

## **Tirantes de Betão Armado com Varões de Fibra de Vidro**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia – Especialização em Construção Urbana

**Autor**  
**Gonçalo André Lopes Bento**

**Orientadores**  
**Prof. Doutor Ricardo Nuno Francisco do Carmo**  
Instituto Politécnico de Coimbra  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa**  
Instituto Politécnico de Coimbra  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, Outubro, 2013**



## Agradecimentos

Ao Professor Doutor Ricardo Carmo pelos conhecimentos que me facultou durante a minha formação. Foi com grande gosto que desenvolvi este trabalho sob a sua dedicada orientação. Obrigado pelos incentivos e conselhos para o desenvolvimento deste estudo. Obrigado também por todo o material disponibilizado.

Ao Professor Doutor Hugo Costa por todos os conselhos e incentivos durante este trabalho. Agradeço todo o empenho e conhecimentos transmitidos na elaboração do trabalho experimental.

À Halfen Portugal, em especial ao Senhor Francisco Fernandes e à Senhora Elisabete Fernandes que forneceram de forma gratuita os varões de fibra de vidro. Sem esta ajuda este trabalho não teria sido possível. Muito Obrigado!

Ao Técnico Sr. António Amaral por todo o tempo despendido que muito contribuiu para que este trabalho fosse possível.

Ao Professor Engenheiro Jorge Lourenço, por facultar as instalações do Laboratório de Materiais de Construção.

Ao Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra por me ter dado todas as condições para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra em especial ao Engenheiro Paulo Amaro e ao Doutor Luís Roseiro pela ajuda na criação do sistema de amarração para os varões de fibra de vidro.

Ao Sr. Nelson Duarte da Garciaço – Ferros e aços Lda, pelo aço para o sistema de amarração.

Aos meus pais, por me possibilitarem toda a minha formação, sem eles este trabalho não teria sido possível.

A todos que de certo modo estiveram envolvidos e que contribuíram para um trabalho melhor.

## Resumo

O aparecimento da fibra de vidro deve-se à pesquisa de novos materiais. No século XIX, as fibras de vidro foram pela primeira vez tecidas. Só mais tarde, durante o século XX, com o desenvolvimento de resinas foi possível produzir a fibra de vidro como material compósito. Ainda durante a 2ª Guerra Mundial foi construído um avião de combate em fibra de vidro. Desde então sofreu um grande desenvolvimento, tendo sido aplicada nas mais diversas indústrias. Recentemente, a fibra de vidro tem sido também aplicada em estruturas na construção civil.

Nos últimos anos tem havido uma crescente investigação acerca das estruturas de betão armado com armaduras de fibra de vidro (GFRP). A análise de parâmetros como a fendilhação, a deformação e a contribuição do betão entre fendas, é fundamental para a compreensão do comportamento desse material compósito. A aderência entre os varões e o betão é condicionada pela resistência do betão e pela superfície das armaduras, podendo estas propriedades influenciarem a evolução dos parâmetros atrás referidos. Contudo, a investigação neste domínio ainda está pouco desenvolvida e carece de mais estudo, para que seja possível a sua aplicação em estruturas de uma forma mais criteriosa e abrangente. Pretendeu-se conjugar as vantagens do betão estrutural de agregados leves (BEAL), bom desempenho de resistência e a reduzida densidade, com as dos varões de GFRP, sendo necessário estudar o seu comportamento em conjunto para uma boa compreensão dos fenómenos inerentes a esta combinação de materiais.

Neste trabalho analisam-se vários parâmetros fundamentais ao comportamento de elementos de BEAL reforçado com varões de GFRP, nomeadamente: a aderência da interface betão-armadura, a fendilhação, *tension stiffening effect* e a deformação. Para esta análise, considerou-se a variação da resistência mecânica do BEAL, do tipo de armadura de reforço (aço e GFRP) e o diâmetro dos varões. Foi desenvolvido um programa experimental que contempla um total de doze tirantes de betão armado, seis com varões de GFRP e seis com varões de aço, de forma a poder efectuar-se uma comparação directa. Foram também incluídos no programa experimental trinta e seis provetes de ensaios *pull out*, dezoito com armaduras de fibra de vidro e dezoito com armaduras de aço, igualmente com o objectivo de comparação dos resultados.

Na análise dos resultados foi possível verificar as diferenças entre o uso de armaduras de GFRP e de aço nos parâmetros em estudo, assim como a influência da resistência dos BEAL e dos diâmetros das armaduras. Verificou-se que a largura de fendas, bem como as deformações nos tirantes com armaduras de GFRP foram superiores às observadas com armaduras de aço. No que diz respeito à aderência foram observadas menores tensões nas armaduras de GFRP.

Palavras-Chave: GFRP, BEAL, aço, aderência, contribuição de betão entre fendas, fendilhação, deformação, tirante.

## Abstract

The emergence of fiberglass was due to the research of new materials. In the 19<sup>th</sup> century the glass fibers were first woven. Only later, in the 20<sup>th</sup> century, with the development of resins was possible to produce as glass fiber as composite material. Even during the World War 2 was a fighter plane built in fiberglass. Since then it experienced a great development, having been applied in various industries. Recently, the glass fiber has also been applied to structures in construction.

In recent years, the research focused on the structures of reinforced concrete using fiberglass (GFRP) reinforcement has been increasing. The analysis of parameters such as cracking, deformation and tension stiffening effect is fundamental to understanding the behavior of this composite material. The bond between the bars and concrete is influenced by the strength of concrete and by the surface of the reinforcement bars; that fore, these properties can influence the evolution of the parameters mentioned above. However, research in this area is still undeveloped and needs further study, so that this solution can be used in structures in a more thorough and comprehensive approach. It was intended to combine the advantages of structural lightweight aggregate concrete (LWAC), high strength performance and reduced density, with the GFRP bars, being necessary to study their behavior together for a good understanding of the inherent phenomena in this combination of materials.

In this paper, various important parameters to understand the behavior of LWAC elements reinforced with GFRP bars were analyzed, namely: the bond of concrete-reinforcement interface, the cracking, the tension stiffening effect and deformation. For this analysis, the variation of the mechanical strength of LWAC, the type of reinforcement material (steel and GFRP) and the diameter of the bars were considered. An experimental program was developed, which comprises twelve concrete ties, six with steel reinforcement and six with GFRP, in order to perform a direct comparison. Thirty-six specimens for pull out test were also included in the experimental program, being eighteen with glass fiber reinforcement and the remaining eighteen with steel reinforcement, also for comparing results.

Analyzing the results, it was possible to quantify the differences between the use of reinforcing steel and GFRP bars in the studied parameters, as well as the influence of the strength of LWAC and the diameters of the bars. It was found that the crack width and the strain were higher in the ties with GFRP reinforcement than those observed with steel reinforcement. Regarding bond strength, obtained of pull out tests, lower values were observed in the GFRP reinforcement.

Keywords: GFRP, LWAC, steel, bond, tension stiffening effect, cracking, deformation, tie.

Índice

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>v</b>
<b>Índice .....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Quadros.....</b>	<b>xii</b>
<b>Simbologia .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Acrónimos .....</b>	<b>xv</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento do tema .....	1
1.2 Objectivos Propostos .....	1
1.3 Organização do Trabalho.....	2
<b>Capítulo 2 - Materiais .....</b>	<b>5</b>
2.1 História e Aplicações dos BEAL .....	5
2.1.1 História.....	5
2.2 Propriedade dos BEAL .....	7
2.2.1 Massa volúmica.....	7
2.2.2 Resistência à compressão .....	8
2.2.3 Resistência à tracção .....	9
2.2.4 Módulo de elasticidade.....	9
2.3 Fibra de vidro.....	10
2.3.1 História da fibra de vidro .....	10
2.3.2 Produção.....	11
2.3.3 Características .....	12
2.4 Aplicações da fibra de vidro na Engenharia Civil .....	13
2.4.1 Aplicações gerais.....	13
2.4.2 Factores que influenciam a durabilidade dos GFRP .....	16
2.4.3 Armaduras Halfen FRP FiReP® .....	16
<b>Capítulo 3 - Aderência entre o betão e os varões.....</b>	<b>19</b>
3.1 Introdução .....	19

---

3.2 Definição de aderência.....	19
3.2.1 Adesão.....	20
3.2.2 Atrito.....	20
3.2.3 Aderência mecânica.....	20
3.2.4 Factores que influenciam a aderência.....	21
3.2.5 Curvas de tensão de aderência versus escorregamento.....	21
3.3 Comportamento da aderência no betão armado.....	23
3.3.1 Rotura da Aderência.....	23
3.3.2 A aderência durante a fendilhação.....	24
3.3.3 Modelos teóricos do comportamento da aderência.....	27
3.4 Tension Stiffening effect.....	27
3.5 Estudos recentes usando varões de GFRP.....	34
<b>Capítulo 4 - Programa experimental.....</b>	<b>37</b>
4.1 Introdução.....	37
4.2 Caracterização dos tirantes.....	37
4.3 Caracterização dos provetes para os ensaios <i>pull out</i> .....	38
4.4 Composição e caracterização dos BEAL.....	39
4.4.1 Constituintes dos betões.....	39
4.4.2 Composição dos BEAL.....	40
4.4.3 Propriedades.....	41
4.4 Caracterização dos varões de aço.....	43
4.5 Caracterização dos varões de fibra de vidro Halfen.....	43
4.6 Fabrico das peças.....	44
4.6.1 Instrumentação dos varões de fibra de vidro.....	44
4.6.1 Instrumentação dos varões de aço.....	48
4.6.3 Produção das peças.....	49
4.7 Descrição dos ensaios.....	50
4.7.1 Sistema de amarração para os varões de fibra de vidro.....	51
4.7.2 Ensaio <i>pull out</i> .....	52
4.7.3 Ensaio dos tirantes.....	53
4.7.4 Instrumentação exterior dos tirantes.....	54
4.7.5 Aquisição de dados.....	55
<b>Capítulo 5 - Análise de resultados.....</b>	<b>57</b>

5.1 Tensão de aderência.....	57
5.1.1 Tensão de aderência nas armaduras de aço.....	59
5.1.2 Tensão de aderência nas armaduras de GFRP .....	61
5.1.3 Comparação de resultados.....	63
5.2 Tirantes de betão com varões de aço .....	66
5.2.1 Análise das curvas dos tirantes.....	66
5.2.2 Análise comparativa dos tirantes com armaduras de aço.....	69
5.2.3 Padrão de fendilhação .....	72
5.3 Tirantes de betão com varões de GFRP .....	73
5.3.1 Análise do comportamento dos tirantes .....	73
5.3.2 Análise comparativa dos tirantes com armaduras de GFRP .....	75
5.3.3 Padrão da fendilhação .....	78
5.4 Comparação de tirantes com varões de aço e varões de GFRP .....	79
5.4.1 Diâmetro 12 mm.....	79
5.4.2 Diâmetro 16 mm.....	81
5.5 Relação entre a largura da fenda característica e a tensão na armadura .....	83
5.6 Análise comparativa da largura das fendas e distância máxima experimental com a previsão do EC2 .....	85
5.7 Previsão da deformação dos tirantes pelo MC90, ACI e EC2.....	87
5.8 Contribuição do betão entre fendas – <i>tension stiffening effect</i> .....	89
5.9 Contribuição do betão entre fendas - <i>tension stiffening effect</i> - usando o modelo do MC90 .....	90
5.10 Análise da extensão média das armaduras nos tirantes .....	91
<b>Capítulo 6 - Conclusões.....</b>	<b>95</b>
6.1 Considerações gerais.....	95
6.2 Principais conclusões .....	95
6.3 Recomendação de novos estudos.....	96
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>98</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Coliseu de Roma e Panteão de Roma (Online site; infopédia) .....	5
Figura 2.2 - Lake Point Tower (wikipédia).....	6
Figura 2.3 - Ponte Coronado e ponte Sundøy (Wikipédia, 2013; ASS-Jakobsen, 2013).....	7
Figura 2.4 - Fibras de vidro.....	11
Figura 2.5 - Fabrico de GFRP por pultrusão (Sayed, 2012).....	12
Figura 2.6 - Rotura por esmagamento transversal às fibras durante ensaio de colagem de extensómetro .....	13
Figura 2.7 - Colagem de manta GFRP em pilar (Maranha, 2011). .....	15
Figura 2.8 - Exemplo de lei-constitutiva linear elástica.....	15
Figura 2.9 - Armaduras Halfen FRP FiReP® .....	17
Figura 3.1 - Aderência mecânica (Fernandes, 2000).....	21
Figura 3.2 - Curvas de tensão de aderência versus escorregamento (Leonhardt e Monnig, 1977) .....	22
Figura 3.3 - Modelo de curvas padrão da tensão de aderência versus escorregamento (FIB Bulletin 10, 2000).....	22
Figura 3.4 - Processo de arrancamento (Fenandes, 2000).....	23
Figura 3.5 - Fendilhação longitudinal do betão (Fusco, 1995).....	24
Figura 3.6 - Fendilhação por tracção (Leonhardt e Monnig, 1977; Fernandes, 2000).....	25
Figura 3.7 - Formação de fendas (Leonhardt e Monnig, 1977; Fernandes, 2000).....	26
Figura 3.8 - Micro-fendas (Goto, 1971).....	26
Figura 3.9 - Tirante e viga em flexão .....	27
Figura 3.10 - Resposta típica de um tirante de betão armado com armadura de GFRP (Sooriyaarachchi, 2006) .....	28
Figura 3.11 - Tensões na armadura e betão após a fendilhação (Leonhardt e Monnig, 1977; Fernandes, 2000) .....	29
Figura 4.1 – Fotografia de amostras de cimento II-A/L 42.5R e de areia média. ....	39
Figura 4.2 - Leca® HD2/4 e Leca® HD4/12 .....	40
Figura 4.3 - Provetes de betão submersos em tanque de cura.....	41
Figura 4.4 – Relação tensão-extensão de varão de GFRP em ensaio limitado .....	44
Figura 4.5 - Varão Halfen FRP FiReP® .....	44
Figura 4.6 - Preparação de superfície e cola de Cyanocrylate .....	45
Figura 4.7- Ensaio de extensómetro em varão GFRP .....	46
Figura 4.8 - Colagem e ligação de extensómetro .....	47
Figura 4.9 - Protecção do extensómetro.....	47
Figura 4.10 - Colagem do extensómetro em armadura de aço.....	48
Figura 4.11 – Execução de ligações e colagem de protecção do extensómetro .....	48

