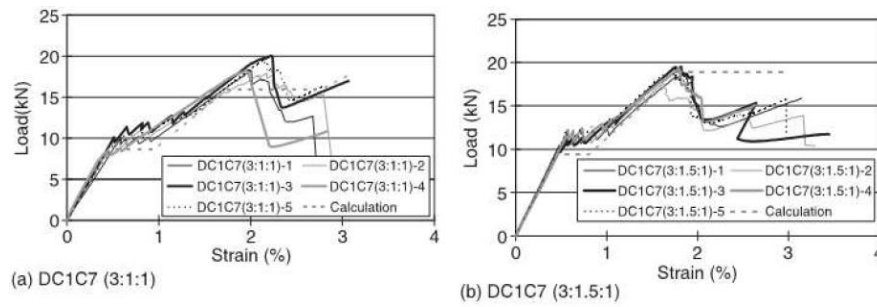


Figura 15 - Compósito híbrido composto por fibra de Dyneema, fibra de alta resistência (C1) e fibra carbono, alto módulo (C7) (Wu, 2005).

Para prever a tensão e a rigidez de um compósito híbrido após a rotura de um tipo de fibra, esta é excluída no cálculo da rigidez (E) e na fração de área (A) do compósito híbrido. O impacto da gradual rotura das fibras, para o mesmo rácio de fibras e resina utilizada, é encontrado em cada pico de rotura correspondente (Wu, 2005).

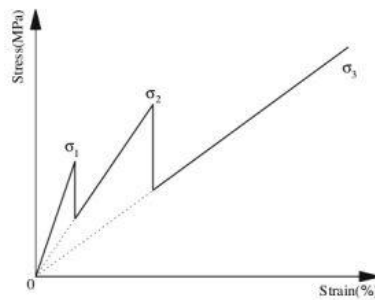


Figura 16 - Teórica curva tensão - extensão de uma barra híbrida (Cui, et al., 2008).

Os dados observados mostram que as curvas calculadas, baseadas na regra das misturas, para uma rigidez inicial elevada, rotura ao carregamento das fibras de HM e máximo carregamento, estão de acordo com os resultados experimentais, assim como, a extensão de 3% do compósito híbrido pode ser alcançada através de um apropriado projeto de hibridação (Figura 15) (Wu, 2005).

Com isto, outras pesquisas como (Yang, C., Wu, Z., Ye, L. P., 2006) (Wu, Z., Yang, C., Takahashi, T., 2003), mostrou que era possível atingir um melhor comportamento pseudodúctil, pela hibridação das barras de FRP, com fibras de alta resistência (HS), alto módulo (HM) e ultra alto módulo (UHM) usando fibras de carbono, e alta ductilidade eletricamente inerte com fibras de aramida. A ideia era aplicar vários tipos de fibras de carbono e aramida para melhorar o comportamento pseudodúctil da barra, e ao mesmo tempo, a identificação de deformações estruturais por diferentes posições de rotura, originados pelos diferentes tipos de fibra. Por outro lado, a caracterização elétrica e mecânica de vigas de betão reforçadas com barras híbridas de

CFRP, utilizando as características intrínsecas de condutibilidade elétrica e piezoresistivas (transformar energia mecânica em elétrica) das fibras de carbono, tornaram possível medir a deformação do elemento e monitorar a resistência do reforço.

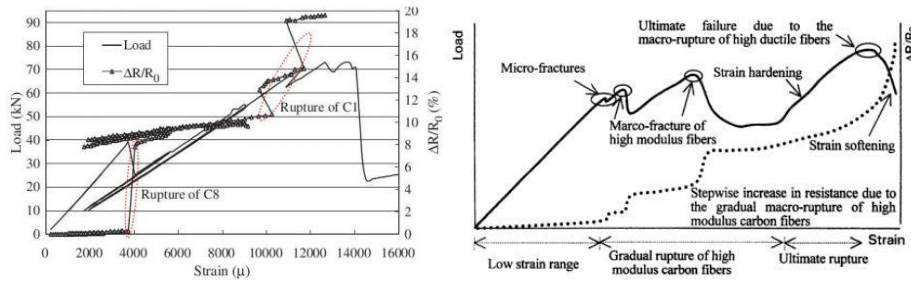


Figura 17 - Modelo elétrico e mecânico da barra híbrida de CFRP, curva carga-extensão e  $\Delta R / R_0$  – extensão (Yang, C., Wu, Z., Ye, L. P., 2006) (Wu, Z., Yang, C., Takahashi, T., 2003).

O estudo revelou que a hibridação melhora a observação do comportamento estrutural, porque funcionou numa primeira fase como um sensor pouco preciso na identificação da primeira extensão, quando da rotura das primeiras fibras de carbono de extensões mais baixas. A rotura destas, criou uma variação da tensão de resistência mecânica no reforço CFRP muito mais evidente e funcionou como um sensor elétrico, (Figura 17), onde uma curva de extensão corresponde ao carregamento e a outra curva de extensão corresponde à mudança na resistência elétrica do reforço CFRP.

Na fase de alta tensão, a resistência elétrica varia com a extensão de uma rotura passo a passo, devido às macros-graduais fraturas das diferentes fibras de carbono, capazes de fornecer um aviso útil, impedindo a catástrofe da estrutura. Foi possível verificar que a resistência elétrica muda com o funcionamento mecânico das barras e o volume de fibras, assim como é influenciado pela distribuição destas na secção da barra (Wu, Z., Yang, C., Takahashi, T., 2003) (Yang, C., Wu, Z., Ye, L. P., 2006).

Pela mesma altura (Sim, J.S., et al, 2005), mostrou um estudo centrado no desenvolvimento de uma barra de polímero reforçado com fibras de vidro, com a finalidade de reforço e monitorização inteligente de estruturas de betão, através da utilização de um sensor de fibra ótica (FOS). Para garantir boa aderência FRP/betão, foram adotadas características similares às barras de reforço em aço, sendo composta por três partes: núcleo FRP como o principal elemento estrutural, secção em costela como elemento para características de aderência, e fibra ótica como elementos

sensores. A costela usada no FRP híbrido era uma mistura de resina epóxida e moído de fibras de vidro, enquanto o núcleo FRP foi em fibras de vidro e resina epóxida.

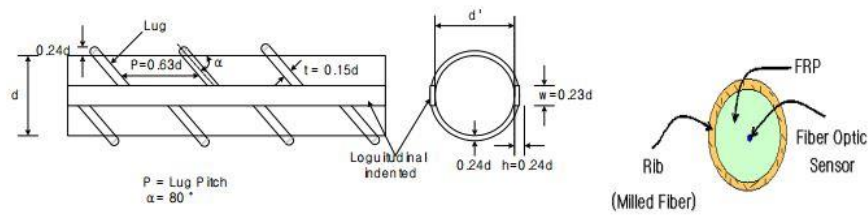


Figura 18 - Forma e seção transversal da barra híbrida FRP (Sim, J.S., et al, 2005).

Os resultados dos ensaios de aderência e monitorização FOS, permitem concluir que a capacidade de aderência do FRP híbrido foi 8% superior à deformação comum do reforço em aço e a monitorização inteligente apresentou bons valores de extensão, confirmando potências capacidades de controlo em estruturas de betão. A aderência alcançada foi motivada pela utilização da secção em costela de moído de fibras de vidro, incrementando uma melhoria de comportamento em 20% (Sim, J.S., et al, 2005). Os bons resultados na melhoria de aderência também foram verificados em 2008 por (Moon, Do Young; et al, 2008), com um estudo exploratório de varões GFRP com costelas contendo fibras de vidro moídas.

#### 2.4.2 Manipulação da estrutura fibrosa do reforço

Até este momento, muitos trabalhos sobre o comportamento mecânico de materiais compósitos híbridos e comportamento pseudodúctil de compósitos já havia sido feito, (Kretsis, 1987). Desta forma, o conhecimento desenvolvido começou a ser aplicada na indústria da construção para melhorar o comportamento dos FRP. No entanto, em meados dos anos 90, os autores (Tepfers, R., et al, 1996) apresentaram uma solução: uma estrutura entrançada composta por fios de fibras de aramida com núcleo cilíndrico, que garantia resistência na primeira parte elástica da curva, tensão-deformação, e comportamento dúctil após o ponto de alongamento plástico. Os autores pretendiam atingir este comportamento, mediante a criação de uma estrutura entrançada que permitisse manter o núcleo comprimido quando o varão estivesse a ser tracionado. Depois disso, as fibras entrançadas seriam capazes de girar e imprimir uma maior deformação de alongamento no nível de carga desejada.

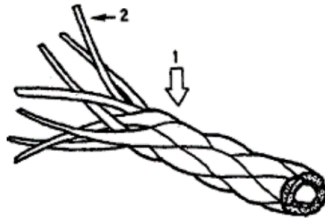


Figura 19 - Entrançado 1),fibra 2), resina (Tepfers, R., et al, 1996).

Para isso, foi estudada em primeiro lugar, a estrutura trançada, avaliando a sua composição com o estudo da utilização de fibras de vidro e aramida, relacionando com as suas propriedades: resistência, a compressão que causava no núcleo, a influência da resina e as propriedades de ductilidade. Depois disso, foram feitas diferentes estruturas trançadas de reforço ao núcleo, utilizando diferentes tipos de fibra, tais como: fibra de aramida trançada com núcleo em fibra de carbono, fibra de vidro trançada com núcleo de fibra de vidro e fibra de aramida trançada com núcleo de fibra de vidro (Tepfers, R., et al, 1996).

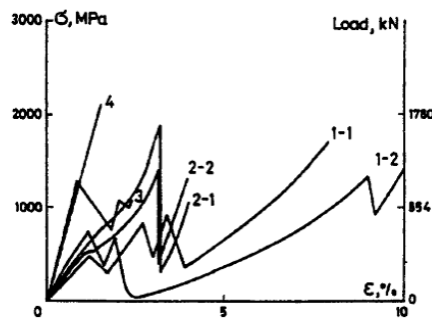
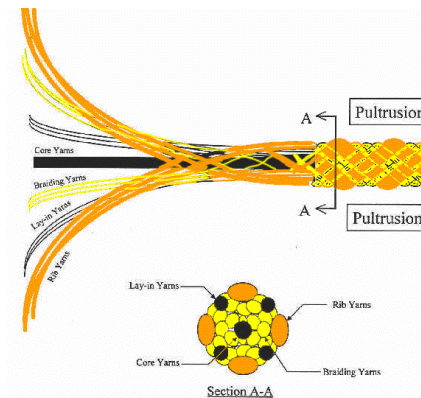


Figura 20 - Medição tensão-deformação do trançado de aramida com núcleo de carbono (Tepfers, R., et al, 1996).

Os melhores resultados foram alcançados com utilização de trançado de fibras de aramida com inclinação de  $30^\circ$  e núcleo em fibra de carbono impregnado com resina epóxida. Quando colocado em tensão, foi registado um módulo de elasticidade de 140GPa e uma extensão de rotura de 1.5% a 2.5%. A técnica estudada permite concluir que é possível aumentar a ductilidade do compósito por meio da utilização da técnica de trançamento, usando apenas um invólucro cilíndrico em vez de um núcleo de reforço unidirecional. No entanto, a rigidez estaria sempre a diminuir com o aumento da ductilidade e a redução da rigidez da barra de compósito traria implicações ao nível estrutural (Tepfers, R., et al, 1996).

Após este trabalho, no final dos anos 90, um grupo de pesquisa da universidade de Drexel, EUA, desenvolveu de forma mais profunda este tipo de estrutura de reforço trançado (Figura 21), sob

a forma de uma barra dúctil híbrida aramida - carbono reforçado com plástico (DH-FRP), que simula as características tensão - deformação do reforço tradicional em aço, produzido por uma técnica inovadora, o processo braidtrusion. Esta pesquisa foi desenvolvida para introduzir um comportamento bilinear tensão-deformação, e assim, resolver as três principais desvantagens associadas ao material FRP: a falta de ductilidade, a baixa rigidez e as propriedades de aderência ao betão. Desta forma, o objetivo inicial era desenvolver uma barra com comportamento dúctil ou pseudodúctil que reconheçam nas propriedades do reforço em aço: alto módulo de elasticidade, ponto de cedência definido e um alto nível de tensão final. No final, projetar uma solução que permitisse substituir diretamente a utilização do aço aplicando todas as vantagens do FRP: alta resistência, baixo peso e resistência à corrosão (Somboonsong, et al., 1998).



**Figura 21 - Processo braidtrusion dúctil híbrido FRP (DH-FRP) (Somboonsong, et al., 1998).**

Este varão compósito entrançado híbrido foi composto por uma estrutura externa entrançada para reforço do núcleo. O processo de "braidtrusion" consiste numa máquina de entrançar que transporta 24 fios e forma uma estrutura entrançada tubular que permite a aplicação de diferentes tipos de fibras na camada entrançada e no núcleo. O processo de entrançamento ocorre com a conformação de um anel, e após este, a estrutura entrançada tubular passa através de uma zona onde as fibras são impregnadas com resina epóxida. Depois disso, o varão passa através de uma câmara aquecida, designado processo de cura (Pastore & Ko, 1999) (Figura 22).

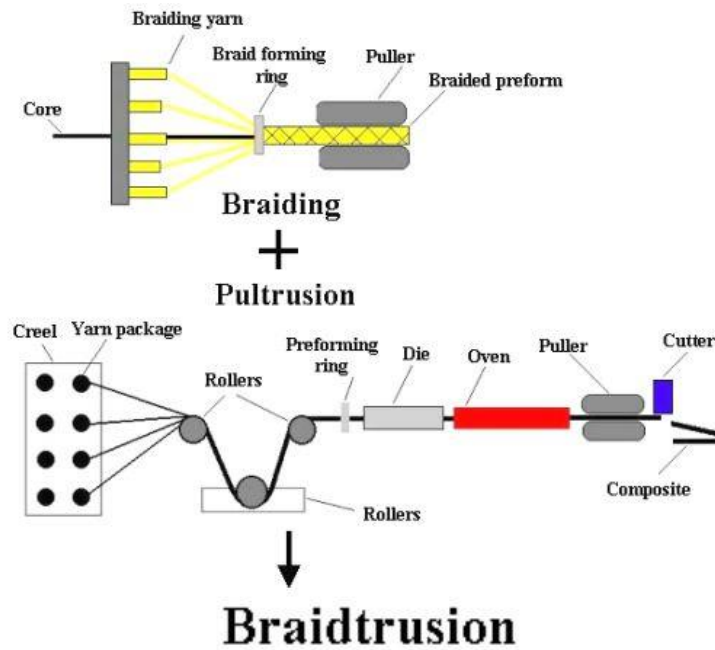


Figura 22 - Esquema de produção no processo “braidtrusion” (Lam, Hoa., et al, 1999).

Com este tipo de estrutura têxtil 3-D, uma escolha acertada dos materiais, como a fibra e resina, e o controlo da arquitetura da camada entrançada, é possível controlar e prever a curva de tensão-deformação. Neste caso as fibras de aramida foram aplicados na estrutura entrançada, de modo a obter um comportamento de pseudoductilidade, e para melhorar a comum falta de rigidez no material FRP, um núcleo em fibra de carbono de alto módulo. Esta estrutura também permite a criação de um efeito de nervura na estrutura entrançada, por adição de fios maiores, criando deste modo uma melhoria de aderência com betão (Pastore & Ko, 1999), (Figura 23).

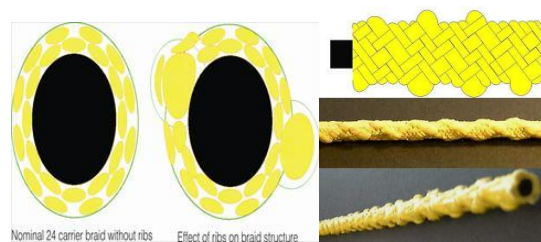


Figura 23 - Efeito dos fios de nervura na geometria do tecido entrançado (Pastore & Ko, 1999) (Lam, Hoa., et al, 1999).

A metodologia de projeto do varão DH-FRP segue uma estrutura hierárquica de fibras essenciais. A deformação da estrutura entrançada pode ser caracterizada considerando os efeitos introduzidos por cada nível da formação do tecido têxtil entrançado. A deformação da estrutura entrançada pode ser caracterizada considerando os efeitos de cada nível do processo de produção. A estrutura hierárquica deste processo está representada por quatro níveis: 1- o nível da fibra, onde

principalmente são consideradas as propriedades do material; 2 - ao nível dos fios, onde os fatores são a torção e o ângulo formado pelas fibras; 3 – ao nível da tecelagem, onde o ângulo e o espaçamento entre o cruzamento dos fios cria deformação quando converge para o alinhamento reto durante o esforço axial; 4 – ao nível do entrançado final. O comportamento dúctil é intrínseco à composição híbrida da fibra e da arquitetura geométrica híbrida das suas fibras entrançadas (Somboonsong, et al., 1998).

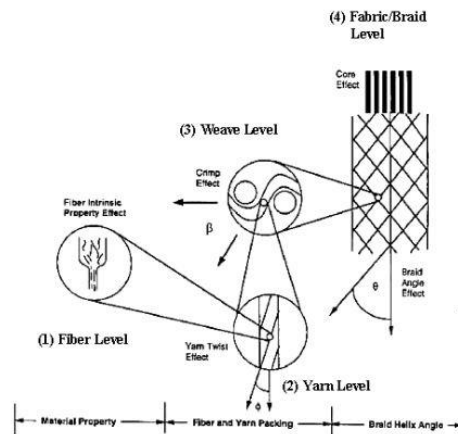


Figura 24 - Hierarquia estrutural de conjuntos fibrosos (Somboonsong, et al., 1998).

Para avaliar o modelo idealizado, foram produzidas amostras de 3, 5 e 10mm de diâmetro com núcleo constituído por fibras de carbono de alto módulo de elasticidade (Thornel P-55S) e a estrutura entrançada por fibras de aramida (Kevlar 49) impregnada com resina epóxida.

Os resultados apresentados na (Figura 25), caracterizam o comportamento mecânico da barra dúctil híbrida FRP (DH-FRP) de 5mm no ensaio de tração, com o limite elástico a esgotar aos 275MPa, tensão última de rotura de 406MPa e um módulo de elasticidade de 78.6MPa, considerando toda a área da secção. Quando considerado apenas a área do núcleo, o módulo de elasticidade era de 202GPa (próximo do reforço tradicional em aço). As curvas obtidas mostram um comportamento elástico bilinear na curva tensão-deformação, com definida cedência elástica e patamar seguinte à fase elástica, simulando a ductilidade essencial do reforço em aço, uma resistência final ao carregamento superior, e tensão de rotura situada entre 2% e 3% da deformação. Foram também conseguidas excelentes características de aderência com a integração das nervuras no revestimento entrançado, que incrementa uma interação mecânica entre a barra e o betão (Hampton, et al., 1999).

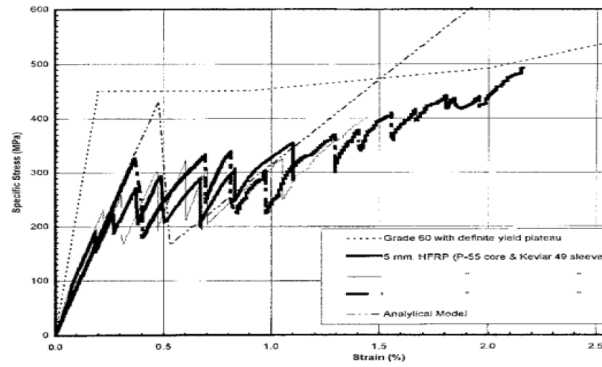


Figura 25 - Curva tensão-extensão barra DH-FRP 5mm e comparação barra de aço (Hampton, et al., 1999).

A tecnologia desenvolvida no varão DH-FRP, foi também ensaiada em vigas de betão de secção transversal 50 por 100mm e comprimento de 1.2 metros. Foram testadas quatro vigas em quatro pontos de flexão, três vigas reforçadas com armadura DH-FRP de 5mm e uma com aço. Os resultados mostraram um comportamento carga - deformação semelhante entre as três vigas reforçadas com DH-FRP 5mm antes da cedência elástica, com elevada resistência inicial à deformação elástica (idêntica à viga reforço em aço) até à carga de cedência. Após ceder, a capacidade de carga continua a aumentar e o reforço DH-FRP mostra uma curva carga - deformação bilinear bem definido até resistência última, rotura, (Figura 26).

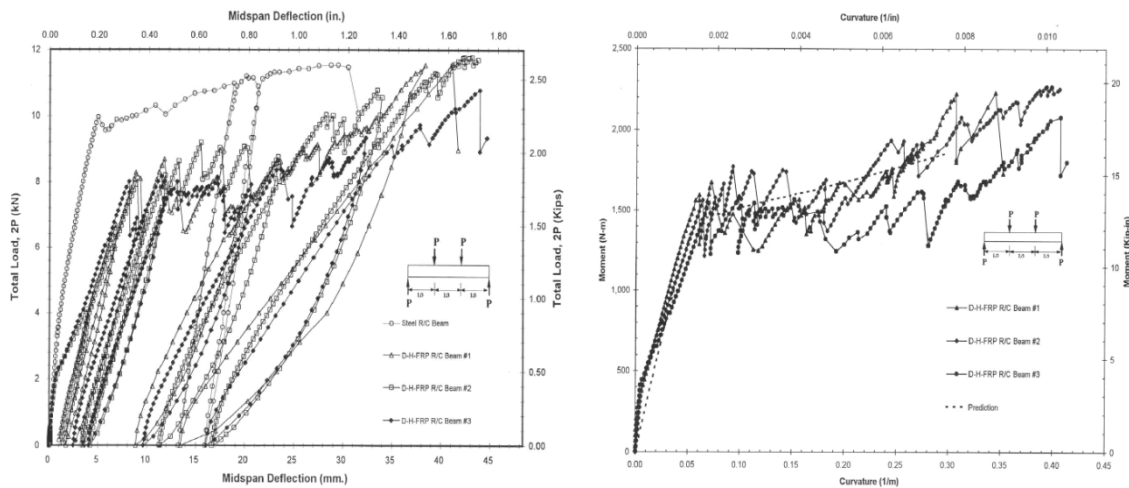


Figura 26 - Carga – deformação, ensaio cíclico (esquerda) e momento - curvatura (direita) por vigas com armadura DH-FRP 5mm e aço (Harris, et al., 1998).

O ensaio cíclico aplicado a cada viga DH-FRP após a cedência elástica e durante o patamar dúctil, com um máximo de cinco ciclos carga - descarga, (Figura 26) - esquerda, permitiram estudar o comportamento natural não elástico. Os resultados mostraram significante capacidade de



absorção de energia, onde a deformação permanente verificada, poderia funcionar como um alerta da capacidade de resistência da estrutura.

A relação momento - curvatura, como demonstrado na (Figura 26) - direita, mostra um comportamento dúctil das vigas nos três DH-FRP e a reprodutibilidade do comportamento dúctil, comportamento que não se verifica noutra FRP, onde apresentam características lineares elásticas até à rotura. Foi possível notar um comportamento momento - curvatura bilinear do novo DH-FRP, apenas conseguido através do desenho de entrançado exterior, definido ponto de cedência, uma curva carga - deformação bilinear equivalente e uma elevada carga última de cedência (Harris, et al., 1998).

## **2.5 Incorporações materiais dúcteis em FRP 's**

Um dos primeiros grupos de trabalho da comunidade científica a estudar a melhoria da ductilidade dos varões FRP através da introdução de aço no núcleo foi (Nanni, A., et al., 1993). O trabalho foi iniciado com um estudo exploratório do FRP utilizando fibras de vidro-E, aramida e fibras de PVA para produção de varões entrançados impregnadas com resina epóxida, por forma a adquirir uma eficiência superior de aderência ao betão. Os resultados no reforço de elementos armados com varão proposto, mostrou um comportamento mecânico linear de tensão-deformação. Depois deste estudo, o mesmo grupo de trabalho, concretizou uma tentativa revolucionária e inovadora com a colocação de aço no núcleo do varão compósito, a fim de introduzir ductilidade através do uso de um material dúctil, mas garantindo a proteção à corrosão do aço e ao mesmo tempo, a utilização da estrutura desenvolvida por (Nanni, A., et al., 1993). O varão FRP foi desenvolvido com núcleo de aço e fibras de aramida ou vinylon impregnado com resina epóxida, (Nanni, A., Henneke, M. J., Okamoto, T., 1994) (Henneke, 1993).

As amostras produzidas foram testadas à tração, com os resultados a demonstrarem um comportamento mecânico axial bilinear de acordo com o estudo teórico, calculado segundo a regra das misturas e apresentado na (Figura 27). A estrutura entrançada com fibra de aramida, aramida-aço (K96), apresenta melhor desempenho na capacidade de absorção e transmissão de cargas ao núcleo, incrementando uma resistência superior (Henneke, 1993).

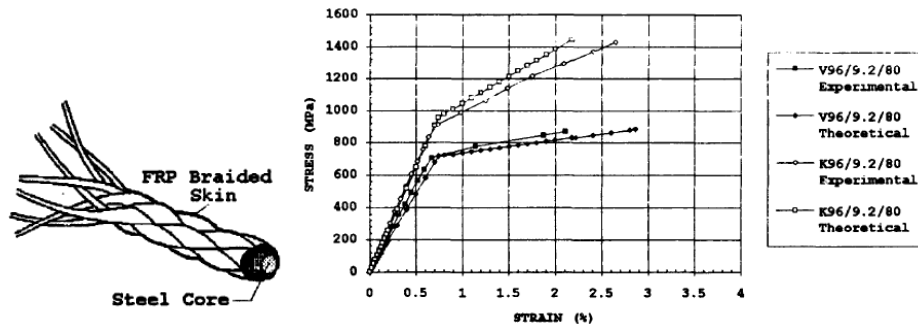


Figura 27 - Diagrama da barra híbrida e curva tensão - extensão: experimental e teórica, Kevlar-aço (K96) e Vinylon - aço (V96), com barra aço diâmetro 9.2mm (Henneke, 1993).

O estudo foi também desenvolvido com a aplicação dos mesmos varões no reforço de vigas de betão e testados com ensaios de flexão. Neste estudo foram usadas barras híbridas de Kevlar/aço e vinylon/aço no reforço de vigas, com núcleo de 9.2mm de área. Novamente o comportamento alcançado foi o esperado, e foi possível concluir que a capacidade de carregamento conseguido está fortemente relacionado com a resistência do núcleo em aço e o seu diâmetro, do que com o tipo e espessura da camada exterior do FRP. O mesmo foi possível verificar quanto à deformação das vigas. Por outro lado, o carregamento último e a deformação de rotura está muito influenciado pela área da secção do revestimento do FRP, devido à sua elevada resistência (Henneke, 1993).

Com a finalidade de obter custo competitivo e propriedades mecânicas favoráveis (ductilidade), em 2005 foi desenvolvida outra pesquisa no reforço de vigas de betão utilizando varão híbrido com núcleo em aço. O varão usado consistiu na utilização de dez fios de fibras de vidro com 2mm de diâmetro enrolados em forma helicoidal sobre um núcleo de aço macio com 6mm de diâmetro, impregnado com resina epóxida (Saikia, B., et al, 2005).

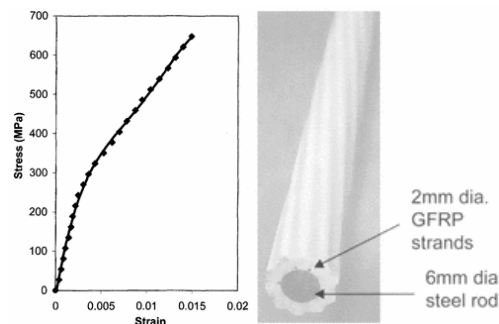
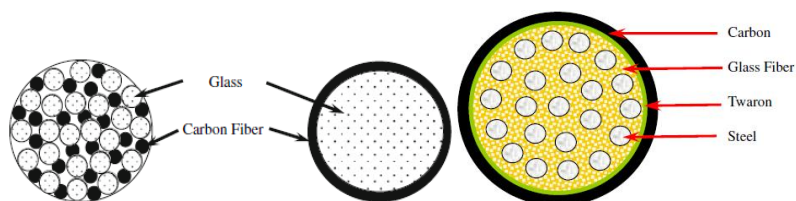


Figura 28 - Varão híbrido e curva de tensão – extensão (Saikia, B., et al, 2005).

Quando sujeito a ensaios de tração pura, este material apresentou um módulo de elasticidade último de 101GPa, menos 50% que o varão tradicional em aço, e a curva de tensão - extensão, como (Figura 28), que não demonstra sinais evidentes ductilidade, talvez justificados pela rotura

prematura do varão. Posteriormente o mesmo varão quando utilizado como reforço de vigas de betão mostrou maior deformação comparativamente com o ensaio em tração pura, justificado por problemas de ligação entre a barra híbrida e o betão (Saikia, B., et al, 2005). As mesmas características mecânicas, mas com utilização de diferente configuração das fibras e aço, foi verificado por (Hao, et al., 2008), sendo o varão GFRP desenvolvido com fios de aço no núcleo e uma camada exterior melhorada para alcançar melhor comportamento de aderência entre FRP/betão. A investigação da ligação entre os dois materiais foi realizada de acordo com código American Concrete Institute (ACI) num total de 180 amostras de arrancamento.

Em 2008 a pesquisa científica desenvolvida por (Cui, et al., 2008) iniciada a partir do conhecimento das fragilidades dos varões FRP como reforço do betão, baixo módulo de elasticidade, baixo alongamento pré-rotura, quebra por rotura e alto custo, originou a modelação de um novo varão híbrido. Este, fabricado pelo método de enrolamento à mão, com 10mm de diâmetro, utilizou uma dispersão aleatória das fibras de vidro e aço na secção transversal, e fibra de carbono e Technora® (aramida) envolvida em resina epóxida na parte exterior para melhorar o módulo de elasticidade, e proteção do ataque alcalino às fibras de vidro e corrosão do aço.



**Figura 29 - Secção transversal composto tradicional (esquerda) e no modelo composto híbrido (Cui, et al., 2008).**

A presente configuração para potenciar um melhor comportamento mecânico e proteção das fibras mais suscetíveis de agressões ambientais, também considera o posicionamento das fibras exteriores, idealizando a rotura primeira das fibras de carbono com uma rotura progressiva de restantes fibras, visionando uma rotura por patamares de ductilidade, introduzindo um comportamento pseudodúctil, (Figura 30). A fim de prever o comportamento teórico do novo modelo de composto híbrido, curva tensão - extensão, foi utilizado segundo a regra das misturas e o conhecimento sobre as características mecânicas das fibras constituintes (Cui, et al., 2008).

Tabela 4 - Combinação de materiais para desenvolvimento do reforço composta híbrida (Cui, et al., 2008).

Tipo Fibra	Fabricante	Módulo Elasticidade (GPa)	Extensão Máxima (%)
Carbono	Zoltec	225	1,25
Aramida	Twaron	102	2,05
Aço	Local	200	20
Vidro	Taiwan Electric	74	2,4
Epóxida	Taiwan Reno	3,5	6

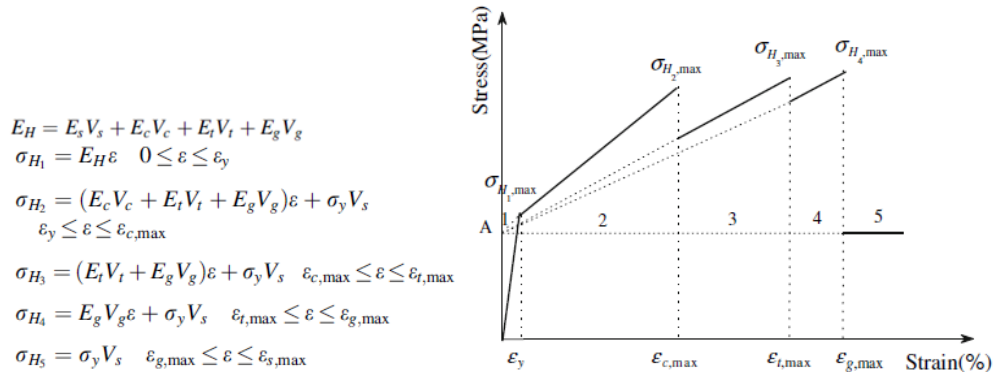


Figura 30 - Lei das misturas e relação teórica da curva de tensão - extensão da barra de reforço híbrida (Cui, et al., 2008).

Para avaliar a solução e o modelo, foram realizados ensaios de tração, (Figura 31), com resultados mecânicos a demonstrarem um comportamento pseudodúctil, com um módulo de elasticidade de 142.11GPa, 71% do aço e uma resistência à tração de 628MPa, 156% do aço, ligeiramente inferior ao previsto, provavelmente por incorreto alinhamento das fibras de reforço.

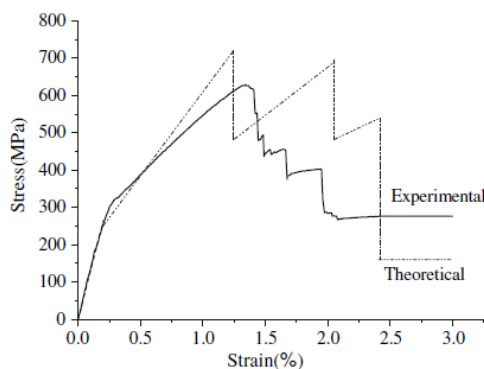


Figura 31 - Relação curva tensão - extensão barra híbrida (Cui, et al., 2008).

Após a validação dos resultados do desempenho mecânico, foram implementados ensaios de variação de peso e envelhecimento acelerado, por comparação entre barras comerciais GFRP e novo modelo híbrido, com exposição ao meio alcalino. As barras foram imersas num meio alcalino,

com PH entre 12.5 e 13.5 simulando condições do betão, e à temperatura de 60°C. O estudo foi realizado durante 8 semanas e as barras avaliadas a cada 2 semanas (Figura 32).

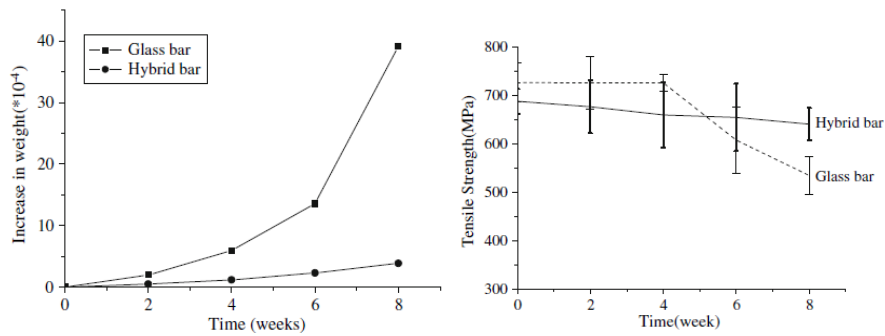


Figura 32 - Comparação ganho de peso e resistência à tração do varão híbrido e GFRP (Cui, et al., 2008).

Os resultados apresentados validam a potencialidade do novo modelo de varão híbrido, com apenas um ganho de peso de 9.35% após 8 semanas de imersão em meio alcalino, comparativamente com a barra de revestimento em polímero, GFRP. Por outro lado, antes do envelhecimento acelerado introduzido pelo meio alcalino, a barra GFRP apresenta uma maior capacidade de resistência inicial à tração, acabando por se igualar com a barra em estudo ao fim de 5 semanas. No final das 8 semanas o novo modelo de barra híbrida permanece com 93.14% da resistência inicial contra 73.62% verificado na GFRP.

O desempenho global da armadura híbrida tem potencial para o reforço de estruturas de betão, apesar de um maior custo e para tal, o presente estudo, também analisou os resultados em 3 principais aspetos: rigidez, resistência e custo (Figura 33) (Cui, et al., 2008).

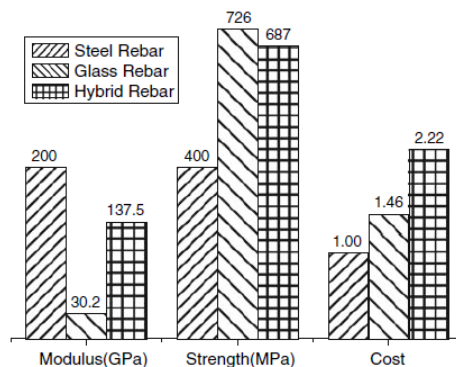


Figura 33 - Comparação da rigidez, resistência e custo de diferente armadura de reforço (Cui, et al., 2008).

No ano 2010, outra pesquisa foi desenvolvida com a utilização de aço nervurado no núcleo e o revestimento em fibras de carbono e basalto (SFCB). A configuração do varão mostrada neste

estudo, foi alcançada com ensaios preliminares dos diferentes constituinte (fibras, resinas e aço) e a capacidade de aumento de ligação entre eles, procurando garantir maior desempenho da barra. Para evitar efeitos pontuais de flexão nas fibras, provocada pela utilização de aço nervurado no núcleo, foram enroladas fibras em volta do núcleo (Figura 34) (Aramid, 2015).

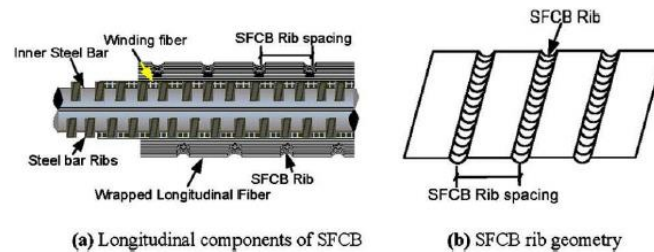


Figura 34 - Configuração do produto SFCB (Aramid, 2015).

Este tipo de varão SFCB foi produzido através de um processo de pultrusão modificado de forma ser possível obter quantidade industrial. Os resultados obtidos foram de acordo com o previsto e os resultados mecânicos alcançados semelhantes à investigação de (Nanni, A., Henneke, M. J., Okamoto, T., 1994).

## 2.6 Balanço da evolução do comportamento mecânico de varões de FRP

Em pleno século XXI, o material FRP já é globalizado e as suas características físicas, químicas, mecânicas e a ligação com o betão, largamente investigado, aglomerando o conhecimento criado em documentação especializada, "Guide Lines". Pode afirmar-se que se está perante um fiável substituto do varão tradicional em aço, e o potencial contributo na eliminação de um dos maiores desafios da comunidade científica, a corrosão do aço e deterioração prematura das estruturas de betão.