Figura 4.12 - Aplicação de camada viscosa de protecção do extensómetro .....	49
Figura 4.13 - Colagem de capa plástica e preparação da cofragem .....	49
Figura 4.14 - Execução de amassadura e betonagem dos tirantes.....	50
Figura 4.15 - Preparação e betonagem de cubos para ensaios de pull out .....	50
Figura 4.16 - Sistema de amarração de armaduras de GFRP .....	52
Figura 4.17 - Ensaio de <i>pull out</i> de provetes com armaduras de GFRP.....	52
Figura 4.18 - Ensaio de <i>pull out</i> de provetes com armaduras de aço .....	53
Figura 4.19 - Ensaio de tirantes com armaduras de GFRP.....	54
Figura 4.20 - Exemplo de ensaio de tirante com armadura de aço.....	54
Figura 4.21 - Transdutores de deslocamento durante os ensaios .....	55
Figura 4.22 - <i>Datalogger</i> e <i>Dynatester</i> .....	55
Figura 5.1 - Comportamento típica de ensaio <i>pull out</i> com rotura do betão.....	57
Figura 5.2 - Rotura de betão em ensaio de arrancamento .....	58
Figura 5.3 - Curva típica de ensaio de arrancamento com deslizamento .....	58
Figura 5.4 - Deslizamento de armadura em ensaio de arrancamento.....	59
Figura 5.5 - Tensão tangencial - resistência do betão à compressão (varões de aço) .....	61
Figura 5.6 – Efeito do atrito mecânico e a forma da abertura de fendas nos pull out com aço... 61	
Figura 5.7 - Rotura do provete .....	62
Figura 5.8 - Tensão tangencial - resistência do betão à compressão (varões GFRP).....	63
Figura 5.9 – Efeito do atrito mecânico e a forma da abertura de fendas nos <i>pull out</i> com GFRP .....	63
Figura 5.10 - Evolução da tensão da aderência para os diâmetros de 12 mm e 16 mm .....	65
Figura 5.11 - Curvas representativas do comportamento do tirante LC40 D12 com varão de aço .....	67
Figura 5.12 - Curvas representativas do comportamento do tirante LC70 D12.....	68
Figura 5.13 - Análise das extensões nas armaduras de aço durante ensaio de tracção dos tirantes .....	69
Figura 5.14 - Tirantes com armaduras de aço .....	72
Figura 5.15 - Padrão de fendilhação de tirantes com armaduras de aço .....	73
Figura 5.16 - Curvas representativas dos tirantes com armaduras GFRP .....	74
Figura 5.17 - Análise das extensões nas armaduras de GFRP .....	75
Figura 5.18 - Tirantes com armaduras de GFRP.....	78
Figura 5.19 - Padrão de fendilhação em tirantes com armaduras GFRP.....	79
Figura 5.20 - Gráfico de comparação da relação $F-\delta$ entre varões de aço e GFRP.....	82
Figura 5.21 - Relação força e a largura das fendas - comparação entre os tirantes com varões de aço e de GFRP.....	83
Figura 5.22 – Relação da largura da fenda com a tensão .....	85
Figura 5.23 – Comparação da relação $F-\delta$ dos códigos com a experimental para tirantes de aço .....	88

Figura 5.24 – Comparação da relação  $F-\delta$  dos códigos com a experimental para tirantes de GFRP..... 89

Figura 5.25 - Coeficiente experimental  $\beta_t$ . Tirante LC55 D16 GFRP. .... 91

## Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Classes de densidade (EC2).....	8
Quadro 2.2 - Classes de resistências à compressão para betão leve (EC2).....	9
Quadro 2.3 – Previsão dos códigos para de módulo de elasticidade.....	10
Quadro 2.4 - Vantagens e aplicações de armaduras de GFRP. ....	18
Quadro 2.5 - Comparação de tipo de armaduras (Halfen FRP FiReP®, 2010).....	18
Quadro 4.1 - Massas volúmicas dos ligantes .....	39
Quadro 4.2 - Massas volúmicas das areias.....	39
Quadro 4.3 - Propriedades dos agregados leves.....	40
Quadro 4.4 - Composição dos vários tipos de betão. ....	41
Quadro 4.5 – Caracterização dos vários tipos de betões .....	42
Quadro 4.6 – Propriedades do aço A500NR SD.....	43
Quadro 4.7 - Valores de ensaio a extensómetro.....	46
Quadro 5.1 - Tensões de aderência em provetes com armaduras de aço .....	60
Quadro 5.2 - Tensões de aderência em armaduras de GFRP .....	62
Quadro 5.3 - Comparação de tensão de cálculo e tensão obtida em ensaio para varões de aço..	65
Quadro 5.4 - Comparação de tensão de cálculo e tensão obtida em ensaio para varões de GFRP .....	66
Quadro 5.5 - Parâmetros observados de tirantes com varão de aço .....	72
Quadro 5.6 - Quadro de resumo dos tirantes com varões de GFRP.....	78
Quadro 5.7 - Comparação de tirantes de aço e GFRP de diâmetro 12 mm.....	80
Quadro 5.8 - Comparação de tirantes de aço e GFRP de diâmetro 16 mm.....	82
Quadro 5.9 – Largura de fendas teórica (EC2) e experimental em tirantes com armaduras de aço .....	86
Quadro 5.10 – Largura de fendas teórica (EC2) e experimental em tirantes com armaduras de GFRP.....	86
Quadro 5.11 - Coeficiente de distribuição experimental.....	90
Quadro 5.12 - Coeficiente experimental $\beta_t$ .....	91
Quadro 5.13 - Comparação da extensão média teórica com a experimental para tirantes com armaduras de aço.....	92
Quadro 5.14 - Extensão média experimental para tirantes com armaduras de GFRP.....	<b>Erro!</b>

**Marcador não definido.**

## Simbologia

### Maiúsculas Gregas

$\Delta\delta_{cr}$	diferença de deformação numa secção fendilhada e não fendilhada, quando se forma a primeira fenda.
$\Delta\varepsilon_{sr}$	diferença entre $\varepsilon_{sr2}$ e $\varepsilon_{sr1}$
$\Omega$	valor de resistência eléctrica

### Minúsculas gregas

$\alpha$	parâmetro de deformação, por exemplo, uma extensão, uma curvatura ou uma rotação
$\alpha_e$	relação $E_s/E_c$ ou $E_f/E_c$
$\alpha_l$	valores do parâmetro calculado para o estado não fendilhado
$\alpha_{ll}$	valores do parâmetro calculado para o estado fendilhado
$\beta$	coeficiente que tem em conta a influência da duração do carregamento ou da repetição do carregamento na extensão média.
$\beta_{cc}(t)$	coeficiente de endurecimento que depende da idade do betão
$\beta_d$	factor de ligação recomendado pelo ACI
$\beta_t$	factor que traduz a percentagem de betão fendilhado.
$\delta_{armadura}$	deformação da armadura
$\delta_{tirante}$	deformação do tirante
$\varepsilon_{cm}$	extensão média no betão entre fendas
$\varepsilon_f$	extensão na armadura de fibra de vidro
$\varepsilon_{s1}$	extensão da armadura quando o betão não está fendilhado
$\varepsilon_{s2}$	extensão da armadura numa secção fendilhada
$\varepsilon_{sm}$	extensão média da armadura para a combinação de acções considerada.
$\varepsilon_{sm}$	extensão média da armadura
$\varepsilon_{smu}$	extensão média da armadura no instante da rotura
$\varepsilon_{sr1}$	extensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão)
$\varepsilon_{sr2}$	extensão da armadura numa secção fendilhada sob a acção das forças que originam a 1ª fenda
$\varepsilon_{su}$	extensão de rotura da armadura
$\varepsilon_{sy}$	extensão de cedência da armadura
$\varepsilon_{uk}$	valor característico da extensão do aço na carga máxima
$\eta_l$	coeficiente de correcção da resistência do BEAL comparativamente ao BDN
$\eta_l$	coeficiente que relaciona as condições de aderência e a disposição do varão

## Simbologia

---

$\eta_2$	coeficiente em função do diâmetro
$\eta_E$	coeficiente de correcção do módulo de elasticidade do BEAL comparativamente ao BDN
$\mu m$	micrómetro
$\pi_0$	baridade no estado anidro
$\rho$	é a massa volúmica do betão endurecido a seco em estufa
$\rho_{p,eff}$	taxa de armadura de tracção em relação ao betão traccionado
$\rho_{p0}$	massa volúmica das partículas no estado anidro
$\rho_{PS}$	massa volúmica das partículas saturadas
$\sigma_f$	tensão na armadura de fibra de vidro
$\sigma_s$	tensão nas armaduras de tracção, calculada na hipótese de secção fendilhada
$\sigma_s$	tensão da armadura numa secção fendilhada
$\sigma_{sr}$	tensão nas armaduras de tracção, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação
$\sigma_{sr1}$	tensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão)
$\sigma_{srn}$	tensão da armadura no fim da estabilização da fendilhação, quando se forma a última fenda (considerando a contribuição do betão).
$\zeta$	coeficiente de distribuição
$\zeta_{exp}$	coeficiente de distribuição experimental

## Maiúsculas Latinas

$A_{c,eff}$	área efectiva de betão mobilizado por aderência
$A_N$	percentagem de absorção em relação ao estado de humidade natural
$AS$	percentagem de absorção de saturação
$\emptyset$	diâmetro
$E_c$	módulo de elasticidade do betão
$E_f$	módulo de elasticidade da armadura de fibra de vidro
$E_s$	módulo de elasticidade do aço
$F_s$	força de tracção das armaduras
$H_p$	teor humidade interior das partículas
$I$	inércia da secção
$K_I$	rigidez no estado I
$K_{II}$	rigidez no estado II
$S_{r,máx}$	distância máxima entre fendas
$S_{r,méd}$	distância média entre fendas
$W_{55kN}$	largura da fenda característica para 55 kN de força
$W_{65kN}$	largura da fenda característica para 65 kN de força
$W_k$	largura da fenda característica

## Minúsculas Latinas

$f_{ctd}$	valor de cálculo da resistência do betão à tracção
$f_{lc}$	tensão de rotura do betão à compressão
$f_{lcm}$	valor médio da tensão de rotura à compressão do betão leve
$f_{lct}$	tensão de rotura do betão leve à tracção
$f_{lctk}$	valor característico da tensão de rotura à tracção do betão leve
$f_{sym}$	valor médio da tensão de cedência do aço
$f_{tk}$	tensão característica de rotura da armadura
$f_{yk}$	tensão característica de cedência da armadura
$k_t$	coeficiente em função da duração do carregamento
$s$	coeficiente dependente do tipo de cimento
$t$	tempo/ idade do betão

## Acrónimos

3002HE	Superplastificante Viscocrete® 3002HE
A/C	Relação, em massa, água/cimento
ACI	American Concrete Institute
BDN	Betão de densidade normal
BEAL	Betão estrutural de agregados leves
CEB	Comité Euro-International du Béton
D12	Diâmetro 12mm
D16	Diâmetro 16mm
EC2	Eurocódigo 2
FIP	Fédération Internationale de la Précontraint
FS	Areia fina 0/2 mm
HD 2/4	Leca estrutural 2/4 mm
HD 4/12	Leca estrutural 4/12 mm
LC40	Betão leve com uma resistência à compressão de 40 MPa
LC55	Betão leve com uma resistência à compressão de 55 MPa
LC70	Betão leve com uma resistência à compressão de 70 MPa
MC90	Model Code 1990
MS	Areia média 0/4 mm



## Capítulo 1 - Introdução

### 1.1 Enquadramento do tema

Nas últimas décadas, a engenharia civil tem-se deparado com o problema da corrosão das armaduras de aço nas estruturas de betão armado, originando uma preocupação crescente por parte dos engenheiros na prevenção deste fenómeno. Assim, a forma de atenuar este problema tem passado por um aumento dos recobrimentos e uso de betões de melhor qualidade, entre outros métodos. No entanto, com o desenvolvimento de novos materiais, como a fibra de vidro, já são produzidas, na actualidade, armaduras diferentes para o betão armado, nomeadamente deste material. Com as armaduras de fibra de vidro, o fenómeno da corrosão pode ser desvalorizado, podendo mesmo existir menor exigência no campo da durabilidade das armaduras. Com estas armaduras é possível, inclusive, utilizar recobrimentos menores.

Julga-se que a fibra de vidro tenha sido fabricada pela primeira vez no século dezanove, mas só durante o século vinte é que foram obtidos resultados fidedignos. A fibra de vidro produzida na actualidade é um material com elevada resistência à tracção, o que aliado ao bom desempenho do betão estrutural de agregados leves (BEAL) pode conduzir a secções de dimensões mais reduzidas mas muito resistentes. Deste modo, poderão ser produzidos elementos de betão armado esbeltos e leves, para assim responder aos novos desafios estruturais dos dias de hoje. No entanto, para se projectar estruturas com estes materiais “novos” é necessário realizar estudos para verificar/avaliar o desempenho estrutural destas estruturas, à semelhança dos estudos já realizados para o betão armado com armaduras de aço. Entre alguns aspectos a estudar pode destacar-se a aderência, a fendilhação, a deformação e a contribuição do betão entre fendas. Estes parâmetros são importantes para a avaliação dos estados limites de utilização mas são também fundamentais para perceber o comportamento das estruturas nos estados limites últimos.

Na última década tem havido um crescente aumento dos estudos sobre o comportamento de elementos de betão armado com armaduras não metálicas. No entanto, os regulamentos existentes ainda não têm informações suficientes para que a sua implementação seja mais generalizada nos projectos de estruturas. Assim, julga-se que o presente estudo é pertinente e possa ser um contributo para um melhor entendimento do uso dos varões não metálicos em combinação com os BEAL.

### 1.2 Objectivos Propostos

O objectivo principal deste trabalho é analisar o comportamento de tirantes de BEAL reforçados com varões não metálicos, e identificar a influência dos parâmetros das

armaduras e do BEAL no comportamento estrutural. Para se atingir este objectivo destacam-se os seguintes passos:

- Revisão bibliográfica sobre os assuntos em análise, aderência e *tension stiffening effect*. Também as propriedades dos varões de fibra de vidro, GFRP (Glass Fiber Reinforcement Polymer), e dos BEAL e os factores que têm influência no betão leve armado foram alvo de revisão bibliográfica.
- Fabrico dos tirantes armados e dos provetes *pull out* com varões de GFRP e de aço, além dos respectivos provetes para a caracterização da resistência à compressão dos betões.
- Realização dos ensaios experimentais, 12 tirantes armados ensaiados à tracção e 36 ensaios *pull out*. Estes ensaios possibilitaram a análise dos fenómenos em estudo e, claro, a recolha de dados para posterior análise.
- Análise dos resultados obtidos durante os ensaios dos tirantes e *pull out*. Esta análise permite compreender a influência da variação dos parâmetros definidos (resistência do BEAL, tipo de varão - aço ou GFRP - e diâmetro do varão) na aderência, no padrão de fendilhação, no *tension stiffening effect* e na deformação.
- Apresentação das principais conclusões relativas aos ensaios efectuados e apresentação da sugestão de alguns estudos a desenvolver no futuro.

### 1.3 Organização do Trabalho

O trabalho apresentado está organizado em 6 capítulos que representam as várias etapas deste estudo.

No Capítulo 1 elabora-se um pequeno enquadramento do tema em análise, realçando a importância deste estudo e os objectivos definidos para a realização do mesmo. Define-se também a metodologia e a organização.

No Capítulo 2 é efectuada uma pesquisa acerca dos BEAL e da fibra de vidro (GFRP), onde é efectuada uma síntese das suas principais propriedades. São apresentadas algumas utilizações históricas e outras mais recentes destes materiais.

O Capítulo 3 resume o conhecimento actual relativamente à aderência e ao *tension stiffening effect*. São apresentadas algumas definições, assim como uma revisão sobre os factores que podem ter influência sobre a aderência e o *tension stiffening effect*. Apresenta-se também um resumo das recomendações dos regulamentos relativamente a estes tópicos.

No Capítulo 4 é descrito o programa experimental elaborado, o processo de fabrico dos tirantes e dos provetes para *pull out*, e a caracterização dos materiais utilizados. Neste capítulo é ainda descrito o procedimento de ensaio a seguir. É também realizada uma

explicação sobre o funcionamento dos equipamentos de instrumentação e aquisição de dados utilizados.

No Capítulo 5 realiza-se a análise dos resultados obtidos. São apresentadas figuras que mostram o comportamento dos tirantes e dos provetes *pull out*. São também realizadas comparações com os regulamentos acerca dos parâmetros estudados.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões resultantes do estudo realizado. Apresenta-se uma reflexão dos resultados analisados e uma discussão sobre a concretização dos objectivos propostos. São também apresentadas recomendações para estudos a realizar no futuro na mesma área.



## Capítulo 2 - Materiais

### 2.1 História e Aplicações dos BEAL

#### 2.1.1 História

O betão leve é um material utilizado na construção há vários milénios. Nas composições usadas nos primeiros betões eram utilizados agregados naturais de várias origens, principalmente a vulcânica. Estima-se que o primeiro uso deste tipo de material terá ocorrido por volta dos anos 2500 a.C., onde se pensa terem sido fabricados tijolos com argila porosa durante a época da civilização Indus Valley, situada a noroeste da actual Índia. Os tijolos foram produzidos e utilizados na construção da cidade de Mohenjo-Daro e Harappa e pensa-se que terão sido tijolos fragmentados usados na construção das paredes dos edifícios (Chandra e Berntsson, 2002).

Durante o Império Romano foram também construídos vários edifícios com recurso ao betão de agregados leves. Exemplo disso são o Coliseu de Roma e o Panteão de Roma, que ainda hoje existem, tendo estes sido construídos também com betões leves com uso de agregados naturais leves de origem vulcânica. O Coliseu de Roma foi uma das primeiras grandes construções em que foram utilizados betões com uso de agregados naturais leves, mais precisamente nas fundações e paredes. A sua construção foi iniciada no ano 70 a.C. e durou cerca de 12 anos. Esta construção mostra-nos assim o método usado durante o Império Romano (Chandra e Berntsson, 2002; EuroLightCon, 1998). Outra construção importante foi o Panteão de Roma, construído entre 118 e 128 d.C., e actualmente a sua estrutura ainda se encontra em bom estado de conservação. Este edifício destaca-se pela sua cúpula com um diâmetro de 43,4 m executada em BEAL. Através deste feito, muito avançado na época, é possível verificar que o Império Romano era detentor de um vasto conhecimento da produção deste material usado na época (Costa, 2007; EuroLightCon, 1998).



Figura 2.1 - Coliseu de Roma e Panteão de Roma (Online site; infopédia)

### 2.1.2 Século XX

No início do século XX ocorreu uma das aplicações mais importantes dos BEAL, a construção de navios de guerra, desenvolvida pelos Estados Unidos da América. O uso dos BEAL deveu-se à escassez de aço para o fabrico de navios; assim, para conseguirem construir navios, usaram o BEAL poupando assim 2/3 do aço usado em cada navio. Através da experiência adquirida com este processo e considerando também a reduzida densidade dos BEAL, fez com que este material começasse a ser usado na construção civil. Contudo, as propriedades dos BEAL foram sofrendo alterações devido ao desenvolvimento tecnológico. Ao longo das últimas décadas foram realizadas muitas construções na América do Norte e também na Europa com este tipo de betão (Costa, 2007; Silva, 2006).

Das construções mais recentes destacam-se edifícios de grande altura, pontes, estruturas pré-fabricadas e plataformas, entre outras construções. No caso dos edifícios de grande altura, a utilização de BEAL tem sido feita com grande sucesso. A utilização deste material garante um aligeiramento do peso de toda a estrutura e conseqüentemente uma redução dos esforços na estrutura, além do melhor comportamento quer acústico, quer em caso de incêndio (Silva, 2006). Um dos exemplos destas construções é a Lake Point Tower (Chicago, EUA) construída em 1968 com 70 andares (Asik, 2006).



**Figura 2.2 - Lake Point Tower (wikipédia)**

As pontes têm sido também algumas das construções executadas com BEAL principalmente no Norte da Europa e no Norte da América. A utilização de BEAL em pontes com grandes vãos é uma opção com vantagens estruturais, com redução do peso próprio da estrutura e uma conseqüente redução dos esforços. De entre muitas pontes até hoje executadas destacam-se a (San Diego, EUA) construída em 1969 com 3350 m de comprimento; a ponte *Sundoy* (Noruega) construída em 2003 com um vão central de 298 m e dois laterais de 120 m (Costa, 2007).



**Figura 2.3 - Ponte Coronado e ponte Sundøy (Wikipédia, 2013; ASS-Jakobsen, 2013)**

O BEAL tem sido também usado em construções pré-fabricadas. A redução do peso próprio da estrutura beneficia o processo de transporte das fábricas para os locais de montagem, trazendo assim vantagens a nível económico (Silva, 2006). Tem sido também usual utilizar-se BEAL em estruturas flutuantes e portuárias. No caso das plataformas o uso destes betões é vantajoso, visto que o transporte de terra para mar é facilitado com a diminuição do seu peso.

O BEAL tem ainda outras aplicações, já foi usado na reabilitação e reforço de estruturas. A menor massa volúmica relativamente aos betões de densidade normal é uma enorme vantagem quando é necessário aumentar as dimensões dos elementos estruturais, acrescentando o mínimo de massa possível à estrutura. O alargamento da Ponte 25 de Abril (Lisboa, Portugal) em 1999 é um dos casos onde isso se verificou.

## **2.2 Propriedade dos BEAL**

### **2.2.1 Massa volúmica**

A massa volúmica dos BEAL é uma propriedade importante, sendo esta inferior à dos betões de densidade (BDN) e é uma das principais características que os demarca dos BDN e, por este facto deve ser devidamente controlada. A massa volúmica dos BEAL é directamente influenciada pelas proporções dos constituintes e ainda pelas percentagens de humidade e absorção dos agregados. A classificação dos BEAL é feita através da EN 206-1 (NP EN 206-1, 2005) e pelo EC2 actual, ver Quadro 2.1 (NP EN 1992-1-1, 2010).

**Quadro 2.1 - Classes de densidade (EC2).**

Classe de densidade		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		801-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000
Massa volúmica de projecto (kg/m <sup>3</sup> )	Betão Simples	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	Betão Armado	1150	1350	1550	1750	1950	2150

A massa volúmica pode ser determinada de duas maneiras, usando amostras secas ao ar ou secas em estufa. Verifica-se que as amostras em estufa são normalmente cerca de 50kg/m<sup>3</sup> mais leves em relação às amostras secas ao ar (Costa, 2007; EuroLightCon, 1998; EuroLightCon, 2000a).

### **2.2.2 Resistência à compressão**

O comportamento mecânico dos BEAL difere dos BDN, visto que nos BEAL há introdução de agregados leves em detrimento de agregados normais dos BDN. O uso destes agregados leva a alterações no que diz respeito à massa volúmica e também às suas resistência mecânica e rigidez.

A resistência mecânica é uma característica importante e serve geralmente de referência para a sua caracterização, uma vez que é correlacionada com as restantes propriedades do betão.

O BEAL, sendo um material composto, pode ser analisado em duas partes, os agregados leves grossos e a matriz ligante. O valor da resistência, apesar de difícil de prever, pode ser controlado através dos seguintes parâmetros (Costa, 2007), os quais influenciam também a distribuição interna das tensões durante o carregamento:

- Resistência e proporção da matriz da pasta ligante;
- Resistência, tipo e proporção dos agregados leves;
- Interface entre a matriz ligante e os agregados leves;
- Cura do betão.

A resistência à compressão é determinada através de ensaios normalizados (NP EN 12390), em que são usados provetes cilíndricos e cúbicos, à semelhança dos ensaios com os BDN (NP EN 12390, 2009). Nos BEAL, a diferença de resistência à compressão ensaiada entre os dois tipos de provete é menor do que nos BDN, sendo isso evidente nas classes de resistência da norma NP EN 206-1.