Tabela 5 – Resumo do Estado da Arte – Estudos de ignição no conhecimento desenvolvido

Referências	Tipo ensaio	Diâmetro (mm)	Técnica produção	Tipo de fibras (Reforço)	Resina (matriz)	Caraterísticas físicas	Rigidez (Gpa)	Extensão (%)	Desempenho mecânico
(Benmoktane, B; et al:1995)(Bank, Lawrence C.:2006)	Vigas à flexão.	6	Pultrusão	Vidro	Vinyléster e poliéster	Areia e enrolamento helicoidal com fibras	-	2,5	Não ocorreu deslizamento do varão.
(Benmoktane, B; et al:1995)(Reis, Vítor:2009)	Tração pura	12,5	Pultrusão	Vidro	-	-	-	-	Linear elástico até rotura, ausência de fase plástica.
(Bakis, E. C.; et al:1996)(Bakis, C.E.; et al:2001)(Sim, J.S.; et al:2005)	Tração pura	11	Pultrusão	Carbono, vidro e aramida	Vinyléster e poliéster	-	40-60	1,2 a 1,7	Comportamento pseudodúctil
(Wu, Zhishen;2005)	Tração pura	-	Pultrusão	Carbono alto módulo, carbono alta resistência, PBO, vidro	Epóxi	-	-	3	Comportamento pseudo-plástico
(Tepfers, R.; et al:1996)	Tração pura	3	Entraçamento	Vidro, carbono, aramida	Epóxi	Entraçado de fibras de aramida com inclinação de 30°.	40	1,5 a 2,5	Comportamento dúctil, bons indicadores de aderência.
(Tepfers, R.; et al:1996)(Somboonson g, Win; et al:1998)(Hampton, F.; et al:1999)(Pastore, Christopher M.:1999)	Tração pura, flexão em vigas.	3,5;10	idem	idem	idem	Fibras de aramida entraçadas na camada exterior.	202	2 a 3	Comportamento de pseudoductilidade e conseguidas excelentes caraterísticas de aderência.
(M. J. Henneke:1993)(Nanni, A.; et al:1994)	Tração pura		idem	Aramida e vinylon/Aço	idem	Fibras de aramida entraçadas em núcleo em fio de aço liso (barra híbrida).	-	-	Comportamento mecânico axial bilinear.
(M. J. Henneke:1993)	Flexão em vigas	9 e 13	idem	idem	idem	Fibras de aramida entraçadas em núcleo de aço e vinylon em núcleo em fio de aço liso (barra híbrida).	-	5	Capacidade de carregamento conseguido está fortemente relacionado com a resistência do núcleo em aço e o seu diâmetro, do que com o tipo e espessura da camada exterior do FRP.
(Saikia, B.; et al:2005)	Tração pura	8	Enrolamento Helicoidal	Vidro/Aço	idem	Fibras de vidro enroladas em núcleo em fio de aço liso (barra híbrida).	101	-	Não demonstra sinais evidentes ductilidade, talvez justificados pela rotura prematura do varão.
(Saikia, B.; et al:2005)(You, Young-jun; et al:2007)	Vigas à flexão	8	Enrolamento Helicoidal	Vidro/Aço	idem	idem	-	-	Maior deformação apresentada quando comparado com os resultados em tração pura, possivelmente justificado pela falta de aderência com o betão.
(Cui, Yihua; et al:2008)	Tração pura	10	Enrolamento Helicoidal	Vidro/aço, aço, carbono, aramida	idem	Núcleo em fio de aço liso e fibras de vidro, revestido com fibras de carbono e aramida	142	2	Comportamento pseudodúctil
	Envelhecimento e variação de peso	10	idem	Vidro, aço, aço, carbono, aramida	idem	Barra GFRP e barra vidro/aço (barra híbrida). Imerso 8 semanas num meio alcalino, com PH entre 12.5 e 13.5 e temperatura de 60°C	-	2	Barra híbrida com um ganho de peso de apenas 9,4%, comparativamente com revestimento polimérico, 40%. No ensaio de tração pura, barra híbrida apresenta 93% da resistência inicial.

Contudo, o revolucionário material compósito, apresenta as vantagens potencialmente exploradas e conhecidas, mas desvantagens que ainda hoje são e continuaram a ser um desafio continuo na mitigação destas. A investigação aliada à evolução tecnológica no conhecimento de novas fibras e técnicas, podem conduzir à durabilidade continua das caraterísticas físicas e mecânicas ao longo do ciclo de vida, com o dimensionamento estrutural a considerar menores fatores de redução das propriedades mecânicas dos FRPs inicialmente conhecidas.

## 2.7 Durabilidade dos varões FRP no reforço de betão

A tecnológica FRP está em constante desenvolvimento com a aplicação do conhecimento científico na melhoria das propriedades mecânicas e físicas destes materiais, com utilização de novas fibras, resinas, técnicas de produção e avanços na composição química das barras FRP. Desta forma, a utilização do material FRP no reforço do betão em alternativa ao reforço tradicional em aço, apresenta-se como uma solução de potencial mudança, pelas suas características físicas e mecânicas, e de durabilidade prolongado. Contudo, se o aço é afetado pela corrosão durante o ciclo de vida da estrutura de betão armado, o material FRP, um compósito, é condicionado nas suas características mecânicas por efeitos do ambiente do betão, em termos de condições ambientais externas e fator tempo, o que condiciona a sua durabilidade. Mais ainda, a potencial degradação do FRP ao longo do ciclo de vida da estrutura, é diretamente condicionado pelo tipo de matriz, fibras, interface fibra/matriz e técnicas de fabrico. O desenvolvimento tecnológico do material FRP é realizado com simulação teórico e prático a ambientes desfavoráveis e envelhecimento acelerado do compósito, (Fib, 2007).

A Tabela 6 mostra os resultados dos ensaios de tração realizados na universidade de Chalmers em barras GFRP, onde são representadas as reduções das características mecânicas das barras, quando envolvidas em solução alcalina, betão e água com simulação a diferentes idades (Fib, 2007).

**Tabela 6 - Efeitos da temperatura em barras GFRP expostas ambiente alcalino, betão e água (Fib, 2007).**

Exposure Condition	Temp (°C)	% of original tensile strength				
		Age at Test (days)				
		28	90	180	365	545
Alkali	60	82	55	37	32	31
Concrete	60	91	80	57	51	45
Water	60	93	84	75	73	72
All (average)	20	95	92	90	88	80

Para tal, o dimensionamento estrutural com uso do reforço FRP segue recomendações de projeto, CAP - ESTADO DA ARTE, que introduzem coeficiente de redução das propriedades mecânicas padrão de uma barra FRP, com a finalidade preservar a durabilidade e desempenho do material. As propriedades mecânicas afetadas (resistência de tração, extensão última e módulo de elasticidade) do sistema FRP degrada-se em condições ambientais específicas, como: ambiente alcalino, humidade, altas temperaturas, ciclo de congelamento e descongelamento, radiação ultravioleta (UV) e ainda elevadas cargas permanentes (CNR, 2007).



No seguimento das recomendações transportadas para os guias de projeto existentes internacionalmente através do conhecimento verificado pela comunidade científica (Micelli & Nanni, 2004) elaborou um estudo com cinco tipos de barras FRP, 3 carbono e 2 vidro. A análise nas variações das propriedades físicas e mecânicas foram estudadas segundo envelhecimento acelerado, com exposição ao ambiente alcalino do betão e agentes ambientais externos, nomeadamente, congelamento e descongelamento, humidade relativa elevada, alta temperatura e radiação ultravioleta (UV). Os ensaios mediram as propriedades conservadas e a observação dos danos e redução da resistência padrão.

O programa experimental mostrou que as propriedades da resina pode influenciar fortemente a durabilidade do FRP, os ciclos de agressão ambiental não conduziu a significantes danos na barra e as barras GFRP são muito sensíveis a ataques alcalinos quando a resina não protege de forma eficaz as fibras (Micelli & Nanni, 2004).

As características de resina que podem influenciar a durabilidade dos materiais FRP, independentemente do tipo de resina e tipo de fibras, foram enumeradas por (Ceroni, et all, 2006) e são:

- Qualidade da impregnação da resina;
- Ausências de fissuras;
- Eliminação dos vazios ou distribuição homogénea na secção;
- Qualidade da cura da resina;
- Capacidade de resistência a ataques alcalinos e de cloretos;
- Dureza para resistir às micro fissuras;
- Impermeabilidade;
- Qualidade/eficiência processo produção;
- Compatibilidade com diferentes fibras de forma a potenciar a ligação fibra/matriz.

A evolução do conhecimento sobre o previsto comportamento do material FRP ao longo do seu ciclo de vida, permite a divisão da durabilidade em três temas, sendo estes, a influência ambiental exteriores, efeitos do ambiente do betão e efeitos em função do tempo. Os materiais FRP são materiais compósitos e compostos essencialmente por duas fases: uma matriz de resina e fibras. A compatibilidade entre ambos os materiais e as propriedades de cada um, são fundamentais para obter um material durável (Ceroni, et all, 2006).

### 2.7.1 Influência do ambiente exterior

**Alta temperatura:** o módulo de elasticidade e a resistência à tração de varões de FRP diminui com o aumento de temperatura. As temperaturas elevadas combinadas com cargas continuadas pode causar deterioração da matriz, o que limita a eficácia fibras. Em caso de altas temperaturas, provocadas pela presença de fogo, a resistência do FRP é determinada pela resina, devido à sua menor resistência. Usualmente as resinas perdem as suas propriedades entre os 150°C e 200°C;

**Ciclos de congelamento / descongelamento:** combinados com água e cloretos pode potenciar a infiltração no betão e atacar as barras FRP, causando a degradação de fibras, resinas e ligação resina/fibras;

**Radiação Ultra Violeta:** os raios UV podem afetar barras GFRP e AFRP, no entanto, se o FRP estiver no interior do betão as barras não sofrem agressão da radiação UV.

### 2.7.2 Efeitos do ambiente do betão

**Humidade:** absorção por capilaridade ou por fissuras que possam existir no compósito, aumentando a massa do GFRP, originando danos na matriz;

**Soluções alcalinas:** a absorção pelo FRP do fluido com alto PH, alcalinidade, afeta as fibras de vidro, diminuindo assim a resistência à tração e rigidez das barras de FRP. Os danos para as fibras é tanto maior, quanto mais tempo estiver sob estas condições, influenciando a ligação fibra/resina, afetando diretamente a resistência do GFRP, classificando de extrema importância a escolha da resina apropriada;

**Cloretos:** a presença destes pode danificar seriamente GFRP. Por outro lado CFRP e AFRP não são sensíveis aos cloretos.

Tabela 7 - Influência dos agentes ambiente do betão (Ceroni, et al, 2006)

Influência ambiente do betão				
Efeito	Tipo de Fibra			Parâmetros de influência
	Aramida	Carbono	Vidro	
Exposição Alcalina	Redução de resistência entre 0 - 20%	Redução de resistência entre 0 - 20%	Redução de resistência entre 0 - 75%	Tipo de resina, temperatura, tensão de tração
Exposição Cloretos	Baixa sensibilidade	Resistente	Sensível	Tipo de resina
Humidade	Propriedades mecânicas decrescente das fibras	Danos na resina	Danos na resina	Temperatura

### 2.7.3 Efeitos em função do tempo

**Fluência:** Este fenómeno pode ser explicado pela deformação progressiva do material FRP, quando sujeito a cargas constantes e permanentes, ao longo do tempo. A rotura por fluência está dependente do tipo, orientação e volume de fibras, sendo as fibras de carbono as menos suscetíveis à rotura por fluência, seguindo-se as fibras de vidro e aramida. Normalmente, para evitar a rotura em fluência deve limitar-se, no dimensionamento, a tensão prolongada a 60% da força de tração, onde a fluência pode também ser influenciada por efeitos ambientais e efeitos do ambiente do betão (Ceroni, et all, 2006) (Reis, 2009);

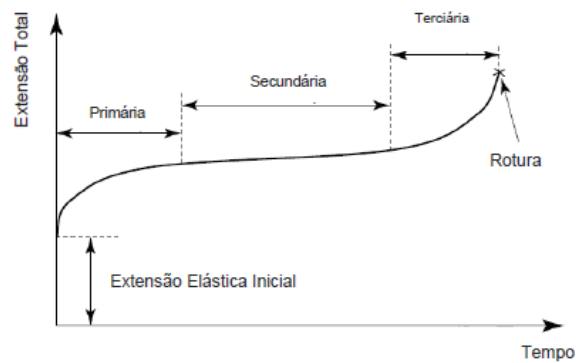


Figura 35 - Curva típica da extensão durante a deformação em fluência, (Reis, 2009).

**Relaxamento:** O fenómeno descreve-se como a perda de tensão do FRP com o tempo, quando o material é mantido sob temperatura e tensão constante. A taxa de relaxamento pode ser determinada dividindo a carga final medida num ensaio de relaxamento, pela carga inicial, que representa a percentagem de redução do valor da carga inicial, após um indicado período de tempo. Exposição a temperaturas elevadas pode aumentar a taxa de relaxação. Normalmente CFRP são mais resistentes ao relaxamento, seguido de barras GFRP e como mais afetadas, barras de AFRP (Ceroni, et all, 2006) (Reis, 2009).

Tabela 8 - Série de efeitos dependentes do tempo, (Ceroni, et all, 2006).

Influência do tempo nas propriedades mecânicas				
Fenómeno	Tipo de Fibra			Parâmetros de influência
	Aramida (%)	Carbono (%)	Vidro (%)	
Extensão por fluência sob carregamento constante (80% tensão de tração depois de 3000h)	0,15 - 1,0	< 0,01	0,3 - 1,0	Temperatura, humidade
Força rotura por fluência, depois de 50 anos	47 - 66	79 - 93	29 - 55	Tipo de resina, volume e orientação das fibras, condições ambientais
Relaxamento	1000h	5,0 - 8,0	0,5 - 1,0	Temperatura, tensão de tração inicial
	50 anos	11 - 25	2,0 - 10	

Com este trabalho, é mostrado a importância da influência ambiental e os efeitos do ambiente do betão na durabilidade das barras FRP. Por outro lado, os efeitos que dependem do tempo, também são influenciados pelas condições ambientais de exposição e do interior do betão, que determinam uma ainda maior redução de características mecânicas que dependem do tempo.

## **2.8 Disposições de projeto para a durabilidade**

Atualmente, os varões FRP podem construir armaduras de FRP com diferentes tipos de fibras, resinas e técnicas de produção, considerando o efeito da influência ambiental, efeito do ambiente do betão e efeitos em função do tempo de carga, no ciclo de vida previsto para uma nova construção. Com isto, apresenta-se na Tabela 9 e na Tabela 10 a transposição do conhecimento sobre fibras de vidro, carbono e aramida, com uso de resinas termoendurecíveis, conforme estado da arte/códigos de projeto. Estas, pretendem traduzir relevantes considerações nos fatores de redução das propriedades mecânicas do material FRP a aplicar no dimensionamento estrutural FRP, segundo condições de exposição e cenários de durabilidade.

Importante ainda considerar, que os valores das propriedades físicas dos varões de FRP correspondem à utilização de um volume de fibras na mistura entre os 50 % e 70%, e os valores negativos dos coeficientes de dilatação térmica, indicam a contração do material quando a temperatura aumenta e a expansão com a diminuição da mesma (Committee 440 ACI, 2006). Por outro lado, segundo (JSCE, 1997), os valores característicos do FRP padrão nas suas propriedades mecânicas de tração e extensão última, são valores mínimos da maioria dos resultados dos ensaios desenvolvidos pela comunidade científica, permitindo alguma variação nos fatores apresentados.

**Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas de varões FRP (CNR, 2007) (Committee 440 ACI, 2006) (Fib, 2007).**

Propriedades físicas de varões FRP		Tipo de Fibra			Aço
		CFRP	AFRP	GFRP	
Massa Volúmica ( $g/cm^3$ )	Matriz Poliéster	1,43 - 1,65	1,31 - 1,43	1,75 - 2,17	7,85
	Matriz Epóxida	1,44 - 1,67	1,32 - 1,45	1,76 - 2,18	
	Matriz Viniléster	1,44 - 1,63	1,30 - 1,41	1,73 - 2,15	
Coeficiente de dilatação térmica ( $10^{-6}/^{\circ}C$ )	Longitudinal ( $\alpha_L$ )	-9 a 0	- 6 a -2	06 - 10	11
	Transversal ( $\alpha_T$ )	74 - 104	60 - 80	21 - 23	
<b>Propriedades mecânicas de varões FRP</b>					
Tensão de tração (MPa)		600 - 3690	1000 - 2540	450 - 1600	450 - 700
Módulo de elasticidade (GPa)		100 - 580	40 - 125	35 - 60	200
Extensão de rotura (%)		0,5 - 1,7	1,9 - 4,4	1,2 - 3,7	05 - 20

**Tabela 10 - Fatores de redução da capacidade de tração dos varões FRP, por ações ambientais e carga constante (Committee 440 ACI, 2006) (CNR, 2007) (JSCE, 1997).**

Fator de redução	Principais propostas de "Guidelines"		
	ACI440 CE	JSCE 1/yfm	CNR $\eta_a$
Redução por deterioração ambiental (ULS)	GFRP: 0.7-0.8	GFRP: 0.77	GFRP: 0.7-0.8
	AFRP: 0.8-0.9	AFRP: 0.87	AFRP: 0.8-0.9
	CFRP: 0.9-1.0	CFRP: 0.87	CFRP: 0.9-1.0
	0,8 x "carga rotura de fluência"		
Tensão limite por carregamento constante (SLS)	GFRP: 0.2	GFRP $\leq$ 0.7	GFRP: 0.3
	AFRP: 0.3	AFRP $\leq$ 0.7	AFRP: 0.5
	CFRP: 0.55	CFRP $\leq$ 0.7	CFRP: 0.9

## 2.9 Tecnologia Braided Composite Rods (BCRs)

Braided Composite Rods (BCRs) resulta do conhecimento desenvolvido pelo Grupo de investigação em Materiais Fibrosos da Universidade do Minho, criando pequenas adaptações a uma máquina convencional têxtil, utilizada na produção de cordoara, e reabilitando-a para a produção de varões compósitos através da técnica de entrançamento. Esta, apresenta-se como uma técnica de baixo custo que permite orientação multiaxial das fibras, excelente proteção do núcleo e condução das cargas a este, original acabamento exterior estriado e uma alargada variedade de propriedades mecânicas, alcançadas pela combinação de diferentes tipos do reforço, (Figura 36).

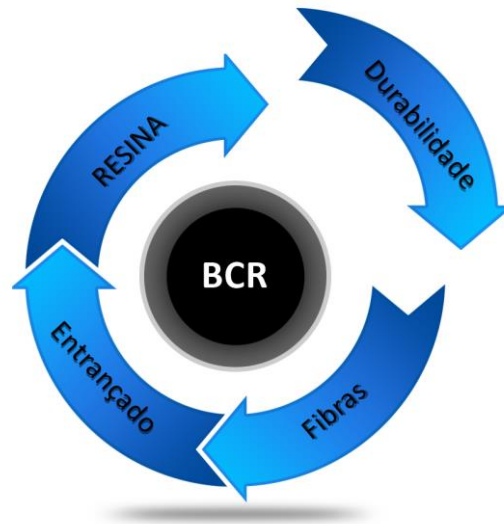


Figura 36 - BCR de hoje ao futuro

Por outro lado, esta técnica de entrançamento também permite a utilização de diferentes fibras e fibras com diferentes densidades na estrutura entrançada, gerando um estriado natural, que potencia a melhoria do comportamento de aderência ao betão e a procura do comportamento pseudodúctil, pela deformação da estrutura entrançada durante o carregamento. O reforço axial é impregnado imediatamente antes da criação da estrutura de revestimento, o que revoluciona a impregnação da camada entrançada, acontecendo do interior para o exterior, potenciando a homogeneidade de ligação entre o material compósito (Fangueiro, et al., 2011).

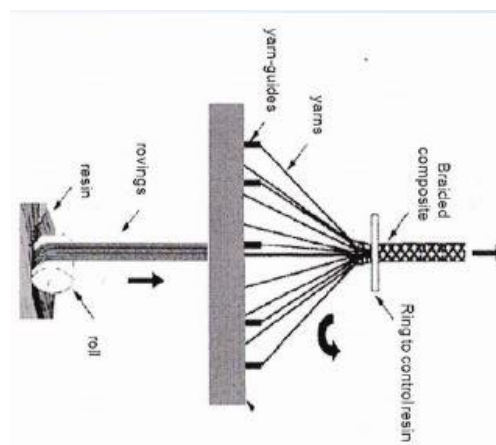


Figura 37 - Processo produção BCR (Fangueiro, et al., 2011).

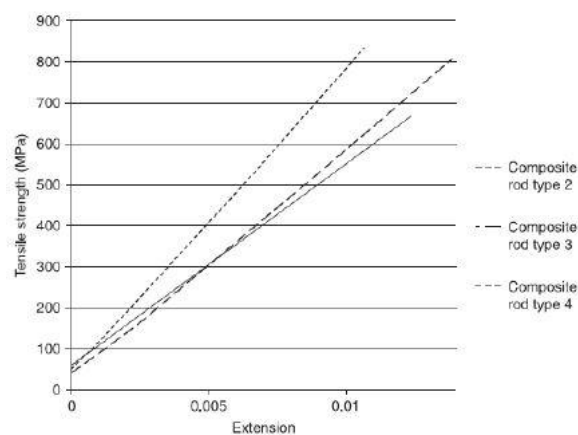
Na busca pelo custo competitivo, alto módulo de elasticidade e um comportamento dúctil capaz de identificar aproximação da rotura da barra de compósito e desintegração estrutural, foram produzidos sete diferentes barras BCR, com estrutura entrançada igual em fibras de poliéster. Os BCRs com núcleo construído por diferentes percentagens de fibras de vidro, carbono e HT

polietileno foram impregnados com resina poliéster. O ensaio de BCRs com diferentes tipos de reforço e quantidades (um, dois e três tipos de fibra no mesmo varão) visou estudar a influência de cada origem de fibra na quantificação do comportamento mecânico da barra entrançada. A composição do varão BCR e os resultados obtidos pelos ensaios de tração são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - BCR composição e resultados dos ensaios de tração** (Fangueiro, et al., 2011).

BCR	Tipo de reforço do núcleo			Propriedades mecânicas			
	Fibra vidro- E (%)	Fibra carbono (%)	HT Polietileno (%)	Resistência tração (MPa)	Extensão de rotura	Resistência tração a 0,2% (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	100	-	-	485,35	0,01701	110,73	55,36
2	77	23	-	766,7	0,01416	157,05	78,52
3	53	47	-	740,41	0,01178	148,96	74,48
4	-	100	-	747,77	0,01183	192,58	96,29
5	50	45	5	679,45	0,01105	167,84	83,92
6	52	45	3	652,77	0,01098	162,17	81,09
7	75	22	3	690,99	0,01438	146,4	73,2

Os resultados mostram que o BCR 1 apresenta o pior resultado de resistência à tração e o BCR 2 o melhor resultado, um extensão máxima de 0.2%. O maior módulo de elasticidade foi atingido pelo BCR 3, com 100% fibra de carbono, sendo inferior a 1/2 do módulo de elasticidade do aço tradicionalmente usada na indústria da construção em Portugal, 210GPa. No entanto, o pior resultado, BCR 1, é a única barra com resistência inferior ao aço com maior resistência usado em Portugal, A500NR/ER = 550MPa. As curvas tensão – extensão do BCR 2, BCR 3 e BCR 4, são representadas na (Figura 38).



**Figura 38 - BCR curva tensão – extensão** (Fangueiro, et al., 2011).

Posteriormente, para o estudo do comportamento dos varões compósito à flexão, foram produzidas vigas de betão reforçadas com armadura de aço e BCR do tipo 2 e 4, utilizando igual distribuição de armadura e betão, assim como igual secção dos elementos de betão (Figura 39).

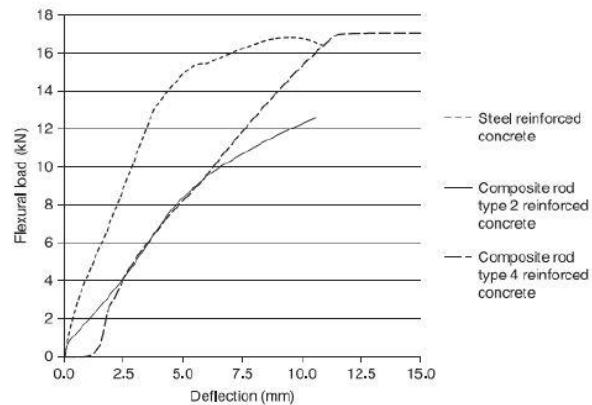
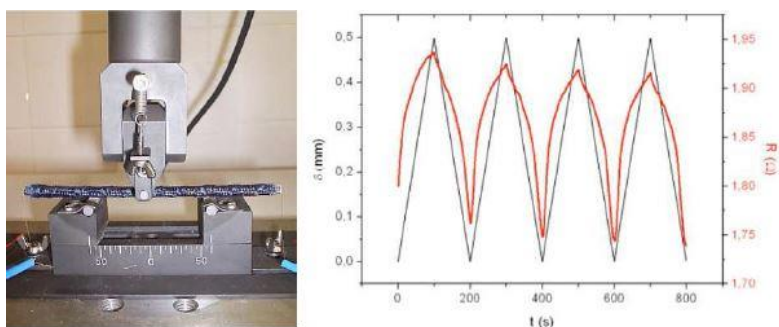


Figura 39 - BCR curva carga – deflexão vigas de betão (Fangueiro, et al., 2011).

Conclui-se que comparativamente ao reforço em aço, o baixo carregamento inicial conduziu a uma significativa deflexão da viga com armadura BCR 4, enquanto a viga com armadura BCR 2 apresentou baixa capacidade de carregamento e comportamento linear elástico até à rotura. Ambas as vigas de armadura com varão compósito não mostrou comportamento dúctil.

Após estes trabalhos, outros estudos foram desenvolvidos com o objetivo de potenciar o conhecimento sobre o material BCR (Fangueiro, et al., 2006) (Zdraveva, 2009) (Cunha, 2012) (Oliveira, 2013) como elemento que conduza à fiável monitorização estrutural. Desta forma, foram produzidos varões Braided Composite Rods (BCRs) com fibras de vidro e carbono, utilizando diferentes percentagens do material com características piezoresistivas, fibra de carbono (23%, 77% e 100%) e ensaiados à flexão. Os ensaios de flexão foram realizados com a medição da deformação em 3 pontos do varão BCR submetido a ensaios cíclicos. Os resultados (Figura 40) mostram a variação da resistência elétrica durante a aplicação da deformação e a capacidade desta de conduzir a uma eficaz monitorização do sistema estrutural através do reforço BCR (Fangueiro, et al., 2011).





**Figura 40 - Ensaio de flexão (à esquerda), o deslocamento, mudança de resistência e tempo de resposta BCR (núcleo 77% de vidro e 23% de carbono) (Zdraveva, 2010).**

Os resultados obtidos, mostram um excelente comportamento de monitorização do varão BCR com núcleo de 77% de vidro e 23% de carbono. Portanto, permitem concluir que a resistividade elétrica e fiabilidade da monitorização está diretamente relacionada com a percentagem de fibras de carbono utilizadas no varão (Fangueiro, et al., 2011) (Zdraveva, 2010).

### **3. CAP III – ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CARATERIZAÇÃO DO BETÃO**

#### **3.1 Introdução**

O betão é uma pedra artificial e pode ser definida como um material heterogéneo, uma vez que, as suas características dependem das características individuais dos seus constituintes bem como da sua compatibilidade.

O betão é um composto de cimento, agregados grossos e finos, água, com eventual adição de adjuvantes que visam potenciar as características físicas e mecânicas do material. A combinação dos materiais conferem propriedades únicas que influenciam diretamente a resistência, durabilidade, custos de produção e aplicação em estruturas.

Para o programa experimental, foi determinante a escolha de um betão que estabelece-se a relação mais interessante entre o trabalho laboratorial a implementar, o desempenho mecânico expectável e a favorável produção da mistura em laboratório.

Para tal, o planeamento das amassaduras de teste, com vista à caracterização mecânica do betão e seleção da mistura a utilizar como betão de referência, foram circunscritas a um plano que se desenvolveu em duas fases, fase 1 e fase 2. A fase 1 é caracterizada pela produção das misturas e avaliação do desempenho mecânico do betão através de ensaios de compressão. Por sua vez, a fase 2, aponta a escolha do betão a utilizar e complementa a avaliação do desempenho mecânico através do módulo de elasticidade.

#### **3.2 Composição do material**

A produção de betão normalizado obriga ao cumprimento de determinados requisitos exigidos por normalização específica, que valida e caracteriza as propriedades atingidas. Para tal, as amassaduras teste executadas cumprem o recomendado pela norma ( NP EN 206-1, 2007) no que se refere aos aspetos relacionados com a especificação, desempenho, produção e conformidade do betão.

Na realização das amassaduras foram utilizados agregados (grossos e finos) de origem natural, provenientes de Portugal e secos em estufa ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ), de modo a eliminar dúvidas quanto à variação do seu teor de humidade (NP EN 480-1, 2007). O ligante foi o Cimento Portland da SECIL

CEM I 42.5R que dispõe de marcação CE (NP EN 197-1, 2012). A água utilizada no fabrico das amassaduras é potável e recolhida a partir da rede pública.

O betão de referência, que decorreu da observação dos resultados das betonagens experimentais foi igualado por todas as outras misturas produzidos no decorrer do programa experimental. Com isto, e porque houve a necessidade de adquirir um lote de agregados suficientes para satisfazer todo trabalho do programa experimental, realizou-se em laboratório o estudo da granulometria dos agregados.

### **3.2.1 Estudo curva granulométrica dos agregados**

O estudo da curva granulométrica tem como objetivo conhecer a distribuição do agregado e representá-la através de uma curva, possibilitando assim a determinação das suas características físicas. O ensaio de caracterização de agregado, consiste na separação do material por meio de peneiros, em diversas classes granulométricas de granulometria descendente.

Por outro lado, o estudo da composição granulométrica do agregado é classificado segundo a norma (NP 1379, 1976) como fino, areia 0/4mm e agregado grosso, brita 4/8mm. A composição granulométrica do agregado tem grande influência no desempenho das propriedades do betão.

### **3.2.2 Recolha da amostra**

A massa seca total para o estudo a granulometria dos inertes, foi recolhida de acordo com a norma ( NP EN 933 - 1, 2000). A partir do volume total da amostra de inertes necessários para a realização do trabalho laboratorial, foi recolhida uma amostra mais pequena de 0.75kg, que visou estudar e representar as propriedades da amostra total. O volume de inerte estudado nas duas granulometrias tem um peso seco superior ao mínimo recomendado no quadro 1 da presente norma, onde é referido para a máxima dimensão do agregado  $\leq 4\text{mm}$  (0.2kg) e  $\geq 4\text{mm}$  (0.6kg).

### **3.2.3 Peneiração e pesagem dos agregados**

Os peneiros de ensaio com aberturas como especificado na norma (BS EN 933-1, 1996) e em conformidade com as exigências da (ISO 3310-2, 1999) foram colocados em coluna e posicionados de cima para baixo por ordem decrescente, conforme a dimensão das aberturas, tendo um fundo e uma tampa.

O processo foi iniciado com o despejar do material seco na coluna de peneiros e agitado manualmente até à massa do material retido não se alterar mais de 1.0% durante 1 minuto de

peneiração. Dado este resultado, a peneiração pode ser considerada completa para determinada dimensão do peneiro.

Posteriormente, foi necessário realizar a pesagem do material retido nos peneiros com a maior dimensão que as aberturas e registar a sua massa, com auxílio de uma balança digital de precisão de  $\pm 1\%$  da massa do provete, (Figura 41 (a)).

Este procedimento foi executado de igual modo para todos os peneiros que compoñham a coluna inicial de peneiros, de modo a obter a massa das diferentes frações dos materiais retidos, (Figura 41 (b)).

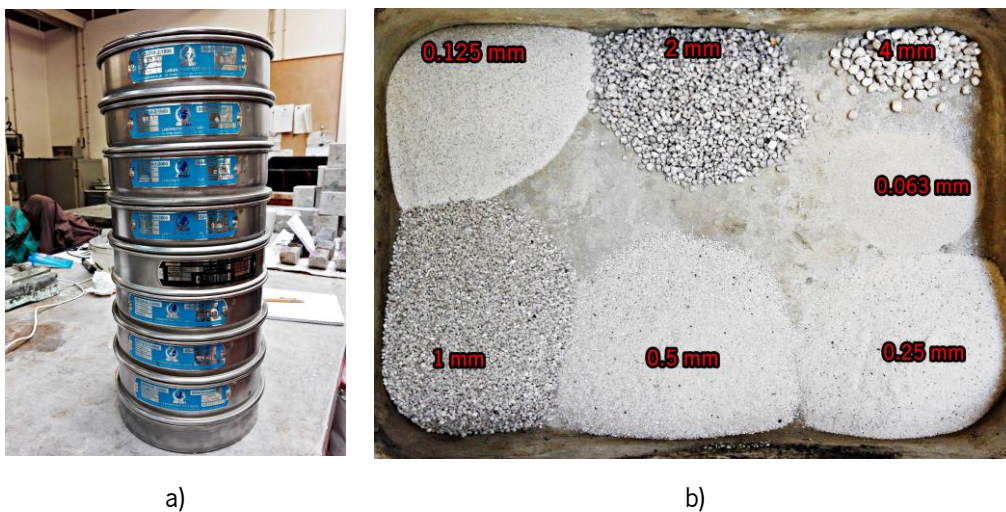


Figura 41 – (a) Série de peneiros areia 0/4mm; (b) Acumulados retidos areia 0/4mm

Mais ainda, a análise dos dados obtidos permite afirmar segundo os critérios ASTM – American Society for Testing Material, que a máxima dimensão do agregado é 4 mm para agregado fino e 8 mm para agregado grosso, uma vez que, pelo peneiro de 4 e 8 mm da serie de peneiros, passam mais de 90% da massa do agregado (% acumulados passados) (Tabela 12).

Tabela 12 - Análise granulométrica

Amostras		
Massa seca total M1 (kg)	0,75	
	Areia 0/4	Brita 4/8
Dimensões (mm)	% Acumulados passados	
63	100	100
31,5	100	100
16	100	100
8	100	100
6,3	97	100
5,6	97	99
5	97	99
4	97	92
2	84	68
1	64	47
0,5	42	32
0,25	21	22
0,125	6	11
0,063	1	3
P	-	-

### 3.2.4 Caraterização dos agregados

As curvas granulométricas são fundamentais para observar rapidamente a granulometria do agregado e as deficiências que possam existir ao nível de certas frações granulométricas, como a falta de partículas de dada dimensão. A análise granulométrica dos agregados finos e grossos através da representação gráfica da curva granulométrica permite também conhecer a homogeneidade da repartição dos inertes.

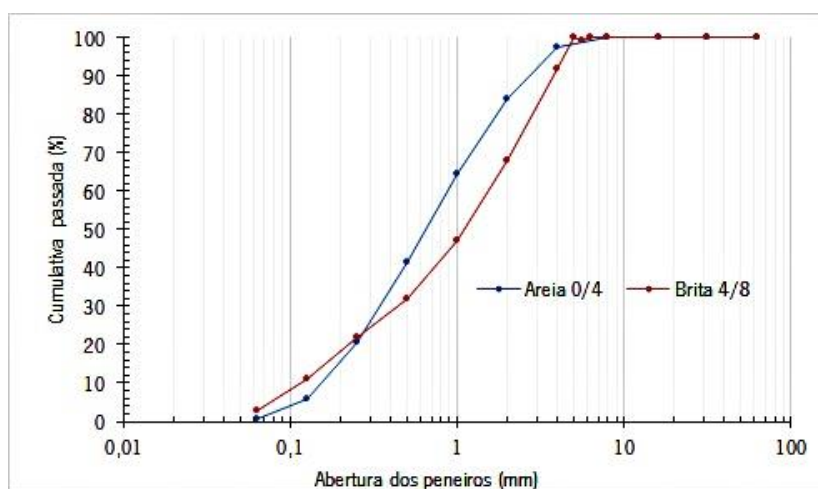


Figura 42 - Curva granulométrica agregados

Conforme observado no (Figura 42) e de acordo com o descrito por (Coutinho, 1988) as curvas granulométricas indicam que estamos perante agregados ausentes de deficiências granulométricas e com um preenchimento uniforme de partículas por todas as dimensões, da mais pequena à maior (0/4 mm e 4/8 mm). Mais ainda, a excelente graduação dos agregados é dada pela continuidade das curvas granulométricas mostradas.

### 3.3 Metodologia

O programa experimental foi iniciado com a execução de 2 betonagens experimentais, no estudo de 2 amassaduras de teste. O objetivo foi assegurar um betão com classe de resistência C30/37, classificado segundo ( NP EN 206-1, 2007). Para tal, recorreu-se ao trabalho desenvolvido na Universidade do Minho por (Pereira, 2014), a fim de obter a composição do betão capaz de satisfazer o desempenho mecânico requerido.

Esta etapa foi desenvolvida em duas fases: os trabalhos que conduziram à realização das amassaduras e a escolha da mistura de betão referência C30/37.

Fase 1: Realização das amassaduras.

O estudo das misturas de betão, designadas por Betão\_1 e Betão\_2, consistiu na produção de uma população de 14 provetes cilíndricos, com dimensão 150mm de diâmetro e 300mm de altura, betonados em moldes de ferro fundido, e de acordo com norma (NP EN 12390-1, 2009). Para tal, foram definidas famílias de 7 amostras para cada mistura, e ensaiadas à compressão aos 14 dias (2 amostras) e 28 dias (5 amostras) de idade), a fim de sistematizar as propriedades mecânicas reconhecidas por (Pereira, 2014) . Assim, são apresentadas na (Tabela 13), a composição das misturas para 1m<sup>3</sup> de betão.

**Tabela 13 - Misturas de betão, (Pereira, 2014)**

<b>Composição</b>	<b>Betão_1 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Betão_2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Agregados finos 0/4 (mm)	1333,43	1333,43
Agregados Grossos 4/8 (mm)	288,46	288,46
Cimento CEM I 42,5R	427,47	500
Água	231	231
Superplastificante, SIKA 3005 HE (%)	-	5

Fase 2: Estudo do módulo de elasticidade.

Estruturado o conhecimento alcançado por (Pereira, 2014) através dos resultados obtidos das famílias de amostras de betão endurecido, foi selecionada a mistura designada por Betão\_2. Esta, satisfaz a classe de resistência pretendida e apresenta uma relação água cimento A/C 0.46 estando de acordo com norma ( NP EN 206-1, 2007) para um betão com estas características.

Por outro lado, e de forma a complementar o conhecimento do desempenho mecânico do Betão\_2 a reproduzir como a matriz cimentícia em todas as betonagens do programa laboratorial, foram fabricados provetes cilíndricos de acordo com (LNEC - E397, 1993) para estudo do módulo de elasticidade em betão endurecido, após os 28 dias de idade.

### **3.4 Realização das amassaduras**

#### **3.4.1 Procedimento**

A execução das misturas foi realizada numa betoneira de eixo vertical, constituída por três pás rasantes com diferentes dimensões e uma capacidade de 90 litros por mistura de betão. Para tal, foram previamente e sequencialmente pesados os agregados grossos, finos, cimento e água.

O trabalho da betoneira foi iniciado depois de colocados no seu interior por ordem de grandeza os agregados grossos, agregados finos e o cimento. A mistura decorreu durante 5 minutos e posteriormente foi adicionada progressivamente a água, continuando o trabalho de mistura por mais 5 minutos. O processo de amassadura foi executado de forma a garantir uma distribuição uniforme dos materiais constituintes e uma consistência uniforme do betão, (NP EN 480-1, 2007).