O EC2 ordena a resistência dos BEAL por classes como os BDN. Os valores apresentados são os valores característicos mínimos da tensão de rotura à compressão aos 28 dias de idade. Estes valores são apresentados para os provetes cúbicos e cilíndricos no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Classes de resistências à compressão para betão leve (EC2)

Classe de resistência		LC 8/9	LC 12/13	LC 16/18	LC 20/22	LC 25/28	LC 30/33	LC 35/38	LC 40/44	LC 45/50	LC 50/55	LC 55/60	LC 60/66	LC 70/77	LC 80/88
$f_{ick}$ (MPa)	Cilindros	8	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80
	Cubos	9	13	18	22	28	33	38	44	50	55	60	66	77	88

### 2.2.3 Resistência à tracção

A resistência à tracção dos BEAL é também influenciada pela constituição do betão, mais precisamente pelo tipo de matriz ligante, agregados e pela interface entre ambos. Além destes parâmetros, a cura é também um factor que influencia a resistência à tracção. Para a determinar a resistência à tracção pode ser executado um ensaio de flexão ou de compressão diametral. Este ensaio está descrito na EN NP 12390 (NP EN 12390, 2009).

A resistência à tracção, segundo o EC2, pode ser correlacionada com o valor da resistência à compressão. Essa relação para betões de classe inferior LC50/55 é dada pela expressão 2.1:

$$f_{lcm} = 0,30 \times f_{lck}^{2/3} \times \eta_1 \quad (2.1)$$

Para betões de classe superior a LC50/55 a resistência à tracção pode ser prevista através da expressão 2.2:

$$f_{lcm} = 2,12 \times \ln(1 + (f_{lcm}/10)) \times \eta_1 \quad (2.2)$$

onde:

$\eta_1 = 0,4 + (0,6\rho/2200)$ , em que  $\rho$  é a massa volúmica do betão endurecido a seco em estufa.

### 2.2.4 Módulo de elasticidade

Os valores do módulo de elasticidade dos BEAL são inferiores ao BDN. Este facto, e apesar da pasta ligante ter influência directa, deve-se aos diferentes tipos de agregados,

que no caso dos BEAL têm muito menor rigidez quando comparados com os agregados correntes.

Nos betões, os parâmetros da resistência à compressão e o respectivo módulo de elasticidade podem ser relacionados, isto porque os factores que influenciam a resistência à compressão influenciam também a sua rigidez. No EC2 e ACI 213R-87 esta relação é visível através das expressões indicadas para o cálculo deste parâmetro, onde a rigidez é obtida através do valor da resistência à compressão (NP EN 1992-1-1, 2010; ACI, 1999). No Quadro 2.3 apresenta-se a previsão para o módulo de elasticidade usando as expressões do EC2 e do ACI.

**Quadro 2.3 – Previsão dos códigos para de módulo de elasticidade**

Código	Previsão do módulo de elasticidade	Parâmetros e unidades
EC2, MC10	$E_{lcm}=22 \times (f_{clm}/19)^{0,3} \times \eta_E$	$E_{lcm}(GPa); f_{lcm}(MPa)$ $\eta_E = (\frac{\rho}{2200})^2; \rho(kg/m^3)$
ACI 213 R-87	$E_{lcm}= C \times \rho^{1,5} \times \sqrt{f_{lcm}}$	$E_{lcm}(GPa); f_{lcm}(MPa); \rho(kg/m^3)$ $C=0,04(f_{lcm} \leq 35MPa); C=0,038(f_{lcm} > 35MPa)$

É também possível prever o módulo de elasticidade para uma idade  $t$ , diferente da dos 28 dias, através da expressão 2.3. O valor do módulo de elasticidade aos 28 dias é usado como referência (EC2).

$$E_{lcm}(t) = E_{lcm} \times (\beta(t))^{0,3}, \quad (2.3)$$

onde:

$$\beta(t) = e^{((s \times (1 - \sqrt{\frac{28}{t}}))} \quad (2.4)$$

onde:

- $s$  depende do tipo de cimento (pode ser igual a 0,20, 0,25 e 0,38);
- $t$  é a idade em dias.

## 2.3 Fibra de vidro

### 2.3.1 História da fibra de vidro

O aparecimento da fibra de vidro surge da constante procura de materiais com melhores propriedades e remonta ao século XIX, mais precisamente em 1836. Nesse ano foi desenvolvido e patenteado na Europa uma forma de tecer vidro maleável de finíssimos

filamentos. Esta data não é consensual, pois existem diversos autores que indicam diferentes datas para o aparecimento da fibra de vidro (Nasseh, 2007). Só passado cerca de um século é que a fibra de vidro começou a ser produzida em massa e ocorreu por acidente, quando um pesquisador da Owens-Illinois projetou um jacto de ar comprimido para o local onde estava vidro fundido e produziu fibras. Alguns anos depois e com o aparecimento de resinas, como o caso da resina de poliéster, consegue-se que a fibra de vidro e as resinas se tornem num material compósito. Esta combinação potenciou o uso comercial deste material dadas as suas boas características mecânicas (Figura 2.4).



**Figura 2.4 - Fibras de vidro**

A fibra de vidro teve um uso em massa, essencialmente na aviação e na indústria náutica, sendo a indústria da aviação a que promoveu bastante pesquisa e desenvolvimento na procura de resultados de materiais usando fibras de vidro e outros tipos de fibras. Ainda durante a 2ª Guerra Mundial foi testado um avião de combate em fibra de vidro. Mais tarde, muitas outras indústrias começaram a usar a fibra de vidro nas mais diversas aplicações e o nome da fibra de vidro começou assim a dar-se tanto às finíssimas fibras de vidro como também ao material compósito que usa as fibras de vidro na sua matriz. Na actualidade, a fibra de vidro é usada em várias indústrias, onde se podem fazer as mais diversas peças, desde peças para automóveis e aviões, cascos e hélices para barcos, tanques de água, tubos, componentes aeroespaciais, placas de montagem de circuitos eléctricos e materiais de construção civil (Periyasamy, 2012; Forbes Aird, 1996).

### **2.3.2 Produção**

As fibras de vidro são produzidas a partir do vidro em forma líquida, que é arrefecido a alta velocidade. Através do controle de temperatura e velocidade de escoamento do vidro são produzidos diversos tipos de filamentos com diâmetros variados.

Para produzir o material GFRP existem três tipos principais de processos de fabrico: pultrusão, trança e filamento (enrolamento filamentar). As barras de material compósito são produzidas usando, geralmente, o processo de pultrusão. Este processo (Figura 2.5) é usado para fabricar peças com diversas secções transversais e com comprimentos indefinidos, como barras, cabos, vigas em I ou L. Este método consiste em ligar as fibras através de uma resina e passar através de um pré-molde (Sayed, Ahmad 2012). As temperaturas de cura estão normalmente entre 110 °C e 180 °C. Após esta fase há uma passagem pelo sector de polimerização da resina que endurece. As disposições especiais de fibras ou uma combinação de dois ou mais tipos de fibras de reforço podem ser utilizados para conferir ao material compósito boas propriedades mecânicas. Podem ser utilizados outros processos, como o método de entrançar, para produzir cordões entrançados. Este processo entrança as fibras, seguido por impregnação com resina e cura. O tratamento da superfície das armaduras pode ser em bruto, o que é bom para se obter uma boa aderência com o betão, ou pode-se aplicar uma camada de areia na superfície do reforço para se aumentar ainda mais a aderência. O revestimento da superfície pode ser feito com partículas, por exemplo, podem conter areia incorporada na resina de elevada resistência, ficando assim com a superfície rugosa. Outra possibilidade para aumentar a capacidade de aderência pode ser a colocação de entalhes ou sulcos na superfície. Estes entalhes podem ser obtidos por meio dos enrolamentos espirais dos feixes de fibras, embutidas por pressão na resina ou nervuras semelhantes às utilizadas nas armaduras de aço convencionais. Os enrolamentos e as nervuras melhoram a acção mecânica entre a armadura e o betão, através da maior aderência entre os dois materiais (Sayed, Ahmad 2012).



**Figura 2.5 - Fabrico de GFRP por pultrusão (Sayed, 2012)**

### 2.3.3 Características

As fibras de vidro são finíssimas e ao serem impregnadas numa resina tornam-se num material compósito a que se chama também fibra de vidro. Este material compósito é formado por uma matriz, que pode ter de várias formas. O material compósito pode ter características diferentes dependendo do tipo de resina usado e da forma e disposição

das fibras. Geralmente, as resinas usadas são *poliéster* ou *epoxy* mas pode ainda ser outro tipo de resina (Forbes Aird, 1996).

A fibra de vidro destaca-se pela sua elevada resistência à tracção e à compressão (dependendo do sentido do arranjo das fibras e da resina usada). Todavia, como normalmente as fibras são longas e finas, têm tendência a deformar, o que diminui a resistência em compressão. Mas, se o arranjo da matriz não permitir a deformação das fibras, a resistência à compressão poderá ser elevada nessa direcção. Aquando do fabrico, a rigidez e a resistência podem ser controladas através das camadas e direcção das fibras, aumentando ou diminuindo as camadas, conforme o pretendido para as propriedades do material e sua aplicação (Gordon, 1991).

A fibra de vidro tem como desvantagem a pouca resistência às compressões perpendiculares, isto porque as finíssimas fibras de vidro quando solicitadas em corte entram em rotura com facilidade, quer seja por corte ou por esmagamento. Além disso, quando são comprimidas perpendicularmente ao seu sentido longitudinal, elas tendem a desagregar-se por rotura da resina que as envolve. Esta característica foi observada num ensaio de tracção, realizado preliminarmente, onde se utilizaram as garras normais para os varões de aço (Figura 2.6), sendo este ensaio abordado à frente.



**Figura 2.6 - Rotura por esmagamento transversal às fibras durante ensaio de colagem de extensómetro**

Outra desvantagem é o facto de a fibra de vidro ser um material pouco rígido (no caso dos varões produzidos pelo fabricante Halfen  $E = 60$  GPa) quando comparado, por exemplo, com o aço ( $E_s=200$  GPa).

## 2.4 Aplicações da fibra de vidro na Engenharia Civil

### 2.4.1 Aplicações gerais

Na construção civil, o uso das fibras de vidro tem vindo a crescer devido às boas características físicas e químicas, o que se traduz num bom comportamento durante a vida útil dos edifícios. Um dos grandes problemas que as estruturas de betão armado

têm apresentado é a corrosão do aço, principalmente em ambientes agressivos onde a penetração de cloretos e a carbonatação acabam por reduzir o tempo de serviço do edifício, conduzindo à necessidade de intervenções estruturais demoradas e minuciosas, que trazem custos elevados de manutenção ou substituição. Em casos extremos, a corrosão das armaduras pode levar mesmo ao colapso do edifício (Maranha, 2011). O uso de fibra de vidro em forma de varões, como os produzidos pela Halfen (Halfen FRP FiReP<sup>®</sup>, 2010), em estruturas de betão armado oferece uma alternativa sem problemas de corrosão. Deste modo, estas estruturas terão menos intervenções durante o seu tempo de serviço e têm, conseqüentemente, menores custos de manutenção ou reparação. Além do bom comportamento em termos de durabilidade, os varões de fibra de vidro e acessórios têm uma elevada capacidade resistente, sendo, no caso das armaduras Halfen FRP FiReP<sup>®</sup>, a tensão de rotura à tracção de 1000 MPa. O uso de varões de fibra de vidro no betão armado, mais concretamente o produto Halfen FRP FiReP<sup>®</sup>, será descrito de forma detalhada mais à frente.

A fibra de vidro pode também ser usada como um material de reforço de estruturas, seja na fase de construção ou durante o período de vida da estrutura. Na fase de construção, pode ser necessário quando existem erros de projecto, erros de execução ou até erros na produção do betão. Devido a estes erros os elementos estruturais podem ter uma resistência inferior à necessária ou não cumprirem os estados limites de utilização, havendo assim necessidade de reforçar a estrutura.

À semelhança da fase de construção, no período de vida da estrutura também pode ser necessário reforçar, seja pela debilidade que a estrutura apresenta, que pode ser provocada por sismos ou acidentes (choques, incêndios) ou até por necessidades de reforço com vista a alteração de requisitos regulamentares ou modificação das exigências de serviço. Claro que é necessária uma avaliação da capacidade resistente da estrutura antes de aplicar os novos materiais (Maranha, 2011).

O uso das fibras de vidro no reforço de estruturas é feito geralmente através da colagem de mantas ou laminados e pode ser aplicado em todos os tipos de estrutura: edifícios, pontes, túneis, tanques, silos, marinas. Estas mantas ou laminados podem ser usadas em vários tipos de reforços, flexão, corte, impacto ou explosão, reforço sísmico ou confinamento (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Colagem de manta GFRP em pilar (Maranha, 2011).

O reforço usando mantas ou laminados é geralmente eficaz mas apresenta alguns inconvenientes, como o seu comportamento linear elástico até à rotura (Figura 2.8). Esta diferença de comportamento em relação ao aço, que apresenta um patamar de cedência, pode levantar dúvidas acerca da ductilidade das estruturas.