#### **3.4.2 Betonagem e cura dos provetes**

A betonagem dos provetes cilíndricos foi realizada segundo as recomendações da norma ( NP EN 12390 - 2, 2009) que especifica métodos de executar e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica.

Com isto, os moldes de ferro fundido foram cobertos pelo interior com uma camada de óleo descofrante para evitar a aderência entre o betão e o molde. Em seguida, os moldes cilíndricos foram enchidos em duas vezes com uma camada de betão não superior a 100 mm de cada vez, compactando cada camada individualmente com o apoio de uma mesa vibratória.

Posteriormente à betonagem dos moldes, executou-se o nivelamento e proteção da superfície visível com a colocação de uma película de plástico, tendo a finalidade de controlar a evaporação da água do betão nas primeiras horas de cura (Figura 43 (a)).



Figura 43 - (a) Betonagem provetes; (b) População de Provetes

A desmoldagem dos provetes do betão\_1 foi realizada até à idade de 24 horas e a do betão\_2 com idade de até 72 horas, evitando choques e vibrações capazes de danificar as ligações da hidratação do betão nas primeiras horas de cura. Os provetes desmoldados continuaram o processo de cura submersos em água, no tanque do laboratório a uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , (NP EN 12390 - 2, 2009), (Figura 43 (b)).

### 3.5 Estudo do módulo de elasticidade

O conhecimento do módulo de elasticidade do betão é um parâmetro muito importante na caracterização do betão em estado endurecido, quando se pretende otimizar o funcionamento estrutural em regime praticamente elástico. O módulo de elasticidade do betão caracteriza a curva tensão – deformação através do declive da reta na fase elástica, e traduz a resposta das estruturas de betão armado em termos de deformações em regime linear elástico, sem abertura de fendas.

#### 3.5.1 Metodologia

Os provetes para o estudo do módulo de elasticidade do betão foram fabricados depois de conhecidos os resultados das betonagens experimentais e assim, escolhida a amassadura que mostrou condições de resistência de betão classificado de C30/37.

Com o efeito, foi produzida uma mistura de 36 litros de betão e betonados uma família de 5 provetes cilíndricos com dimensão 150mm de diâmetro e 300mm de altura, em moldes em ferro fundido, (NP EN 12390-1, 2009).



### **3.5.2 Amassadura, betonagem e cura.**

O processo de amassadura, betonagem e cura, foi executado como descrito no (3.4.2 Betonagem e cura dos provetes), de forma a garantir provetes em estado endurecido de acordo com norma (NP EN 480-1, 2007) para amassaduras e norma (NP EN 12390-2, 2009) no que respeita a execução e cura de provetes de betão.

## **4. CAP IV – MATERIAL DE REFORÇO**

### **4.1 Introdução**

O reforço de elementos de betão com utilização de varões entrançados em material compósito, é estudado pela comunidade científica desde a década de 60 e introduzido como reforço de elementos de betão a partir da década de 70.

O aparecimento da técnica Braided Composite Rods (BCRs), desenvolvida pelo grupo de investigação da Universidade do Minho (Fangueiro, et al., 2006) (Zdraveva, 2009) (Cunha, 2012) (Oliveira, 2013), foi o trabalho de ignição que conduziu ao estudo do desempenho mecânico dos varões BCR incorporados como reforço de vigas em betão.

O programa laboratorial contou com a utilização de duas famílias de reforço, os varões compósitos BCR e os varões em aço, comumente usados na indústria da construção. Assim, o exibido desempenho mecânico estrutural dos elementos de betão com diferentes tipologias de reforço, visa continuar o desafio de acrescentar valor, no conhecimento dos varões BCR como fiável substituto de aço.

Com o efeito, foram adotados de acordo com o conhecimento já desenvolvido, varões que tenham um rácio resistência/preço e comportamento mecânico/aplicabilidade aliciente, onde o resultado mostrado possa influenciar a decisão final por uma solução válida e aplicável.

### **4.2 Composição do material de reforço BCR**

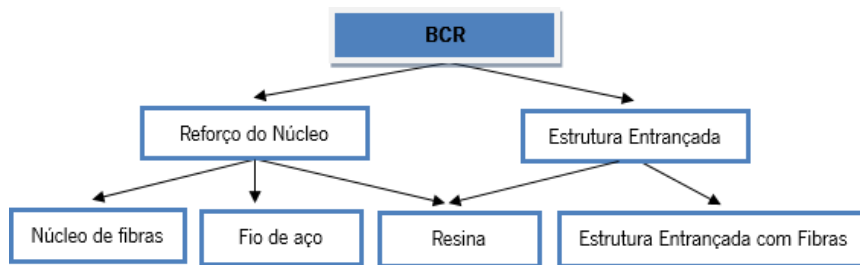
A resistência mecânica dos varões BCR é característica fundamental para utilização deste reforço em substituição do reforço tradicional em aço, pelo que, é preponderante ativar um expectável bom desempenho resistente do núcleo. O núcleo do varão BCR é o responsável por conferir capacidade de resistência mecânica em trabalho.

Perante o desafio, foram selecionados três tipos de material de reforço do núcleo para o fabrico dos varões compósitos BCR. Assim, o núcleo dos varões BCR foram produzidos com um multifilamento de fibra de vidro, multifilamento de fibra de carbono e a combinação de multifilamento de fibra de vidro com fio de aço de 3mm A500 EL estudado por (Oliveira, 2013). A estrutura entrançada que envolve o núcleo é composto por um multifilamento de alta tenacidade de poliéster.

As propriedades dos materiais utilizados na produção dos varões compósitos entrançados, são mostradas na (Tabela 14) e representado o processo segundo um organigrama na (Figura 44)

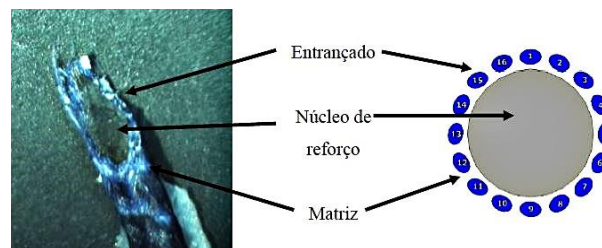
**Tabela 14 - Propriedades dos materiais utilizados na produção dos varões compósitos entrançados**

Material	Massa Volúmica $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	Massa linear Tex (g/km)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (Mpa)	Extensão na rotura (%)
Fibra de vidro	2,54	9600	72	-	2710	4,0
Fibra de carbono	1,77	1600	240	-	4400	1,8
Aço A500 EL	7,82	3000	210	500	550	10
Fios de poliéster	1,32	110	-	-	-	-
Biresin@_CR144	1,16	-	2,9	-	98	6,4
Biresin@_CR141	1,20	-	2,9	-	98	6,4
Biresin@_CA144	1,03	-	2,9	-	98	6,4



**Figura 44 - Organigrama produção varões entrançados compósitos entrançados**

Em aglomerado, observa-se na (Figura 45) representação em corte transversal de um varão compósito BCR. A resina e o multifilamento de poliéster que compõe a estrutura entrançada criam uma matriz polimérica que confere proteção, rigidez e alinhamento definido às fibras do compósito, tendo ainda a finalidade de conduzir e distribuir eficientemente as cargas no núcleo. O núcleo é o responsável pelo sucesso do comportamento mecânico dos compósitos BCR produzidos e implementados no programa experimental.



**Figura 45 - Representação em corte transversal BCR, (Cunha, 2012)**

#### **4.2.1 Fibras**

As fibras conhecidas pelo alto desempenho mecânico e baixo peso são o material que constitui o núcleo do varão BCR: fibras de vidro e fibra de carbono. Apresentam-se como uma solução de custo mais elevado do que a solução tradicional, mas são essenciais para o desenvolvimento de uma boa solução do varão BCR.

#### **4.2.2 Matriz**

A matriz utilizada na produção do varão BCR é de origem polimérica (resina). Com isto, neste tipo de varões compósitos, tem por missão, numa primeira fase distribuir de forma uniforme as cargas mecânicas para as fibras de reforço utilizadas no núcleo e por outro lado, funcionar como elemento responsável por conferir rigidez ao compósito.

A resina usada neste estudo foi do tipo termoendurecível, epóxida, tendencialmente mais usada na produção de materiais compósitos para reforço estrutural. As principais características são: maior módulo de elasticidade, maior resistência à tração, grande resistência à corrosão, é a resina com menor retração por secagem, maior resistência à quebra quando exposto a altas temperaturas, resistência a altas temperaturas e boa ligação com diferentes tipos de fibras.

#### **4.3 Composição do aço**

O aço define-se como uma liga ferro - carbónica em que as suas propriedades são definidas em função da sua composição química e o processo de transformação térmico e mecânico à qual foi sujeita até ser apresentada e utilizado na indústria da engenharia civil. Com a definição deste processo, o aço é caracterizado como um material dúctil e com igual desempenho mecânico à tração e à compressão. Mais ainda, a sua disposição em varões para a utilização como reforço de estruturas de betão, permite um bom envolvimento pelo betão e consequentemente condições para uma boa aderência entre os materiais, betão e aço.

As principais propriedades mecânicas do aço são o módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de rotura, alongamento percentual até à rotura e dureza. Por seu lado, podemos então classificar o aço tendo em consideração o processo de fabrico, a rugosidade da superfície, e a sua capacidade resistente.

Na presente campanha experimental, o aço utilizado como reforço de referência, foi o aço A400NR. Este tipo de aço comumente utilizado na indústria da construção civil, contempla um

processo de fabrico tecnicamente laminado a quente (N), é designado como aço de alta aderência (R) com uma superfície nervurada e uma resistência de cedência de 400MPa, (Figura 46).



Figura 46 - Reforço tipo A400NR

Tabela 15 - Propriedades do aço A400NR, (LNEC, 2010)

Material	Massa Volúmica $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	Massa linear (g/m)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de cedência $f_{syk}$ (MPa)	Tensão de rotura $f_{suk}$ (Mpa)	Extensão na rotura $\epsilon_{suk}$ (%)
Aço A400 NR	7,82	222	210	400	460	14

#### 4.4 Metodologia para produção do material de reforço BCR

O processo de produção do varão compósito BCR pela técnica de entrançamento foi modelado tendo em consideração dois aspetos importantes, a capacidade resistente do núcleo e a rugosidade exterior do material. Para o efeito, é relevante garantir que o núcleo tenha uma resistência suficientemente elevada para obter um material capaz de substituir o aço nas estruturas de betão armado, mitigando as fragilidades do betão, e por outro, quando sujeito a esforço de tração, bloquear o deslizamento dentro do betão com a rugosidade conferida pela estrutura entrançada.

Assim, a composição do núcleo dos varões BCR e o processo de produção, foram definidos segundo o conhecimento desenvolvida pelo grupo de investigação da universidade do Minho (Fangueiro, et al., 2006) (Zdraveva, 2009) (Cunha, 2012) (Oliveira, 2013). Por outro lado, a rugosidade conferida pela estrutura entrançada foi definida através da análise dos resultados atingidos pelo estudo desenvolvido por (Martins, 2013).

#### 4.5 Técnica de entrançamento

O entrançamento é uma técnica de baixo custo de produção e com inúmeras vantagens, entre as quais: a produção de estruturas nervuradas permite a orientação multiaxial das fibras no plano e a introdução de propriedades mecânicas pode ser obtida e melhorada com a introdução no núcleo de diferentes tipos de fibra (Fangueiro, et al., 2011).

Por outro lado, a rugosidade aplicada na produção dos varões foi também estudada por (Martins, 2013), na aplicação de uma malha como reforço para paredes de alvenaria. Assim, o desempenho mecânico dos varões no interior do betão é tanto melhor, quanto maior for a capacidade de este estar dotado de uma rugosidade capaz de evitar o deslizamento do varão na solução estrutural e mobilizar a elevada capacidade resistente das fibras que compõe o núcleo dos diferentes varões.

Desta forma, a técnica de entrançamento foi utilizada em duas diferentes fases durante a produção dos varões BCR; fase (1): foi utilizada para criar uma estrutura nervurada rugosa de 8 fios capaz de dotar o varão com capacidade de atingir o seu máximo desempenho no imbricamento com o betão; fase (2): conferir orientação multiaxial das fibras de reforço do núcleo no plano, criando juntamente com a impregnação em resina epóxida uma matriz polimérica.

#### **4.5.1 Estrutura nervurada**

A rugosidade do entrançado é um fator que merece particular atenção, uma vez que, a utilização de uma apropriada rugosidade potencia a aderência entre o material de reforço e o betão, o que favorece o desempenho conjunto da solução construtiva. A escolha da rugosidade para dotar os varões BCR com o máximo desempenho de aderência entre o material de reforço e o betão, está orientada com os resultados do estudo aplicado por (Martins, 2013) na seleção da estrutura nervurada que materializa positivamente o desempenho da aderência do material.

A inclusão da rugosidade do entrançado exterior resulta no enchimento das bobines utilizadas no equipamento de produção do compósito, segundo um processo semelhante. Estas bobines são preenchidas com um multifilamento de poliéster transferido a partir de um cone com cerca de 2kg, através de um equipamento designado por bobinadora de enrolamento paralelo da marca Trenz - Export modelo PR/810. A velocidade de trabalho é de 25rad/s e imprime 100 ciclos de enrolamento a cada bobine. Este processo, designando por bobinagem, (Figura 47 (a)), é feito tantas vezes quando necessário para concluir o enchimento uniforme de todas as bobines utilizadas no processo de produção.

Posteriormente ao enchimento as bobines foram colocadas na mesma bobinadora, mas nos fusos verticais, construindo uma rugosidade de 8 fios. Cada estrutura entrançada de 8 fios do multifilamento de poliéster é formada por dois grupos de 4 fios que se distinguem pelo sentido em que giram as bobines no momento de entrelaçamento, quanto à orientação transversal e longitudinal. Portanto, o processo mecânico ocorre com o movimento de quatros bobines no

sentido horário (cor amarela), enquanto as restantes quatro bobines giram em sentido anti – horário (cor vermelha), formando-se uma estrutura tubular entrançada, (Figura 47 (b)).

Assim, os varões BCR foram capacitados com uma rugosidade na superfície exterior composta por 16 fios, distribuída por duas estruturas tubulares entrançadas individuais de 8 fios que criam um ângulo de entrançamento entre si de  $\pm 45^\circ$ .

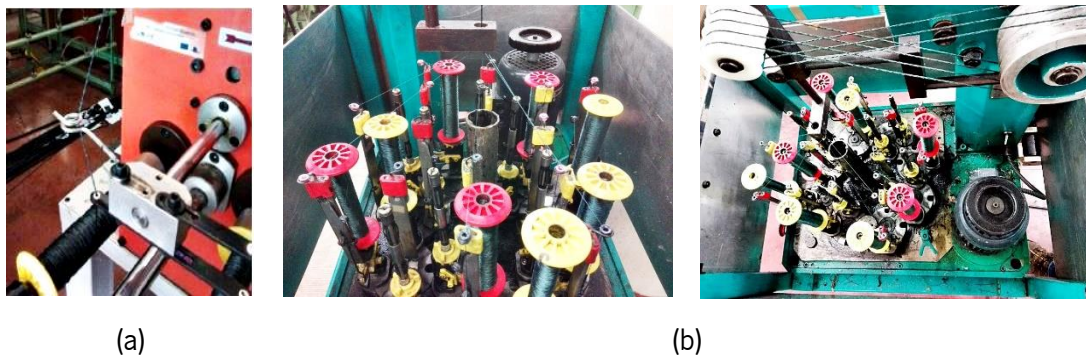


Figura 47 - Bobinagem (a); Fabrico da rugosidade (b)

#### 4.5.2 Entrançamento dos varões BCR

O processo de entrançamento dos varões BCR foi preparado com a colocação de 40 bobines nos fusos do equipamento principal de produção dos varões, uma entrançadora convencional de marca Trenz - Export modelo 40/100, especialmente alterado para o efeito, (Figura 48).

As bobines colocadas são compostas por 38 de multifilamento de poliéster e 2 da estrutura tubular entrançada de 8 fios que tem o objetivo de conferir rugosidade exterior ao varão. A estrutura tubular entrançada de 2 bobines compostas por 8 fios/cada, do multifilamento de poliéster, são inseridas em fusos de movimento oposto, sentido horário e anti – horário, por forma a criar saliências bem definidas no conjunto do entrançado das 40 bobines. Estas saliências e o multifilamento de poliéster compõe um ângulo de entrançamento de  $\pm 45^\circ$  com o alinhamento longitudinal do varão de  $\pm 6\text{mm}$ . Para tal, foi adotada uma velocidade de entrançamento sustentada no estudo de (Oliveira, 2013) com velocidade de entrançamento de  $30\text{rad/s}$  e velocidade de tiragem de  $10\text{rad/s}$ .

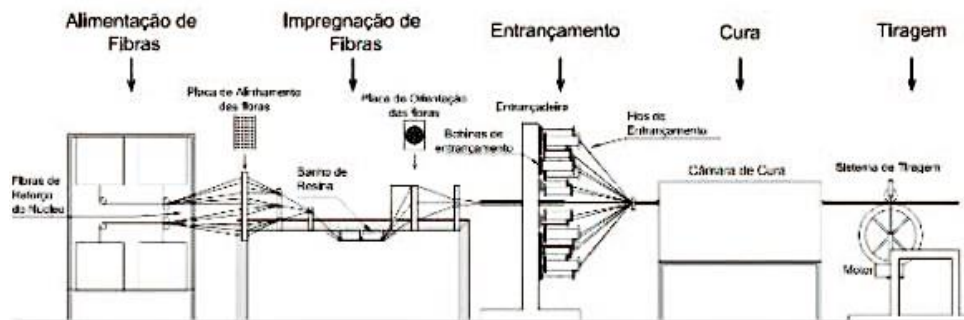


Figura 48 - Esquema do processo de produção utilizado, (Patinha, et al., 2014)

#### 4.6 Processo de produção dos varões BCR

Os varões produzidos durante o programa experimental tiveram a finalidade de satisfazer todos os objetivos proposto neste trabalho, no que concerne ao reforço de elementos de betão armado com varões entrançados em material compósito. Assim, foi necessário calcular os metros lineares de cada varão a produzir para realizar a caracterização das propriedades mecânicas individuais dos varões, o estudo da ligação entre o varão e a matriz cimentícia, e por último, armar vigas longitudinalmente à flexão com armadura em material compósito BCR.

##### 4.6.1 Modelo teórico

A produção dos varões BCR é composta por 5 fases, como descrito visualmente da esquerda para a direita na (Figura 48). (Patinha, et al., 2014);

1. Alinhamento das fibras: as diferentes bobinas das fibras que alimentam o núcleo do varão estão colocadas numa esquinadeira e desenrolam-se conforme combinação da velocidade de entrançamento e tiragem;
2. Impregnação das fibras: as fibras depois de alinhadas em placas guias com orifício, são mergulhadas num banho de resina termoendurecível passando posteriormente por um rolo de orientação que conduz as fibras à entrançadora;
3. Entrançamento: Esta é a fase em que ocorre o entrançamento em volta do varão dos multifilamentos de poliéster e existe a possibilidade de conferir rugosidade no revestimento exterior. Este entrançado é responsável por conferir a geometria circular da secção transversal do varão, espremer o excesso de resina existente nas fibras do núcleo, proveniente da zona de impregnação das fibras do interior para o exterior e criar no exterior



do varão, rugosidades e saliências que garantam a sua aderência ao betão. A velocidade de rotação do mecanismo de entrançamento é controlável, permitindo a produção de varões com diferentes configurações do entrançado;

4. Cura: A câmara de cura é aquecida a uma temperatura controlada que provoca a rápida cura do polímero envolvente. Esta etapa é de elevada importância para as características finais do varão produzido, uma vez que, este não deve estar exposto a temperatura demasiado elevadas, mas terá de apresentar consistência sólida suficiente que permita ser puxado pelo sistema de tiragem sem que exista danos nas fibras e no entrançado;
5. Tiragem: Equipamento responsável pela tiragem do varão produzido após a sua impregnação e cura, assegurando a tensão necessária ao correto alinhamento das fibras do núcleo ao longo do trabalho de produção.

#### 4.6.2 Modelo experimental

O programa experimental contou com a produção de 80 metros de varões BCR com  $\pm 6$ mm de secção transversal e 3 composições diferentes do núcleo. As 5 fases da produção BCR são descritas seguidamente:

1. Alinhamento das fibras

Recorrendo ao auxílio de uma folha de cálculo, foram inseridas as propriedades das fibras que compõe o núcleo dos varões, e obteve-se segundo a combinação da gramagem das fibras com o diâmetro estipulado, o número de fios a colocar no processo de produção dos varões, (Figura 49 (a));

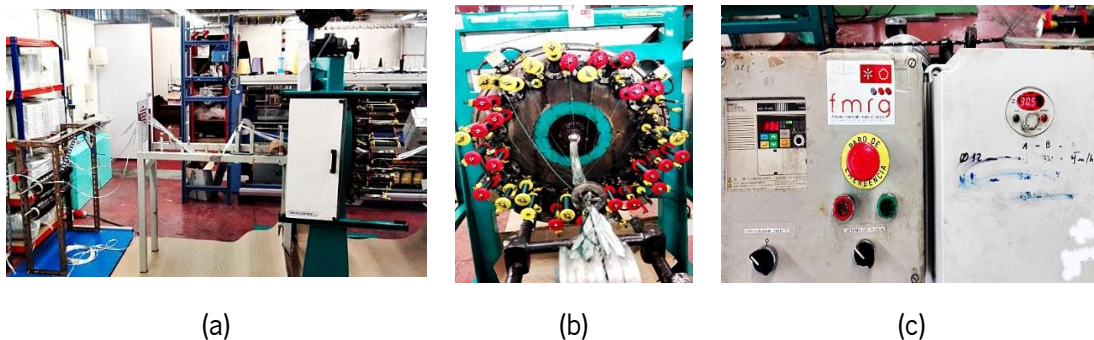
2. Impregnação das fibras

A impregnação das fibras foi garantida com resina termoendurecível epóxida. Para tal foi respeitada na íntegra a ficha técnica do material do tipo Biresin® CR144 que indica a mistura de endurecedor do tipo Biresin® CH141 e acelerador do tipo Biresin® CA144. Esta mistura confere a adição de 90% de endurecedor e 4% de acelerador à quantidade inicial de resina epóxida do tipo Biresin® CR144. O sucesso da mistura foi executado com a pesagem dos diferentes constituintes utilizando uma balança digital de precisão 0.01g. A impregnação no processo de produção utilizado é garantida pela colocação intermédia de um balseiro entre a fase 1 e a fase 3, (Figura 49 (a));

### 3. Entrançamento

A fase do entrançamento marca o início da definição da secção circular do varão BCR. Como descrito no (ponto 4.5 – Técnica de entrançamento), existe uma prévia preparação da matéria-prima antes de iniciar o processo final de produção.

Finalizado este e posicionados os fios de fibras no interior circular onde ocorre o entrançamento, procede-se à colocação de cada elemento de poliéster proveniente das 40 bobines também eles na zona de entrançamento. Uma vez direcionadas as fibras e a matéria-prima que compõe a superfície exterior dos varões para centro de entrançamento, procedeu-se a amarração destes a uma corda que permite atravessar a camara de cura e fazê-la passar pelo equipamento de tiragem. Esta técnica, com a utilização de uma corda, vem substituir o varão até agora inexistente, mas garantir que a produção possa ser iniciada com o tracionamento provocado através do equipamento de tiragem na corda, (Figura 49 (b)).



**Figura 49 - Alinhamento das fibras (a); Impregnação das fibras (b); Entrançamento (c)**

Posteriormente, foi definido de acordo com o estudo desenvolvido por (Oliveira, 2013), (Patinha, et al., 2014) para varões de 6mm de diâmetro e um ângulo de entrançamento de  $\pm 45^\circ$  com o alinhamento longitudinal, uma velocidade de entrançamento de sensivelmente 30,5 rad/s e uma velocidade de tiragem de 13.2 rad/s. Estas velocidades estão ajustadas o mais próximo possível dos valores estudados, 30 rad/s para entrançadora e 10rad/s para tiragem. O sistema de controlo de velocidade apresenta sensibilidade elevada, incrementando uma dificuldade no manuseamento manual do sistema, (Figura 49 (c));

### 4. Cura

A cura dos varões produzidos foi realizada pela camara de cura a uma temperatura de sensivelmente 180°C, variação de  $\pm 2$ , Figura 50 (a)); realizada sob um processo contínuo. A cura

proporcionada ao varão durante a passagem pela camara de cura, garante a obtenção de rigidez suficiente de proteção física do núcleo e do entrançado exterior.

## 5. Tiragem

O sistema de tiragem e a velocidade implementada está diretamente relacionado com os critérios definidos para as características finais da camada exterior entrançada e tensão necessária ao correto alinhamento das fibras do núcleo. Assim a velocidade de tiragem foi de 13.2 rad/s, Figura 50 (b)).

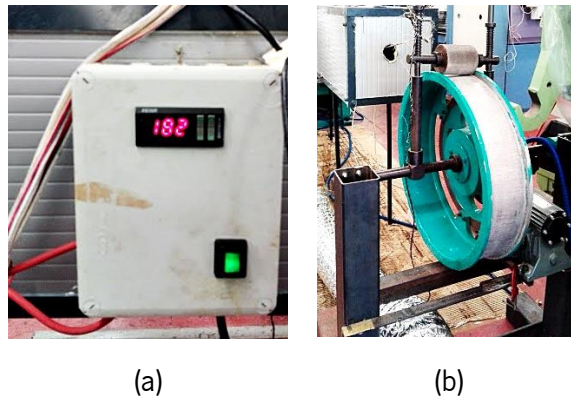


Figura 50 - Cura (a) e Tiragem (b)

## 4.7 Reforço BCR

O material obtido pela técnica Braided Composite Rods (BCRs), no uso do melhor conhecimento investigação que define as mais otimizadas e capazes características físicas e mecânicas, é mostrado na (Figura 51). É também possível identificar as diferentes tipologias que materializam o núcleo dos varões BCR.

Portanto, a (Figura 51 (a)), apresenta 5 varões BCR 100% fibra de vidro e 5 varões BCR de 73.60% fibra de vidro e 26.40% fibra de carbono. Por outro lado, a (Figura 51 (b)) apresenta um varão BCR híbrido composto por 70.64% fibra de vidro e 29.36% fio de aço A500 EL (fio de aço 3mm).



(a)

(b)

Figura 51 - Varão com núcleo em fibra de vidro e vidro/carbono (a) e Varão híbrido vidro/aço (b)

Mais ainda, as características físicas e mecânicas teóricas, que permitiram resumir o processo de produção nas suas 5 fases, estão apresentadas na (Tabela 16). Importa salientar que as propriedades mecânicas dos varões compósitos, foram calculadas considerando apenas o volume e características mecânicas das fibras. A matriz polimérica em resina epóxida e o entrançado não estão representados no cálculo teórico.

Tabela 16 - Características físicas e mecânicas teóricas dos varões

	Fibras	n° fios	Tex (g/km)	$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	VFibra/fibras (%)	E (Gpa) teórico	$\phi$ BCR (mm)
BCR_1	vidro	1	4800	2,54	100,00%	72	6,09
	vidro	5	9600	2,54			
BCR_2	carbono	6	1600	1,77	26,40%	116	6,05
	vidro	4	9600	2,54	73,60%		
BCR_3	vidro	1	4800	2,54	70,64%	113	6,55
	vidro	4	9600	2,54			
	<i>Fibras metálicas</i>	<i>n° fios</i>	<i><math>\phi</math> (mm)</i>	<i><math>\delta</math> (g/cm<sup>3</sup>)</i>			
	aço A500 EL	1	3	7850	29,36%		

## **5. CAP V - CARATERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO MATERIAL DE REFORÇO**

### **5.1 Introdução**

Considerando o objetivo do presente trabalho em desenvolver conhecimento sobre o material compósito BCR integrado no reforço de elementos de betão, é importante estabelecer uma relação entre as propriedades físicas e o desempenho mecânico do reforço entrançado. Por outro lado, e tratando-se de um trabalho comparativo entre o inovador reforço BCR e o reforço referência em aço, torna-se obrigatório submeter os dois materiais às mesmas condições e tipo de ensaios. Ambos foram submetidos à caraterização mecânica individual e caraterização mecânica integrada.

Assim, a caraterização mecânica dos materiais de reforço foi atingida por três campanhas experimentais distintas. Numa fase inicial, foram aplicados esforços de tração individuais aos varões de reforço, para validar efetivamente a capacidade resistente teórica de funcionarem como um reforço capaz.

Numa segunda fase, foi realizada a caraterização integrada do reforço com a matriz cimentícia (betão), segundo ensaios de pull out, tendo a finalidade de avaliar o desempenho de aderência entre os varões de reforço BCR e os varões de referência em aço, validando e comparando a rugosidade da superfície dos varões.

A terceira fase, assinala a incorporação de armaduras de reforço BCR e reforço em aço em vigas tipo de betão, e define uma fronteira de análise com o estudo focado no desempenho da armadura de flexão. Desta forma, as vigas foram armadas longitudinalmente ao esforço de flexão com varões BCR e varões em aço. O reforço ao esforço transversal foi garantido por estribos de aço, criando e potenciando um teórico igual comportamento mecânico de resistência ao esforço transversal. As vigas simplesmente apoiadas foram ensaiadas com aplicação de uma carga pontual a meio vão e medida a carga máxima admissível, deformação vertical a meio vão e representado o padrão de abertura de fendas na face lateral das vigas.

### **5.2 Caraterização individual do material de reforço**

A caraterização do material de reforço através do ensaio mecânico de tração uniaxial aplicado individualmente a cada tipo de varão de reforço, revela importante conhecimento sobre a força máxima de rotura suportada por cada tipo de material, como também, o seu comportamento mecânico em termos de deformação e ductilidade.

### **5.2.1 Metodologia**

Os varões de reforço BCR de 6 mm de diâmetro produzidos no trabalho experimental e devidamente curados, foram sujeitos a um programa experimental que visou avaliar o desempenho das propriedades mecânicas por ensaios à tração de acordo com a norma “American Concrete Institute 440.3R-04.B2A” (ACI 440.3R-04, 2004), e utilizando a técnica desenvolvida pelo grupo de investigação da Universidade do Minho (Fangueiro, et al., 2006) (Zdraveva, 2009) (Cunha, 2012) (Oliveira, 2013).

O reforço referência em aço A400NR foi fornecido pelo grupo de estruturas da Universidade do Minho, e foi sujeito a um programa experimental que visou aferir o desempenho das propriedades mecânicas conhecidas segundo (LNEC, 2010) por ensaios à tração, de acordo com a norma (NP EN 10002-1, 2006).

### **5.2.2 Comportamento à tração do material de reforço**

O conhecimento aplicado à caracterização dos varões em material compósito, recomenda a utilização de ancoragens colocadas como proteção ao varão, devido à fragilidade deste material em suportar forças de compressão transversais ao alinhamento longitudinal das fibras. Perante esta recomendação, o método de ancoragem utilizado em varões de aço não pode ser aplicado diretamente no varão BCR.

Como tal, os varões BCR para ensaio de caracterização das propriedades mecânicas, foram protegidos com um tudo metálico, o qual receberá as forças de tração introduzidas pelo equipamento de ensaio, incrementando a reprodutibilidade uniforme no comprimento de amarração.

Os varões de reforço referência em aço A400NR, foram ancorados diretamente ao equipamento de ensaio, não existindo a necessidade de proteger o comprimento de amarração dos varões das forças de ancoragem de compressão

### **5.2.3 Preparação dos provetes de BCR para ensaio**

Com a perspetiva de atingir o conhecimento sobre as propriedades mecânicas dos varões produzidos e a ser aplicados como material de reforço à flexão em vigas, foram desenvolvidos ensaios à tração dos 3 tipos de reforço BCR. A composição do núcleo dos varões é apresentada na (Tabela 17).

Tabela 17 - Composição da amostra ensaio de tração e tipo de reforço

Tipo varão	Tipo de reforço	Un	Ø BCR (mm)	Tipo ensaio
BCR_1	100% Fibra de vidro	5	6,09	Tração
BCR_2	73,60% Fibra vidro e 26,40% fibra de carbono	5	6,05	Tração
BCR_3	Fio de aço A500 EL (3mm) e 70,64% fibra de vidro	5	6,55	Tração

Foram utilizadas 5 amostras de cada constituição do núcleo, existindo 15 provetes com um comprimento de 800mm, de forma a possuir duas ancoragem e um comprimento livre para ensaio de 250mm, assim como 25mm fora das ancoragens para auxiliar processo de moldagem. A zona do varão BCR definida como ancoragem para ensaio de tração, foi sujeita à moldagem de um tubo de aço em ambas as extremidades, com características físicas de 250mm de comprimento, 40mm de diâmetro externo e 36mm de diâmetro interno.

Deste ponto de vista, a preparação dos provetes com uso de tubos de aço pode ser entendida com a divisão do processo em 3 fases distintas, que contribuem no sucesso do resultado conjunto: fase 1: eliminação do revestimento entrançado; fase 2: enchimento do molde com fibra de vidro e alinhamento centrado do varão; fase 3: impregnação das fibras do molde com resina.

#### 1. Eliminação do revestimento entrançado

O revestimento entrançado dos varões na zona de moldagem do tubo foi removido com o auxílio de uma lixadora e o núcleo exposto, sendo este fator preponderante para garantir a ligação eficaz entre o núcleo do reforço e o molde. A sólida ligação entre o reforço e o tubo de aço é fundamental para avaliar o desempenho mecânico dos varões durante os ensaios à tração pura, uma vez que, a resistência mecânica da camada entrançada é teoricamente inferior à resistência mecânica do núcleo em fibras. Por sua vez, não seria garantida uma ligação eficiente, com possibilidade de deslizamento do varão dentro do molde e a ausência do esgotamento da capacidade de tração, principal objetivo, (Figura 52).

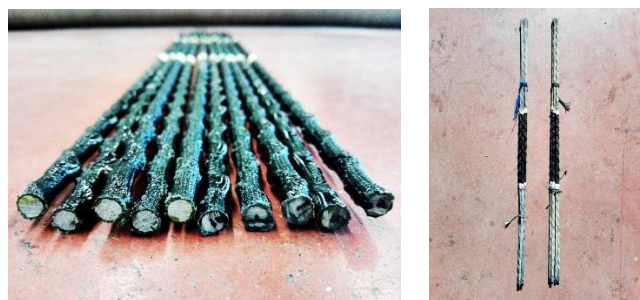


Figura 52 - Remoção do entrançado

## 2. Enchimento do molde com fibra de vidro e alinhamento do varão

O processo de moldagem dos provetes contou com a utilização de manta de fibra de vidro de 600g/m<sup>2</sup>, para enchimento e reforço do volume interior existente entre o varão de reforço e a face do tubo. Para tal, foram usadas amostras cortadas longitudinalmente em tiras com 800mm de comprimento e 220mm de largura. A manta de fibra de vidro foi enrolado com em torno da superfície do núcleo ausente do entrançado e inserida no molde do tubo em aço, (Figura 53).

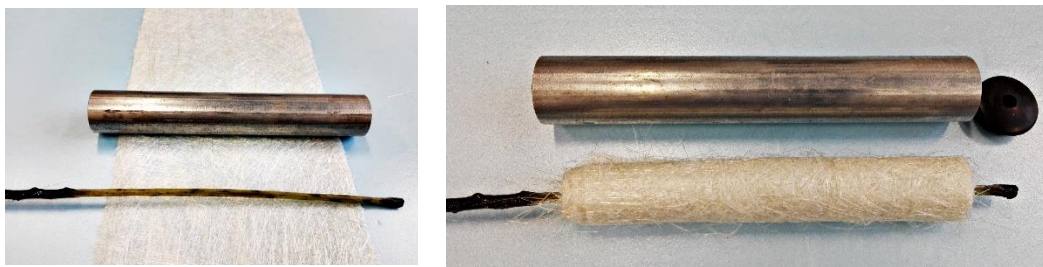


Figura 53 - Enrolamento manta fibra de vidro

As dimensões adotadas para a manta de fibra de vidro, permitiu reservar 30mm de vazio no topo do tubo, a partir do qual aconteceu a impregnação da fibra no interior do tubo de aço, (Figura 54 (a)).

Complementarmente, existe ainda a necessidade de garantir o correto e centrado alinhamento dos varões dentro do molde em aço. Para isso, contou-se com a aplicação de um material plástico, tampões para os topos dos tubos, colocados em ambas as extremidades e perfurados no seu centro geométrico com o diâmetro do varão. Assim, ficou proporcionada a orientação centrada dos varões no diâmetro interior do tubo, (Figura 54 (b)).

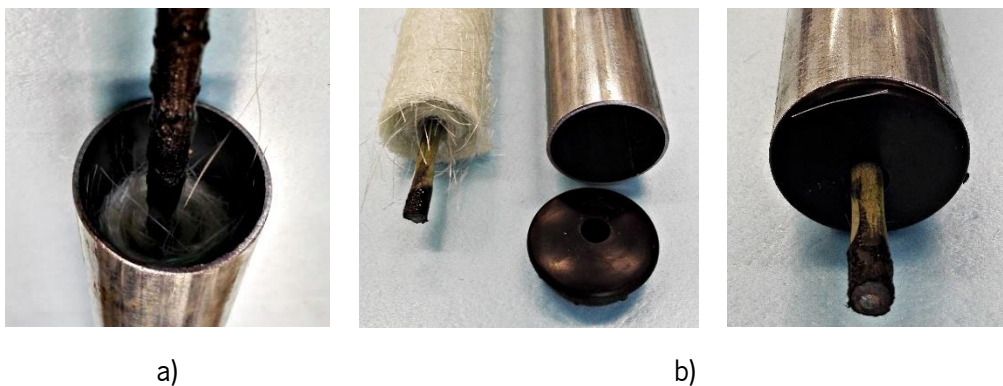


Figura 54 - Zona enchimento provete (a) e Orientação centrada do varão (b)



O alinhamento central do varão é característica fundamental no sucesso dos resultados obtidos, uma vez que, é reduzida ou eliminada tanto quanto possível, o incremento do efeito de torção nos varões durante o procedimento de ensaio. Os tampões colocados nos topos exteriores do molde foram selados com cola quente tendo o objetivo de criar estanquidade durante o processo de enchimento dos provetes e reação exotérmica de cura da resina, (Figura 55).



**Figura 55 - Selagem provetes com cola quente**

Esta técnica confere economia da resina de enchimento, potencia maior resistência mecânica aquando da solicitação de tração do varão e durante a reação exotérmica da cura da resina, onde é mitigadora da retratação por secagem.