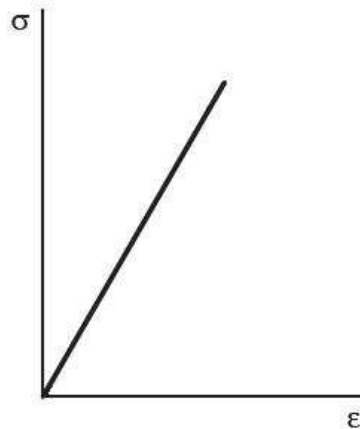


Figura 2.8 - Exemplo de lei-constitutiva linear elástica.

Outro problema das fibras de vidro é a sua perda de resistência quando exposta aos raios solares, podendo comprometer o seu tempo de serviço caso não seja protegido. No reforço com recurso a mantas e laminados é necessário também proteger este material contra os incêndios e, como é uma colagem, mesmo com colas de alta resistência, deve ter-se em atenção que as temperaturas impostas não ultrapassem os 60°C, para não haver uma diminuição da capacidade resistente da cola.

As especificações acerca de produtos e sistemas de colagem são descritos da secção 4 da EN 1504 (NP EN 1504-4, 2006).

### 2.4.2 Factores que influenciam a durabilidade dos GFRP

Os factores que influenciam a durabilidade das armaduras de GFRP não são os mesmos que afectam o aço. Ao contrário das de aço, as armaduras de GFRP não são significativamente afectadas por cloretos ou pelo processo de carbonatação do betão.

Nas armaduras de GFRP existem 3 elementos que influenciam o seu processo de degradação: a matriz, as fibras e a ligação fibras/matriz. Cada um destes elementos pode ser susceptível de ser atacado por agentes externos. A resina é bastante resistente e é normalmente esta que protege as fibras na interface com o betão, funciona como uma barreira. Os agentes externos que podem potenciar a degradação desta barreira são (Sayed, Ahmad 2012):

- o tipo de meio ambiente (PH do betão e existência de elementos iónicos agressivos);
- a tensão aplicada na armadura;
- a temperatura;
- o estado da armadura de GFRP;
- a qualidade da armadura (vazios e homogeneidade da resina).

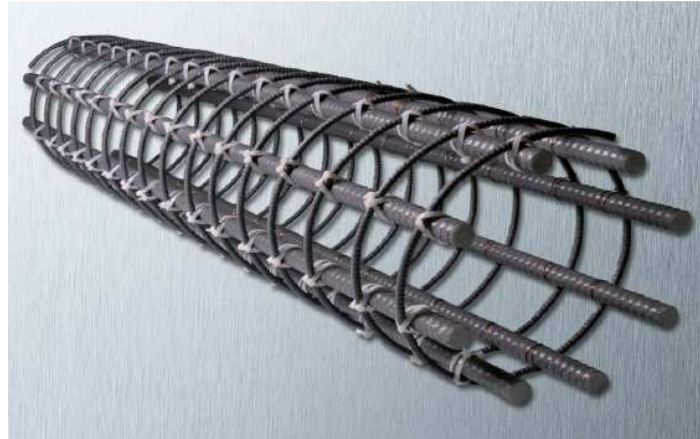
Como uma das funções da resina é proteger as fibras, devem ser evitados cortes ou desgastes na superfície da armadura para assim se obter o máximo de durabilidade. É também importante garantir que as resinas tenham algumas propriedades importantes para a sua durabilidade devendo garantir (Sayed, 2012):

- resistência ao ataque de cloretos;
- impermeabilidade;
- bons padrões de qualidade;
- boa aderência entre as fibras e a matriz.

### 2.4.3 Armaduras Halfen FRP FiReP®

As estruturas de betão armado, com varões de aço, são muito usadas na construção devido ao excelente comportamento do betão armado para resistir aos diversos tipos de esforços. Contudo, estas estruturas apresentam algumas debilidades como a provável corrosão do aço ao longo do tempo. Além do GFRP têm sido estudados e usados outros materiais em substituição do aço, tentando diminuir a ocorrência de corrosão, como o caso do aço inox, zincado, galvanizado ou aço protegido com revestimento de resina *epóxi*. Mesmo o aço zincado, galvanizado ou aço protegido podem apresentar

problemas, e é principalmente neste campo que as armaduras e acessórios de fibra de vidro Halfen FRP FiReP<sup>®</sup> (Figura 2.9) se apresentam como uma boa alternativa. Principalmente nas condições mais adversas onde as duas características acabam por apresentar vantagens.



**Figura 2.9 - Armaduras Halfen FRP FiReP<sup>®</sup>**

As características, vantagens e possíveis aplicações dos varões GFRP são apresentadas a seguir (Halfen FRP FiReP<sup>®</sup>, 2010) (Quadro 2.4):

**Quadro 2.4 - Vantagens e aplicações de armaduras de GFRP.**

<b>Características</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Aplicações</b>
-Alta resistência à corrosão e ataques químicos.	-Longa duração em condições extremas.  -Redução de recobrimento.  -Elevada durabilidade.	-Apropriado para ambientes favoráveis à corrosão mesmo com pouco recobrimento: garagens enterradas, infraestrutura e super-estrutura de pontes, revestimentos finos de fachadas, obras hidráulicas, pavimentos industriais, reservatórios, estações de águas residuais e estacas.
-Pode ser facilmente cortado e desgastado/lascado.	-Poupança de tempo ao trabalhar, podendo ser cortado e perfurado já no local de aplicação	-Paredes de túneis, ancoragens e estruturas temporárias.
- Inexistência de condutibilidade eléctrica, cargas eléctricas e magnetismo.	- Método simplificado de construção, sem electromagnetismo ou condutibilidade.	-Adequado para instalação edifícios de investigação médica onde é necessária a calibração de equipamentos de alta voltagem, em áreas próximas de sensores de semáforos de trânsito, instrumentos sensíveis, construção ecológica e salas de explosivos.
-Elevada resistência à tracção.	-Elementos estruturais mais pequenos, redução de peso dos elementos.	- Estruturas em geral e estruturas temporárias e reforço adicional para condições de cargas extraordinárias.
- Superfície de revestimento selada	-Melhorias na resistência química e na aderência; bom manuseamento.	- Apropriado para construção no local da obra.

Este material, além das características mencionadas acima tem características mecânicas que podem representar uma mais-valia na construção em betão armado. No Quadro 2.5 apresenta-se uma comparação entre 3 tipos de materiais de armaduras.

**Quadro 2.5 - Comparação de tipo de armaduras (Halfen FRP FiReP®, 2010)**

Tipo de armaduras	Aço	Aço inox	Halfen FRP FiReP®
Tensão máxima de tracção (MPa)	550	550	1000
Módulo de elasticidade (MPa)	200.000	170.000	60.000
Coefficiente de expansão térmica $\alpha$ [1/K]	$10 \times 10^{-6}$	$16 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$ (axial) $18 \times 10^{-6}$ (radial)
Condutibilidade eléctrica	Sim	Baixa	Não
Magnetismo	Sim	Muito baixo	Não
Densidade (kg/dm <sup>3</sup> )	7,85	7,9	2,2

## Capítulo 3 - Aderência entre o betão e os varões

### 3.1 Introdução

A aderência entre o betão e o varão é uma propriedade fundamental no comportamento estrutural de qualquer peça de betão armado. É através da aderência entre estes dois materiais que há distribuição de tensões quando são aplicados esforços ou deformações ao elemento de betão armado. Nas zonas de compressão, o betão e o aço, ou outro material de reforço, apresentam deformações idênticas mas, nas zonas traccionadas, o mesmo não acontece, porque nesta situação há ocorrência de fissuras e há, consequentemente, um deslocamento relativo entre a armadura e o betão. Quando as deformações entre os dois materiais são idênticas designa-se por aderência “rígida”, já no caso em que há deslocamento na interface designa-se por aderência “móvel” (Fernandes, 2000; Silva, 2006).

Nos elementos estruturais, as tensões de aderência são principalmente provocadas por:

- acções externas que provocam tensões de tracção e/ou de compressão no aço.
- fissuras, aumentando as tensões na armadura.
- forças de ancoragem que transmitem as tensões dos varões para o betão.
- variação da temperatura, dada a diferença de expansão térmica da armadura e do betão.
- retracção do betão que é impedida pelo varão e provoca tensões na interface da armadura com o betão.
- fluência do betão em zonas comprimidas que aumenta as deformações elásticas de encurtamento, o que aumenta as tensões na armadura.

### 3.2 Definição de aderência

A aderência pode ser considerada como o mecanismo de transferência de tensões ao longo de toda a interface existente entre o betão e a armadura. Sem este mecanismo o desempenho do betão armado não seria possível. O mecanismo da aderência é bastante importante, tendo sido exaustivamente investigado ao longo de décadas, de modo a adquirirem-se conhecimentos para a sua compreensão e posterior aplicação nos mais variados elementos estruturais usados na construção em betão armado (Fernandes, 2000).

A aderência pode ser avaliada tendo em conta uma relação tensão de aderência *versus* deslizamento, sendo esta representativa da variação da tensão ocorrida na interface do aço e do betão e relacionada com o deslocamento ocorrido entre a armadura e o betão. Quando os valores máximos da tensão são atingidos há perda da aderência e ocorre uma

destruição parcial da aderência com consequentes deformações e fissuras (Fernandes, 2000; Louro, 2011).

Embora a aderência seja tratada como um mecanismo onde se obtêm diversas parcelas, o valor médio é o valor realmente importante. É necessário referir que este mecanismo de transferência de forças tem várias parcelas, a adesão, o atrito e a aderência mecânica. No entanto, é difícil de obter experimentalmente os valores separados de cada parcela (Castro 2002; Louro 2011).

### 3.2.1 Adesão

A adesão também chamada de aderência química é formada através de uma ligação física e química durante a presa do betão. Esta ligação é formada na interface da armadura e o betão e depende também do tipo da superfície da armadura e do seu estado de conservação. A parcela da adesão pode ser avaliada através de um ensaio de separação de um cubo sobre uma chapa metálica. É comum considerar-se que a adesão é destruída pelas acções de serviço ou até pela retracção do betão, isto é, por solicitações baixas. No entanto, de acordo com o ACI Committee 408 (1991) e outros estudos recentes realizados, para comparar o comportamento de varões lisos com varões revestidos com *epoxi*, mostraram que a adesão tem um papel importante na aderência e influência na fendilhação (Fernandes, 2000; Louro 2011).

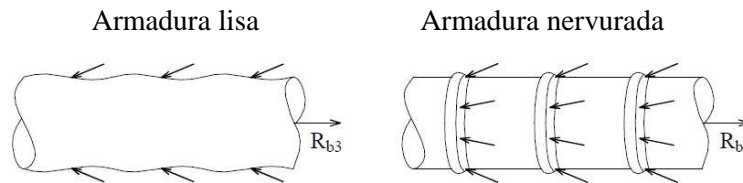
### 3.2.2 Atrito

Na interface da armadura e do betão desenvolvem-se forças de atrito. O atrito que ocorre na interface é uma reacção às forças na interface da armadura e do betão. As forças de atrito são quantificadas através do coeficiente de atrito que existe entre a armadura e o betão, e este é bastante influenciado pelo tipo/qualidade da superfície da armadura. O atrito resulta da pressão transversal imposta pelo betão na armadura que pode ser originada pela própria retracção do betão e/ou confinamento. O atrito pode ser determinado num ensaio de arrancamento de uma armadura lisa embebida num elemento de betão. Neste ensaio deve ter-se em atenção que na fase inicial existe também adesão (Fernandes, 2000).

### 3.2.3 Aderência mecânica

A aderência mecânica manifestada principalmente em armaduras com nervuras é caracterizada pelas forças de compressão perpendiculares às nervuras da armadura. Estas forças são resultantes da tentativa de deslizamento da armadura quando lhe é imposta uma tensão de tracção. Nas zonas das nervuras há micro-fissuração e micro-

esmagamento provocado pelas tensões elevadas que se desenvolvem naquelas zonas. Nas armaduras lisas, devido a algumas irregularidades superficiais, existe também aderência mecânica. Nas armaduras nervuradas, o valor da tensão de aderência mecânica depende da forma e da inclinação das nervuras, da altura e da distância entre as mesmas (Fernandes, 2000; Fusco, 1995).



**Figura 3.1 - Aderência mecânica (Fernandes, 2000)**

### 3.2.4 Factores que influenciam a aderência

A aderência pode ser influenciada por uma grande variedade de factores (Fernandes, 2000):

- Tipo de betão
- Classe de aço
- Tensão na armadura
- Recobrimento e espaçamento da armadura
- Diâmetro da armadura
- Comprimento de ancoragem
- Tipo e geometria da nervura
- Efeito de confinamento (pressão transversal)
- Quantidade de armadura transversal
- Posição da armadura em relação à betonagem
- Repetição de carregamento, número de ciclos e amplitude do carregamento
- Tipo, velocidade e duração do carregamento
- Temperatura
- Revestimento da armadura

### 3.2.5 Curvas de tensão de aderência versus escorregamento

Na figura 3.2 podemos ver as curvas de tensão de aderência *versus* escorregamento para armaduras nervuradas e armaduras lisas, segundo Leonhardt e Monnig (1977).