### 3 Impregnação das fibras com resina

Dado o número de provetes, foi pertinente estabelecer uma estrutura que permitisse otimizar o processo de impregnação das fibras de todos os 15 provetes em quatro vezes. Posto isto, foi adotado uma estrutura plana em material XPS, perfurada em 10 pontos com o diâmetro dos tubos de aço e uma profundidade de 50mm. Esta técnica tem em vista a colocação vertical dos provetes, facilidade em moldar 10 ancoragens de provetes em simultâneo, boa trabalhabilidade e capacidade de finalização do trabalho de enchimento com a colocação dos tampões de plástico para o alinhamento centrado do varão no molde, (Figura 56 (a)).

A aderência entre os varões BCR, a manta de fibra de vidro e o tubo aço, é conseguido com o enchimento e impregnação do diâmetro interior do tubo através da adição da mistura de resina epóxida do tipo Biresin® CR83 com o endurecedor Biresin® CH83 – 2. A mistura da resina epóxida foi realizada respeitando a ficha técnica do produto, onde é mencionado a adição de 30% de endurecedor à quantidade total de resina para cada solução preparada. A reação química que conduz ao sucesso da mistura é iniciado depois da adição do endurecedor, (Figura 56 (b)).

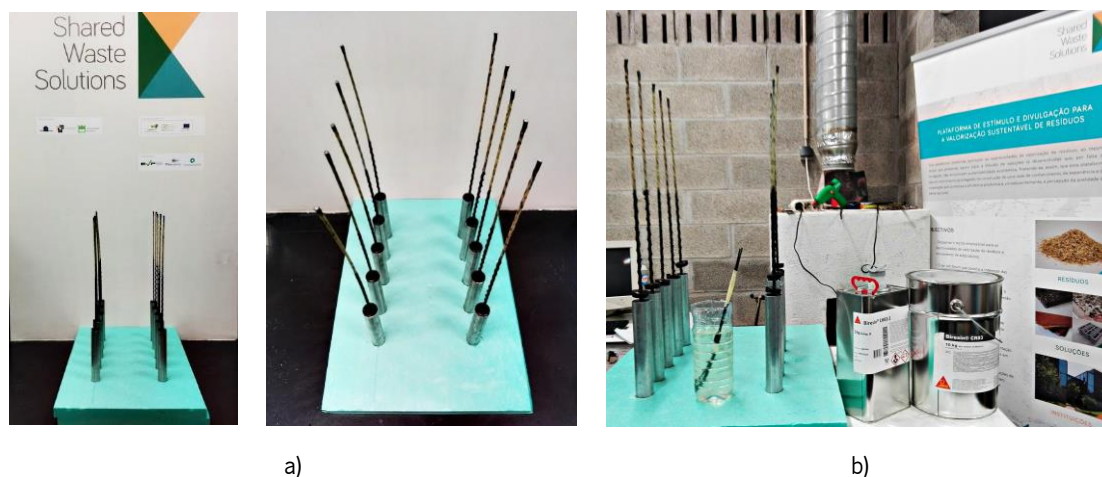


Figura 56 - Estrutura de impregnação (a), Enchimento com resina epóxida (b)

O sucesso desta mistura foi garantido pela pesagem dos diferentes componentes recorrendo a uma balança digital com diferença de 0.01g.

O processo de cura dos últimos provetes aconteceu ao longo de 120 horas, 48 em ambiente de laboratório e 96 horas em estufa. Portanto, todos os 15 provetes depois de moldados mantiveram-se à temperatura ambiente do laboratório e posteriormente foram colocados numa estufa à temperatura de 80 °C por mais 96 horas, de forma a homogeneizar o processo de cura e assim garantir que todos os provetes à data do ensaio estavam em igual condição de cura, (Figura 57). O sucesso da técnica utilizada para caracterizar o desempenho mecânico dos varões BCR é intrínseca a cada processo executado durante a preparação, moldagem e cura dos provetes.



Figura 57 - Provetes para caraterização desempenho mecânico BCR

#### 5.2.4 Preparação dos provetes de ensaio em aço

Os provetes de ensaio utilizados no programa experimental para a caraterização e validação das propriedades mecânicas dos varões de aço A400NR, são representados por uma amostra de 5 varões com caraterísticas físicas de 50cm de comprimento e 6mm de diâmetro. Estes, foram

cortados de varões com 12 metros de comprimentos existentes no laboratório de estruturas da Universidade do Minho.

### 5.3 Caracterização do comportamento de aderência do reforço ao betão

#### 5.3.1 Metodologia

A execução do presente estudo teve em consideração recomendações quanto às características físicas dos provetes e à definição do comprimento de aderência para ensaios com varões de aço. Assim, as características físicas dos provetes de ensaio visam garantir a proporcionalidade entre o diâmetro da barra e o comprimento de aderência. Com o intuito de satisfazer esta relação, (RILEM, 1983) (SILVA, et al., 2013) recomenda que a dimensão do provete para ensaio de varões de aço é de dez vezes o diâmetro do varão ( $10\varnothing$ ), num mínimo de 20cm, e a ancoragem de fixação é de cinco vezes o diâmetro do varão ( $5\varnothing$ ). Mais ainda, a norma europeia (EN 12504-3, 2005) especifica que a distância entre os varões, e os bordos dos elementos de betão deve ser de 100mm. O interior do provete de betão onde se estuda a aderência entre o varão e betão está localizada na zona mais afastada ao posicionamento do equipamento de tração do varão, (Figura 58).

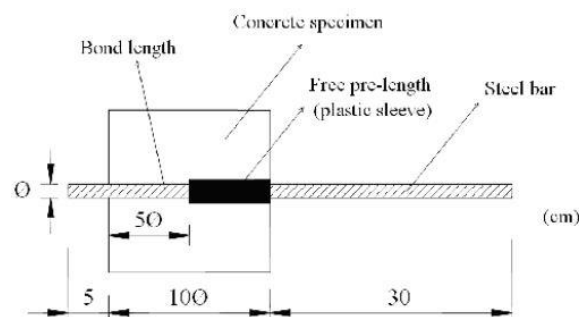


Figura 58 - Especificação das dimensões usadas no método pull - out, (SILVA, et al., 2013).

O estudo dos provetes de pull - out contou com as recomendações identificadas e largamente utilizadas pela comunidade científica para o estudo de varões de aço. Assim, foram usados provetes de secção cúbica de 200mm de lado e fabricados em duas diferentes betonagens. O número total da amostra foi de 16 unidades, divididos em famílias de 4 amostras.

#### 5.3.2 Definição do comprimento de aderência

O estudo da capacidade de aderência comparativa foi estudada com a utilização de varões BCR e varões aço de comprimento total de 50cm e uma zona de aderência de  $10\varnothing$ , correspondente a

6cm. A adoção de um comprimento de aderência diferente do recomendado pelo (RILEM, 1983), (5 $\phi$ ), está relacionado com utilização de varões de pequeno diâmetro, o que levaria à definição de um comprimento de estudo de 3cm. Portanto, entendeu-se como sendo um imbricamento frágil e de baixa representatividade para os objetivos propostos.

Deste modo, a definição do comprimento de aderência foi justificado segundo dois indicadores de conhecimento sobre o aço de referência utilizado; 1 - a resistência teórica do aço sem plastificar e diminuição da secção transversal, relacionando a força de tração aplicada com a secção do varão; 2 - estimativa da força de aderência resistente do varão de aço A400NR de 6mm de diâmetro, usando um comprimento de imbricamento de 6cm, (LNEC, 2010).

Assim, usando o conhecimento teórico da resistência dos varões em aço às forças de tração e o comportamento mecânico largamente estudo, foi possível estabelecer uma correspondência com a capacidade teórica resistente à tração dos varões compósitos. Os varões de aço, após atingir o patamar de cedência elástica tendem a perder secção transversal, o que por sua vez, conduz ao deslizamento do varão no interior do betão, não atingindo a rotura. Neste sentido, os varões compósitos, apresentam superior capacidade resistente à tração, mantendo a mesma secção transversal.

Possuindo este comportamento teórico desenvolvido no decorrer do estado da arte, procurou-se a relação que pudesse conduzir a um estudo comparativo de aderência entre materiais de reforço de origens diferenciadas, onde o principal objetivo era comparar a competência da superfície exterior dos varões de reforço BCR, com a rugosidade eficiente do reforço tradicional em aço.

Para tal, e de forma a acrescentar o maior conhecimento possível aos varões de reforço BCR quando comparado com o reforço em aço, foi necessário estudar o limite ao qual estaríamos a usar o aço no seu limite mecânico de aderência, para assim, usar e justificar o potencial da técnica de entrançamento para o mesmo diâmetro, mesmo comprimento de imbricamento e mesmas condições de ensaio. Mais ainda, perceber se a rugosidade conferida ao varão BCR é capaz de conjugar a maior resistência mecânica a esforços de tração, com a capacidade de os receber através ligação da superfície de acabamento dos varões BCR e conduzir estes esforços ao núcleo em fibras.

Neste contexto, e ocorrendo o deslizamento dos varões BCR no interior do betão, torna possível avaliar e analisar visualmente o que acontece ao revestimento entrançado depois de deslizar no betão.

### **5.3.3 Ensaio de aderência (Pull – out)**

Os ensaios de aderência, designado por ensaio de pull – out (ou arrancamento), tem como objetivo caracterizar a força de ligação da interface dos varões de aço e varões BCR, com a matriz onde se encontram embebidos, o betão. O conhecimento da capacidade de ligação entre a interface dos dois materiais, varão e betão, é fundamental para o funcionamento de estruturas de betão armado, uma vez que caracteriza a transferência de cargas/esforços entre materiais.

No presente estudo comparativo entre os dois tipos diferentes de reforço (aço e BCR) para o betão armado, é preponderante a análise quantitativa de resultados que garanta e valide as potenciais características da técnica de entrançamento no revestimento e proteção do núcleo dos varões BCR, e a capacidade de transferência de esforços entre os varões e a matriz de betão. Por outro lado, criar conhecimento de uma solução credível para a mitigação das fraquezas dos materiais compósitos no imbricamento ao betão e fundamentação do incremento das suas potencialidades no futuro das obras de arte.

### **5.3.4 Preparação varões Pull - out**

O estudo da capacidade de aderência comparativa, foi avaliada com a utilização de varões BCR e varões aço de comprimento total de 50cm e uma zona de contacto com o betão de 10Ø, correspondente a 6cm.

Mais ainda, de acordo com (RILEM, 1983), o restante comprimento do varão dentro do betão foi protegido com um tubo de aço com diâmetro interior de 8mm e exterior de 12mm, que visou eliminar o contacto do betão com o varão, conduzindo toda a tensão resultante da tração aplicada ao varão, para o comprimento de aderência definido, (Figura 59).



Figura 59 – Moldagem da zona de aderência, Pull – out

Posteriormente, os topos dos varões BCR onde foi aplicada a força de tração, foram protegidos com um tubo de aço de 10cm de comprimento, diâmetro interior de 8mm e exterior de 12mm. O comprimento do tubo corresponde à dimensão da amarra utilizada no setup de ensaio e tem a finalidade de mitigar a fragilidade dos materiais compósitos à aplicação de forças transversais ao alinhamento das fibras.

Importa também referir que o revestimento entrançado do topo de ancoragem foi retirado com auxílio de uma lixadeira e o espaço vazio entre o varão e a face interior do tubo foi preenchida com o enchimento de resina epóxida do tipo Biresin® CR83 com o endurecedor Biresin® CH83 – 2.

A técnica tem o objetivo de potenciar a eficiente aderência entre o núcleo do varão e a resina, (Figura 60 (a)). Para os varões de aço não há necessidade de implementar esta proteção, uma vez que o aço tem a mesma resistência mecânica em ambos os sentidos, longitudinal e transversal, (Figura 60 (b)).



Figura 60 – Moldagem da zona de ancoragem, pull – out BCR (a), pull – out aço (b),

### Molde de cofragem

Os provetes para ensaio por pull - out foram construídos com características físicas cúbicas de 200mm de lado, contando com a utilização de uma cofragem em contraplacado de madeira hidrófuga construída para o efeito e moldável, com capacidade para executar 12 provetes. Contudo, optou-se para execução dos 16 provetes, a realização de duas betonagens em datas

diferentes, executando 8 provetes em cada betonagem. Esta opção foi definida tendo em conta a capacidade da betoneira utilizada nos trabalhos de fabrico das amassaduras e distribuição em partes iguais do número final de provetes, justificando também, o igual controlo das características mecânicas do betão por volume de betonagem.

O número total de provetes para ensaio de pull – out foi planeado segundo os tipos de varão e a representatividade esperada para os resultados obtidos, (Tabela 18).

**Tabela 18 - Composição da amostra Pull – out e tipo de reforço**

Tipo varão	Tipo de reforço	Un	Ø BCR (mm)	Tipo ensaio
BCR_1	100% Fibra de vidro	4	6,09	Pull - out
BCR_2	73,60% Fibra vidro e 26,40% fibra de carbono	4	6,05	Pull - out
BCR_3	Fio de aço A500 EL (3mm) e 70,64% fibra de vidro	4	6,55	Pull - out
Aço	Aço A400NR	4	6	Pull - out

Depois de preparados os varões para ensaio de pull – out, estes foram colocados no molde de cofragem e alinhados no centro geométrico, afastados em ambos os lados 100mm da face do cubo, de forma a serem cumpridos os requisitos normativos que justificam a utilização da respetiva técnica. Os varões adotam uma posição transversal à face do provete onde será o encosto do cubo, durante o ensaio de arrancamento dos varões do betão, (Figura 61).



**Figura 61 - Molde pull – out e posicionamento do varão**

### 5.3.5 Amassadura, betonagem e cura dos provetes pull – out

O processo de amassadura do betão foi executado de forma a garantir uma distribuição homogénea dos materiais constituintes e uma consistência uniforme do betão, (NP EN 480-1, 2007).



A betonagem dos provetes para ensaio pelo método de pull – out, foi realizada segundo as recomendações da norma (NP EN 12390-2, 2009) que especifica métodos de execução e cura de provetes para ensaios de resistência.

Com isto, os moldes previamente preparados foram cobertos com filme de produto descofrante e posteriormente enchidos em duas vezes com betão, com uma camada não superior a 100mm. Cada camada foi compactada com um varão de compactação, 25 apiloadas, e finalizada com um vibrador de agulha de diâmetro 48mm. Durante o processo de betonagem é de relevante importância garantir que o alinhamento central do varão é mantido no interior o molde, (Figura 62 (a)).

O facto do fabrico do número total de provetes para pull – out ser realizado em duas diferentes betonagens, foi definida o controlo do betão através do enchimento de 4 cubos com 100mm de lado em cada amassadura, tendo o objetivo de validar o desempenho mecânico do betão. Os ensaios à compressão foram realizados aos 28 dias de idade.

Posteriormente ao enchimento dos moldes, procedeu-se ao nivelamento da superfície visível e colocação de uma película de plástico para controlar a evaporação da água do betão nas primeiras horas de cura, (Figura 62 (b)).

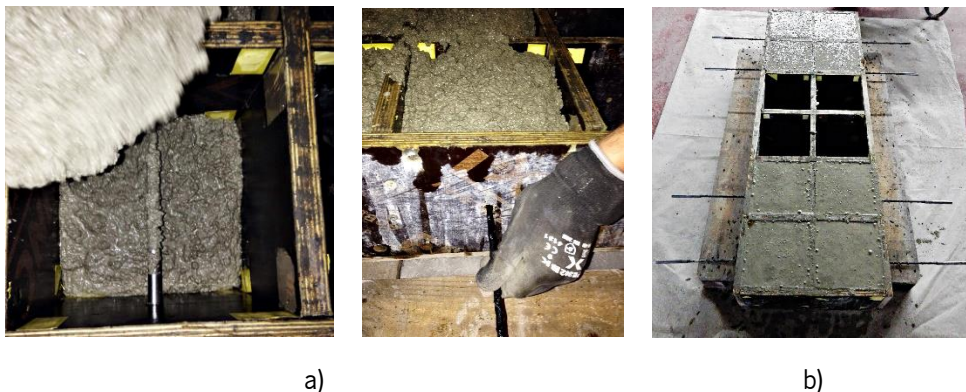


Figura 62 - Betonagem provetes pull – out

A desmoldagem dos provetes foi realizada até à idade de 24 horas, (Figura 63 (a)). Posteriormente, os provetes desmoldados continuaram o processo de cura dentro de câmara de cura existente no laboratório de materiais à temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade de 80%, elevados do pavimento e separados entre si por pequenas tabuas de madeiras, proporcionando iguais condições de cura em todas as faces do provete, ( NP EN 12390 - 2, 2009), (Figura 63 (b)).





Figura 63 - Provetes de ensaio pull – out

#### 5.4 Caracterização do comportamento de elementos de betão - vigas

O comportamento de elementos de betão é fortemente influenciado pelas propriedades mecânicas do material simples, o betão, quanto às suas fraquezas e potencialidades. Desta forma, o conhecimento bibliográfico individual sobre o betão e o funcionamento conjunto do betão com o aço em estruturas de betão armado, permitem desenvolver soluções suficientemente capazes de mitigar a fraquezas individuais dos materiais e usar as potencialidades integrando soluções.

O reforço de estruturas de betão armadura com varões de aço é aquela solução que comumente é usada para mitigar a fraqueza do betão à tração, dotando-o de conteúdo e eficiência estrutural. Por outro lado, é também fundamental conhecer o comportamento elástico – plástico das estruturas, para poder compreender a influência das características do comportamento não linear dos materiais este aspeto é particularmente importante quando se pretende substituir o reforço que confere eficiência estrutural a elementos de betão.

Por sua vez, o estudo de estruturas de betão armado e a fraqueza apresentada na durabilidade do aço com o aparecimento da corrosão das armaduras, criou a necessidade de fazer nascer um material capaz de superar a debilitação dos varões de aço, e ao mesmo tempo, incrementar um comportamento mecânico equiparado.

Neste contexto, a técnica inovadora de fabrico de varões entrançados em material compósito, BCRs, propõe-se como um fiel e credível substituto dos varões de aço no reforço de estruturas de betão. Mais ainda, é expectável que a introdução destas armaduras no betão obtenha um comportamento conjunto de boa ligação de aderência e eficiente, em termos de resposta estrutural.

O estudo de ignição para acrescentar valor na valorização de um novo material de reforço do betão, utiliza vigas tipo de referência com reforço em aço e a hipótese de comportamento linear elástico (LNEC, 2010).

Com a introdução do reforço inovador BCR, pretende-se explorar a capacidade resistente do betão, através do equilíbrio das compressões mais elevadas do betão com a mobilização das armaduras de flexão a esforços de tração. Além disso, comparar a ductilidade associada ao aço e o comportamento dúctil de rotura das vigas de referência, transpondo-o para as soluções de reforço BCR.

#### 5.4.1 Metodologia

Para o efeito foram construídas 12 vigas de betão armado reforçadas com 3 diferentes armaduras BRC e uma em aço tradicional A400NR, compondo 4 famílias de 3 amostras. Todas usam semelhantes características de amarração, nervuras e diâmetro da barra, o mesmo betão, igual recobrimento e condições de fabrico e cura idênticas.

O programa experimental contou com a utilização do varão de aço, que visa estabelecer uma análise de comparação da solução correntemente utilizada em estruturas de betão. Para tal, foram construídos 3 provetes de viga de cada combinação de armadura, por forma a tornar o programa experimental representativo dos resultados obtidos.

O betão usado no fabrico das vigas, foi previamente analisado no *CAP III – ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CARATERIZAÇÃO DO BETÃO*, e é um betão de elevada resistência à compressão, por forma a retirar o máximo aproveitamento e estudo das características do comportamento mecânico das armadura de flexão, explorando o máximo desempenho da resistência do material da lâmina superior das vigas em compressão.

Posteriormente, as amostras de 12 vigas, constituídas por 4 famílias, foram sujeitas a ensaios mecânicos de flexão em 3 pontos, com a carga aplicada a meio vão, segundo adaptação da regulamentação para ensaio de elementos de betão (RILEM, 1985) e ainda (EN 14651, 2005), (Figura 64).

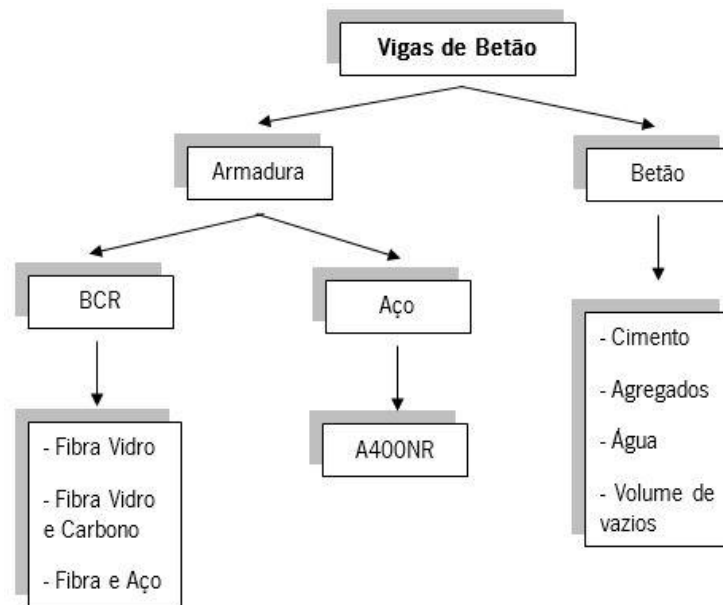


Figura 64 - Estrutura da composição das vigas de betão

#### 5.4.2 Definição da geometria da secção das vigas

A definição da geometria das vigas foi selecionada segundo três indicadores base: 1 – tempo para execução do trabalho experimental; 2 – objetivos e conhecimento a atingir; 3 – Moldes de cofragem existentes ou facilmente contruídos no laboratório de materiais da Universidade do Minho.

Assim, e segundo um levantamento elaborado no início do trabalho experimental, foi definida a utilização de moldes de cofragem existente em material de ferro fundido, com comprimento de 0.85 metros e secção quadrada de 0.1 metros. Estes moldes foram utilizados como elementos de cofragem que permitiram fabricar as 12 amostras de vigas tipo em ambiente laboratorial. Todas as vigas apresentam um comprimento de 850mm, uma secção quadrada de 100mm e um recobrimento das armaduras de 15mm.

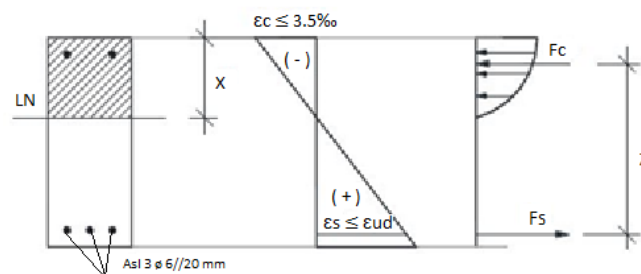
#### 5.4.3 Armadura de flexão em aço

A definição da armadura de flexão a aplicar no reforço dos elementos de betão, foi definida considerando as recomendações técnicas e critérios de dimensionamento para estruturas de betão armado, com reforço em aço do EUROCÓDIGO 2 (LNEC, 2010). Esta definição, contemplou a utilização de uma área de armadura de aço referência à flexão, que permitisse utilizar a máxima

resistência do betão à compressão e colocando o aço no patamar de cedência, usufruindo de toda a ductilidade representada por este material.

Para tal, com a secção da viga definida, foi adotada a utilização de 3 varões de aço com  $\phi 6\text{mm}$  de diâmetro para armadura das vigas aos esforços de flexão. Mais ainda, o objetivo da definição da quantidade de armadura a utilizar no reforço dos elementos de betão à flexão, teve também particular atenção quanto à rotura convencional deste tipo de elementos, ou seja, confirmar que a rotura convencional se dá pelo esmagamento do betão.

A rotura pelo betão por compressão, está relacionada com a posição da linha neutra na secção de betão e a armadura de aço usada que permite alcançar o esgotamento da resistência do betão à compressão, através da plasticidade da armadura, elevação do eixo neutro e consequente redução da área de compressão do betão, (Figura 65).



**Figura 65 - Representação teórica de tensões - extensões em elementos de betão armado**

A garantia das condições desejáveis através da utilização da armadura de reforço em aço, foi estudada segundo a execução de cálculos preliminares para o comportamento e rotura teórica dos elementos de betão. Os resultados teóricos atingidos para justificação da quantidade de armadura aplicada que permitiu conceder conteúdo e eficiência no material compósito, o betão, podem ser consultados em anexo.

#### **5.4.4 Armadura de flexão em BCR**

O conhecimento da capacidade resistente das secções de betão à flexão com reforço em aço, no âmbito da filosofia em relação à rotura, e garantia das condições desejáveis da família de vigas referência, conduziu a incorporação das mesmas disposições construtivas em armadura BCR.

Assim, foi utilizada a mesma quantidade de armadura para o reforço dos elementos de betão aos esforços de flexão com material compósito, 3 varões BCR de  $\phi 6\text{mm}$ . Este material de reforço, com resistência mecânica a esforços de tração superior, conduziu à concretização do objetivo de

rotura das vigas simplesmente apoiadas por flexão. Por isto, foi avaliado o desempenho mecânico destas soluções até ao esgotamento da capacidade resistente do betão, com a rotura parcial da secção, não existindo a desintegração dos elementos construtivo.

Dados estes parâmetros, foram garantidas as condições base iniciais para acrescentar valor no conhecimento das potencialidades das armaduras BCR no reforço de elementos de betão armado, segundo a comparação de resultados com família de vigas de referência em aço.

#### **5.4.5 Armadura de esforço transverso**

A definição da armadura usada para armar as vigas ao esforço de flexão e o atingível objetivo de rotura das secções por flexão pura, conduz a uma particular atenção à armadura de reforço ao fenómeno do esforço transverso, estribos.

Por isto, e conhecendo o comportamento e resistência mecânica diferenciada dos materiais de reforço à flexão, foi necessário definir a origem e área de armadura de reforço ao esforço transverso. Esta armadura tem a finalidade e capacidade de conduzir à rotura das secções por flexão pura e retirar o máximo aproveitamento e estudo das características do comportamento mecânico das armadura de flexão, até se esgotar a capacidade resistente do betão.

Com base no objetivo do trabalho, e focado no estudo de elementos de betão reforçados ao esforço de flexão com armadura em material compósito, foi definido adotar armadura de aço para armar os elementos de betão ao esforço transverso, e assim, mitigar a possibilidade do registo e observação de fenómenos difíceis de explicar aquando dos ensaios de flexão. Tal facto, é justificado pela heterogeneidade dos materiais compósitos e a dificuldade em prever o comportamento dos estribos BCR a esforços que se desenvolvem perpendicularmente à direção longitudinal das fibras.

Mais ainda, os cálculos preliminares da armadura do esforço transverso foram desenvolvidos no seguimento dos cálculos da armadura de flexão em aço, e a carga pontual a meio vão que teoricamente colocava a armadura em cedência. Estes valores foram aplicados para estimar a armadura necessária de resistência ao fenómeno de esforço transverso em vigas longitudinalmente armadas com aço.

Tal verificação, foi adotada como solução de referência e aplicado um sob dimensionamento da área de armadura em aço, estribos, a aplicar a todas as vigas do programa experimental. Este sob dimensionamento foi justificado pela superior resistência mecânica da armadura longitudinal

compósita a esforço de tração e a imprevisibilidade de comportamento mecânico e redistribuição de esforços no interior da seção de betão armado.

O programa experimental contou a utilização de estribos em fio de aço A500 EL de 3mm, espaçados de 0.06m e deste modo, eliminar a possibilidade de rotura prematura das vigas por esforço transversal.

Os cálculos preliminares para dotar as vigas com capacidade resistente ao esforço transversal até ao esgotamento da resistência do betão, podem ser consultados em anexo.

#### 5.4.6 Moldagem das armaduras

As 12 armaduras das vigas contruídas durante o programa experimental, são constituídas por varões de 4 diferentes famílias, identificadas pelo tipo de reforço longitudinal à flexão, e mostrados na (Tabela 19).

Tabela 19 - Composição da amostra flexão e tipo de reforço

Tipo varão	Tipo de reforço	Un	Ø BCR (mm)	Tipo ensaio
BCR_1	100% Fibra de vidro	4	6,09	Flexão
BCR_2	73,60% Fibra vidro e 26,40% fibra de carbono	4	6,05	Flexão
BCR_3	Fio de aço A500 EL (3mm) e 70,64% fibra de vidro	4	6,55	Flexão
Aço	Aço A400NR	4	6	Flexão

A montagem das armaduras destinadas a serem integradas no betão, e a finalidade de absorver esforços, requer o cumprimento das disposições de projeto, ou neste caso, a adotada disposição das armaduras no interior da geometria definida para o presente programa experimental. Tal, e independentemente da dimensão dos elementos estruturais, a construtibilidade das armaduras aplicadas em todas as vigas foi realizada segundo o conhecimento descrito por (Trigo & Neves da Silva, 2009).

#### Armadura longitudinal

A armadura de reforço longitudinal em vigas composta por material compósito BCR e material referência em aço A400NR, foi cortado com um comprimento de 82cm, por forma a garantir um recobrimento dos topos das vigas com 1.5cm, de acordo com o recobrimento das armaduras estipulado para os elementos a estudar.

Os varões de aço foram cortados de varões com 12 metros de comprimentos existentes no laboratório de estruturas da Universidade do Minho (Figura 66 (a)), e os varões BCR foram

produzidos numa fase inicial da campanha experimental e cortados logo depois de produzidos, à saída da câmara de cura do compósito, (Figura 66 (b)).

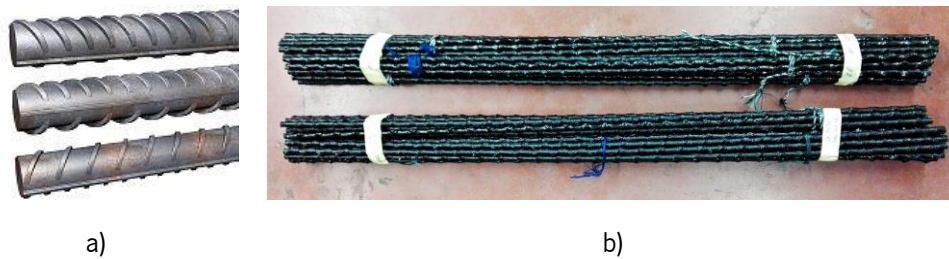


Figura 66 - Material de reforço, a) aço A400NR; b) BCR

### Estribos

Os estribos em fio de aço A500 EL de 3mm foram cortados a partir de um rolo de fio de aço, com 32cm de comprimento, por forma a realizar a dobragem da armadura a frio e obter um afastamento livre interior de 7cm, (Figura 67).

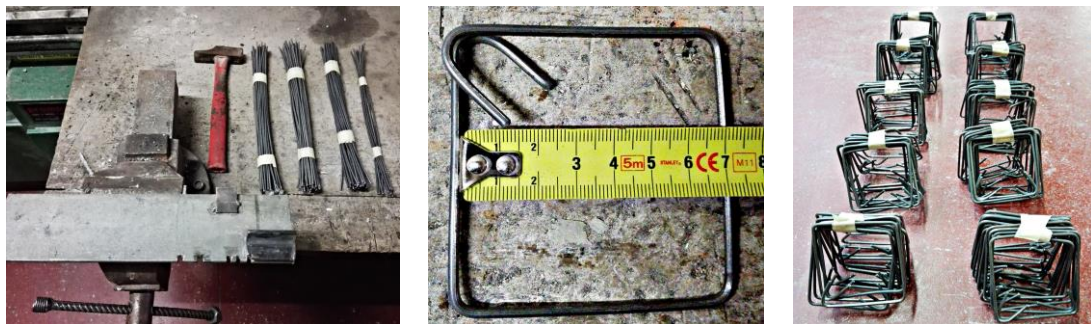


Figura 67 - Corte do aço e moldagem dos estribos

### Composição geométrica das armaduras das vigas, (Figura 68)

Dados: Comprimento (L): 850mm

Secção (A): 100 x 100mm

Armadura longitudinal de flexão (Asl): 3  $\varnothing$  6mm

Armadura esforço transversal (Ast):  $\varnothing$  3//60mm

Afastamento entre Asl: 2cm  $\pm$  2mm



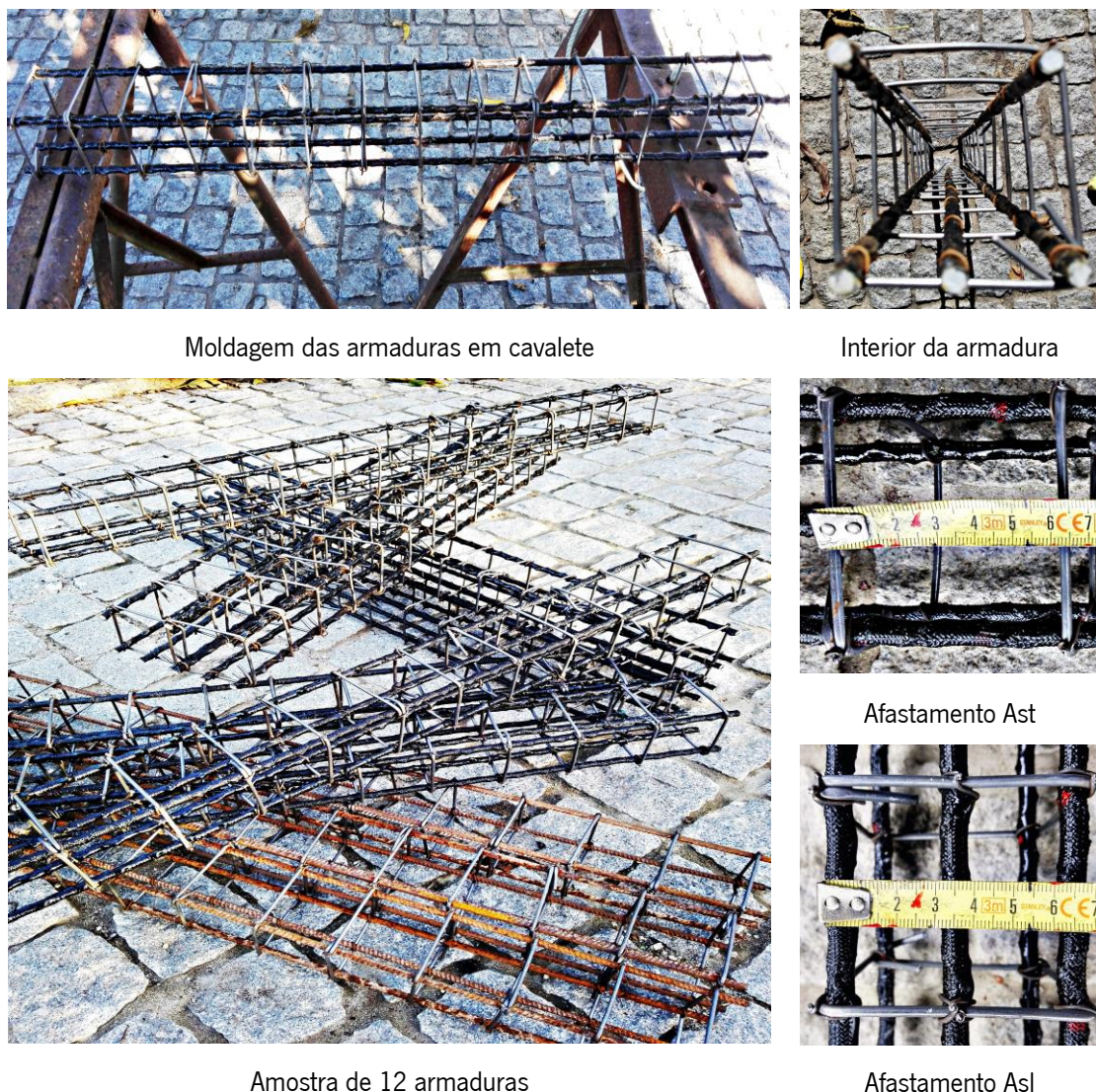


Figura 68 - Moldagem de armadura para vigas

#### 5.4.7 Amassadura, betonagem e cura dos provetes

O processo de amassadura foi executado de forma a garantir uma distribuição homogénea dos materiais constituintes e uma consistência uniforme do betão, (NP EN 480-1, 2007). A betonagem e cura das vigas para ensaio de flexão foi realizada segundo as recomendações da norma (NP EN 12390-2, 2009) que especifica métodos de execução e cura de provetes para ensaios de resistência. O procedimento identificado foi o mesmo utilizado em todo o programa experimental e explicado no CAP III – ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CARATERIZAÇÃO DO BETÃO, subcapítulo 3.4 - Realização das amassaduras, (





Figura 69).



Figura 69 - Betonagem vigas

O facto do fabrico da amostra de vigas ser realizado em duas diferentes betonagens, foi definida o controlo do betão através do enchimento de 4 cubos com 100mm de lado em cada amassadura, tendo o objetivo de validar o desempenho mecânico do betão. Os ensaios à compressão foram realizados aos 28 dias de idade, (



Figura 70).



a)

b)

Figura 70 – a) Vigas BCR1 e BCR2, b) BCR3 e Aço A400NR

## **6. CAP VI - RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS**

O presente capítulo exhibe todos os ensaios executados durante a implementação do programa experimental que conduziram ao acrescentar de valor, no conhecimento da integração dos materiais compósitos BCR em elementos de betão.

Por isto, o conhecimento aferido é apresentado no decorrer deste capítulo, mediante a ordem cronológica do trabalho desenvolvido que conduziu à caracterização dos materiais e à combinação das suas potencialidades para mitigar as debilidades destes mesmos materiais.

O trabalho foi iniciado com a caracterização da matriz cimentícia segundo a avaliação das propriedades do betão, com ensaios de compressão e módulo de elasticidade. Em simultâneo, foi desenvolvida a produção do reforço BCR em varões e a caracterização dos reforços aço e BCR com aplicação de ensaios de tração. Com isto, todos os materiais macros intervenientes foram estudados individualmente e posteriormente estudados no betão através de ensaios de pull-out e ensaios de flexão em vigas tipo. Assim, são mostrados em seis subcapítulos os resultados alcançados, e no sétimo subcapítulo, elaborada uma análise de resultados.

A análise de resultados, visa sistematizar o conhecimento alcançado, criar uma avaliação holística sobre o conteúdo produzido e o seu valor enquanto definidor de uma solução credível para substituir o aço no reforço de estruturas de betão armado.

### **6.1 Caracterização do betão em estado fresco**

A caracterização do betão em estado fresco visa avaliar a trabalhabilidade a partir da aptidão que detém para fluir com base na sua plasticidade, que está diretamente relacionada com a capacidade de o moldar. Esta avaliação da trabalhabilidade do betão em estado fresco está associada ao tipo de elemento estrutural a betonar e ao reforço que o compõe.

#### **6.1.1 Metodologia**

As duas misturas de betão estudadas foram caracterizadas em estado fresco, através de um ensaio de abaixamento (cone de Abrams).

O ensaio foi realizado depois da amassadura e antes do enchimento dos moldes cilíndricos, seguindo as recomendações da norma (NP EN 12350-2, 2009).

### 6.1.2 Procedimento de ensaio

A amostra para o ensaio de betão fresco foi retirada do interior da betoneira, enchido o molde (cone de Abrams) em três camadas faseadas e apiloando 25 vezes cada camada. Posteriormente, foi retirado o molde cuidadosamente com uma força manual vertical sem causar movimentos laterais e de torsão. O abaixamento foi medido entre o topo do cone e o ponto mais alto do provete que baixou, após desmoldagem.