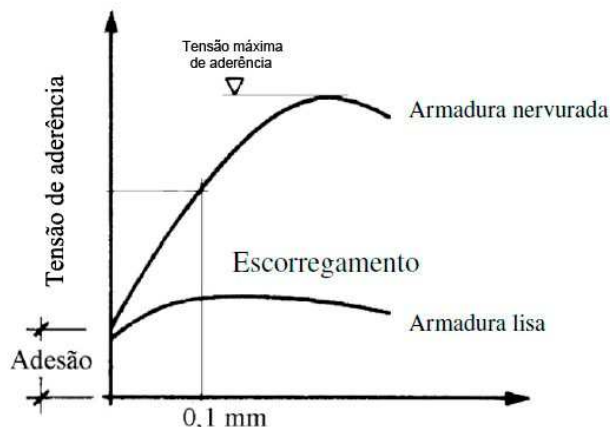


Figura 3.2 - Curvas de tensão de aderência versus escorregamento (Leonhardt e Monnig, 1977)

Através da Figura 3.2 é possível verificar que na fase inicial há uma etapa que corresponde à adesão. O troço seguinte, até se atingir a tensão máxima de aderência, correspondente à resistência mecânica provocada pelas nervuras da armadura. Por fim, o troço descendente corresponde à aderência mecânica. É importante referir que nesta última fase parte da aderência foi destruída.

O *Bulletin 10* da *Fédération Internationale du Béton* sugere curvas padrão mais pormenorizadas para os vários tipos de armaduras e confinamento (FIB Bulletin 10, 2000). Na Figura 3.3 são identificadas 4 etapas distintas para estas curvas padrão.

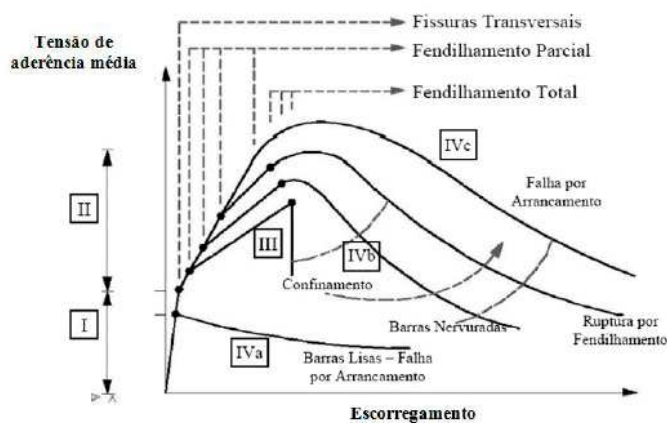


Figura 3.3 - Modelo de curvas padrão da tensão de aderência versus escorregamento (FIB Bulletin 10, 2000)

Na primeira fase não há ocorrência de fissuras nem escorregamento, sendo esta fase caracterizada pela parcela da adesão. Contudo, o modelo também indica que nesta fase há interação mecânica provocada pela rugosidade da superfície, embora residual. Nesta fase, o deslocamento é representativo da deformação do betão. A segunda fase é

caracterizada pela perda da adesão e é neste período que aparecem as primeiras fendas provocadas pelas tensões de tracção no betão. A fase posterior precede a rotura da aderência, verifica-se que as fendas mencionadas anteriormente tornam-se maiores e há formação de novas fendas, fendas longitudinais até à face do betão. A quarta fase e última é a fase descendente das curvas e representa a rotura da aderência. Esta rotura varia conforme os tipos materiais e a sua disposição.

### 3.3 Comportamento da aderência no betão armado

#### 3.3.1 Rotura da Aderência

A aderência entre o betão e a armadura tem dois tipos de rotura, o arrancamento da armadura e a rotura prematura do provete de betão.

O arrancamento da armadura por vezes só é possível com recurso a confinamento, evitando a rotura do betão. Deste modo, as tensões de tracção provocadas pelas nervuras são suportadas pelas armaduras transversais, permitindo o corte do betão nas zonas nervuradas. No caso de não haver confinamento, se for atingida a tensão máxima de tracção do betão há fendilhação e conseqüente perda de aderência (Figura 3.4).

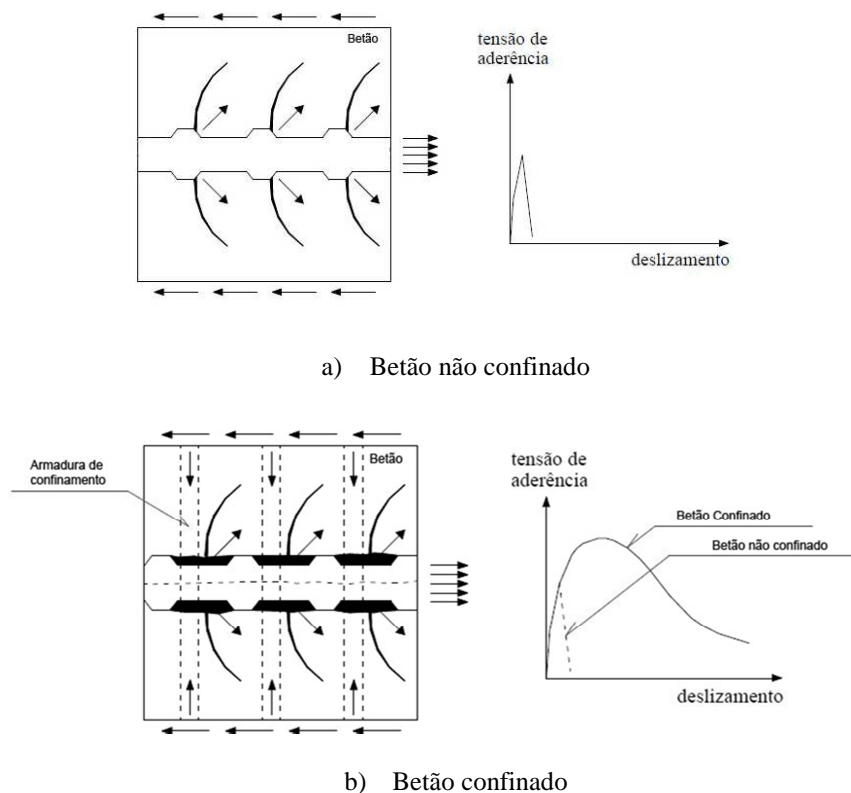


Figura 3.4 - Processo de arrancamento (Fenandes, 2000)

A fendilhação do recobrimento é resultado do efeito de tracção circunferencial que por sua vez é resultante das componentes radiais das tensões de compressão transferidas do aço para o betão. A rotura só acontece quando não existe confinamento suficiente para resistir às referidas tensões. Estas tensões de tracção provocam obviamente microfissuras que tendem a propagar-se até ao exterior da peça (Figura 3.5). As fissuras são condicionadas pelo tipo de armadura e a sua posição na peça (Fusco, 1995).

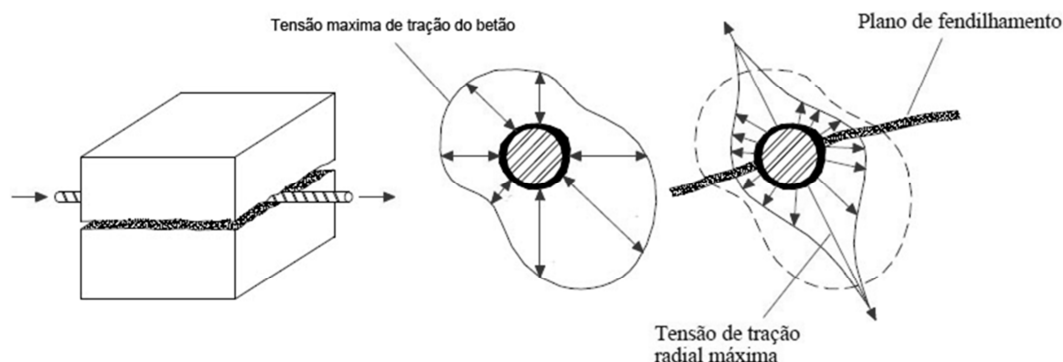


Figura 3.5 - Fendilhação longitudinal do betão (Fusco, 1995)

A tensão de cálculo de aderência para o betão armado está regulamentada no subcapítulo 8.4.2. do EC2 e pode ser calculada através da expressão 3.1:

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd}, \quad (3.1)$$

onde:

$f_{ctd}$  valor de cálculo da resistência à tracção do betão;

$\eta_1$  coeficiente que relaciona as condições de aderência e a disposição do varão;

$\eta_2$  dado em função do diâmetro.

### 3.3.2 A aderência durante a fendilhação

A aderência que ocorre na interface da armadura e do betão permite que o aço possa absorver as forças de tracção. No entanto, quando as forças de tracção são baixas, o betão resiste à tracção mantendo-se assim no estado não-fendilhado. Quando as solicitações são mais elevadas, o betão deixa de resistir à tracção e fissa, ficando assim no estado fendilhado. Durante a fendilhação há alterações na distribuição das tensões. Nas secções onde há formação de fendas, a tensão na armadura aumenta, sendo provocada pela separação do betão, que deixa de resistir à tracção. Nas zonas

fendilhadas há também uma perda da tensão de aderência que aumenta à medida que se aproxima das secções não fendilhadas (Figura 3.6).

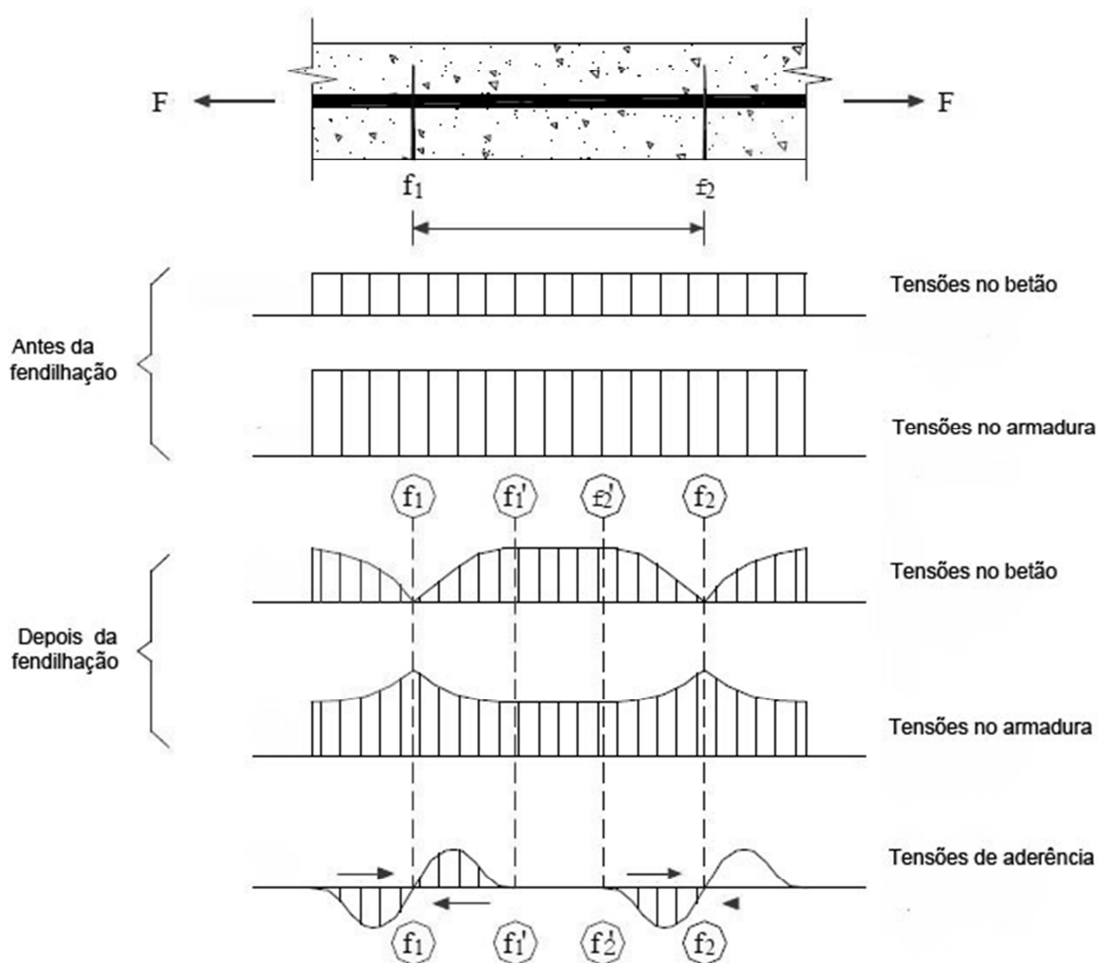


Figura 3.6 - Fendilhação por tracção (Leonhardt e Monnig, 1977; Fernandes, 2000)

Na Figura 3.6 é possível verificar que nas secções fendilhadas a tensão na armadura aumenta à medida que se aproxima da fenda; já no betão, a tensão diminui à medida que se aproxima da fenda. Nas secções fendilhadas, as tensões de aderência são nulas; estas tensões são mobilizadas na proximidade da fenda como se verifica no troço  $f_1 f'_1$  e  $f_2 f'_2$ . O troço  $f_1 f'_1$  poderá tornar-se maior se a aderência for menor, condicionando a distância entre fendas; isto é, se a aderência for menor, haverá um maior comprimento de aderência na interface e assim não provoca a abertura de novas fendas. Entre a secção  $f'_1$  e  $f'_2$  as tensões de aderência estabilizam, tendo pouca variação. Se existir uma solicitação maior na peça e se a tensão máxima do betão à tracção for atingida, ocorrerá uma nova fenda e há uma nova distribuição das tensões. Com a formação de uma nova fenda há novas tensões de aderência na sua proximidade, como é demonstrado na proximidade da fenda 3, na Figura 3.7 (Fernandes, 2000).

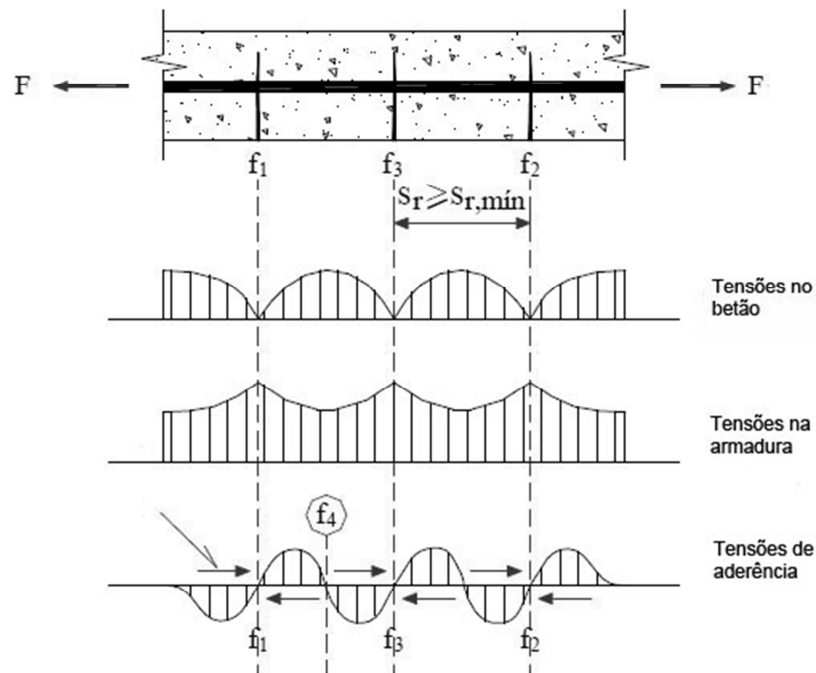


Figura 3.7 - Formação de fendas (Leonhardt e Monnig, 1977; Fernandes, 2000)

Na proximidade às fendas poderá haver perda da adesão, visto que em armaduras nervuradas ocorrem micro-fendas como é visível na Figura 3.8. Esta perda da adesão está relacionada com as tensões de compressão no betão provocadas pelas nervuras (Goto, 1971).

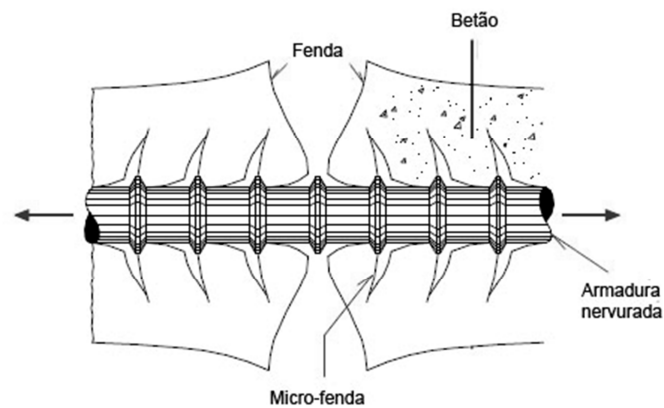


Figura 3.8 - Micro-fendas (Goto, 1971)

### 3.3.3 Modelos teóricos do comportamento da aderência

Ao longo de décadas foram estudados e elaborados diversos modelos numéricos para o comportamento da aderência. De entre vários, TASSIOS (1979) apresenta um modelo com várias fases ao longo do crescimento das tensões de aderência versus escorregamento (Fernandes, 2000).

Varum (2003) propôs também um modelo mas, neste caso, o modelo tem simplificações ao nível do escorregamento da armadura, sendo assumida a aderência perfeita (Louro 2011).

De forma idêntica ao proposto por Varum e Tassios, o CEB 217 (1993) propõe um modelo para o comportamento da aderência. Neste modelo, o primeiro troço segue uma lei não linear e é seguido por um troço linear, independentemente do tipo de solicitação (tracção ou compressão). Neste modelo, está também prevista uma relação tensão-extensão as armaduras lisas (Melo, 2009).

### 3.4 Tension Stiffening effect

No betão armado a contribuição do betão é geralmente apenas para forças de compressão; contudo, o betão também é capaz de um contributo em esforços de tracção mas menos relevante. Um desses contributos é designado por *tension stiffening effect*. Este fenómeno está relacionado com as forças de tracção; portanto, zonas traccionadas de vigas e tirantes de betão armado são exemplos da sua ocorrência (Figura 3.9).

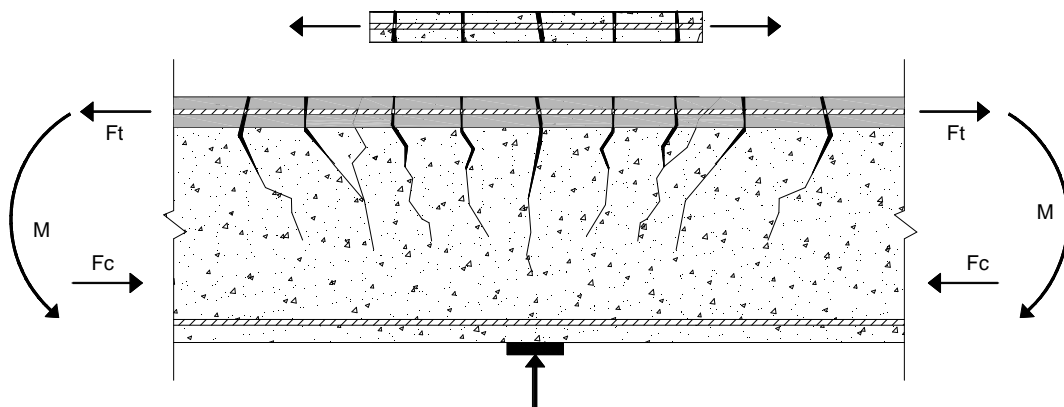


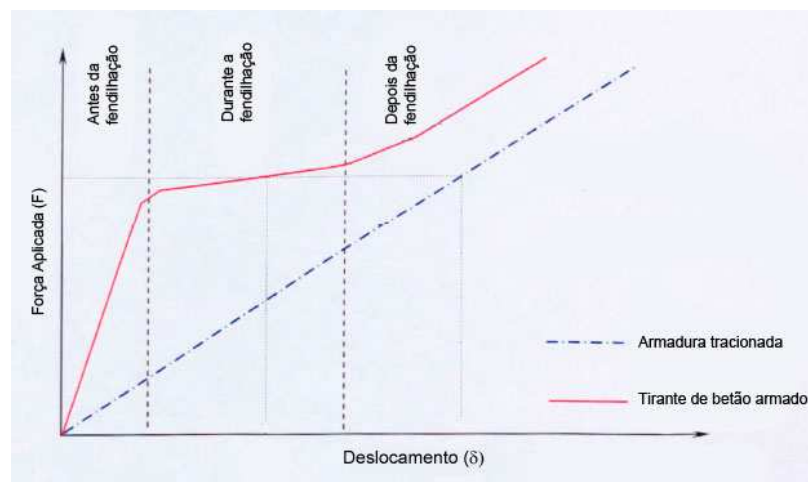
Figura 3.9 - Tirante e viga em flexão

O *tension stiffening effect* é entendido como um aumento da rigidez consequente da interacção da armadura com o betão. Este aumento da rigidez ocorre devido à

contribuição do betão entre as fendas, que resiste às tensões de tracção e contribui para a rigidez. Este efeito é de grande importância e deve ser considerado no cálculo das deformações dos elementos de betão armado, caso contrário o cálculo será pouco rigoroso. O *tension stiffening effect* é afectado por vários parâmetros, quer do betão, quer do aço e, pela intersecção de ambos. Abaixo estão enumerados alguns desses factores:

- módulo de elasticidade do betão
- resistência à tracção do betão
- aderência na interface betão-armadura
- módulo de elasticidade da armadura
- número de carregamentos

A resposta do betão armado com armaduras de GFRP é caracterizada três diferentes estados (Figura 3.10). O primeiro é relativo ao período antes da formação da primeira fenda (antes da fendilhação), o segundo estado é relativo à formação das fendas e, por último, há a fase referente ao estado fendilhado do elemento de betão armado.



**Figura 3.10 - Resposta típica de um tirante de betão armado com armadura de GFRP (Sooriyaarachchi, 2006)**

No caso de betão armado com armaduras de aço a resposta típica é idêntica. Contudo, os deslocamentos são menores, sendo isso mais notório no estado relativo à formação das fendas e, conseqüentemente, a transição entre o primeiro e o terceiro estado é mais directa/menor.

As deformações nos elementos de betão armado são geralmente condicionadas por dois estados, estado não fendilhado e estado totalmente fendilhado. Contudo, as deformações reais correspondem a uma situação intermédia dos dois estados. Antes da fendilhação, tanto a armadura como o betão têm uma tensão com reduzida variação ao longo do elemento. Após a formação de fendas, verifica-se que as tensões e conseqüentes deformações variam de secção para secção. Nas secções fendilhadas, a tensão na armadura aumenta, sendo a força de tracção resistida apenas pelo aço, e no betão a

tensão é nula. Nas secções não fendilhadas, a tensão de tracção na armadura é menor porque existe a contribuição do betão, transmitida através da aderência entre os dois materiais, na resistência às tensões de tracção (Figura 3.11).

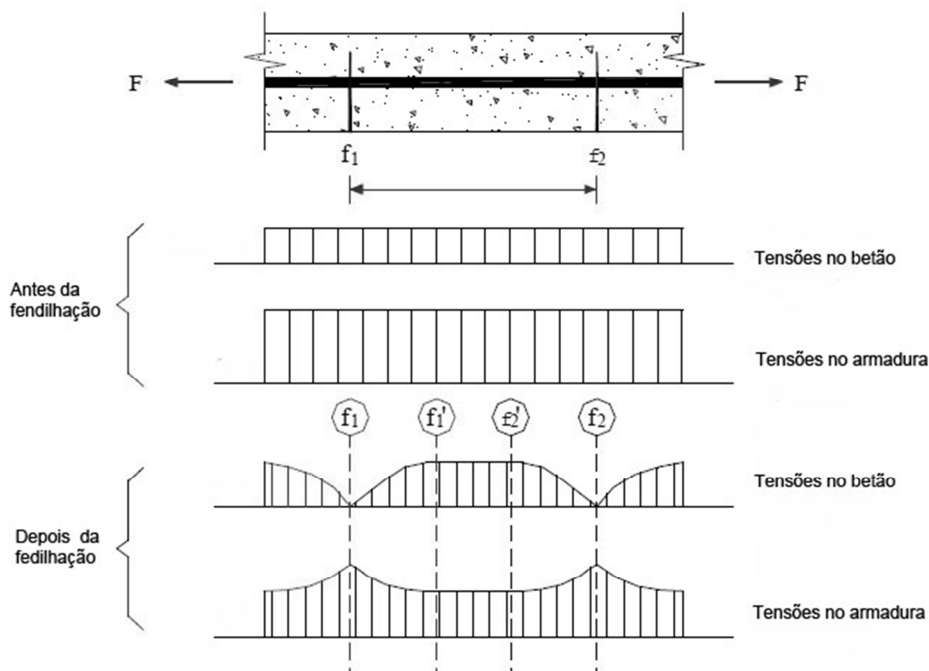


Figura 3.11 - Tensões na armadura e betão após a fendilhação (Leonhardt e Monnig, 1977; Fernandes, 2000)

O *tension stiffening effect* é referido nos principais regulamentos actuais sobre dimensionamento de estruturas de betão armado, tais como, o EC2, MC90 e o ACI 224.2R-92. O MC90 e ACI 224.2R-92 provêm de expressões empíricas que consideram o *tension stiffening effect* (ACI, 1997; CEB-FIP, 1990; NP EN 1992-1-1, 2010).