### 6.1.3 Resultados

Os valores obtidos para o abaixamento são apresentados na (Tabela 20), sendo que, de acordo com (Pereira, 2014), ambos os abaixamentos forma considerados válidos.

**Tabela 20 - Caraterização do abaixamento dos betões (NP EN 206-1, 2007)**

Tipo betão	Forma de abaixamento	Medida abaixamento (mm)	Classe
Betão_1	Abaixamento verdadeiro	50	S2
Betão_2	Abaixamento verdadeiro	60	S2

Assim, através do ensaio de abaixamento, foi verificável a aptidão do material para o objetivo a que se propõe a mistura selecionada, caraterizada com uma classe S2 (abaixamento 50 a 90mm) (Pereira, 2014), segundo classificação ( NP EN 206-1, 2007).

## 6.2 Caraterização do betão em estado endurecido

Os ensaios ao betão no estado endurecido têm como finalidade caraterizar e avaliar o seu comportamento quando solicitado a esforços mecânicos, averiguando a sua resistência para responder a essas solicitações.

Com isto, e para sistematizar o conhecimento do betão produzido em laboratório, foi definido caraterizar o desempenho mecânico do material compósito através de ensaios de compressão e módulo de elasticidade, recorrendo à utilização de provetes cilíndricos.

### 6.2.1 Metodologia

As duas amassaduras de betão estudadas foram sujeitas a ensaios de compressão realizados em idades de cura variáveis e de acordo com o indicado na norma (NP EN 12390-3, 2009), para seleção de um betão com caraterísticas mecânicas C30/37.

O planeamento do programa experimental, no que concerne à caracterização mecânica dos betões por ensaios de compressão, contou com um total de 14 amostras e a ocorrência de ensaios aos 14 e 28 dias de idade, com utilização de provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Tal foi verificado com a realização de 7 ensaios de compressão para cada mistura de betão, distribuindo a amostra por 2 ensaios de compressão aos 14 dias e 5 ensaios aos 28 dias de idade.

Por outro lado, e de acordo com os resultados apurados nos ensaios de compressão, o estudo do módulo de elasticidade da mistura seleccionada como referência, ou seja, a mistura que apresentou melhores resultados aos ensaios de compressão, foi realizado segundo a produção de 5 amostras de provetes cilíndricos de dimensão 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Estas amostras foram produzidas após o término da campanha experimental de ensaios de compressão, curadas em condições semelhantes e ensaiadas aos 28 dias de idade da cura do betão.

### **6.2.2 Procedimento de ensaio de compressão**

Os provetes a ensaiar nas várias idades de cura foram previamente objeto de uma correção da face superior do processo de betonagem, para que a força constante de compressão aplicada, tivesse uma distribuição homogénea por toda a secção circular do provete.

Posteriormente, procedeu-se à pesagem dos provetes e foi iniciado procedimento de ensaio.

A determinação da tensão de rotura dos provetes à compressão foi obtida através da utilização de uma máquina hidráulica de compressão com capacidade de aplicar forças gradualmente crescentes de 2000KN, contínuas e sem choques, até se atingir a rotura do betão. A aplicação da carga nos provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro foi realizada a uma velocidade constante de 10KN/s, conforme (NP EN 12390 - 4, 2009).

### **6.2.3 Resultados de ensaios de compressão**

A obtenção das respetivas tensões de rotura das misturas estudadas, foram calculados de acordo com o estipulado no Eurocódigo2 (LNEC, 2010), e a classificação dos betões por classe de resistência à compressão definidas segundo ( NP EN 206-1, 2007).

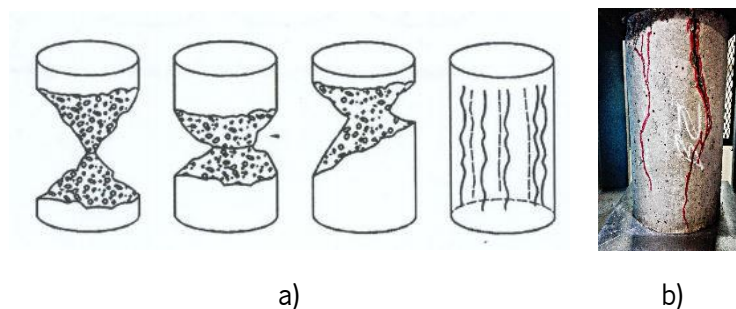
Com isto, a resistência média à compressão da família de provetes das amassaduras de teste em idades variáveis de cura, é dada pela média aritmética dos valores da tensão de rotura ( $f_{cm}$ ), dividido pelas diferentes amostras correspondentes. Mais ainda, segundo a norma (NP EN 480-1, 2007), os resultados dos provetes que diferirem da média 10% devem ser rejeitados.

A identificação das misturas, o número de provetes ensaiados e os resultados dos ensaios à compressão, que visaram medir o desempenho mecânico das misturas de betão, são apresentados na (Tabela 21).

**Tabela 21 - Resultados ensaios de compressão**

Mistura	Idade (dias)	Amostra	Peso (kg)	Força F (KN)	Tensão de rotura, fci (MPa)	Tensão média, fcm (MPa)	CV δ(%)	Valor característico, fck (Mpa)	Classe de resistência à compressão (Mpa)
Betão_1	14	1	11,58	511,60	28,95	29,72	3,68%	-	-
		2	11,69	538,90	30,50				
	28	1	11,60	566,00	32,03	32,17	0,97%	24	C20/25
		2	11,61	571,10	32,32				
		3	11,60	569,70	32,24				
Betão_2	14	1	11,32	603,80	34,17	34,47	1,23%	-	-
		2	11,70	614,40	34,77				
	28	1	11,67	671,70	38,01	37,93	0,20%	30	C30/37
		2	11,67	670,40	37,94				
		3	11,66	669,40	37,88				
		4	11,71	671,50	38,00				
		5	11,70	668,60	37,84				

Por outro lado, decorridos os ensaios individuais de compressão e registada a força máxima de rotura dos provetes, foi importante inspecionar visualmente o modo de rotura de cada provete, considerando satisfatória ou não satisfatória, conforme descrito na norma (NP EN 12390-3, 2009), (Figura 71).



**Figura 71 - a) Tipos de rotura satisfatórios provetes cilíndricos (NP EN 12390-3, 2009); b) Amostra rotura experimental ensaio aos 28 dias betão\_2**

Toda a população de amostras ensaiadas apresentaram comportamento de rotura idêntico, roturas satisfatórias, durante o procedimento de ensaio das duas famílias de betão. As variações



de resistência verificadas aos 28 dias de idade foram inferiores a 1% da tensão de rotura, aferindo o especificado pela norma (NP EN 480-1, 2007).

A tensão média de rotura do betão\_1 aos 28 dias foi de 32.17MPa, classificado segundo ( NP EN 206-1, 2007) como um betão de características mecânicas C20/25, insuficiente resistência à compressão para o objetivo do trabalho. Por outro lado, o betão\_2 com uma tensão média de rotura de 37.93MPa e a mesma idade, foi classificado como um betão C30/37 ( NP EN 206-1, 2007), e justificou ser a mistura escolhida para reproduzir ao longo de todo o programa experimental.

O betão\_2, corresponde à classe de resistência pretendida C30/37 e apresenta uma relação água cimento A/C 0.46, estando de acordo com norma ( NP EN 206-1, 2007) para um betão desta resistência.

Importa ainda salientar que os resultados alcançados nos ensaios experimentais de caracterização do betão para as duas misturas estudadas, expõem uma gama de resultados ligeiramente inferiores aos verificados pelo estudo de (Pereira, 2014). Este desfasamento de resultados foi alvo de análise prévia antes de continuar a caracterização do betão e o progresso do trabalho experimental. Para tal, foi executada uma avaliação do agregado fino e grosso disponível em laboratório, através de peneiração com série de peneiro.

Com a análise teste realizada, foi possível detetar descontinuidades na curva granulométrica do agregado fino, pelo que se optou pela aquisição de um novo agregado fino e o traçado da curva granulométrica, estudada no ponto 3.2 Composição do material.

Contudo, o resultado alcançado pela mistura do betão\_2 na caracterização do betão, manteve a confiança dos resultados verificados, sendo a matriz cimentícia definidora do trabalho experimental. Assim, a caracterização da mistura de betão selecionada progrediu para o estudo do módulo de elasticidade do betão\_2.

Este estudo foi realizado com provetes cilíndricos, utilizando-se o novo agregado fino.

#### **6.2.4 Procedimento de ensaio módulo elasticidade**

Os provetes a ensaiar foram previamente objeto de uma correção da face superior do processo de betonagem, para que a força constante de compressão aplicada, tenha uma distribuição homogénea por toda a secção circular do provete.

Posteriormente, procedeu-se à pesagem dos provetes e foi iniciado o processo de ensaio com a definição da tensão média de rotura ( $f_{cm}$ ).

A determinação da tensão de rotura dos provetes à compressão foi obtida através da utilização de uma máquina hidráulica de compressão com capacidade de aplicar forças gradualmente crescentes de 2000KN, contínuas e sem choques, até se atingir a rotura do betão. A aplicação da carga nos provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro foi realizada a uma velocidade constante de 10KN/s, conforme (NP EN 12390 - 4, 2009).

O módulo de elasticidade foi determinado conforme especificado (LNEC E397, 1993) segundo aplicação de ciclos de carga - descarga entre níveis de carregamento que solicitaram o comportamento elástico do betão em análise.

Para tal, foram utilizadas 5 amostras de provetes cilíndricos de dimensão 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Duas amostras foram inicialmente usadas para ensaio de compressão, e assim, conhecer a tensão média de rotura ( $f_{cm}$ ) dos provetes. O resultado da tensão média de rotura dos provetes, permitiu definir o patamar superior estabelecido pela especificação LNEC, onde a tensão é de 1/3 da tensão de rotura ( $f_{cm}$ ) verificada.

A extensão axial originada pelos ciclos de carga – descarga aplicados nos provetes cilíndricos, foi determinada por intermédio de 3 LDVT's, posicionados em geratrizes diametralmente nos anéis que abraçaram individualmente os provetes, radialmente separados entre si 120°, obtendo as leituras de deformação de forma automática, (Figura 72). Refira-se que o ensaio não é destrutivo, pelo que após determinado o módulo de elasticidade levou-se os provetes à rotura.



Figura 72 - Ensaio do módulo elasticidade



### 6.2.5 Resultados de ensaios módulo de elasticidade

O presente subcapítulo contempla os resultados atingidos na validação das características mecânicas da mistura de betão utilizada na realização do trabalho laboratorial. A (Figura 73) apresenta o valor individual do módulo de elasticidade registado nos 3 provetes ensaiados.

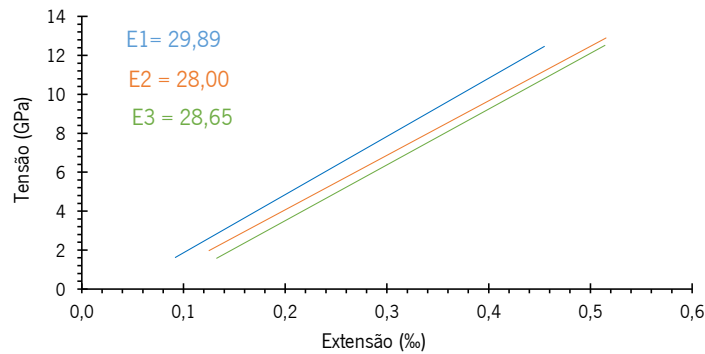


Figura 73 - Módulo elasticidade do betão

A (Tabela 22) apresenta os resultados individuais das propriedades mecânicas dos provetes no estudo do módulo de elasticidade do betão.

Tabela 22 - Estudo módulo elasticidade do betão, (LNEC E397, 1993)

Idade (dias)	Provete	Peso (kg)	Força F (KN)	Tensão de rotura - fci (MPa)	Tensão média rotura, fcm (MPa)	Desvio padrão (fcm) Δ	Módulo elasticidade Eci (GPa)	Módulo elasticidade Ecm (GPa)	Desvio padrão (Eci) Δ	Eurocódigo2		
										Módulo elasticidade Ec (GPa)	Valor característico fck (Mpa)	Classe de resistência compressão (Mpa)
28	E1	11,843	845	47,82	47,25	0,80	-	-	-	33	40	C30/37
	E2	11,84	825	46,69								
	E3	11,812	870	49,23	29,89							
	E4	11,983	816	46,18	48,33	1,87	28,00	29	0,96			
	E5	11,790	876	49,57	28,65							

Os provetes cilíndricos de betão foram ensaiados aos 28 dias de idade de cura, e apresentam um módulo de elasticidade médio ( $E_{cm}$ ) de 29GPa, calculado de acordo com (LNEC E397, 1993), (Figura 73). Contudo, como mostrado na (Tabela 22), o módulo verificado é inferior ao indicado no Eurocódigo 2 em 4GPa, para o mesmo tipo de betão C30/37. Tal facto e dada a diferença registada, pode ser considerado um desvio normal, sendo previsivelmente justificado pela sensibilização à variação do tipo de agregado fino e grosso utilizado.

Assim, podemos também concluir que o módulo de elasticidade do betão não deve ser apenas determinado em função da respetiva resistência à compressão, devendo ser também considerado a influência do agregado utilizado.

### 6.3 Caraterização do reforço em aço A400NR

As vigas de betão referência armadas no corrente trabalho experimental foram reforçadas longitudinalmente aos esforços de flexão com armadura em varões de 6mm de aço A400NR. Dada a utilização deste material, foi considerado interessante validar as caraterísticas mecânicas comerciais e o comportamento do reforço quando sujeito a esforços de tração.

O conhecimento do reforço em aço é teoricamente conhecido e largamente estudado. Contudo, não menos importante, foi ensaiar o material usado e cotar se possuía todas as potencialidades apontadas ao reforço de aço A400NR.

#### 6.3.1 Metodologia

As 5 amostras de varão em aço A400NR com 50cm de comprimento e 6mm de diâmetro foram sujeitas a ensaio destrutivo de tração pura, solicitando o provete a uma força de tração uniaxial continuamente crescente até à rotura.

O ensaio foi realizado segundo a normalização aplicável para elementos metálicos (NP EN 10002-1, 2006), a fim de se determinar o valor medio da tensão de cedência ( $f_y$ ), o valor medio da tensão de rotura ( $f_t$ ) e o módulo de elasticidade ( $E$ ) deste material.

#### 6.3.2 Procedimento de ensaios varões de aço A400NR

Os varões com 50cm de comprimento foram colocados e posicionados nas ancoragens de uma célula hidráulica com capacidade de 2000KN. O comprimento de ancoragem utilizado em cada extremidade é de 5cm, o que conduz a um banzo livre de 40cm, com o registo da força de alongamento a ser registada pelo medidor interno da máquina de tração, (Figura 74 (a)).

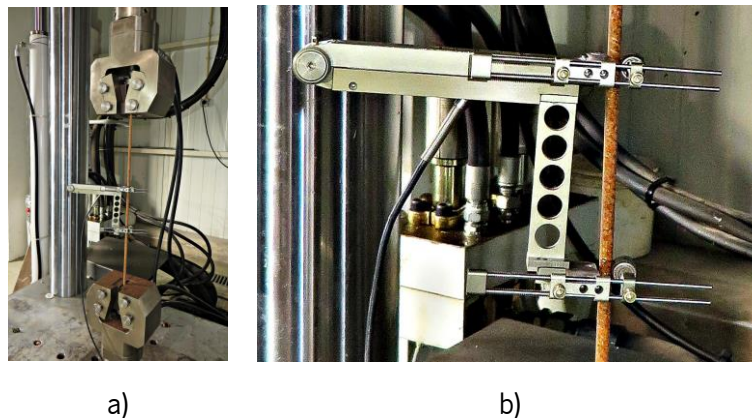


Figura 74 – Ensaio de tração do aço A400NR (a), Posicionamento Clip Gauge (b)

Por outro lado, a meio vão do comprimento livre, foi posicionado um clip gauge com um comprimento de medida de 10cm, permitindo medir com precisão posicional (em 10cm) a variação real do comprimento no varão, ou seja, a relação direta entre a aplicação da força de tração e a deformação do varão, (Figura 74 (b)).

O ensaio de tração foi aplicado individualmente a cada varão de aço com uma força crescente aplicada à velocidade de 500N/s até se atingir a rotura total do elemento.

### 6.3.3 Resultados dos ensaios de tração do aço A400NR

O presente subcapítulo, apresenta os resultados atingidos no estudo das características mecânicas dos varões de aço, (Figura 75).

#### Clip Gauge – Relação tensão – extensão para cálculo módulo elasticidade do aço A400NR

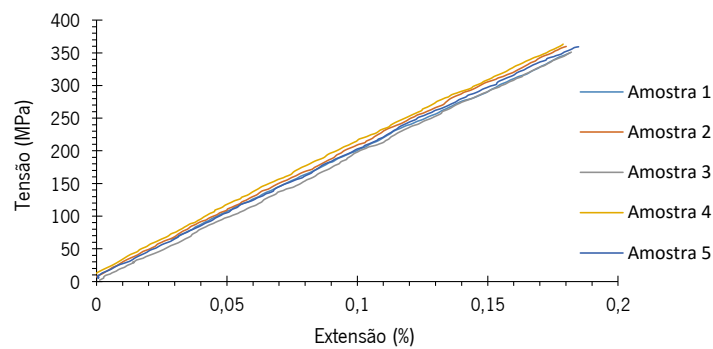


Figura 75 - Relação tensão-extensão para varões de aço A400NR

Como mostrado na (Tabela 23), são apresentados os resultados individuais das propriedades mecânicas das amostras de varões de aço A400NR por ensaios de tração, medidas através do uso do Clip Gauge.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração de varões de aço A400NR

Distância maxilas LVDT		100	(mm)	
Amostra	Força (N) (max)	Tensão (MPa)max	Extensão (%) max	E (GPa)
1	9891,70	349,85	0,18	188,86
2	10171,09	359,73	0,18	195,47
3	9924,96	351,02	0,18	192,99
4	10270,87	363,26	0,18	194,49
5	10157,79	359,26	0,18	193,15
Média	10083,28	356,62	18,15%	192,99
Desp	139,96	4,95	0,16%	1,65
CV	0,01	0,01	0,87%	0,01

O estudo do módulo de elasticidade dos varões de aço, está de acordo com o apontado nas características técnicas do aço A400NR, atingindo no ensaio laboratorial um  $E_{cm} = 192.99\text{GPa}$ . A ficha técnica deste material indica um módulo de elasticidade de  $210\text{GPa}$ , (Tabela 15).

A diferença de resultado alcançado, cerca de  $17\text{GPa}$ , pode estar relacionado com a conservação do material em laboratório, estando exposto à variação das condições ambientais internas e à deterioração do varão com o fator tempo.

#### LVDT Interno - Quantificação da resistência máxima dos varões de aço à tração

A (Figura 76) mostra os resultados atingidos no estudo das características mecânicas dos varões de aço por ensaios de tração.

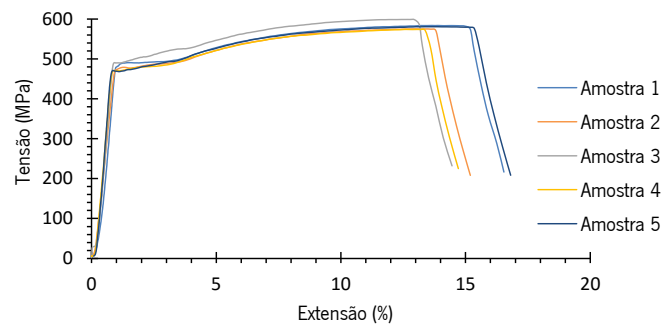


Figura 76 - Ensaios de tração em varões de aço

A (Tabela 24) apresenta os resultados individuais das propriedades mecânicas das amostras de varões de aço A400NR por ensaios de tração medidas através do uso do LVDT Interno.

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de tração em varões de aço A400NR

Distância entre maxilas		400	(mm)
Amostra	Força (N) (max)	Tensão (MPa)max	Extensão (%) max
1	16503,91	583,71	16,54
2	16264,43	575,24	15,19
3	16929,64	598,76	14,46
4	16224,52	573,83	14,71
5	16417,43	580,65	16,81
Média	16467,99	582,44	15,54%
Desp	199,03	7,039	0,9%
CV	1%	1%	0,06%

A representação dos ensaios de tração mostrados na (Figura 76), e os resultados indicados na (

A (Tabela 24) apresenta os resultados individuais das propriedades mecânicas das amostras de varões de aço A400NR por ensaios de tração medidas através do uso do LVDT Interno.

*Tabela 24*, correspondem às características tipicamente conhecidas e validadas para este material. A fase plástica está compreendida entre a tensão dos 0MPa e os 450MPa, patamar onde são criadas as primeiras rótulas plásticas e o varão plastifica. Depois da plastificação dos varões, não foi verificável qualquer perda de carga, progredindo com um incremento de tensão crescente até à tensão de rotura média de 582MPa. A extensão média alcançada foi de 15.54%.

#### **6.4 Caracterização do reforço em material compósito BCR**

O reforço inovador BCR de  $\pm 6$ mm de diâmetro, utilizado em armadura de reforço longitudinal a esforços de flexão de elementos de betão armado, foi sujeito a um processo de caracterização mecânica experimental por aplicação de forças de tração pura.

Este procedimento foi executado para aferir as características mecânicas reais do material produzido em laboratório e aplicado nas vigas de betão armado, comparando os valores teóricos com o comportamento deste quando sujeito a esforços de tração.

##### **6.4.1 Metodologia**

A população BCR, composta por 15 amostras de 3 diferentes famílias *5.2.3 Preparação dos provetes de BCR para ensaio*, foram sujeitas a ensaios individuais de tração por tipo de composição do núcleo do varão, a fim de se determinar a real extensão média, a tensão de rotura (ft) e o módulo de elasticidade (E) deste material.

Os varões de reforço BCR de  $\pm 6$  mm de diâmetro foram colocados no pórtico de ensaio à tração, de acordo com a norma “American Concrete Institute 440.3R-04.B2A” (ACI 440.3R-04, 2004), e utilizando a técnica desenvolvida pelo grupo de investigação da Universidade do Minho (Fangueiro, et al., 2006) (Zdraveva, 2009) (Cunha, 2012) (Oliveira, 2013).

##### **6.4.2 Procedimento de ensaio**

Os provetes de ensaio têm um comprimento total de 800mm, sendo o banzo livre para análise de 250mm. A célula hidráulica de ensaio demonstra uma capacidade de força de 2000KN e o registo da força de alongamento foi registada pelo medidor interno da máquina de tração.

O ensaio de varões em material compósito requer um setup de ensaio completamente diferente do comumente utilizado para varões de aço. Dada esta particularidade, foram acopladas duas estruturas de aço à máquina de tração, que posteriormente receberam os provetes para ensaio, (Figura 77 (a)).

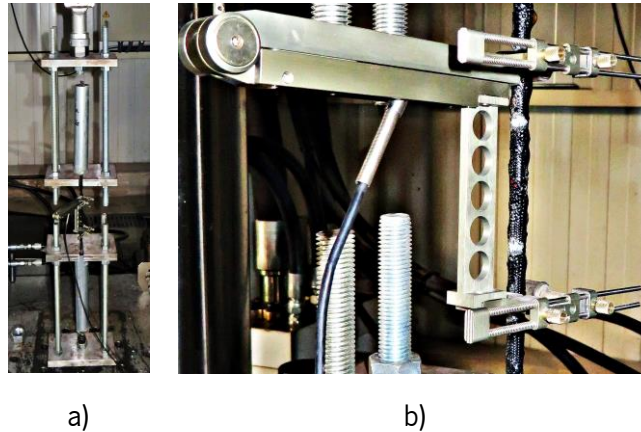


Figura 77 - Setup ensaio tração BCR (a), Posicionamento Clip Gauge (b)

Por outro lado, a meio vão do comprimento livre, foi posicionado um clip gauge com um comprimento de medida de 10cm, permitindo medir com exatidão a real variação do comprimento no varão dentro deste comprimento de análise, ou seja, a relação direta entre a aplicação da força de tração e a deformação do varão, (Figura 77 (b)).

Por isto, previamente à colocação do clip gauge e nos pontos de ancoragem deste ao varão BCR, foi removido o entrançado de revestimento do núcleo do varão BCR. Este pormenor técnico, visou garantir que durante a aplicação da força axial de tração, a variação do comprimento no varão é garantidamente justificada pela capacidade resistente do núcleo em fibras.

O ensaio de tração foi aplicado individualmente a cada varão BCR com uma força crescente aplicada à velocidade de 2mm/minuto, até se atingir a rotura total do elemento.

#### 6.4.3 Resultados dos ensaios de tração em BCRs

Os resultados dos ensaios de tração dos varões compósitos são representativos de um padrão comparativo entre reforços, onde o aço é reforço de referência.

### Clip Gauge.- Relação tensão – extensão para cálculo módulo elasticidade dos varões BCR

A determinação do módulo de elasticidade das amostras BCR seguiu a metodologia indicada, utilizando-se uma regressão linear que relaciona a tensão - extensão entre 20% e 50% da tensão de rotura dos varões.

Para além disso, a apresentação dos resultados na (Figura 78), introduz a visualização do comportamento atingido para o reforço em aço, e assim, obter um conhecimento simplificado e eficaz na observação comparativa entre reforços.

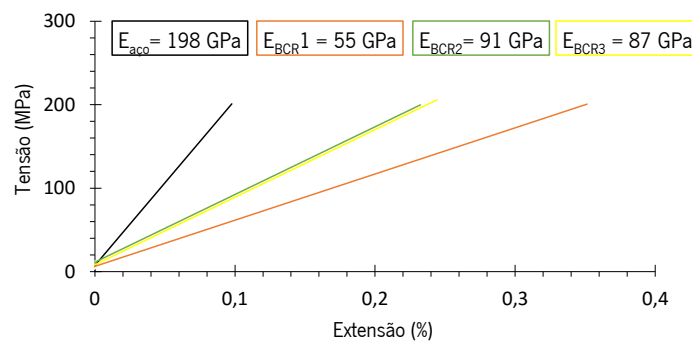
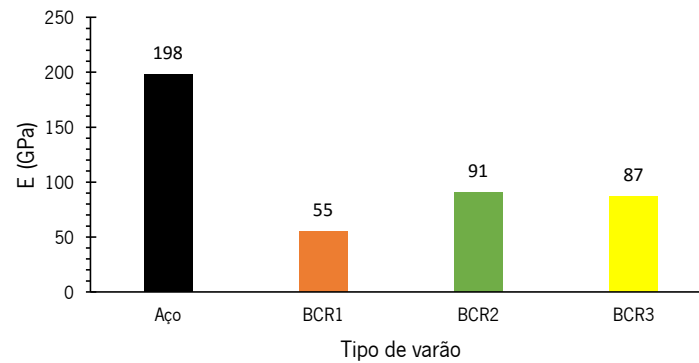


Figura 78 – Relação tensão-extensão para os varões BCR e aço

A caracterização mecânica dos varões segundo o módulo de elasticidade, é um indicador fundamental quando se pretende entender a relação tensão – extensão e a medição da credibilidade mecânica a garantir, para justificar a aplicação e introdução de novos materiais no reforço de estruturas de betão.

A aplicação de novos materiais como substitutos do aço são desafiados a obter igual ou superiores características mecânicas, nomeadamente, a rigidez dos materiais, que diretamente confere rigidez estrutural. A rigidez para este tipo de material de reforço é medida pelo módulo de elasticidade (E) alcançado.



**Figura 79 - Representação gráfica do módulo de elasticidade por tipo de varão**

Por isto, o (Figura 79) indica diferenças relevantes entre o reforço tradicional em aço e os inovadores varões compósitos BCR. Assim, os varões em fibra de vidro – BCR1, mostram um módulo de elasticidade cerca de 25% do aço, e os varões em fibra de vidro e carbono – BCR2 e vidro e aço – BCR3, aproximadamente 50% do aço.

**Tabela 25 - Módulo elasticidade teórico e laboratorial dos varões BCR**

Varão	E (Gpa) Teórico	E (Gpa) Laboratorial	Desvio padrão $\Delta$	CV $\delta$ (%)
BCR1	72	55	12,02	22%
BCR2	116	91	17,68	19%
BCR3	113	87	18,38	21%

Numa perspetiva de análise entre os resultados atingidos nos ensaios laboratoriais e a quantificação teórica (Tabela 25), verificou-se uma variação na ordem dos 20% quando analisados os resultados do módulo de elasticidade calculados teoricamente, considerando apenas o volume de fibras e o seu respetivo módulo. A quantificação da fração de volume da matriz de origem polimérica (resina epóxida) e do entrançado na composição dos varões BCR, não foi considerada como objetivo de foco no presente trabalho.

Assim, a influência da matriz e o efeito do entrançado no revestimento do varão, incrementam uma consequência na rigidez dos varões compósitos. Tal facto, é justificado por possuírem módulos de elasticidade muito inferiores ao material de reforço, as fibras (Tabela 14), capítulo 4.

Por outro lado, o mesmo argumento é apontado pelos autores (Cui, et al., 2008) (Wu, 2005), nos trabalhos científicos desenvolvidos, onde os autores previram o módulo de elasticidade aplicando a regra das misturas de acordo com o módulo de elasticidade (E) e a fração da área (A) de cada componente, de forma a obter o módulo do compósito, (Equação 1).



### LVDT Interno – Quantificação da resistência máxima dos varões à tração

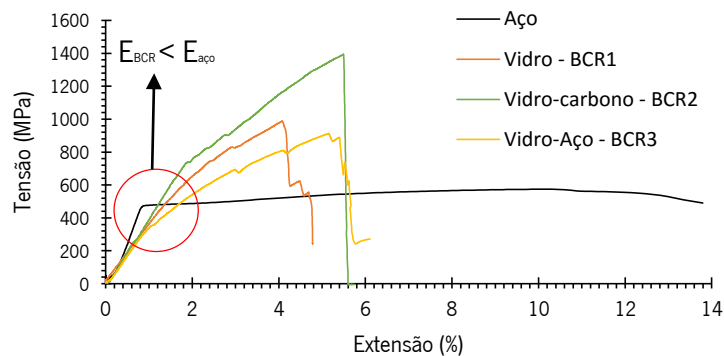


Figura 80 - Representação gráfica da tensão máxima alcançada por tipo de varão

A observação da (Figura 80), mostra varões compósitos BCR com comportamento mecânico tensão-extensão a esforços de tração, inferiores comparativamente ao aço, até ao limite de aproximadamente 500MPa. Tal facto, é visualizado através da análise da relação tensão – extensão, onde os varões BCR demonstram maior extensão para uma menor capacidade de carga, posicionando-se visualmente inferior ao resultado do aço.

O comportamento verificado valida os resultados anteriormente conhecidos, onde são mostrados módulos de elasticidades inferiores ao aço (Figura 79), ou seja, os varões BCR apresentam menor rigidez individual,  $E_{BCR} < E_{aço}$ , justificando-se com uma maior extensão (maior alongamento) para o mesmo patamar de carga de tração.

Contudo, podemos observar varões compósitos com comportamento pseudodúctil bem definido, principalmente no varão BCR2, vidro e carbono, estando refletido os diferentes patamares de rotura das fibras, 800MPa e 1400MPa. O conhecimento bibliográfico designa tal resultado pelo efeito de hibridação dos varões compósitos.

Por outro lado, todos os varões compósitos, mostram comportamento equiparado até próximo dos 400MPa. Posteriormente a este patamar de esforço de tração, o BCR3, mostra o comportamento mais desfavorável entre os varões compósitos.

É a ainda de salientar que o varão BCR3, composto por fibras de vidro e fio de aço, acompanha de igual modo o comportamento dos varões BCR1 e BCR2, até cerca dos 400MPa, onde se presume que tenha sido esgotada a capacidade resistente do fio de aço que compõe o núcleo do varão juntamente com a fibra de vidro.

Assim, a análise gráfica permite concluir que o esgotamento da resistência à tração das fibras de vidro no BCR2 acontece próximo dos 800MPa, passando as fibras de carbono a assumir a liderança na resistência mecânica do varão à tração. Desta forma, podemos afirmar que o efeito de hibridização utilizado na definição do varão do tipo BCR2, potencia maior resistência mecânica de tração, aumento do módulo de elasticidade e conseqüente melhor rácio tensão-extensão. Mais ainda, a junção destas duas fibras utiliza as potencialidades mecânicas individuais para suprimir as fraquezas coletivas, ou seja; as fibras de vidro caracterizam-se com menor módulo de elasticidade e as fibras de carbono com maior módulo de elasticidade. O resultado final é um varão mais resistente e com maior rigidez.

No entanto, comparativamente com o reforço em aço, o comportamento mecânico dos varões compósitos entre os 0MPa e os 400MPa não manifestam superioridade mecânica, obtendo um comportamento inferior aproximadamente dos 200MPa aos 400MPa. Após superado o patamar dos 400MPa, ou seja, onde é conhecido e mostrado o esgotamento da fase plástica do aço, todos os varões BCR conquistam destacada capacidade resistente a esforços de tração e real comportamento pseudodúctil.

Este é um comportamento severamente investigado e procurado pela comunidade científica, para a mitigação do comportamento linear elástico característico dos materiais compósitos, e manifestamente negativo quando introduzido em estruturas de betão armado, não sendo reconhecível com eficiente antecedência o provável esgotamento da capacidade resistente dos elementos de betão armado e o eminente colapso estrutural.

Como tal, os 3 tipos de varões BCR manifestam um notável comportamento de pseudoductilidade teóricamente capaz de conferir um desempenho estrutural que demonstre a deterioração prematura da capacidade de carga de uma estrutura de betão armada, antecedendo uma rotura frágil.

O funcionamento mecânico integrado, segundo as percentagens de fibra utilizadas, mostra que a solução BCR2 estudada individualmente à tração, é aquela que identifica o melhor resultado comparativamente com os BCR1 e BCR3 na criação de uma identidade pseudodúctil. Mais ainda, o BCR2, é aquele que proporciona um patamar de resistência à tração mais elevado, ultrapassando os 1400MPa.

O patamar de resistência máxima à tração entre os 900MPa e os 1000MPa, é definido pelos varões BCR1 e BCR3, sendo 300 a 400MPa superiores ao aço A400NR, (Figura 81).

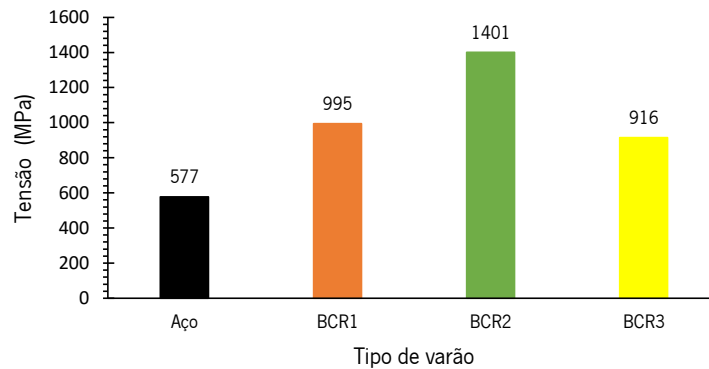


Figura 81 - Representação gráfica das tensões máximas de tração por tipo de varão

### 6.5 Caracterização do material de reforço por ensaio de pull out

A escolha do material de reforço a integrar em elementos de betão, está diretamente associada à capacidade resistente e à integridade física e mecânica que este pode introduzir no potencial do material betão.

Por outro lado, é fundamental existir suficiente aderência entre os materiais de diferentes tipologias, por forma a criar elementos de elevada resistência, que usem as potencialidades para mitigar fraquezas.

Por isto, os ensaios do estudo de aderência entre o betão e os varões de reforço, representam um importante conhecimento na validação de soluções capazes de superar a debilidade do betão à tração. Nestes, é avaliada a capacidade resistente dos varões de reforço ao deslizamento dentro dos elementos de betão.

Assim, os materiais de reforço em varão de aço A400NR e reforço em varão BCR com diferentes composições do núcleo, foram submetidos a ensaios de pull out que visaram caracterizar os diferentes tipos de reforço inseridos no betão.

#### 6.5.1 Metodologia

A população de reforços é composta por 16 amostras de 4 diferentes famílias, *CAP IV – MATERIAL DE REFORÇO*, e foram sujeitas a ensaios individuais de pull out por tipo de composição do núcleo do varão, a fim de se determinar a capacidade de aderência ao betão.

Com o intuito de conhecer a capacidade dos diferentes varões em mobilizar a força de tração no betão, através da sua rugosidade aparente distribuída pela secção circular de  $\pm 6\text{mm}$  de diâmetro, foi adotado o método de ensaio de acordo com (RILEM, 1983). Os varões foram tracionados individualmente com uma força medida em kN (kilonewtons) e esta, dividida pela área do varão de ancoragem e comprimento embebido ( $l_{exp}$ ). Assim, foi possível obter a tensão de aderência entre o varão e a matriz de betão, (SILVA, et al., 2013), como mostrado na (Equação 3).

$$\tau b = \frac{F}{\pi \cdot \varnothing \cdot l_{exp}}$$

### Equação 3 - Tensão de aderência

Onde,  $F$  é a força do ensaio Pull – out (N),  $\varnothing$  é o diâmetro do varão (mm), e  $l_{exp}$  é o comprimento de ancoragem do ensaio (mm). Assim, foi calculada a tensão máxima de aderência entre o varão e a matriz de betão.

#### 6.5.2 Procedimento de ensaio pull out

O estudo da capacidade de aderência comparativa entre reforços, foi executada com a utilização de varões BCR e varões aço de comprimento total de 50cm e uma zona de aderência de  $10\varnothing$  (6cm), no interior de cubos de betão.

O setup de ensaio foi executado num pórtico de aço suficientemente rígido, com aplicação da célula hidráulico e seguindo as recomendações da normalização aceite pela comunidade científica. O provete cúbico foi confinado horizontalmente recorrendo à utilização de duas chapas de aço fixadas ao pórtico de suporte, de modo a promover o deslocamento entre o varão tracionado e o provete de betão fixo.

A célula hidráulica de ensaio mobiliza uma força horizontal de tração máxima de 100KN, através de um atuador hidráulico. O registo da carga aplicada às amostras foi registado através de um sistema de controlo e aquisição de dados ligados a um sistema computacional.

Por outro lado, o deslizamento do varão no interior do betão foi medido através do posicionamento de um dispositivo LVDT na face mais distante da zona de ancoragem, base do provete. Este dispositivo foi apontado diretamente no topo do varão exposto e medido o deslizamento do varão durante o período de ensaio, (Figura 82 (a)).

Para além disso, outro dispositivo LVDT foi posicionado junto da zona de ancoragem e acoplado ao varão, tendo a finalidade de quantificar as deformações axiais do varão, medindo o seu deslizamento linear à saída do provete (Figura 82(b)).



**Figura 82 - Setup ensaio Pull - out**

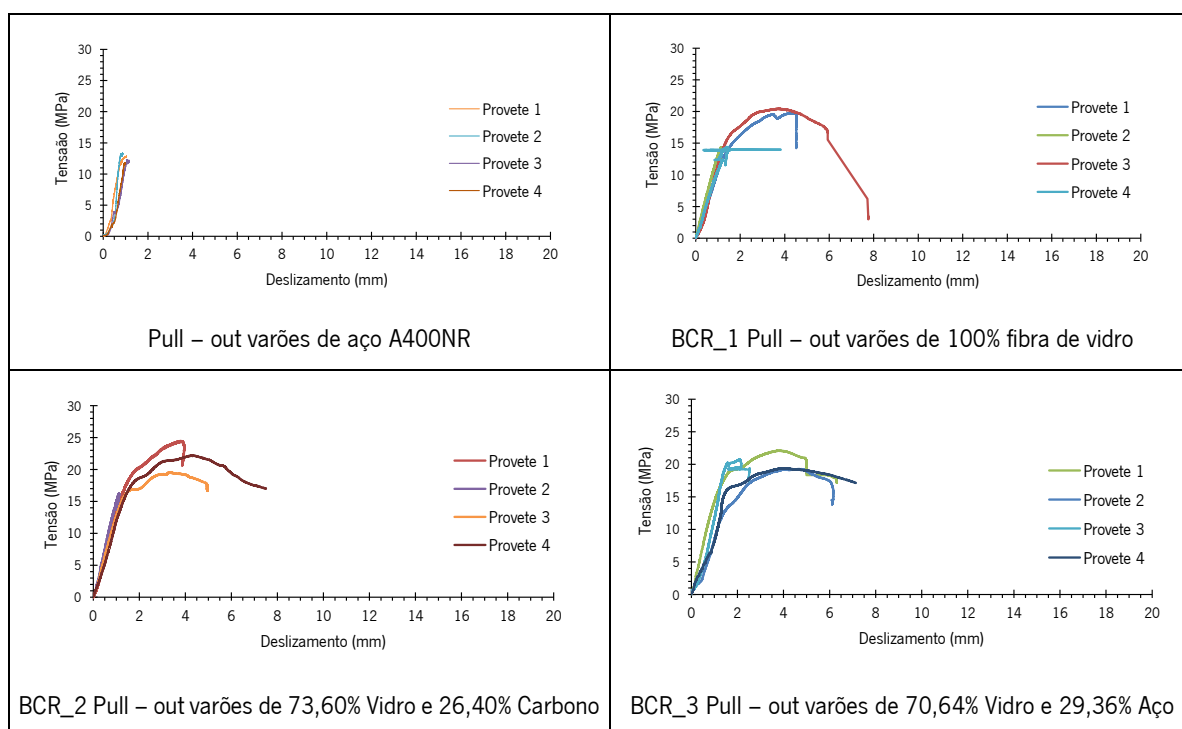
O ensaio de aderência foi efetuado em controlo de deslocamento através do LVDT interno do equipamento e assim, é possível o registo dos deslocamentos após o alcance da carga máxima. O sistema de ensaio solicitou o provete com uma força de tração uniaxial continuamente crescente, a uma velocidade de tração de 0.010mm/s até à rotura da amostra, que correspondeu a ensaios com duração de aproximadamente 20 a 30 minutos.

No presente trabalho comparativo de ensaios pull - out entre varões de aço e varões BCR, foi determinado um tempo máximo de ensaio de 30 minutos, segundo as mesmas condições e velocidade de ensaio.

### **6.5.3 Resultados dos ensaios de Pull - out**

Os resultados gráficos individuais de pull – out, por tipo de reforço, na caracterização do comportamento de aderência entre o varão e o betão, são apresentados na (Tabela 26). Importa referir, que foram utilizados 4 provetes para cada tipo de varão.

Tabela 26 - Gráficos ensaios de pull – out, tensão - deslizamento



Na (Tabela 27), são quantificados numericamente os resultados atingidos nos ensaios de pull – out, podendo afirmar-se que os varões BCR, em termos de tensões médias de aderência ao betão, mostram resultados superiores ao aço em cerca de 8MPa.

Tabela 27 - Resultados numéricos ensaios de pull - out

Varão	Tipo de fibra	Diâmetro varão (mm)	Força máxima (KN)	$l_{exp.}$ (mm)	$\tau_{máx.}$ (MPa)	Coefficiente variação $\delta$ (%)	Deslizamento (mm)	$\tau_d, média.$ (MPa)
Aço	-	6	14,56	60	12,87	4%	1,04	12,40
			13,36		11,81		0,86	
			13,94		12,33		1,15	
			14,23		12,58		0,99	
BCR_1	100% Fibra de vidro	6,09	22,31	60	<b>19,43</b>	2%	4,52	19,78
			16,25		<u>14,16</u>		1,45	
			23,11		<b>20,13</b>		7,75	
BCR_2	73,60% Fibra de vidro e 26,40% Fibra de carbono	6,05	24,99	60	21,91	6%	6,31	20,21
			21,82		19,13		6,15	
			23,45		20,56		2,58	
BCR_3	Fibra de vidro 62,79% e Fio de aço 29,30%	6,55	27,70	60	<b>22,44</b>	7%	3,95	20,21
			18,37		<u>14,88</u>		1,12	
			22,08		17,88		4,95	
			25,09		<b>20,32</b>		7,50	

É ainda importante referir, que os resultados assinalados a **negrito** e **sublinhado** indicam que: *sublinhado* – provetes com cedência da ancoragem ao equipamento hidráulico de tração durante o ensaio; *negrito* – valor da tensão máxima utilizado para cálculo tensão média.

Para a definição dos valores de tensão média de aderência dos varões ao betão no estudo mostrado no presente trabalho laboratorial, foi definido que não seriam considerados os ensaios com um coeficiente de variação superior a 10%.

## **6.6 Caracterização do comportamento de elementos de betão por ensaios de flexão**

O programa experimental definido no âmbito dos ensaios de flexão em vigas, apontou como principal objetivo o estudo de elementos de betão armados longitudinalmente à flexão, utilizando diferentes tipos de armadura.

A campanha de ensaios foi realizada em vigas contínuas de betão à escala reduzida, de secção quadrada, com o objetivo de elaborar um estudo comparativo do comportamento mecânico estrutural destes elementos, com varões em aço e varões compósitos BCR.

Estabelecido o principal objetivo, a caracterização do comportamento mecânico das vigas foi avaliado segundo um ensaio destrutivo de flexão com aplicação da carga a meio vão. Este ensaio, foi aplicado a 3 vigas de cada um dos 4 tipos de armadura longitudinal, por forma a tornar o programa experimental representativo dos resultados obtidos.

### **6.6.1 Metodologia**

O estudo do comportamento de elementos de betão por ensaios de flexão seguiu as recomendações descritas por (RILEM, 1994) e (BS EN 14651, 2005), e foi adaptado para os ensaios de flexão em peças lineares armadas. Os ensaios foram realizados em 12 vigas de 4 diferentes famílias, como descrito em *5.4 Caracterização do comportamento de elementos de betão - vigas*.

Assim, as vigas do programa experimental foram sujeitas a ensaios individuais de flexão por tipo de armadura de reforço, a fim de se avaliar a pseudoductilidade dos elementos reforçados com armadura BCR comparativamente com os elementos reforçados com aço tradicional. Por outro lado, demonstrar representativamente a forma como o comportamento pseudodúctil se manifesta entre as diferentes combinações de armadura BCR.

### 6.6.2 Procedimento de ensaio em vigas à flexão

As vigas de betão com comprimento total de 850mm e secção quadrada 100 x 100mm, foram posicionadas num pórtico de aço suficientemente rígido e simplesmente apoiadas numa estrutura com rolos de aço, especificamente desenvolvida para ensaios de flexão.

A especificidade dos apoios está relacionada com o grau de movimento que individualmente é favorecido à viga de betão. Portanto, os ensaios de flexão pura com aplicação de carga a meio vão utilizaram um apoio que restringe o deslocamento nos eixos baricêntricos x e y, e outro apoio, com restrição apenas vertical, eixo do y.

O atuador hidráulica capaz de induzir esforço de flexão nas vigas, foi aplicado ao pórtico, seguindo as recomendações da normalização aceite pela comunidade científica na definição dos parâmetros de teste.

A célula hidráulica de ensaio, com capacidade máxima para mobilizar uma força vertical de 100KN, foi acionada através de um sistema de controlo por deslocamento e aquisição de dados, ligado diretamente a um sistema computacional. As características deste setup de ensaio permitiram definir velocidades e tempo de carregamento semelhantes, por forma a estabelecer parâmetros iguais de análise nas diferentes composições de armadura longitudinal.

O estudo da capacidade resistente das vigas ao ensaio de flexão com aplicação de carga a meio vão, foi apurado com a definição de um vão livre de 700mm, garantindo em ambos os lados dos apoios, 75mm entre o eixo dos rolos (apoio) de suporte e a face exterior do topo das vigas.

A aplicação de carga a meio vão, relaciona o posicionamento mais desfavorável da carga pontual com a efetiva resistência do elemento de betão reforçado com armadura longitudinal de flexão, assim como, a máxima resistência de flexão para a máxima resistência de compressão do betão na face superior da estrutura porticada.

Para além disso, a aplicação da força de flexão foi controlada por um dispositivo LVDT posicionado no atuador hidráulico de carga, e o deslocamento vertical, medido por outro dispositivo LVDT seguro numa estrutura em aço a meio vão das vigas, no pórtico de ensaio.

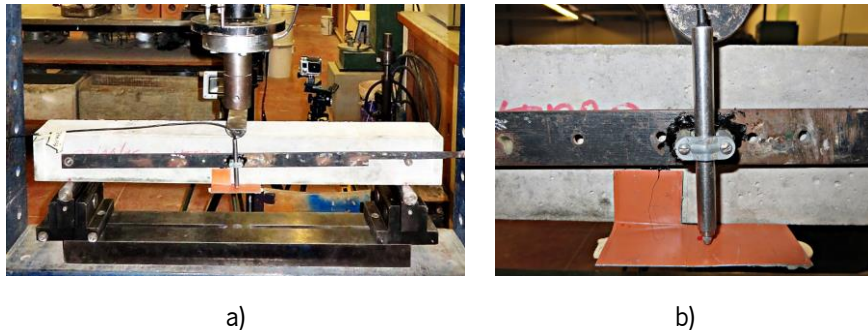
O LVDT de medição do deslocamento vertical contínuo e máximo das vigas, foi montado individualmente a cada amostra antes do início do ensaio, posicionado ao longo do eixo



longitudinal/eixo neutro. O posicionamento geométrico aconteceu a  $\frac{1}{2}$  da altura, segundo a fixação numa estrutura rígida em aço, régua metálica.

A régua metálica foi amarrada às vigas através de dois pontos de ancoragem, sendo uma extremidade fixa e rotativa, e a outra, com um acessório que permite o movimento da estrutura rígida no eixo do x, garantindo restrição de movimentos na direção vertical ao posicionamento das vigas no pórtico de ensaio, (Figura 83 (a)).

O dispositivo metálico que provoca a medição pelo LVDT da deformação contínua e máxima das vigas, foi acoplado na face inferior das vigas a meio vão, através da fixação com cola quente ao betão, (Figura 83 (b)):



**Figura 83 - Posicionamento régua metálica (a), LVDT deslocamento vertical (b)**

Para tal, foi definido no sistema computacional de ensaio, um procedimento que contou com a definição de 3 patamares de avaliação do comportamento mecânico dos elementos de betão, designados por fase1, fase 2 e fase 3. Cada patamar de ensaio demarca-se do anterior pela velocidade incrementada na aplicação de carga.

O aumento da velocidade de ensaio foi definido tendo como referência o aumento da deformação estrutural, criando um intervalo de análise do desempenho mecânico entre 0 – 36mm. Este intervalo, é o definido do estudo comparativo observado, e tem a finalidade de acrescentar valor no desempenho mecânico estrutural do reforço BCR como potencial substituto do reforço tradicional em aço.

Assim, são apresentados de seguida e de forma detalhada, o contributo de cada patamar de carregamento na observação do padrão de abertura de fendas e a relação carga – deformação nas vigas ensaiadas:

Fase 1: Velocidade 0,0033mm/s

Deslocamento vertical:  $\leq 3\text{mm}$

Fase 2: Velocidade 0,006mm/s

Deslocamento vertical:  $\leq 6\text{mm}$

Fase 3: Velocidade 0,010mm/s

Deslocamento vertical:  $\leq 30\text{mm}$

Ao longo do ensaio, para além do registo de carga e deformação registado pelo sistema de controlo e aquisição de dados, foi também representado numa das faces das vigas, o padrão de abertura de fendas. Este padrão de fissuração, foi realizado manualmente com diferentes cores, segundo um registo visual e escrita a carga em que se iniciou a abertura de fenda ou se prolongou a fissuração no elemento de betão.

Assim, a representação do padrão de fissuração foi interrompido quando a carga de flexão aplicada originou a rotura da secção por esmagamento da lâmina superior de compressão do betão.

### **6.6.3 Resultados dos ensaios de flexão em vigas**

Neste subcapítulo, são mostrados os resultados individuais das vigas armadas por tipo de reforço na análise aos esforços de flexão. Cada tipo de reforço justifica os resultados apresentados pelo ensaio em três vigas simplesmente apoiadas.

A observação dos resultados exibidos mostra o desenvolvimento dos ensaios de flexão em vigas simplesmente apoiadas, onde o carregamento ocorreu de forma contínua até se atingir sensivelmente 15 a 20mm de deslocamento vertical de cada viga que formava a estrutura porticada.

Por outro lado, uma análise macro dos ensaios de flexão mostram a homogeneidade das características do betão atingidas individualmente em cada viga, justificando-se pelo esmagamento do betão à compressão para um deslocamento vertical de 6 a 8mm, e um patamar de força de flexão de 20 a 30KN.

Por isto, os ensaios individuais de cada viga decorreram ao longo de sensivelmente 45 minutos.

### Vigas com armadura em aço A400NR

A (Figura 84) mostra o desempenho estrutural de 3 vigas de betão reforçadas com armadura em aço A400NR à flexão.

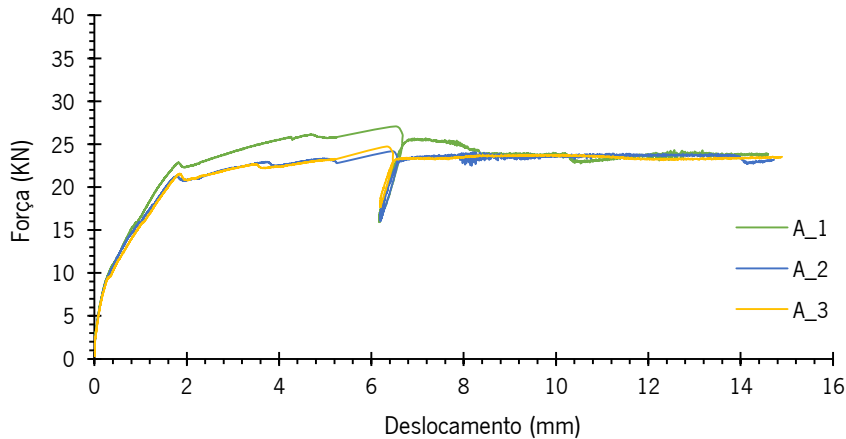


Figura 84 - Desempenho estrutural das vigas referência armadas com aço

A análise do comportamento das vigas reforçadas com armadura em aço A400NR, em termos de força de carregamento e deslocamento vertical, verifica um comportamento dúctil do elemento estrutural. Este cenário, tipicamente conhecido e vulgarmente estudado, proporciona a verificabilidade do conhecimento espetável no desempenho mecânico das vigas de betão armado com aço.

Mais ainda, o comportamento dúctil verificado no sistema porticado com vigas armadas com aço, revela a possibilidade de aviso prévio na deformada do elemento e a representação da segurança aparente em termos de prolongamento da capacidade de carga sem ocorrência do colapso estrutural por rotural frágil.

O esgotamento da capacidade resistente do betão à tração verifica-se inferior aos 5KN, como mostado no (Figura 84), com a primeira mudança de comportamento registado entre os 0KN e os 5KN, deslocamento.

A capacidade resistente do reforço em aço depois de atingir o esgotamento da fase elástica (0- $\pm 21$ KN) e origem de rótulas plásticas, fase plástica aos  $\pm 21$ KN, mantém uma tendência crescente de incremento de carga nas três vigas ensaiadas, até se atingir a rotura por esmagamento da lâmina superior de compressão do betão. Tal fenómeno é verificado depois de vencida a deformação vertical a meio vão de 6mm, e o interrompimento da linearidade força – deslocamento.

Mesmo depois do betão esgotar a capacidade resistente à compressão, o reforço em aço foi capaz de estabilizar a perda de carga, mantendo uma tendência constante até ao limite da resistência à tração do aço e rotura total da secção, cerca dos 16mm de deslocamento.

A (Figura 85) apresenta o padrão de abertura de fissuras da viga A2 (viga 2) de betão, reforçada com armadura em aço A400NR à flexão durante o carregamento e até à rotura por esmagamento do betão.



Figura 85 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de aço (a-fase plástica; b – fase elástica; c – esmagamento betão).

O padrão de fissuração registado visualmente durante os ensaios de flexão em vigas de aço (Figura 85), pode ser dividido em duas fases. A primeira fase (a) está localizada na fase elástica e a segunda na fase plástica (b).

No caso da viga A2 (viga 2 de aço), a ocorrência da primeira fissura representativa visível a olho nu verificou-se aos 12.6kN (a), não reproduzindo a veracidade dos resultados numéricos, mas considerado normal para a não utilização de equipamentos específicos de medição. Contudo, e de acordo com o esperado, a representação do padrão de fissuras da viga, indica a rotura do elemento por esforço de flexão, descrito pela verticalidade do surgimento das fissuras a meio vão. Posteriormente, e de acordo com os resultados numéricos, a segunda fase de abertura de fendas em vigas de aço, está relacionada com a fase plástica dos varões de reforço em aço. Esta fase é caracterizada pelo encaminhamento das fissuras existente na direção do ponto de aplicação de

carga e ocorrência de novas fissuras paralelamente às existentes na direção dos apoios. Este fenómeno provocado pela elavação do eixo neutro da secção, conduziu à diminuição da área da lâmina de compressão do betão e conseqüente destruição por esmagamento (c).

### Vigas com armadura BCR1 – Fibras de vidro

A (Figura 86) mostra o desempenho estrutural de 3 vigas de betão reforçadas com armadura BCR1 à flexão.

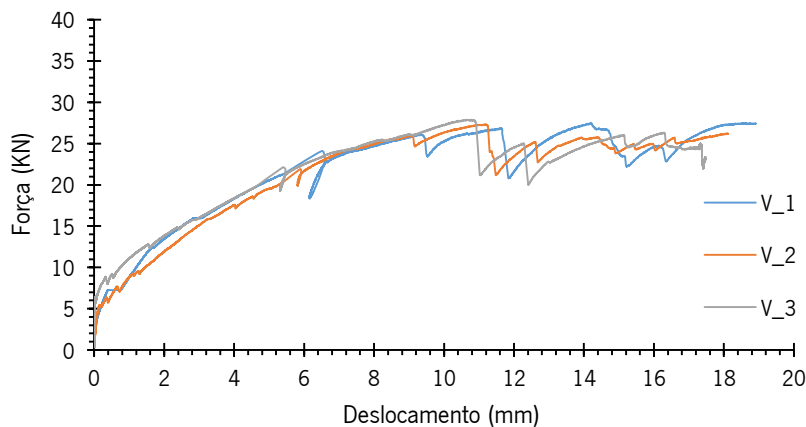


Figura 86 - Desempenho estrutural das vigas armadas com BCR1 – Fibras de vidro

O comportamento das vigas reforço em varões de fibra de vidro (BCR1) (Figura 86), mostra um comportamento pseudúctil durante o carregamento. Este comportamento é verificável entre o esgotamento da capacidade resistente do betão à tração, cerca dos 5kN, e o esmagamento da lâmina superior do betão, depois dos 20kN.

O elemento reforçado com 100% fibra de vidro adota uma tendência de curva força-deslocamento interessante, com a verificação de uma tendência de deformação pseudodúctil e contínuo incremento de carga, não ocorrendo a rotura dos varões mesmo depois do esmagamento do betão.

Mais ainda, o ruído da curva de carregamento e o comportamento pseudodúctil, indica ser provocada pelo entrançado dos varões BCR1, adotando um funcionamento solidário em colaboração com as fibras. O comportamento solidário é verificável na transmissão de esforços entre o núcleo do reforço e o revestimento entrançado, que por sua vez, transmite e incrementa no betão os esforços a que está sujeito a diferentes patamares de carga. Por isto, podemos também afirmar que a representatividade do comportamento dos varões BCR1 como armadura de betão

armado anula o comportamento linear elástico até à rotura, característico dos varões de fibras de vidro quando utilizada a esforços de tranção individuais.

Esgotada a resistência mecânica do betão à compressão, os varões BCR1 foram capazes de sustentar a rotura frágil do elemento em betão, mostrando o potencial de resistência a forças de tração.

A (Figura 87) apresenta o padrão de abertura de fissuras da viga V1 (viga 1) de betão, reforçada com armadura BCR1 à flexão durante o carregamento e até à rotura por esmagamento do betão.



**Figura 87 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de armadura BCR1 (a - primeira fissura; b - pré-esmagamento do betão; c - esmagamento do betão).**

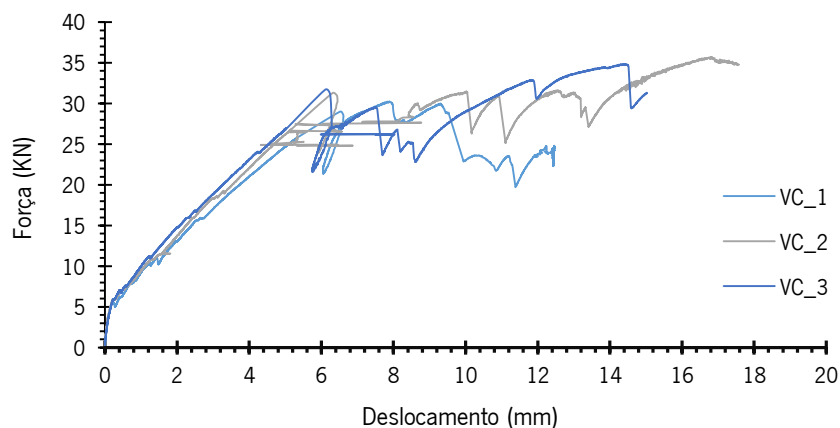
O padrão de fissuração mostrado no (Figura 87), expõe a marcação da primeira fissura representativa registada a olho nu, com a carga de 6.4kN (a). O padrão de abertura de fendas indica a rotura da secção por esforços de flexão, com fendilhação vertical a meio vão e abertura de fendas progressivamente e lateralmente à primeira fenda, para ambos os lados em direção aos apoios. Assim, podemos afirmar que a rotura final da secção aconteceu por esforços de corte. Posteriormente, foi verificável a progressão das primeiras fissuras para o ponto de aplicação de carga, e a ramificação de abertura de pequenas fissuras que perfazem diagonais em direção às primeiras e direcionadas para os apoios (b). Este fenómeno é descrito na bibliografia de referência como seja a existência de redistribuição de esforços dos elementos armados, (LNEC, 2010).



Mais ainda, como observado na fase final da resistência do betão à compressão (b), verificou-se a presença de um arco de compressão com o centro do arco a coincidir com ponto de aplicação da carga e encaminhamento na direção dos apoios, caracterizando a redistribuição dos esforços de flexão e conseqüente rotura do betão (c).

### Vigas com armadura BCR2 – Fibras de vidro e carbono

A (Figura 88) mostra o desempenho estrutural de 3 vigas de betão reforçadas com armadura BCR2 à flexão.



**Figura 88 - Desempenho estrutural das vigas armadas com BCR2 – Fibras de vidro e carbono**

O comportamento das vigas com reforço em varões de fibra de vidro e fibra de carbono (BCR2) (Figura 88), mostra um desempenho mecânico linear elástico até à rotura da secção por esmagamento da lâmina superior em betão.

Este fenómeno, tipicamente conhecido e estudado pela comunidade científica para materiais compósitos, é reproduzido nesta série de vigas e representado durante os ensaios seguidamente do esgotamento da capacidade resistente do betão à tração, aproximadamente aos 5kN de força de carregamento. Após o esgotamento da capacidade resistente do betão, as vigas armadas com armadura compósita BCR2, demonstram uma tendência linear crescente de incremento de carga, não sendo verificável comportamento dúctil ou pseudoductilidade do elemento estrutural na relação direta força – deslocamento.

Numa perspetiva de análise à definição gráfica força – deslocamento, podemos apurar que a linearidade do desempenho mecânico é caracterizado por duas fases, compreendidas entre a abertura das primeiras fissuras, com o esgotamento da resistência do betão à tração e o esmagamento do betão à compressão. Este intervalo do comportamento linear elástico mostra

duas fases do desempenho mecânico, onde as linhas que definem o carregamento das vigas sugerem a interferência do revestimento entrançado e a inexistência desta interferência.

Neste sentido, a análise da (Figura 88) mostra existir impulso de ductilidade justificada pela não linearidade do carregamento até se esgotar os 15KN de força de carregamento e cerca de 3mm de deslocamento. Superado este patamar de resistência mecânica, e até à rotura do betão, a linearidade das linhas que definem a força – deslocamento pode significar a ausência de impulso de ductilidade implementada pela superfície entrançada exterior.

Pode então ser entendido que o revestimento entrançado do reforço à flexão deixou de funcionar como revestimento dúctil, e com capacidade de transmitir a carga ao núcleo. As fibras adotaram um comportamento linear elástico até à rotura prematura do betão.

Esgotada a resistência mecânica do betão à compressão, os varões BCR2 foram capazes de sustentar a rotura frágil do elemento em betão, mostrando o potencial de resistência a forças de tração.

A (Figura 89) apresenta o padrão de abertura de fissuras da viga VC1 (viga 1) de betão, reforçada com armadura BCR2 à flexão durante o carregamento e até à rotura por esmagamento do betão.

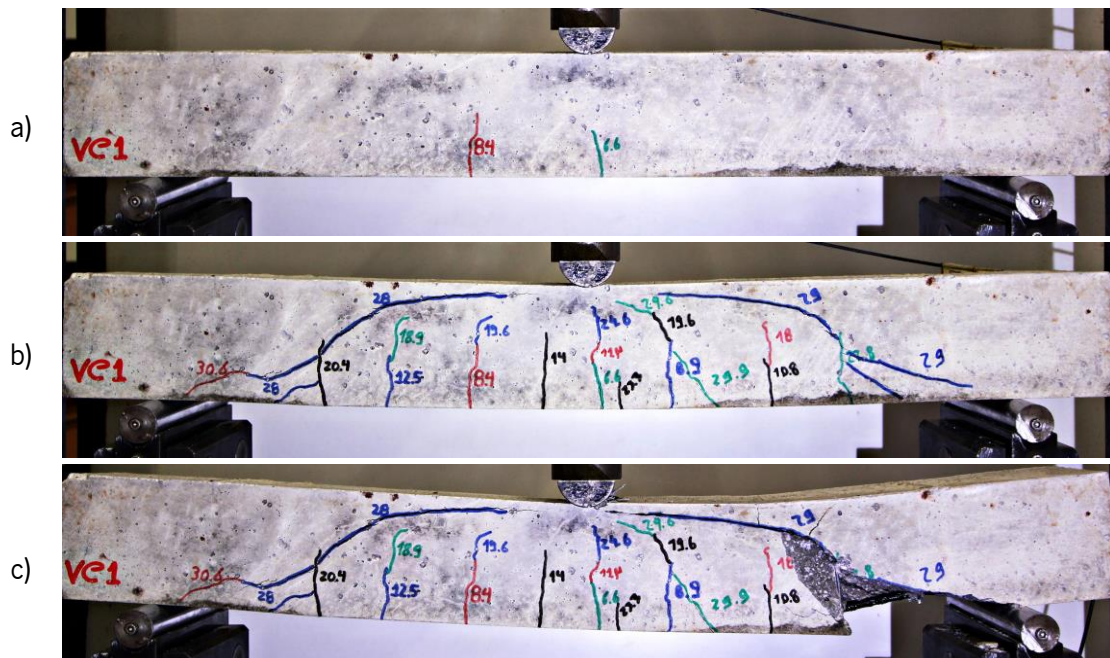


Figura 89 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de armadura BCR2 (a - primeira fissura; b - pré-esmagamento do betão; c - esmagamento do betão).

O padrão de fissuração mostrado no (Figura 89), expõe a marcação da primeira fissura representativa registada a olho nu, com a carga de 6.6KN (a). O padrão de abertura de fendas indica a rotura da secção por esforços de flexão, com fendilhação vertical a meio vão e abertura



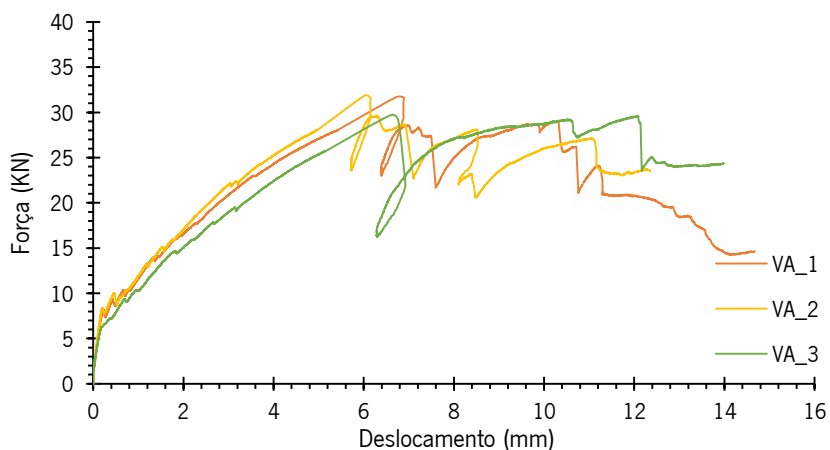
de fendas progressivamente e lateralmente à primeira fenda, para ambos os lados em direção aos apoios. Assim, podemos afirmar que a rotura final da secção aconteceu por esforços de corte.

Posterior, foi verificável a progressão das primeiras fissuras para o ponto de aplicação de carga, demonstrando elevação da posição do eixo neutro da secção e conseqüente redução da área de compressão no betão (b).

Para além disso, como observado na fase final da resistência do betão à compressão (b), verificou-se a presença de um arco de compressão bem definido com o centro do arco a coincidir com ponto de aplicação da carga e encaminhamento na direção dos apoios, caracterizando a redistribuição dos esforços de flexão e conseqüente rotura do betão, (LNEC, 2010), (c).

### Vigas com armadura BCR3 – Fibras de vidro e fio de aço

A (Figura 90) mostra o desempenho estrutural de 3 vigas de betão reforçadas com armadura BCR3 à flexão.



**Figura 90 - Desempenho estrutural das vigas armadas com BCR3 – Fibras de vidro e fio de aço**

O comportamento das vigas com reforço em varões de fibra de vidro e fio de aço (BCR3) (Figura 90), demonstra pseudoductilidade no seu comportamento mecânico e caracteriza-se por duas fases bem definidas durante o carregamento. A primeira fase é posicionada depois do esgotamento da resistência do betão à tração, 5KN, e até aos 10KN, e a segunda fase, com início no final da anterior e até à rotura parcial por esmagamento do betão à compressão.

O reforço BCR3 com incorporação de um filamento de aço A500EL com 3mm de diâmetro mostra um patamar de cedência do aço bem definido, verificando-se com um carregamento de cerca de 8KN a 10KN, a partir do qual o aço plastifica e as fibras de vidro adotam a postura de reforço

lider. A influência da introdução do filamento de aço cria um visível comportamento dúctil até ao esgotamento elástico em tração do fio de aço, 8 e 10KN.

Por outro lado, a influência do aço é verificável até cerca dos 20KN, onde teoricamente o aço está plastificado e as fibras de vidro assumem a liderança no domínio da resistência do elemento à força de flexão incrementada a meio vão. Nesta transição e até à aparente rotura do filamento de aço, superior aos 20KN, o revestimento entrançado do varão composto híbrido, ainda demonstra ter capacidade de transmitir ao núcleo as solicitações mecânicas de resistência à tração, criando pseudoductilidade com a deteoração da rugosidade de aderência ao betão.

Superada a teórica plasticidade do aço e a degradação do revestimento entrançado, podemos observar a demonstração contínua do comportamento pseudodúctil assomida pela fibra de vidro, mas num desempenho linear isento da interferência do filamento de aço e do revestimento entrançado, justificado pela observação limpa força – deslocamento.

Esgotada a resistência mecânica do betão à compressão, os varões BCR3 foram capazes de sustentar a rotura frágil do elemento em betão, mostrando o potencial de resistência a forças de tração.

A (Figura 91) apresenta o padrão de abertura de fissuras da viga VA1 (viga 1) de betão, reforçada com armadura BCR3 à flexão durante o carregamento e até à rotura por esmagamento do betão

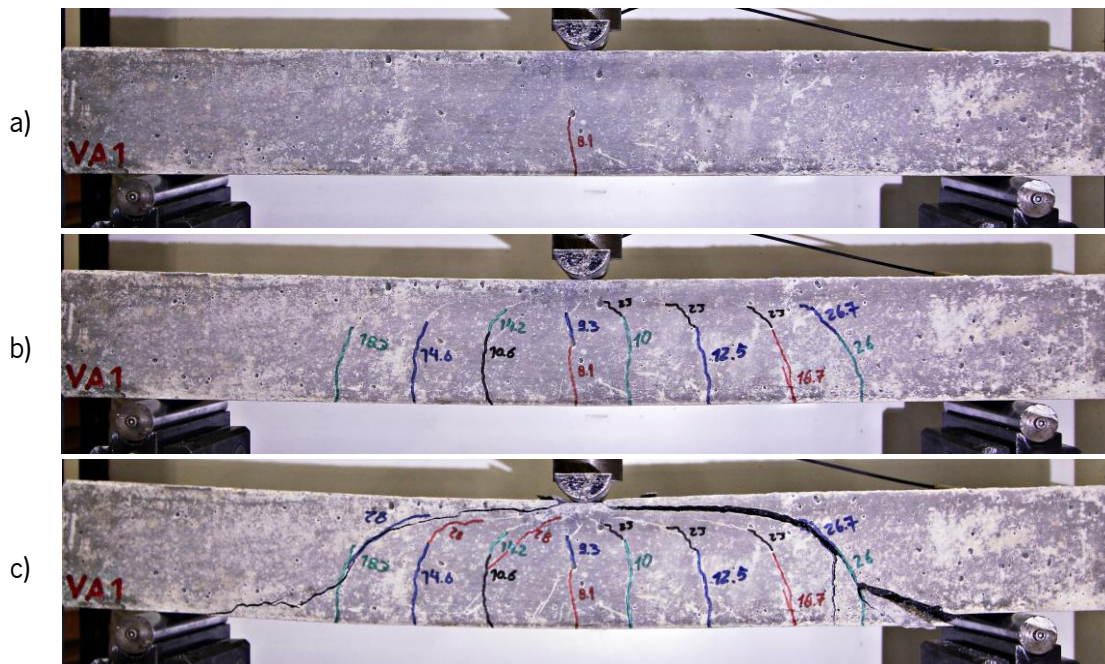


Figura 91 - Padrão fissuração laboratorial tipo em vigas de armadura BCR3 (a - primeira fissura; b - pré-esmagamento do betão; c - esmagamento do betão).

O padrão de fissuração mostrado no (Figura 91), expõe a marcação da primeira fissura representativa registada a olho nu, com a carga de 8.1KN (a). O padrão de abertura de fendas indica a rotura da secção por esforços de flexão, com fendilhação vertical a meio vão e abertura de fendas progressivamente e lateralmente à primeira fenda, para ambos os lados em direção aos apoios. Assim, podemos afirmar que a rotura final da secção aconteceu por esforços de corte.

Posterior, foi verificável a progressão das primeiras fissuras para o ponto de aplicação de carga, demonstrando elevação da posição do eixo neutro da secção e consequente redução da área de compressão no betão (b).

Para além disso, verificou-se a presença de um arco de compressão bem definido com o centro do arco a coincidir com ponto de aplicação da carga e encaminhamento na direção dos apoios, caracterizando a redistribuição dos esforços de flexão e consequente rotura do betão, (LNEC, 2010), (c).

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente subcapítulo tem a finalidade de apresentar uma visão macro e micro dos resultados alcançados na caracterização de um potencial reforço para substituir o aço nas estruturas de betão armado. Para tal, os resultados de seguida descritos e mostrados, são o resumo dos resultados individuais transformados em médias, que visam medir o desempenho dos varões em termos individuais e integrados como reforço de elementos de betão armado.

Os resultados mostrados estão focados no principal objetivo do programa laboratorial, sendo cronologicamente a capacidade de aderência dos varões à matriz cimentícia e a capacidade de transferência de cargas entre materiais; o comportamento estrutural das vigas armadas com diferentes tipos de reforço, e a relação entre o comportamento mecânico individual dos varões quando sujeitos a forças de tração pura, com a manifestação desse mesmo comportamento quando integrados em elementos de betão.

É ainda de salientar, que a interpretação dos resultados alcançados tem como referência o comportamento do reforço tradicional em aço, sendo o seu desempenho mecânico, o desafio a atingir pela comunidade científica com o uso de materiais inovadores.

### 7.1 Ensaio de aderência – Pull-Out

O presente subcapítulo mostra o resumo dos resultados atingidos pelos ensaios de pul – out e apresenta conclusões quanto ao potencial dos varões BCR no incremento de uma solução válida e credível, na mitigação das dificuldades de aderência dos varões compósitos ao betão. Os comentários apresentados são justificativos da aderência atingida por diferentes tipos de varões de reforço, mas o mesmo comprimento de aderência ao betão, 60mm.

A capacidade de resistente média dos varões de aço ao ensaio de aderência posicionou-se nos 12MPa, enquanto os varões BCR assumem a liderança destacada quando comparados com os varões de referência em aço. A resistência dos varões BCR, nomeadamente em termos de resistência máxima em tração por aderência ao betão, mostra uma gama de resultados médios de 20MPa para tensões de aderência ao betão, (Figura 92).

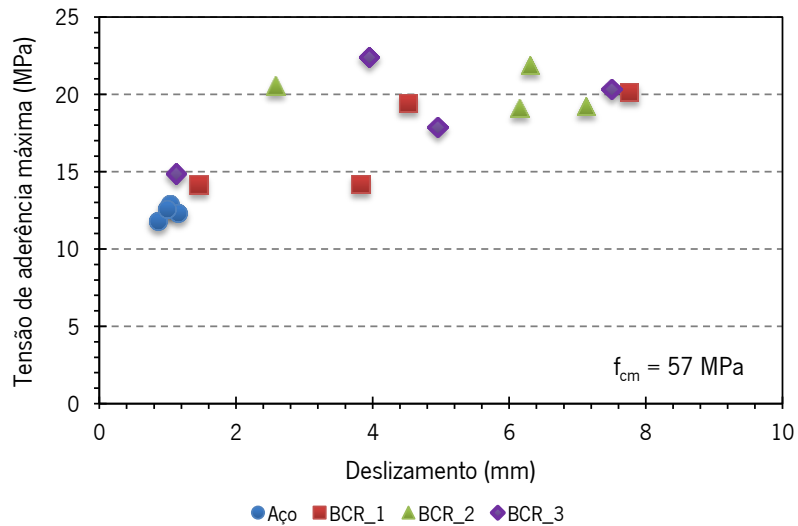


Figura 92 - Tensão de aderência máxima, pull – out

A ocorrência do deslizamento nos varões de aço por ensaio de pull – out, ocorreu por plastificação do varão e esgotamento da capacidade resistente do betão na zona de imbricamento ao betão, potenciando o deslizamento brusco dos varões. A plastificação dos varões de aço foi avaliada e confirmada pela medição do final do comprimento dos varões, após verificado o arrancamento total do betão.

Este deslizamento ocorreu em média, aos 12 MPa de tensão de aderência e um deslizamento de 0.9 mm para os varões de aço, (Figura 93).

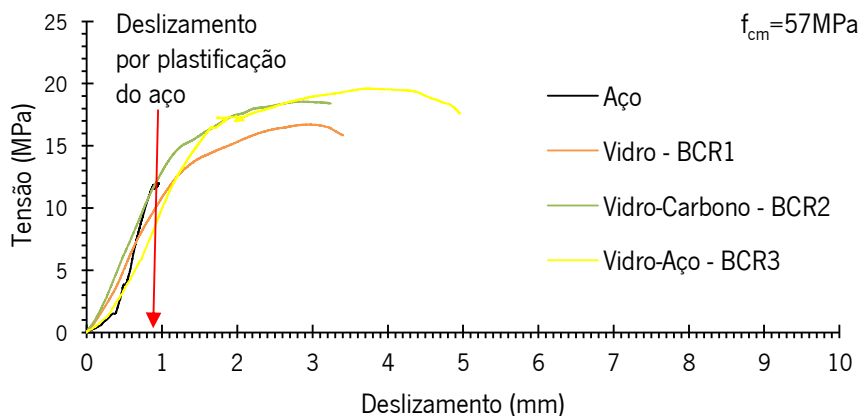


Figura 93 - Comportamento dos varões por ensaio de aderência, pull - out

Tal comportamento dos ensaios em varões de aço é mostrado com o término repentino da capacidade resistente em tração, e observado durante o procedimento de ensaio. Por isto, a

resistência em tração é ascendente até se atingir o deslizamento total dos varões, não sendo verificada capacidade de carga em deslizamento contínuo descendente.

Por outro lado, os provetes pull - out com utilização de varões compósitos BCR, obtiveram excelente comportamento de imbricamento ao betão, com resultados todos superiores ao aço, em termos de capacidade máxima resistente em tração.

Como tal, e numa primeira análise, podemos afirmar que a inovadora rugosidade, incrementada pelo processo de entrançamento BCR, é capaz de mitigar a fraqueza de aderência dos varões compósitos, incorporando extraordinárias características físicas de resistência mecânica, quando introduzidos no betão. Mais ainda, a capacidade de aderência dos varões ao betão é suficientemente competente para imprimir aderência igual e superior aos varões em aço e capaz de mobilizar a resistência do betão aos esforços de compressão, (Figura 94).



a) Corte provete pull - out

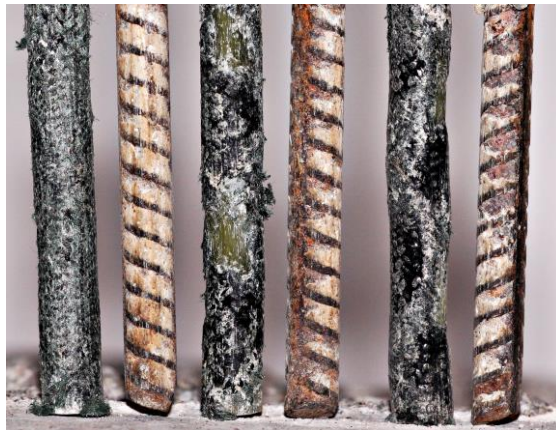
b) Entrançado BCR moldado no betão

**Figura 94 - Pormenor interior provete pull - out com varão BCR**

Por outro lado, é valioso observar e analisar o comportamento dos varões BCR aos ensaios de pull - out, comparando-os entre si. O revestimento entrançado em torno do núcleo dos varões BCR, foi construído para toda a amostra de varões BCR com a mesma tecnologia, mas diferente composição do núcleo de reforço. Assim, as propriedades mecânicas dos varões estudadas anteriormente, nomeadamente a rigidez que é medida pelo módulo de elasticidade, introduz uma nova perspetiva de análise.

O varão BCR1, com um módulo de elasticidade cerca de 25% do aço A400NR, mostra o resultado mais desfavorável entre os varões compósitos ao ensaio de pull - out, mas superior ao aço em termos de tensão de aderência máxima. A capacidade de carga dos varões BCR2 e BCR3, com cerca de 50% da rigidez do aço, mostram semelhante capacidade de carga desde o início do ensaio, igualando-se depois dos 15MPa de tensão de aderência, (Figura 93).

Podemos então afirmar, e segundo estes resultados, que a rigidez dos varões influencia a resistência em tração com o comportamento do núcleo a definir diretamente os resultados obtidos. A rigidez do material, medido pelo módulo de elasticidade dos varões, justifica o maior ou menor alongamento da secção e conseqüente diminuição da secção transversal. Este fenómeno verificado nos materiais em que o alongamento axial é acompanhado por uma contração lateral, dota a superfície entrançada da habilidade para criar trabalho na aderência ao betão. Deste modo, a resistência às tensões de tração incrementadas entre o varão e o betão, proporciona o teórico objetivo de transferência de cargas entre o betão e o material de reforço.



**Figura 95 - Varões arrancados do betão, BCR e aço**

Como mostrado na (Figura 95), amostras de varões de aço (cor castanha) e varões BCR (cor preta) arrancados do betão por ensaio de pull – out, estes, exibem diferentes características de aparência visual e física no acabamento superficial dos varões.

Os varões de aço A400NR, e a sua rugosidade largamente conhecida e estudada, mostra a existência de betão amarrado ao varão entre a superfície rugosa de alta aderência, que se entende como seja a capacidade que estes mostram para esgotar a capacidade de resistência à compressão do betão.

Numa outra perspetiva e no maior desafio da comunidade científica, os varões BCR com a inovadora técnica de entrançamento, mostram a extraordinária capacidade de resiliência do entrançado às agressões provocadas no interior do betão quando solicitado no ensaio de pull – out. O entrançado apresenta danos pontuais ao longo do comprimento de aderência, mas solidário com o núcleo de reforço, não sendo verificável destacamento entre núcleo e o revestimento, e conseqüente deslizamento do núcleo no interior do entrançado.



Estas conclusões são aplicáveis para o comprimento de aderência estudado (60mm), onde é mostrada a fiabilidade e sucesso da técnica de entrançamento para suprimir a dificuldade de aderência dos varões compósitos ao betão, assim como, a capacidade de transferência de cargas entre diferentes materiais.

Por isto, existe um trabalho mecânico de cooperação fiel entre a capacidade do entrançado resistir e criar aderência ao betão, como, transferir estas solicitações mecânicas diretamente ao núcleo de reforço. Perante a validação deste comportamento, a rugosidade incutida nos varões produzidos e estudados, é capaz de conceder aderência igual ou superior aos varões de aço com o mesmo diâmetro.

## **7.2 Ensaio de flexão em vigas**

O presente subcapítulo mostra o resumo dos resultados atingidos pelos ensaios de flexão em vigas de betão reforçadas a esforços de flexão com armadura de varões de aço e armadura de varões em material compósito BCR.

Por outro lado, apresenta conclusões quanto ao potencial dos varões BCR no incremento de uma solução válida e credível, na mitigação das dificuldades para promover a existência de um comportamento pseudodúctil nos elementos de betão armado com armadura em material compósito.

A abertura de fendas em todas as vigas aconteceu sempre por efeito mecânico de flexão, com abertura da primeira fenda a meio vão, correspondendo ao objetivo do sub dimensionamento realizado através do cálculo elástico do reforço referência em aço, e propagação da fissura na direção vertical, alongando-se na secção em diferentes patamares de carga.

O registo da ocorrência deste fenómeno, criou em todas as vigas o aparecimento de um arco de compressão bem definido, em forma de leque, com o centro geométrico a coincidir com o ponto de aplicação da carga, ou seja, foi a trajectória das compressões principais.

O aparecimento do arco de compressão do betão, indica a redistribuição de esforços da secção, mas também a garantia que o reforço resistente ao esforço transversal demonstrou o comportamento esperado, não ocorrendo a destruição de nenhuma viga por rotura devido ao fenómeno de esforço transversal.



O comportamento registado nas vigas armadas à flexão com reforço em aço, obteve um comportamento ligeiramente diferenciado das vigas armadas com reforço BCR, quanto ao encaminhamento das fissuras em direção aos apoios.

Tal facto, está relacionado com o dimensionamento ao esforço transversal, que no caso das vigas referências foi capaz de confinar a abertura de fendas apenas a meio vão e levando os varões de aço à total rotura.

As vigas armadas com armadura em BCR, o mesmo comportamento foi verificado numa fase inicial até um patamar de carga suficientemente elevado capaz de variar bruscamente a posição do eixo neutro. O posicionamento do eixo neutro, que faz a separação entre a zona tracionada e a zona comprimida da secção, é variável e totalmente influenciado no seu movimento posicional pela rigidez da peça de betão armado (betão e reforço).

A conjugação possível de fatores como a menor rigidez dos varões BCR, maior alongamento elástico e a distribuição uniforme de esforços ao longo do núcleo do varão, mobilizou a presença do reforço ao esforço transversal, estribos, manifestando-se a abertura de fendas paralelamente na secção e segundo espaçamento semelhante.

Assim, a mobilização da resistência mecânica dos varões ao esforço de tração, conduziu ao início de uma redistribuição de esforço com a abertura parcelar de fissuras com encaminhamento aos apoios.

Este fenómeno está de acordo com o esperado, balizando e conferindo a credibilidade do dimensionamento dos estribos, sendo caracterizado em estruturas de betão armado pelo efeito mecânico de flexão.

O aviso da cedência das vigas por esmagamento da lâmina superior de compressão do betão, foi antecedido em todas as vigas com reforço em varões BCR e varões de aço, pelo encaminhamento das fissuras para o ponto de aplicação da carga. Mais ainda, a cedência das vigas por esmagamento do betão, independentemente do tipo de reforço, ocorreu pouco depois de se esgotar os 6mm de deformação vertical, (Figura 96).

Até se atingir este patamar de carga, e por forma a conhecer o comportamento mecânico das vigas de betão com incorporação de armadura longitudinal de flexão em material BCR, procura-se entender de que forma o revestimento entrançado dos varões BCR e a hibridação do núcleo dos

varões, influencia e incrementa a existência de um comportamento de pseudoductilidade nos elementos de betão.

O objetivo em atingir a existência de um comportamento pseudodúctil nos elementos de betão armado segundo os indicadores apontados (entrançado e hibridação do núcleo), e conforme a observação da Figura 96, a pseudoductilidade pela intervenção do revestimento entrançado está associado a inferiores patamares de carga e o maior responsável, será o núcleo do reforço.

Desta forma, até ao patamar de 15KN é real a influência do revestimento entrançado no potenciamento de pseudoductilidade das vigas de betão, como mostrado no desempenho mecânico das vigas com armadura BCR1, BCR2 e BCR3, (Figura 96 e Figura 97), através dos diferentes patamares de carga mostrados.

Quando esgotado este limite, o varão BCR3 com núcleo em fibra de vidro e fio de aço, é justificativo da importância da incorporação de materiais dúcteis na composição dos varões compostos. Este resultado, mostra um claro comportamento pseudodúctil das vigas armadas com armadura compósita BCR3 até à rotura por esmagamento do betão.

A hibridização do núcleo do BCR2 não é visível na observação da Figura 96 e Figura 97, uma vez que não são verificados diferentes patamares de rotura, correspondentes à distinta resistência de tração das fibras de vidro e fibras de carbono.

Por outro lado, as vigas com armadura BCR2 e BCR3, obtém em termos de resistência máxima de flexão e deslocamento, resultados muito idênticos, (Figura 96).

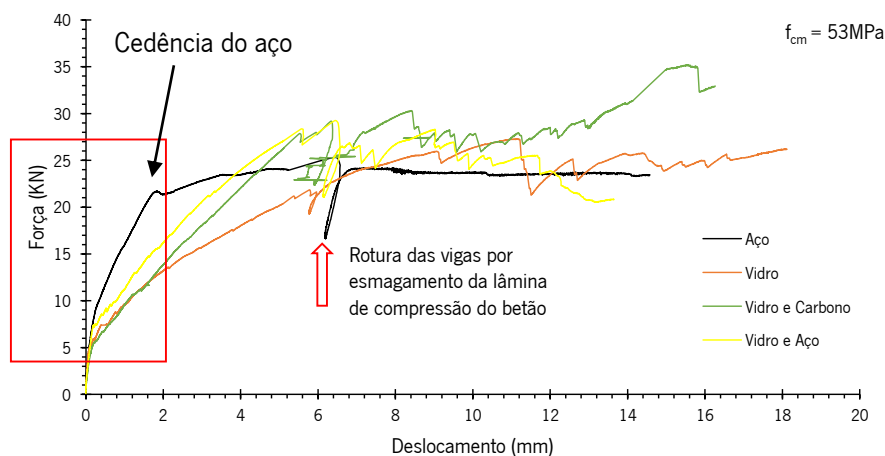


Figura 96 - Conclusões dos ensaios de flexão em vigas força - deslocamento

O esmagamento do betão ( $f_{cm}=53\text{MPa}$ ) foi o limitador do estudo executado, sendo o indicador que parametriza o conhecimento à sua resistência máxima à compressão. Neste contexto, a relação força - deslocamento, e encurvadura - momento fletor, são definidores do potencial individual que cada reforço BCR apresenta para substituir o aço no reforço de estruturas de betão armado.

Depois do esmagamento do betão, todos os reforços foram capazes de resistir à agressão da rotura do betão, estabilizar e até aumentar a capacidade resistente em flexão até nova rotura do betão, não se verificando roturas frágeis dos elementos.

As vigas armadas com armadura em varões compósitos apresentam distinto comportamento mecânico força - deslocamento, sendo justificados pelo tipo de composição do núcleo de reforço e consequentemente a maior ou menor rigidez. Comparado com a armadura referência em aço, e o conhecimento das propriedades mecânicas ao nível da rigidez (módulo elasticidade) inferiores ao aço, verifica-se numa primeira fase uma maior curvatura para a mesma carga, (Tabela 28).

**Tabela 28 - Conclusões ensaios de flexão em vigas, força – deslocamento**

Viga	Carga cedência do aço (1,78mm) (kN)	Dif.(viga aço - viga BCR) kN	Capacidade de carga (%)	Carga rotura esmagamento betão (kN)	Dif.(viga aço - viga BCR) (kN)	Capacidade de carga (%)	Deslocamento rotura (mm)
Aço - A	21,63	0,00	0 %	25,32	0,00	0	6,38
BCR1 - V	12,52	9,11	- 42,12 %	21,18	-4,14	- 16,35 %	5,81
BCR2 - VC	12,77	8,86	- 40,96 %	29,22	3,90	+ 15,40 %	6,42
BCR3 - VA	15,41	6,23	- 28,78 %	28,90	3,58	+ 14,14 %	6,52

A carga de cedência em vigas de aço, e segundo uma análise comparativa entre diferentes tipos de reforços, posiciona-se num valor médio de carga de flexão de 21.63KN, para um deslocamento de 1.78mm. Assim, na altura da cedência do aço, as vigas com armadura BCR mostram resultados inferiores de capacidade de carga para a mesma deformação a meio vão, estando compreendida entre os 28.78% e os 42.12%, (Tabela 28).

O melhor resultado atingido com vigas reforçadas com reforço BCR comparativamente com a cedência dos varões em aço foi a armadura de BCR3, com resultados inferiores de 28.78% da capacidade de carga do aço.

Quando atingido o esgotamento da capacidade resistente do betão à compressão, existe uma clara aproximação de comportamento mecânico entre vigas com armadura de aço e armaduras de BCR, confirmando-se a superioridade das armaduras BCR2 e BCR3 aquando do esmagamento do betão. Assim, a relação entre a capacidade de carga – deformação (Figura 96) nos elementos de betão reforçados com material compósito BCR2 e BCR3, mostra um desempenho mecânico superior

entre 14.14% e 15.40%, comparativamente com o desempenho mecânico dos elementos de betão reforçados com aço A400NR, (Tabela 28).

Mais ainda, a diferença com o aço de 16.35% relativamente à armadura BCR1, pode ser entendida como positiva porque mostra menor deformação, e negativa, porque a carga de rotura é inferior ao aço.

Numa visão simplificada na análise da Figura 96 e Figura 97, o modelo de viga que se encontra mais próximo das vigas com armadura de aço, é o reforço que se define como o melhor substituto do reforço tradicional em aço. Esta perspetiva é uma análise que quantifica a rigidez inicial do reforço e conseqüentemente a ridez do elemento de betão quando solicitado a esforços de tração.

Como é possível constatar na Figura 96 e Figura 97, as vigas de betão com armadura BCR mostram maior deformação para o mesmo nível de carga até uma determinada fase de carregamento, superando –se na armadura BCR2 e BCR3 quando o aço já mostra fase plástica de desempenho mecânico estrutural, (Tabela 29).

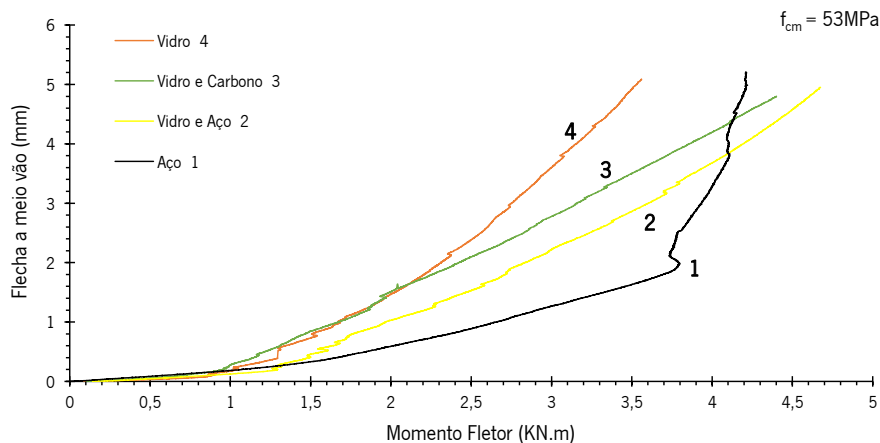


Figura 97 - Conclusões dos ensaios de flexão em vigas, flecha - momento fletor

A (Tabela 29) apresenta a quantificação numérica dos resultados verificados no cálculo flecha-momento fletor em vigas reforçadas com reforço em aço e reforço BCR.

Tabela 29 - Conclusões ensaios de flexão em vigas, flecha - momento fletor

Viga	Momento cedência do aço (1,78mm) (KN.m)	Dif.(viga aço - viga BCR) (kN)	Momento rotura esmagamento betão (KN.m)	Dif.(viga aço - viga BCR) (kN)	Deslocamento rotura (mm)
Aço - A	3,79	0,00	4,43	0,00	6,38
BCR1 - V	2,19	1,59	3,71	-0,72	5,81
BCR2 - VC	2,24	1,55	5,11	0,68	6,42
BCR3 - VA	2,70	1,09	5,06	0,63	6,52

Perante a observação e análise dados descritos no presente trabalho laboratorial e quanto à capacidade da armadura BCR em mitigar o deslizamento dos varões compósitos no betão e incrementar pseudoductilidade no desempenho mecânico, podemos afirmar que:

- o revestimento entrançado dota os varões BCR de capacidade de aderência igual ou superior ao aço;
- o varão BCR3 é aquele que melhor desempenho mecânico demonstrou até próximo do esmagamento da lamina superior de compressão do betão;
- As armaduras construídas por reforço BCR 2 e BCR 3 mostram desempenho mecânico distinto e superior aquando da rotura do betão;
- o pior desempenho é verificado pela armadura totalmente em fibra de vidro, BCR 1, obtendo menor desempenho mecânico em termos de capacidade resistência a forças de flexão;
- Não foi verificável rotura frágil do reforço em nenhum elemento de betão. A rotura aconteceu por esmagamento da lâmina superior de compressão do betão;
- Existe pseudoductilidade originada pelo revestimento entrançado até um determinado patamar de carregamento, está bem definido, e o núcleo BCR com incorporação de material dúctil é o que obtém o melhor desempenho estrutural entre as armaduras compósitas.

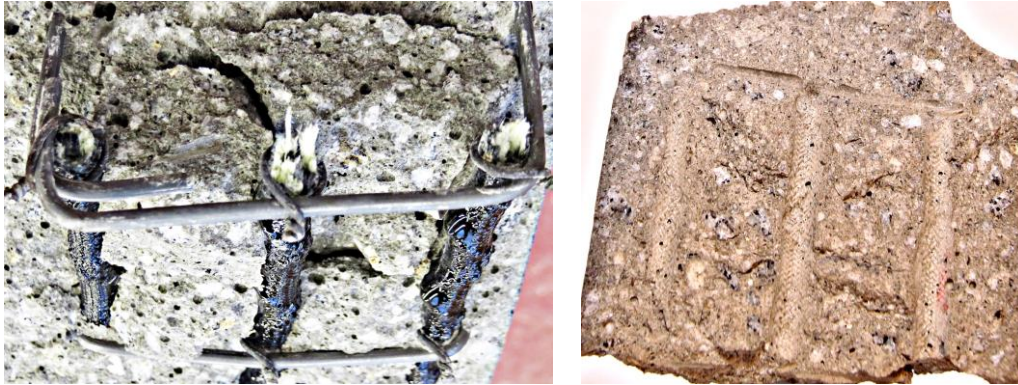
### **7.2.1 Ensaio destrutivo de flexão em vigas**

A rotura dos varões BCR não foi registada em nenhum dos ensaios realizados nas diferentes composições de armadura, uma vez que o betão foi o responsável pela definição do patamar de cedência.

Por sua vez, e com o objetivo de avaliar a solidariedade existente entre o núcleo e o revestimento entrançado BCR, assim como, a capacidade no uso da rugosidade para mobilização da resistência do betão à tração, foi decido tentar esgotar a capacidade resistente dos varões nas vigas com a aplicação de uma carga progressiva e continua a meio vão, uma velocidade de 0.1mm/s em todas as vigas de armadura BCR.

Para este ensaio destrutivo foi retirado todo o equipamento de medição de deslocamento vertical, a fim de garantir a integridade do material.

A carga máxima aplicada a cada elemento correspondeu à carga suportada por este na altura da cedência do betão e a rotura total dos varões BCR ocorreu apenas em três vigas com diferente composição do reforço à flexão pura, 100% vidro, vidro carbo e vidro/aço, (Figura 98).



a) Rotura total dos varões

b) Destaque recobrimento armadura

**Figura 98 - rotura total de viga à flexão**

À semelhança do que foi verificado nos ensaios de aderência, a armadura BCR fomenta a existência de trabalho mecânico de cooperação fiel entre a capacidade do entrançado resistir (Figura 98 (a)), e criar aderência ao betão (Figura 98 (b)), como, transferir estas solicitações mecânicas diretamente ao núcleo de reforço.

### 7.3 Trabalhos futuros

O presente trabalho é o resultada da investigação desenvolvida pelo grupo de investigação da Universidade do Minho, na busca e concretização do conhecimento sobre um potencial substituto dos varões de aço em estruturas de betão armado. Assim, apresentam-se de seguida algumas ideias pertinentes, após a implementação do presente programa laboratorial:

- Otimizar recursos materiais na caraterização dos varões BCR por ensaios de tração pura, utilizando outro tipo de resina que apresente um pico exotérmico de cura inferior. A resina utilizada é altamente exotérmica, o que dificulta o processo de moldagem das amostras;
- Utilizar resina com maior resistência mecânica para realização dos ensaios de pull-out, garantindo suficiente resistência entre equipamento hidráulico e ancoragem, capaz de esgotar a capacidade resistente de aderência dos varões BCR ao betão;

- Estudar a combinação de diferentes comprimentos de aderência dos varões BCR ao betão e diferente composição do núcleo em fibras, por forma a perceber em que nível de força de arrancamento, a composição do núcleo influencia o deslizamento do varão BCR no betão;
- Incorporação de fibras sustentáveis de alto módulo de elasticidade, incrementando rigidez aos varões BCR, traduzindo-se num desempenho mecânico estrutural de menor deformação para elevado patamar de carga;
- Avaliar a incorporação de fibras naturais no núcleo de reforço e combinação com o revestimento entrançado, incrementando um comportamento integrado na promoção do comportamento dúcteis diferenciados;
- Avaliar a proteção química do poliéster no varão compósito, tendo como referência a sua durabilidade e perda de propriedades mecânicas dentro e fora do ambiente do betão;
- Estudar a aplicação de armadura BCR no reforço de elementos de betão ao esforço transversal, utilizando armadura longitudinal em aço (pelo eficiente conhecimento existente) e focando todas as atenções no comportamentos aos esforços transversais ao alinhamento das fibras;
- Posteriormente, um trabalho mais elaborado com a junção das armaduras longitudinais e transversais BCR, elaborando um estudo comparativo com elementos de betão totalmente armados com BCR e Aço.

## 8. REFERÊNCIAS

NP EN 12390 - 2, 2009. Ensaio de betão endurecido parte 2: Execução e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica, Portugal: CEN.

NP EN 206-1, 2007. Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade., Portugal: CEN.

NP EN 933 - 1, 2000. Ensaio das propriedades geométricas do agregados. Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração, Portugal: CEN.

ACI 440.3R-04, A. C. I., 2004. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, CI 440R: American Concrete Institute.

Ahmadi, M. S. & Johari, M. S. e. M. S. M. E., 2009. An experimental study on mechanical properties of GFRP braid-pultruded composite rod. Em: eXPRESS Polymer Letters Vol.3 No.9. s.l.:s.n., p. 560–568.

Anon., 2006. The International Bureau for the standardisation of man-made fibers. Brussels, BISFA.

Aramid, T., 2015. [Online]

Available at: <http://www.teijinaramid.com/aramids/technora/>

Ayranci, C. & Carey, J., 2008. 2D braided composites: a review for stiffness critical applications. Composite Structures, pp. 43-58.

Bakis, E. C., Nanni, A., Terosky, J. A., 1996. Smart, pseudo-ductile reinforcing rods for concrete manufacture and test. Tucson, Arizona , s.n., pp. 95-108.

Bakis, C., Nanni, A. & Terosky, J., 2001. Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for Concrete applications. Elsevier - Composites Science and Technology, Volume 61, pp. 815-823.

Balaguru, P., Nanni, A. & Giancaspro, J., 2008. FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures, New York: Taylor & Francis.



- Balendran, R.V., et al, 2002. Application of FRP bars as reinforcement in civil engineering structures. Volume 20, pp. 62-72.
- Balseiro, A. M. R., 2007. Reforço e reabilitação de vigas de madeira, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Bank, L. C., 2006. Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials , New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Belarbi, A., et al., 2001. Smart fiber-reinforced polymer rods featuring improved ductility and health monitoring capabilities. Smart Materials Structures, Volume 10, pp. 427-431.
- Belarbi, A., Chandrashekhara, K. & Watkins, S., 1999. Manufacture and Performance Evaluation of FRP Rebar Featuring Ductility and Health Monitoring capability, Rolla, USA: University of Missouri.
- Benmoktane, B., Chaallalt, O. & Masmoudi, R., 1995. Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures. Em: Construction and Building Materials. s.l.:s.n., pp. 353-364.
- Bertolini, et al, 2005. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Weinheim: John Wiley & Sons.
- BS EN 14651, 2005. Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), French: BSI.
- BS EN 933-1, 1996. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution Sieving method, Reino Unido: British Standard.
- Bunsell, A. R., 2009. Handbook of tensile properties of textile and technical fibres.. New York: Woodhead publishing limited.
- C. 4. A., 2002. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures - ACI 440R-96, ACI 440R-96: American Concrete Institute.
- C. 4. A., 2006. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-06: American Concrete Institute.
- Ceroni, et all, 2006. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. Elsevier: Cement & Concrete Composites, Volume 28, p. 857–868.

CNR, 2007. CNR-DT 203/2006 - Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars., Roma, Italian: CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, .

Coutinho, S. A., 1988. "Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem" Tese de Doutoramento, Porto: FEUP.

Cui, Y. et al., 2008. Development of ductile composite reinforcement bars for concrete structures. Em: Materials and Structures. s.l.:RILEN, pp. 1509-1518.

Cunha, F., 2012. Tese Mestrado - Desenvolvimento de uma estrutura com materiais fibrosos para ser utilizada como reforço em paredes de alvenaria, Guimarães, Portugal: Universidade do Minho.

Cunha, F. et al., 2013. Development of Braided Fibrous Materials for Retrofitting Masonry Infill Walls. 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures, June 26-28, pp. 1-19.

Eamon; et al, 2012. Life-Cycle Cost Analysis of Alternative Reinforcement Materials for Bridge Superstructures Considering Cost and Maintenance Uncertainties. Volume 24, pp. 373-380.

EN 12504-3, 2005. Testing concrete in structures - Part 3: Determination of pull-out force., s.l.: CEN.

EN 14651, 2005. Test method for metallic fibered concret - Measuring the flexural tensile strenght, Brussels: CEN.

Fangueiro, R., Pereira, R. & Gonilho, C., 2011. Fibrous materials reinforced composite for internal reinforcement. Em: Fibrous and materials for civil engineering applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

Fangueiro, R., Sousa, G., Soutinho, F. & et al, 2006. Application of Braided Fibre Reinforced Composite Rods in Concrete Reinforcement. Volume 514-516, pp. 1556-1560.

Fib, 2007. FRP Reinforcement in RC Structures. Lausanne, Suíça, Technical report, Federation Internationale du Béton, Task Group 9.3.

Hampton, F., ko, F., F., K. & Harris, H., 1999. Creep, Stress, Rupture, and Behavior of a Ductile Hybrid FRP for Concrete Structures. Paris, s.n., p. 731.

Hampton, F. P. & e. t., 2007. Earthquake resistance of concrete columns reinforced with ductile hybrif fiber reinforced polymer (DHFRP). Philadelphia, USA, Drexel University.

Hao, Q., Yanlei, W. & Ou, J., 2008. Design recommendations for bond between GFRP/steel wire composite rebars and concrete. 11, Volume 30, pp. 3239-3246.

Harris, Harry G.; et al, 2000. Cyclic behavior of a second generation ductile hybrid fiber reinforced polymer (D-H-FRP) for earthquake resistente concrete structures. Auckland, Australia, 12th World Conference on Earthquake Engineering (12WCEE)..

Harris, H. G., Somboonsong, W. & Ko, F. K., 1998. New Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures. Journal of Composites for Construction, p. 28–37.

Henneke, M. J., 1993. Master Dissertation: Evaluation of hybrid reinforcement (Fiber-reinforced-plastic rod with steel core), s.l.: Pennsylvania State University : College of Engineering.

ISO 3310-2, 1999. Peneiras de teste - requisitos técnicos e de ensaio - Parte 2: peneiras de teste de placa de metal perfurada, s.l.: ISO.

JSCE, 1997. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials. s.l., Atsuhiko Machida, Tokyo.

Karbhari, V. M., 1988. Use of Composite Materials in Civil Infrastructure, Baltimore, Maryland: International Technology Research Institute.

Karbhar, I. V. M., 2007. Intoduction: the use of compositesin civil structural applications. Em: Durability of composites for civil structural applications. USA: Woodhead Publishing Limited.

Kretsis, G., 1987. A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics. Composites, Volume 18, pp. 13-23.

Lam, Hoa., et al, 1999. Design methodology of a ductile hybrid kevlar-carbon reinforced plastic for concrete structures by the braidtrusion process, Philadelphia: Drexel University.

Lees, J., 2001. Fibre-reinforced polymers in reinforced and prestressed concrete applications: moving forward. Em: Progress in Structural Engineering and Materials. s.l.:s.n., pp. 122-131.

LNEC - E397, 1993. Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão., Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

LNEC E397, 1993. Especificação LNEC. Betões. Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão, s.l.: LNEC.

LNEC, 2010. Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios., Caparica, Portugal: IPQ - Instituto Português da Qualidade.

Marques, A., 2011. Fibrous materials reinforced composites production techniques. Em: *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.

Martins, A., 2013. Soluções de Reforço Sísmico de Paredes de Alvenaria de Enchimento, Guimarães: Universidade do Minho.

Micelli, F. & Nanni, A., 2004. Durability of FRP rods for concrete structures. *Elsivier - Construction and Building Materials*, Volume 18, p. 491–503.

Moon, Do Young; et al, 2008. An exploratory study of GFRP rebar with ribs containing milled glass fibers. *Composites Part B: Engineering*, Volume 39, pp. 882-890.

Moreno, M., Morris, W., Alvarez, M. & Duffó, G., 2004. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions. Em: *Corrosion Science*. s.l.:s.n., pp. 2681-2699.

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

Nanni, A., Henneke, M. J., Okamoto, T., 1994. Tensile properties of hybrid rods for hybrid rods for concrete reinforcement. *Construction and building materials*, pp. 27-34.

Nanni, F., et al., 2006. Self-sensing CF-GFRP rods as mechanical reinforcement and sensors of concrete beams. *Smart Materials and structures*, Volume 16, p. 182–186.

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

Nanni, F.; et al, 2011. Effect of carbon black nanoparticle intrinsic properties on the self-monitoring performance of glass fibre reinforced composite rods. Elsevier - Composites Science and Technology, Volume 71, p. 1–8.

N. E. 1.-2., 2009. Ensaio de betão endurecido parte 2:Execução e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica, Portugal: CEN.

Nordin, H., 2003. Flexural Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Near Surface Mounted CFRP Rods, Sweden: Luleå University of Technology.

Nordin, H., 2005. Strengthening structures with externally prestressed tendons, Sweden: Luleå University of Technology.

NP 1379, 1976. Inertes para argamassas e betões. Análise granulométrica., Portugal: CEN.

NP EN 10002-1, 2006. Materiais metálicos: Ensaio de tração. Parte1: Método de ensaio à temperatura ambiente., Portugal: CEN.

NP EN 12350-2, 2009. Ensaio de betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento., Portugal: CEN.

NP EN 12390 - 4, 2009. Ensaio do betão endurecido. Parte4: Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio., Portugal: CEN.

NP EN 12390-1, 2009. Ensaio de betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaios de provetes e para os moldes., Portugal: CEN.

NP EN 12390-3, 2009. Ensaio de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio., Portugal: CEN.

NP EN 197-1, 2012. Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Portugal: CEN.

NP EN 480-1, 2007. Adjuvantes para betão, argamassas e caldas de injeção. Métodos de ensaio. Parte 1: Betão de referência e argamassas para ensaio, Portugal: CEN.

Oliveira, F., 2013. Varões compósitos híbridos fibra - aço, Guimarães, Portugal: Universidade do Minho.

- Pastore, C. M. & Ko, F. K., 1999. Braided Hybrid Composites for Bridge Repair, Philadelphia: Drexel University : National Textile Center Annual Report.
- Patinha, S. et al., 2014. Desenvolvimento e Caracterização de Varões Compósitos Híbridos para Reforço de Betão, Guimarães, Portuga: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis.
- Pereira, C. G. & al, e., 2010. Hybrid composite rods for concrete reinforcement.
- Pereira, R., 2014. Dissertação de Mestrado Construção e Reabilitação Sustentáveis - Controlo da Qualidade de Betões, Guimarães: Universidade do Minho.
- Pultrall, 2015. [Online]  
Available at: <http://www.pultrall.com/en/construction.asp>
- Quagliarini, E., Monni, F., Lenci, S. & Bondioli, F., 2012. Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution. Elsevier - Construction and Building Materials, Volume 34, pp. 372-380.
- Reis, V., 2009. Dissertação Mestrado: Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- RILEM, 1983. Bond test for reinforcement steel - 2 Pull-out test, Paris: COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON.
- RILEM, 1985. Determination of the fracture energy of mortar and concret by means of tree - point bend tests on notched beams, França: RILEM.
- RILEM, C. E.-I. D. B., 1983. Bond test for reinforcement steel - 2 Pull-out test, Paris: s.n.
- RILEM, C. E.-I. D. B., 1994. Determination of the fracture energy of mortar and concret by means of three-point bend tests on notched beams, Paris: s.n.
- Ruscito, G., et al., 2008. Health monitoring performances of FRP self-sensing composites rods in concrete beams. Zurich, Switzerland, s.n.
- Saikia, B., et al, 2005. Performance of hybrid rebars as longitudinal reinforcement in normal strength concrete. Materials and Structures, Volume 38, pp. 857-864.

- Shaat, A. A. S., 2007. Structural Behaviour of Steel Columns and Steel - Concrete Composite Girdes Retrofitted Using CFRP, Ontario, Canada: Queen's University Kingston.
- SILVA, B. V., BARBOSA, M. P., FILHO, L. C. P. S. & LORRAIN, M. S., 2013. Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: Part 1. Ibracon Structures and Materials Journal, Volume 6, pp. 715-736.
- Sim, J.S., et al, 2005. Hybrid FRP for Reinforcement and Smart-Monitoring in Concrete Structure. s.l., International Institute for FRP in Construction, pp. 393-400.
- Somboonsong, W., Ko, F. K. & Harris, H. G., 1998. Ductile Hybrid Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Bar for Concrete Structures: Design Methodology. Materials Journal, Volume 95, pp. 655-666.
- Tepfers, R., et al, 1996. Ductility of nonmetallic hybrid fiber composite reinforcement for concrete. Mechanics of Composite Materials, N° 2, Volume 32.
- Tinazzi, D. & Nanni, A., 2000. Assessment of Technologies of Masonry Retrofitting With FRP, USA: CIES.
- Trigo, C. & Neves da Silva, A., 2009. Manual prático de armaduras.. AECOPS, Lisboa: ISBN: 978-972-8197-16-2..
- Waldron, P., 2004. The use of FRP as embedded reinforcement in concrete. Em: FRP Composites in Civil Engineering - CICE 2004. Adelaide: Taylor & Francis, pp. 83-93.
- Wang, Y., Wong, P. & Kodur, V., 2007. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. Elsevier - Composite Structures, Volume 80, pp. 131-140.
- Wu, Z., Yang, C., Takahashi, T., 2003. Self-Diagnosis of concrete beams reinforced with hybrid CFRP rods. Pennsylvania, USA, s.n., pp. 155-162.
- Wu, Z., 2005. Structural strengthening an integrity with hybrid FRP composites. Em: FRP Composites in Civil Engineering - CICE 2004. Japan: Taylor & Francis Group, pp. 93-105.

Yang, C., Wu, Z., Ye, L. P. , 2006. Self-Diagnosis of Hybrid CFRP Rods and As-Strengthened Concrete Structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Volume 17, pp. 609-618.

You, Young-jun; et al, 2007. Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions. *Composite Structures*, Volume 80, pp. 117-122.

Zdraveva, E., 2009. Master thesis - Study of the on-line monitoring capabilities of braided composite rods for concrete reinforcements, Guimarães, Portugal: s.n.

Zdraveva, E., 2010. Multifunctional Braided Composite Rods for Civil Engineering Applications, Guimarães, Portugal: Universidade do Minho.



## 9. ANEXOS

### 9.1 Informação sobre cálculos preliminares

#### ANEXO I

#### Resultados dos ensaios de compressão nos provetes de controlo

Durante o processo de betonagem dos elementos de betão a estudar, provetes pull – out e modelos de vigas, foram recolhidas 4 amostras por cada mistura de betão efetuada, sendo realizados ensaios de compressão aos 28 dias de idade de cura.

Os provetes cúbicos com dimensões de 100mm x 100mm, foram enchidos cumprindo os procedimentos descritos no trabalho laboratorial e curados junto dos elementos correspondentes.

Mistura	Idade (dias)	Amostra	Peso (kg)	Força (KN)	Tensão de rotura - fci (MPa)	Tensão média, fcm (MPa)	CV $\delta$ (%)	Valor característico fck (Mpa)	Classe de resistência à compressão (Mpa)
Vigas BCR_1 BCR_2	28	1	2,25	553,60	55,36	55,08	0,52%	47	C35/45
		2	2,25	549,40	54,94				
		3	2,27	547,40	54,74				
		4	2,23	552,70	55,27				
Vigas BCR_3 Aço	28	1	2,23	523,40	52,34	52,04	0,84%	44	C30/37
		2	2,24	524,00	52,40				
		3	2,25	519,50	51,95				
		4	2,24	514,50	51,45				
Pull out BCR_1 BCR_2	28	1	2,26	565,60	56,56	56,99	1,19%	49	C35/45
		2	2,28	566,80	56,68				
		3	2,26	567,00	56,70				
		4	2,28	580,00	58,00				
Pull out BCR_3 Aço	28	1	2,29	573,30	57,33	57,21	0,22%	49	C35/45
		2	2,28	573,00	57,30				
		3	2,29	570,80	57,08				
		4	2,28	571,30	57,13				

### PULL OUT – cálculos preliminares

EC2: página 151 (8.4.2), (LNEC, 2010).

Dados: Aço:A400NR

Betão: C30/37

#### Tensão rotura de aderência

$$f_{bd} = 2.25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd}$$

$$\eta_1 = 1.0$$

$$\eta_2 = 1.0$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk\ 0.05}}{\gamma} = \frac{2.0}{1.5} = 1.3 \text{ MPa}$$

$$f_{bd} = 2.25 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.3 = 3 \text{ MPa (EC2)}$$

$$F_s = 3.4 \text{ KN (EC2)}$$

#### Justificação do deslizamento do varão por plastificação do aço

Este cálculo teve o objetivo de validar a força potenciadora de cedência do varão de aço por alongamento da secção e consequente deslizamento. Desta forma, o limite da aderência máxima do aço ao betão para 6cm de comprimento de aderência foi esgotado.

$$F_s = 13 \text{ KN (valor experimental)}$$

$$F_s = F_{cb}$$

$$A_s \cdot \tau_{sd} = l \cdot u \cdot f_{bd}$$

$\tau_{sd}$  = tensão instalada no varão

$$\varnothing = 6 \text{ mm} = 0.6 \text{ cm}$$

$$A_s = 0.283 \text{ cm}^2$$

$$l = 6 \text{ cm}$$

$$u = 2\pi r = 1.885 \text{ cm}$$

$$f_{bd} = \frac{A_s \cdot \tau_{sd}}{l \cdot u}$$

$$\tau_{sd} = \frac{13}{A_s} = 459.4 \text{ MPa} - \text{Aço A400NR teoricamente em cedência}$$

$$f_{bd} = \frac{F_s}{l \cdot u} = 11.49 \text{ MPa}$$

### Armadura de flexão em aço – pré - dimensionamento

EC2, (LNEC, 2010).

Dados: Aço:A400NR

Betão: C30/37

$f_{cm} = 38\text{MPa}$  (experimental)

Asl: 3  $\varnothing$  6mm

Vão livre (l): 0.70 m

Recobrimento (a): 0.02 m

Altura útil (d): 0.08 m

#### Método direto

$$Z = 0.9d$$

$$M_{rd} = F_s \cdot Z = A_s \cdot f_{yd} \cdot 0.9d = 2.13\text{KN.m}$$

$$M = \frac{F \cdot L}{4} = 2.13 = \frac{F \times 4}{0.70} = 12.17\text{KN}$$

$$\text{Então: } M_{rd} = 2.13 \text{ KN.m}$$

$$F = 12.17 \text{ KN}$$

$$V_{sd} = 6.10\text{KN}$$

#### Espaçamento entre varões

$$s = \frac{b - 2a - n\varnothing}{n - 1} = 0.026\text{m}$$

$$s \geq \varnothing; \text{ min } 2\text{cm} - \text{OK}$$

#### Esforço transversal

$$\alpha = 90^\circ$$

$$V_{sd} = 6.10\text{KN}$$

$$V_{sd} \leq V_{rd} = V_{rd,c} + V_{rd,s}$$

$$V_{rd,c} = 6.16\text{KN}$$

$$V_{rd\text{máx}} = b_w \cdot 0.9 \cdot d \cdot \gamma \cdot f_{cd}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$\cot\theta = 2.5; \theta = 21.8$$

$$\tan\theta = 0.40$$

$$V_{rd,m\acute{a}x} = 49.81\text{KN}$$

$$V_{sd} = 6.10\text{KN} \leq V_{rd,m\acute{a}x} = 49.81\text{KN} - \text{OK}$$

### **Estribos verticais**

$$\alpha = 90^\circ$$

$$V_{rd,s} = A_{sw}/s \cdot 0.9d \cdot f_{yd} \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{rd,s} = V_{sd} - V_{rd,c}$$

### **Armadura mínima**

$$A_{sw}/s = 1.095\text{cm}^2/\text{m}$$

Espaamento mximo

$$S_{l\acute{m}a} = 0.06\text{m}$$

$$A_{sw} = 0.0657\text{cm}^2$$

Foram adotados estribos  $\phi 3//0.05\text{m}$

## 9.2 Informação técnica acerca de materiais utilizados

## Biresin® CR144 Compositeharz-System für Heisshärtung

### Anwendungsgebiete

- insbesondere zur Verarbeitung im Pultrusions- und Filament Winding Verfahren
- speziell für Anwendungen, die eine niedrige Reaktivität und eine lange Topzeit benötigen

### Produktvorteile

- durch niedrige Mischviskosität bei erhöhter Verarbeitungstemperatur schnelle Infiltration der trockenen Fasern
- Anpassung der Topzeit über die Beschleunigerkomponente
- hohe Zugdehnung
- hohe Glasübergangstemperatur (155°C)

### Beschreibung

- Basis 3K-EP-System
- Harz (A) **Biresin® CR144**, Epoxidharz, transluzent
- Härter (B) **Biresin® CH141**, Carbonsäure Anhydrid, transparent
- Beschleuniger (C) **Biresin® CA144**, Amin, bernsteinfarben

Physikalische Daten		Harz (A)	Härter (B)	Beschleuniger(C)
Einzelkomponenten		<b>Biresin® CR144</b>	<b>Biresin® CH141</b>	<b>Biresin® CA144</b>
Viskosität, 25°C	mPas	12.000	< 10	40
Dichte, 25°C	g/ml	1,16	1,20	1,03
Mischungsverhältnis	in Gewichtsteilen	100	90	1-4
			<b>Mischung</b>	
Topfzeit, 100 g / RT, ca. Werte		h	> 24	
Mischviskosität, 25°C, ca. Werte		mPas	800	

### Mechanische Kennwerte der Reinharzprobe

ca.-Werte nach 3 h / 80°C + 8 h / 140°C (Quelle: Sika intern)

Biresin® CR144 Harz (A)		mit Biresin® CH141 Härter (B) und Biresin® CA144 Beschleuniger (C)		
Dichte	ISO 1183	g/cm³	1,20	
Shore-Härte	ISO 868	-	D 87	
Biege-E-Modul	ISO 178	MPa	3.000	
Zug-E-Modul	ISO 527	MPa	2.900	
Biegefestigkeit	ISO 178	MPa	144	
Druckfestigkeit	ISO 604	MPa	126	
Zugfestigkeit	ISO 527	MPa	98	
Zugdehnung	ISO 527	%	6,4	
Schlagzähigkeit	ISO 179	kJ/m²	15	

### Verarbeitung

- Vor der Entformung ist eine entsprechende Temperung erforderlich.
- Zur sofortigen Reinigung von Pinseln und Arbeitsgeräten eignet sich Sika Reinigungsmittel 5.

### Thermische Kennwerte der Reinharzprobe

Biresin® CR144 Harz (A) mit Biresin® CH141 Härter (B) und Biresin® CA144 Beschleuniger (C)			
Wärmeformbeständigkeit	ISO 75B	°C	147*
	ISO 75C	°C	130*
Glasübergangstemperatur	ISO 11357	°C	155*

\* Werte nach Temperung: 3 h / 80°C + 8 h / 140°C

### Verpackung

Einzelbinde	<b>Biresin® CR144 Harz (A)</b>	200 kg; 10 kg netto
	<b>Biresin® CH141 Härter (B)</b>	1.100 kg; 220 kg; 9 kg netto
	<b>Biresin® CA144 Beschleuniger (C)</b>	0,2 kg netto

### Lagerung

- In temperierten Räumen (18 - 25°C) und ungeöffneten Originalbinden beträgt die Lagerfähigkeit von Biresin® CR144 Harz (A) mindestens 24 Monate und von Biresin® CH141 Härter (B) und CA144 Beschleuniger (C) mindestens 12 Monate.
- Durch ungünstige Lagerbedingungen kristallisiertes Harz ist durch vorsichtiges Erwärmen auf max. 60 - 80°C wieder zu verflüssigen.
- Angebrochene Gebinde sind stets sofort wieder dicht zu verschließen und baldmöglichst zu verarbeiten.

### Gefahrenhinweise

Informationen zum sicheren Umgang von chemischen Produkten, sowie die wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen und ökologischen Daten sind den aktuellen Sicherheitsdatenblättern zu entnehmen. Die einschlägigen Vorschriften, wie z.B. die Gefahrstoffverordnung sind zu beachten. Weitere Hinweise und Infodatenblätter zur Produktsicherheit und Entsorgung finden Sie im Internet unter [www.sika.de](http://www.sika.de).

Hautkontakt mit Epoxidharzen kann zu Allergien führen! Beim Umgang mit Epoxidharzen ist der direkte Hautkontakt unbedingt zu vermeiden! Zur Auswahl einer geeigneten Schutzausrüstung stellen wir Ihnen unter [www.sika.de](http://www.sika.de) unsere Infodatenblätter 7510 „Allgemeine Hinweise zum Arbeitsschutz“ und 7511 „Allgemeine Hinweise zum Tragen von Schutzhandschuhen“ zur Verfügung.

### Entsorgung

Nicht ausgehärtete Produkte sind in der Regel besonders überwachungsbedürftige Abfälle und müssen ordnungsgemäß entsorgt werden. Ausgehärtetes Material kann nach Absprache mit der jeweils zuständigen Behörde oder Deponie als Haus- / Gewerbeabfall entsorgt werden.

Auskunftspflichtig für die ordnungsgemäße Entsorgung sind die örtlichen Behörden, wie z.B. Landratsamt, Umweltschutzamt oder Gewerbeaufsichtsamt.

### Datenbasis

Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.

### Rechtshinweise

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen der unterschiedlichen Materialien, Untergründen und abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen, noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass er schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemäßen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt hat. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im übrigen gelten unsere jeweiligen Verkaufs- und Lieferbedingungen. Es gilt das jeweils neueste Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte.



Weitere Informationen:

Sika Deutschland GmbH  
Niederlassung Bad Urach  
Stuttgarter Str. 139  
D - 72574 Bad Urach  
Deutschland

Tel: +49 (0) 7125 940 492  
Fax: +49 (0) 7125 940 401  
Email: [composites@de.sika.com](mailto:composites@de.sika.com)  
Internet: [www.sika.de](http://www.sika.de)



## Biresin® CR83 Composite resin system

### Areas of Application

- For infusion and injection processing
- Specially for applications for which resins with extremely low viscosity are necessary because of the processing temperature or geometry of the components

### Product Benefits

- Approved by Germanischer Lloyd for the production of components
- One resin with three hardeners with different reactivity
- Uniform mixing ratio of 100 : 30
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Because of very low mixed viscosity fast infiltration of dry fabrics and nonwovens also at low temperatures
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions

### Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin (A) **Biresin® CR83**, epoxy resin, translucent, unfilled
- Hardener (B) **Biresin® CH83-2**, amine, colourless to yellowish
- Hardener (B) **Biresin® CH83-6**, amine, colourless to yellowish
- Hardener (B) **Biresin® CH83-10**, amine, colourless to yellowish

Physical Data		Resin (A)		Hardener (B)	
Individual Components		Biresin® CR83	Biresin® CH83-2	Biresin® CH83-6	Biresin® CH83-10
Viscosity, 25°C	mPas	510	< 10	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.14	0.95	0.94	0.95
Mixing ratio	in parts by weight	100	30		
		Mixture			
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min	60	180	300	
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPas	155	170	155	

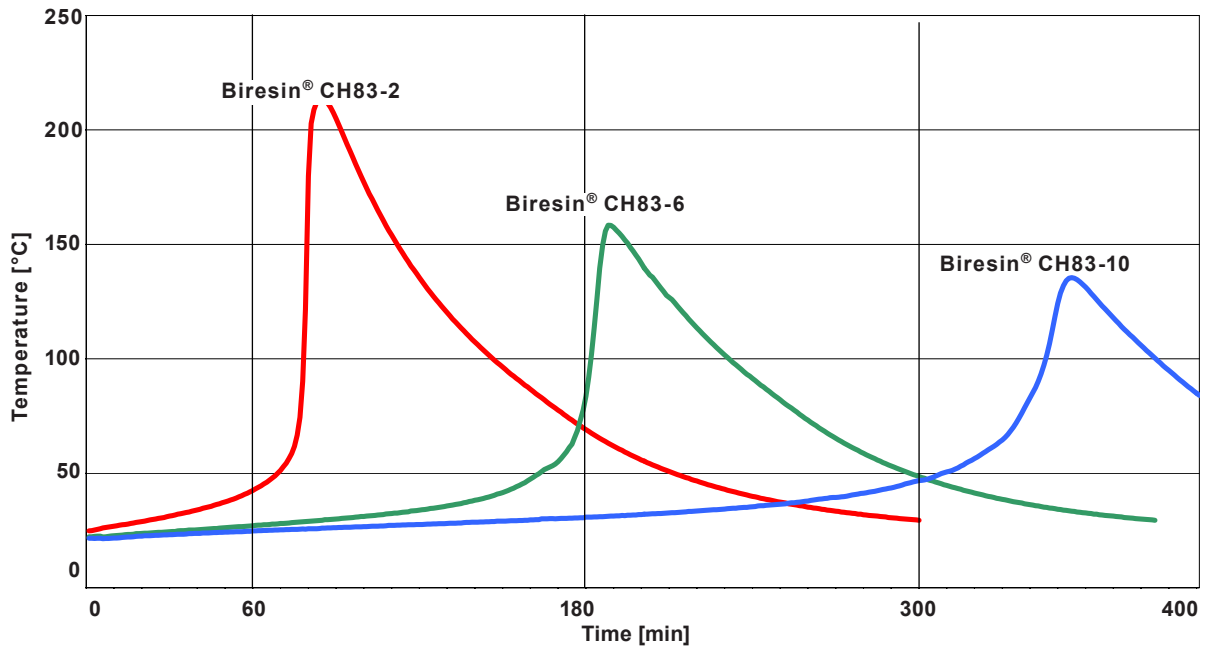
### Processing

- The material and processing temperatures should be 15 - 35°C.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional informations are available in "Processing Instructions for Composite Resins".

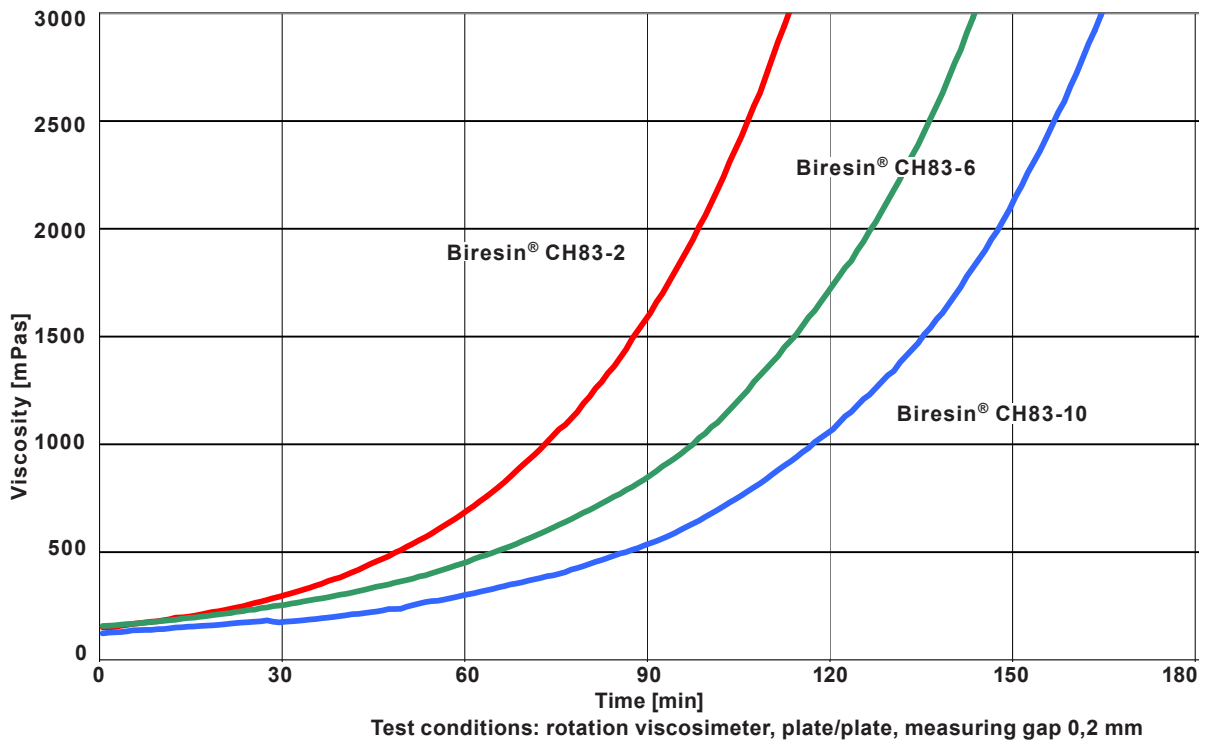




**Development of Exotherm of Biresin® CR80-Resin(A)-Hardener(B)-Mixtures, 100g / RT, insulated**



**Development of Viscosity of Biresin® CR83-Resin(A)-Hardener(B)-Mixtures, 25°C**



Mechanical Data, neat resin specimen at different post curing conditions					
Part 1: approx. values after 12 h / 55°C (source: Sika internal)					
Biresin® CR83 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH83-2	CH83-6	CH83-10
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.15	1.15	1.15
Flexural-E-Modul	ISO 178	MPa	3,150	3,250	3,200
Tensile-E-Modul	ISO 527-2	MPa	3,300	3,300	3,350
Flexural strength	ISO 178	MPa	122	126	123
Tensile strength	ISO 527-2	MPa	88	93	91
Elongation at break	ISO 527-2	%	6,7	6,7	6,5
Water absorption after 7 d	ISO 175	%	0.50	0.44	0.42

Part 2: approx. values after 8 h / 70°C (source: Sika internal)					
Biresin® CR83 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH83-2	CH83-6	CH83-10
Shore-hardness	ISO 868		D 85	D 85	D 85
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.15	1.15	1.15
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,125	3,360	3,340
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	2,960	3,200	3,100
Flexural strength	ISO 178	MPa	129	134	131
Elongation at break	ISO 527	%	4.7	8.4	7.9
Tensile strength	ISO 527	MPa	84	91	86
Impact resistance	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	93	84	83
Compressive strength	ISO 604	N/mm <sup>2</sup>	107	111	109

Thermal data of neat resin specimen at different post curing conditions					
Biresin® CR83 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH83-2	CH83-6	CH83-10
Post curing conditions					
Heat distortion temperature	12 h/55°C	ISO 75A °C	74	72	73
	8 h/70°C	ISO 75A °C	79	79	78
	8 h/70°C	ISO 75B °C	83	83	83
Glass transition temperature		ISO 11357 °C	84	80	81

### Packaging

Individual components **Biresin® CR83 resin (A)** 200 kg; 10 kg net  
**Biresin® CH83-2, CH83-6, CH83-10 hardener (B)** 20 kg; 3.0 kg net

### Storage

- Minimum shelf life of Biresin® CR83 resin (A) is 24 month and of Biresin® CH83-2, CH83-6 and CH83-10 hardener (B) is 12 month under room conditions (18 - 25°C), when stored in original unopened containers.
- The tendency of crystallisation with this system is very low. However, if crystallisation of the resin component appears, it can be easily removed by warming up the resin for a sufficient time to 50-60°C.
- Containers must be closed tightly immediately after use. The residual material needs to be used up as soon as possible.



### Health and Safety Information

For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Safety Data Sheet (SDS) containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

### Disposal considerations

Product Recommendations: Must be disposed of in a special waste disposal unit in accordance with the corresponding regulations.

Packaging Recommendations: Completely emptied packagings can be given for recycling. Packaging that cannot be cleaned should be disposed of as product waste.

### Value Bases

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

### Legal Notice

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Further information available at:

Sika Deutschland GmbH  
Subsidiary Bad Urach  
Stuttgarter Str. 139  
D - 72574 Bad Urach  
Germany

Tel: +49 (0) 7125 940 492  
Fax: +49 (0) 7125 940 401  
Email: [tooling@de.sika.com](mailto:tooling@de.sika.com)  
Internet: [www.sika.com](http://www.sika.com)



# Statement of Approval



Approval No. **WP 1020014 HH**

The material described below complies with the applicable requirements as given in the Rules and Regulations of Germanischer Lloyd. On this basis the material is

approved as **Laminating Resin**

for the construction of components provided that the recommendations for use as specified by the producer are observed.

Type	<b>Biresin CR83</b>
Description	<b>Two Component Epoxy Resin System</b>
Producer	<b>SIKA Deutschland GmbH Stuttgarter Str. 139 72574 Bad Urach Germany</b>
Normative Reference	<b>Rules for Classification and Construction, II - Material and Welding Technology Part 2 Non-Metallic Materials</b>

This document consists of this page and a one-page annex which is integral part of the approval.

This Statement of Approval is valid until 2014-02-14.

Hamburg, 2010-02-15

**Germanischer Lloyd**

  
Sven Koller

  
Guido Michalek



# Statement of Approval



## ANNEX

Approval No. WP 1020014 HH

Date: 2010-02-15

Page 1 of 1

Reference Documents Technical specifications deposited at Germanischer Lloyd Head Office.

Assessed Documents - Technical Data Sheet  
- Test Report issued by IFB Stuttgart, dated 2009-12-10.

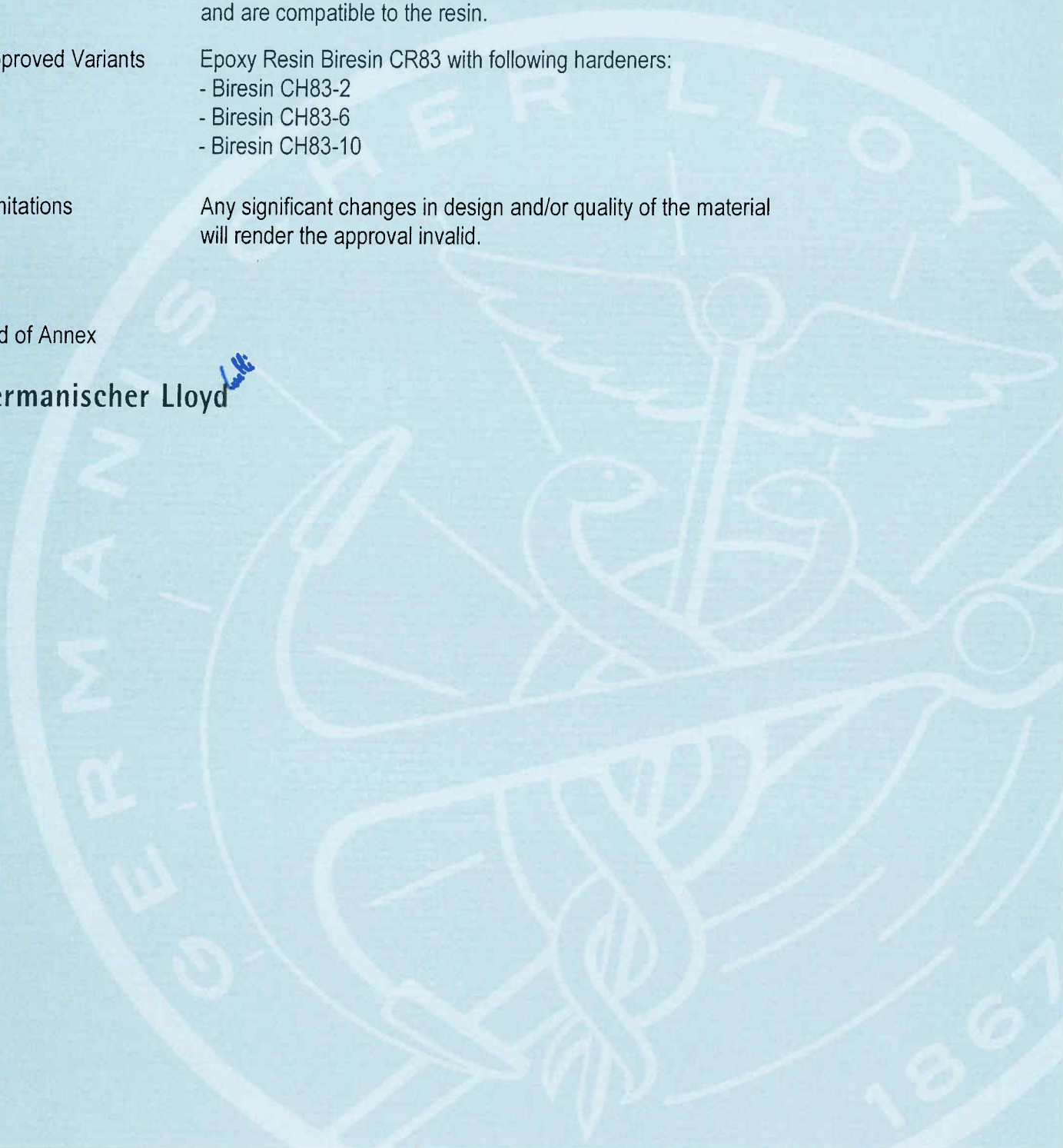
Fields of Application Construction of FRP laminates of components, on condition that the fibre reinforcements comply with the applicable requirements of the Germanischer Lloyd and are compatible to the resin.

Approved Variants Epoxy Resin Biresin CR83 with following hardeners:  
- Biresin CH83-2  
- Biresin CH83-6  
- Biresin CH83-10

Limitations Any significant changes in design and/or quality of the material will render the approval invalid.

End of Annex

Germanischer Lloyd 



# Properties of TENAX<sup>®</sup> Filament Yarn

by Toho method

品名 Grade	フィラメント数 Filament Count	織度 Yield tex	引張強度 Tensile Strength			引張弾性率 Tensile Modulus			伸度 Elongation %	密度 Density g/cm <sup>3</sup>
			MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	ksi	GPa	tonf/mm <sup>2</sup>	Msi		
Standard Modulus type	HTA40	1 000	4100	420	590	240	24	35	1.7	1.77
		3 000								
		6 000								
		12 000								
	HTS40	3 000	4400	450	640	240	24	35	1.8	1.77
		6 000								
		12 000								
		24 000								
	HTS45	12 000	4500	460	650	240	24	35	1.9	1.77
	STS40	24 000	4300	440	620	240	24	35	1.8	1.78
48 000		4300	440	620	250	26	36	1.7	1.77	
UTS50	12 000	5100	520	740	245	25	36	2.1	1.78	
	24 000	5100	520	740	245	25	36	2.1	1.78	
Intermediate Modulus type	IMS40	3 000	4500	460	650	290	30	42	1.6	1.73
		6 000								
		12 000								
	IMS60	6 000	5800	590	840	290	30	42	2.0	1.79
		12 000								
		24 000								
IMS65	24 000	6000	610	870	290	30	42	2.1	1.78	
High Modulus type	HMA35	12 000	3300	340	480	355	36	51	0.9	1.78
	UMS40	12 000	4700	480	680	390	40	57	1.2	1.79
		24 000								
	UMS45	12 000	4600	470	670	425	43	62	1.1	1.83
UMS55	12 000	4000	410	580	550	56	80	0.7	1.91	
Metal-coated type	HTS40 MC	12 000	2900	300	420	230	23	33	1.3	2.70

注) 数値は当社測定による代表値であり、保証値ではありません。詳細は、当社にお問い合わせ願います。  
The properties on this table are typical and not warranty value. It was obtained using certain controlled condition by Toho Tenax. Please contact our sales team, for choosing the best product.

※炭素繊維の輸出は各国の規制の対象になります。輸出者はそれぞれ国の輸出規則を順守する責任を負います。  
更に、他国からの輸出入の規制にも該当する事があります。  
The export of carbon fibers can be subject to authorization. Each exporter is responsible to observe the regulations in his country. Additional import/export regulations from other countries might be relevant.



# Properties of TENAX<sup>®</sup> Filament Yarn

by SACMA method

品名 Grade	フィラメント数 Filament Count	織度 Yield tex	引張強度 Tensile Strength			引張弾性率 Tensile Modulus			伸度 Elongation %	密度 Density g/cm <sup>3</sup>
			MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	ksi	GPa	tonf/mm <sup>2</sup>	Msi		
Standard Modulus type	HTA40	1 000	4100	420	590	230	23	33	1.8	1.77
		3 000								
		6 000								
		12 000								
	HTS40	3 000	4400	450	640	230	23	33	1.9	1.77
		6 000								
		12 000								
		24 000								
	HTS45	12 000	4500	460	650	235	24	34	1.9	1.77
	STS40	24 000	4300	440	620	235	24	34	1.8	1.78
48 000		4300	440	620	245	25	36	1.8	1.77	
UTS50	12 000	5100	520	740	235	24	34	2.2	1.78	
	24 000									
Intermediate Modulus type	IMS40	3 000	4500	460	650	280	29	41	1.6	1.73
		6 000								
		12 000								
	IMS60	6 000	5800	590	840	280	29	41	2.1	1.79
		12 000								
		24 000								
IMS65	24 000	6000	610	870	280	29	41	2.1	1.78	
High Modulus type	HMA35	12 000	3300	340	480	340*	35*	49*	1.0*	1.78
	UMS40	12 000	4700	480	680	375*	38*	54*	1.3*	1.79
		24 000								
	UMS45	12 000	4600	470	670	415	42	60	1.1	1.83
UMS55	12 000	4000	410	580	540	55	78	0.7	1.91	
Metal-coated type	HTS40 MC	12 000	2900	300	420	225*	23*	33*	1.3*	2.70

\* calculated based on values measured by Toho method

注) 数値は当社測定による代表値であり、保証値ではありません。詳細は、当社にお問い合わせ願います。

The properties on this table are typical and not warranty value. It was obtained using certain controlled condition by Toho Tenax. Please contact our sales team, for choosing the best product.

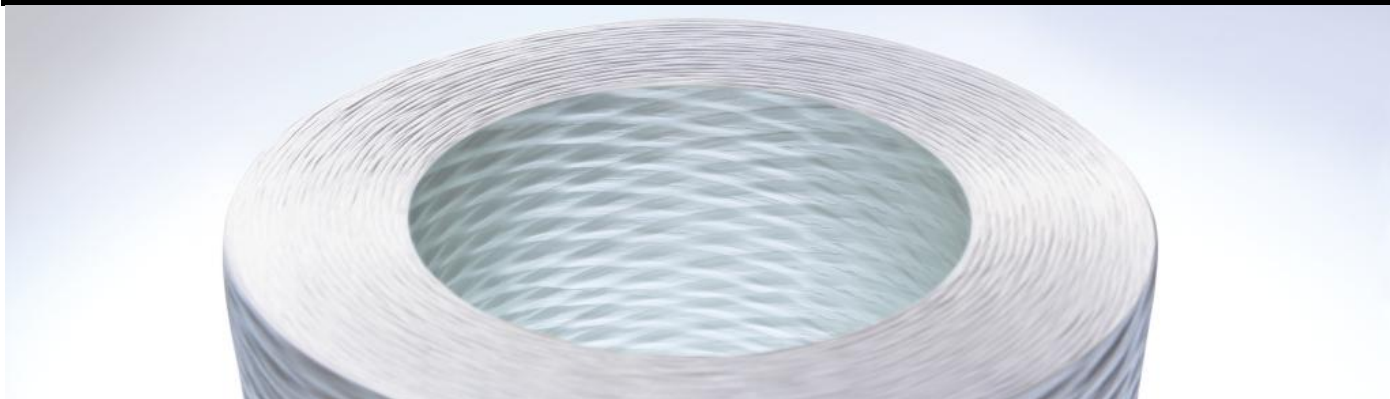
※炭素繊維の輸出は各国の規制の対象になります。輸出者はそれぞれ国の輸出規則を順守する責任を負います。

更に、他国からの輸出入の規制にも該当する事があります。

The export of carbon fibers can be subject to authorization. Each exporter is responsible to observe the regulations in his country. Additional import/export regulations from other countries might be relevant.

# PULSTRAND™ 4100 SINGLE-END ROVING

FOR PULTRUSION PROCESSES



## DESCRIPTION

- **Pulstrand™ 4100 Type 30®** is a single end roving designed specifically for pultrusion, offering fast wetting, excellent processing and excellent laminate performance in major resin systems.
- Pulstrand™ 4100 product sizing is specifically designed for fast wet-out, good processing, and excellent laminate properties, to maximize customers' processing and minimize their processing costs.
- Pulstrand™ 4100 roving is produced with Owens Corning's patented Advantex® corrosion resistant E-CR glass.

## BENEFITS

- **Excellent processing:** Pulstrand™ 4100 product provides smooth run-out, has low fuzz properties, resulting in smoother parts and less downtime for clean up, thus helping to drive higher efficiencies and lower manufacturing costs.
- **Multi-resin compatible:** Pulstrand™ 4100 product is designed for excellent glass/resin bonding in polyester, vinyl ester, polyurethane, acrylic, and epoxy resins, providing the processor maximum flexibility with one input glass. This reduces cost, with less inventory to carry and eliminates the need for costly downtime and labor to change input glass during job changes.
- **Excellent strand wet-out:** Pulstrand™ 4100 product has fast, uniform strand wet-out in all major resin systems. Fast wet-out allows for optimized part production speed and increased productivity, reducing manufacturing costs.
- **Outstanding shear and flexural properties in major resin systems,** providing maximum part strength and long part service life.
- **Excellent corrosion resistance with Advantex® Glass compared to standard E-glass:** Advantex® Glass means longer part life and great service life strength in applications facing corrosion. For additional information on Advantex® Glass: <http://composites.owenscorning.com/aboutAdvantex.aspx>



## APPLICATIONS

Pultrusion applications in polyester, vinyl ester, polyurethane, and epoxy resin systems, using conventional dip bath or resin injection technology

Manufacture of pultruded structural shapes, ladder rails, and grating systems





# PULSTRAND™ 4100 SINGLE-END ROVING

FOR PULTRUSION PROCESSES

**AVAILABILITY** – Not all Tex available in all regions.

Yield	Tex
825 – 250 – 207 – 113 – 103 – 56 – 52	600 – 2000 – 2400 – 4400 – 4800 – 8800 – 9600

## TECHNICAL CHARACTERISTICS (Single-End Roving)

The following data was generated using PulStrand™ 4100 – 113 Yield (4400 Tex) on pultruded part cross-section of samples: 1 inch by 0.125 inch (25.4 mm by 3.175 mm).

Mechanical properties	Flexural Strength ASTM D790		Interlaminar Shear Strength ASTM D 2344		Fiber Weight fraction (%)
	Flexural strength (ksi)	Flexural strength (MPa)	Short beam strength (ksi)	Short beam strength (MPa)	
Polyester Resin	180	1241	6.9	48	81.5
Vinyl ester Resin	204	1407	9.7	67	82
Polyurethane Resin	214	1476	13.3	92	80.5
Epoxy Resin	206	1421	11	76	78

## PACKAGING

Rovings are available in a single-end internal-pull package. Each pallet weighs about 1 ton and can be packaged in bulk or Creel-Pak® packaging format. Pallets are stretch-wrapped for load stability and for protection during transport. All packages are wrapped with Tack-Pak® packaging to aid package run-out and transfer. More information is available in the Customer Acceptance Standards.

## STORAGE

Glass fiber products should be stored in a cool, dry area. The glass fiber products must remain in their original packaging material until use; the product should be stored in the workshop, within its original packaging, 48 hours prior to its utilization, to allow it to reach the workshop temperature condition and prevent condensation, especially during cold weather. The packaging is not waterproof. Be sure to protect the product from the weather and other sources of water. When stored properly, the product has no known shelf-life issues, but retesting is advised after three years from the initial production date to insure optimum performance.

### Americas

Owens Corning  
Composite Materials, LLC.  
One Owens Corning Parkway  
Toledo, Ohio 43659  
1.800.GET.PINK™

### Europe

Owens Corning  
166 Chaussée de la Hulpe  
B-1170 Brussels  
Belgium  
+32 2 674 8211

### Asia Pacific

Owens Corning  
Shanghai Regional Headquarters  
Unit 01, 02,05, 39/F, Pudong Kerry Parkside,  
1155 Fang Dian Road, Pudong, Shanghai,  
201204, China  
+86-21-6101 9666

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation. Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice.

© 2015 Owens Corning. All Rights Reserved. Bridge picture copyright: Paulo Manuel Furtado Pires, shutterstock.com  
Pub number: 10019658. SingleEndRovings\_PulStrand 4100\_product sheet\_ww\_01-2015\_Rev0\_EN, January 2015

[SingleEndRoving@owenscorning.com](mailto:SingleEndRoving@owenscorning.com)  
[composites.owenscorning.com](http://composites.owenscorning.com)