Através do EC2 é possível calcular a extensão média ( $\epsilon_{sm}$ ) da armadura e respectivamente a deformação de elementos de betão armado. As expressões apresentadas neste regulamento são definidas para armaduras de aço, logo a sua aplicação a armaduras GFRP deve ser realizada com bastantes reservas porque não ser aplicável a este tipo de armaduras. Em seguida indica-se a expressão do subcapítulo 7.4.3 do EC2 (expressão 3.2).

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \quad (3.2)$$

onde:

$\alpha$  parâmetro de deformação considerando que poderá ser, por exemplo, uma extensão, uma curvatura ou uma rotação;

- $\alpha_I, \alpha_{II}$  valores do parâmetro calculado, respectivamente, para os estados não fendilhado e totalmente fendilhado;
- $\zeta$  coeficiente de distribuição (que tem em conta a contribuição do betão traccionado entre fendas) obtido pela expressão 3.3 (7.19 do EC2):

$$\zeta = 1 - \beta (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2 \quad (3.3)$$

onde:

- $\zeta = 0$  para secções não fendilhadas;
- $\beta$  coeficiente que tem em conta a influência na extensão média da duração do carregamento ou da repetição do carregamento:  
 = 1,0 para um carregamento de curta duração;  
 = 0,5 para um carregamento de longa duração ou para carregamentos repetidos;
- $\sigma_s$  tensão nas armaduras de tracção, calculada na hipótese de secção fendilhada;
- $\sigma_{sr}$  tensão nas armaduras de tracção, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação.

O MC90 na Secção 3.2 apresenta um modelo para um tirante de betão armado onde é possível determinar a extensão média e consequentemente a deformação.

- i. Para o estado não fendilhado,  $0 < \sigma_s \leq \sigma_{sr1}$

$$\varepsilon_{s,m} = \varepsilon_{s1} \quad (3.4)$$

- ii. Fase da fendilhação,  $\sigma_{sr1} < \sigma_s \leq \sigma_{srn}$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \frac{\beta_t (\sigma_s - \sigma_{sr1}) + (\sigma_{srn} - \sigma_s)}{\sigma_{srn} - \sigma_{sr1}} (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) \quad (3.5)$$

- iii. Fendilhação estabilizada,  $\sigma_{srn} < \sigma_s \leq f_{yk}$

$$\varepsilon_{s,m} = \varepsilon_{s2} - \beta_t (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) \quad (3.6)$$

- iv. Fase pós cedência,  $f_{yk} < \sigma_s \leq f_{tk}$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{sy} - \beta_t (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) + \delta \left( 1 - \frac{\sigma_{sr1}}{f_{yk}} \right) (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{sy}) \quad (3.7)$$

onde:

$\epsilon_{sm}$	extensão média da armadura
$\epsilon_{s1}$	extensão da armadura quando o betão não está fendilhado
$\epsilon_{s2}$	extensão da armadura numa secção fendilhada
$\epsilon_{sr1}$	extensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão)
$\epsilon_{sr2}$	extensão da armadura numa secção fendilhada sob a acção das forças que originam a 1ª fenda
$\Delta\epsilon_{sr}$	diferença entre $\epsilon_{sr2}$ e $\epsilon_{sr1}$
$\beta_t$	factor que traduz a percentagem de betão fendilhado. Este factor está relacionado com o espaçamento das fendas (aderência), com o tipo de esforço e com o tipo de cargas. Para acções de curta duração (tracção pura), $\beta_t = 0,40$ , para acções de longa duração ou cargas repetidas (tracção pura), $\beta_t = 0,25$ .
$\epsilon_{sy}$	extensão de cedência da armadura
$\epsilon_{su}$	extensão de rotura da armadura
$\epsilon_{smu}$	extensão média da armadura no instante da rotura
$\sigma_s$	tensão da armadura numa secção fendilhada
$\sigma_{sr1}$	tensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão)
$\sigma_{sm}$	tensão da armadura no fim da estabilização da fendilhação, quando se forma a última fenda (considerando a contribuição do betão).
$f_{yk}$	tensão característica de cedência da armadura
$f_{tk}$	tensão característica de rotura da armadura
$\delta$	0,8 para aço dúctil e com $f_{yk}=500$ MPa; este coeficiente depende da relação $f_{tk}/f_{yk}$ e de $f_{yk}$ .

Na Secção 3.2 do MC90 é apresentado um modelo de deformação de um tirante de betão armado quando submetido a esforços de tracção. Este modelo indica que após a formação das fendas e a sua estabilização existe um aumento constante da rigidez do tirante, onde se pode avaliar a contribuição do betão. O coeficiente  $\beta_t$  apresentado neste modelo indica a percentagem de betão não fendilhado e expressa, consequentemente, o efeito do *tension stiffening effect*. O modelo indica também para acções de curta duração e tracção pura que o valor deverá ser  $\beta_t = 0,40$ ; já para acções repetidas é indicado um valor menor,  $\beta_t = 0,25$ . Através da expressão 3.8 é possível calcular o coeficiente  $\beta_t$ .

$$\beta_t = \frac{\delta_{armadura} - \delta_{tirante}}{\Delta\delta_{cr}} \quad (3.8)$$

onde:

$\delta_{armadura}$  deformação da armadura para a força ou tensão pretendida.

$\delta_{tirante}$  deformação do tirante para a força ou tensão pretendida.

$\Delta\delta_{cr}$  diferença de deformação na secção, fendilhada e não fendilhada, quando se forma a primeira fenda.

O ACI 224.2R-92 também prevê o estudo do comportamento das deformações no betão armado. O estudo das deformações em elementos de betão armado pode ser realizado através da expressão de cálculo de  $A_e$  (expressão 3.9).

$$A_e = A_g (P_{cr}/P)^3 + A_{cr}(1-(P_{cr}/P)^3) \quad (3.9)$$

onde:

$A_e$  área efectiva da secção de betão;

$A_{cr}$  área da secção fendilhada;

$A_g$  área total da secção incluindo a área homogeneizada da armadura;

$P_{cr}$  força para a qual ocorre a primeira fenda;

$P$  força aplicada.

Para armaduras de GFRP, a expressão foi modificada (expressão 3.10) e está definida no ACI 440.1R-01, onde foi incluído um novo factor de ligação  $\beta_d$ , específico para o uso de armaduras de GFRP, contudo continua a subestimar as deformações (ACI, 2001).

$$A_e = A_g \beta_d (P_{cr}/P)^3 + A_{cr}(1-(P_{cr}/P)^3) \quad (3.10)$$

O factor de ligação,  $\beta_d$ , pode ser estimado através da expressão 3.11:

$$\beta_d = \alpha_b [E_f/E_s + 1] \quad (3.11)$$

onde:

$\alpha_b = 0,5$  (usado para armaduras de GFRP)

A largura das fendas e a distância entre fendas são parâmetros importantes a considerar na análise do comportamento das estruturas nas condições de serviço. As fendas podem prejudicar o correcto funcionamento ou a durabilidade da estrutura. Claro que a fendilhação é normal nas estruturas de betão armado mas tem de existir um controlo da mesma. O EC2 apresenta expressões para prever a largura das fendas ( $W$ ) e a distância máxima entre fendas ( $S_{r,máx}$ ).

A largura das fendas,  $W_k$ , poderá ser calculada através da expressão 3.12 (7.8 do EC2):

$$W_k = S_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (3.12)$$

onde:

- $S_{r,máx}$  distância máxima entre fendas;
- $\epsilon_{sm}$  extensão média da armadura para a combinação de acções considerada, incluindo o efeito das deformações impostas e considerando a contribuição do betão traccionado. Considera-se apenas a extensão de tracção que ocorre para além do estado de extensão nula do betão no mesmo nível;
- $\epsilon_{cm}$  extensão média no betão entre fendas;
- $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$  poderá ser calculado pela expressão 3.13 (7.9 do EC2):

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \left( \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \right) (1 - \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \sigma_s / E_s \quad (3.13)$$

em que:

- $\sigma_s$  tensão na armadura de tracção admitindo a secção fendilhada. Para elementos pré-esforçados por pré-tensão,  $\sigma_s$  poderá ser substituído pela variação  $\Delta \sigma_p$  de tensões nas armaduras de pré-esforço a partir do estado de extensão nula do betão no mesmo nível;
- $\alpha_e$  relação  $E_s/E_c$
- $\rho_{p,eff}$  taxa de armadura de tracção em relação ao betão traccionado
- $A_{c,eff}$  área efectiva de betão mobilizado por aderência
- $k_t$  coeficiente em função da duração do carregamento
  - $k_t=0,6$  para acções de curta duração
  - $k_t=0,4$  para acções de longa duração

### 3.5 Estudos recentes usando varões de GFRP

Ao longo das últimas décadas foram efectuados diversos estudos sobre a aderência e o *tension stiffening effect* que englobaram essencialmente testes em laboratório com varões de aço. Mais recentemente com o aparecimento de novos materiais, estes estudos alargaram o seu âmbito e passaram a incluir também as armaduras de GFRP, entre outras. Seguidamente, apresenta-se um pequeno resumo dos estudos recentes considerados mais significativos sobre a aderência e o *tension stiffening effect* usando varões de GFRP.

Saleh Hamed Alsayed (1998) estudou o comportamento de vigas com armaduras de GFRP, mais precisamente, a deformação e tensões últimas. A deformação prevista pelo ACI teve uma diferença de 70%.

Rejane Martins Fernandes (2000), no âmbito da tese de Mestrado, elaborou um estudo acerca do comportamento da aderência do aço e betão sob acções monotónicas e acções repetidas. Os resultados dos ensaios monotónicos foram comparados com as recomendações do CEB-FIP MC 1990, EC2 e NB-1/78. Os valores da resistência convencional e efectiva da ligação entre as normas apresentaram dispersões muito grandes, como foi o caso da diferença de 67% da tensão ade aderência do EC2 em relação à NB-1/78.

Houssam Toutanji e Yong Deng (2003) elaboraram testes de laboratórios usando vigas de betão armado com armaduras de GFRP. Os modelos propostos pelo ACI440 estimaram de forma correcta a deformação das vigas ensaiadas.

Biswarup Saikia *et al.* (2007) elaboraram um estudo testando vigas de betão armado com armaduras de GFRP com o objectivo de avaliar as tensões e as condições de serviço dos elementos da estrutura. A principal falha das vigas deveu-se a fendas da aderência entre as armaduras e o betão que permitiu o escorregamento.

Harsha Sooriyaarachchi (2006), no âmbito de tese de doutoramento, estudou o comportamento de tirantes de betão armado com armaduras de GFRP e vigas com armaduras de GFRP. Entre vários parâmetros, o *tension stiffening effect* foi também comparado com os códigos existentes (ACI e CEB-FIP). Neste estudo, foram também efectuados ensaios *pull out*. Concluiu-se que os regulamentos aplicados sobrestimam as deformações.

Mohamed S. Issa, *et al.* (2011) analisaram 7 vigas de betão armado com armaduras de GFRP e ensaiadas para diferentes carregamentos. Neste estudo foram também usadas fibras de vidro na mistura dos betões. As previsões teóricas baseadas no ACI 440 mostraram-se coerentes com os resultados experimentais.

Wai *et al.* (2011) elaboraram um estudo acerca dos principais mecanismos de aderência de armaduras e betão. No estudo foram executados ensaios de arrancamento (*pull out*). Os resultados da pesquisa indicam que a adesão foi o principal contribuinte para a aderência, contudo, outros mecanismos contribuíram para o aumento da força de arrancamento do varão.

Abdelmonem Masmoudi *et al.* (2012) estudaram o comportamento de vigas de betão armado com armaduras de GFRP, com diferentes taxas de armadura. Através dos resultados destes ensaios foram propostas taxas de armaduras para rentabilizar o uso destas armaduras.

Sílvia Andrea Couveiro Louro (2011), no âmbito da sua tese de Mestrado, efectuou um estudo de aderência com armaduras de aço com recurso a ensaios de laboratório, mais precisamente ensaios *pull out*. Nestes ensaios foi visível que a superfície do varão influencia os resultados. Já quanto à variação do diâmetro do varão foi verificado que não influenciam os resultados. Para comprimentos de amarração muito longos, a tensão média teve tendência a diminuir.

Mathieu Robert e Brahim Benmokrane (2010), investigaram o efeito do envelhecimento na aderência entre as armaduras de GFRP e o betão. Este estudo previa um aumento da temperatura dos elementos para aumentar a degradação da aderência. Os autores não registaram degradações significativas na aderência.

H. Mazaheripour *et al.* (2013), analisaram a aderência entre as armaduras de GFRP e os betões auto-compactáveis e para isso realizaram 36 ensaios *pull out*. O estudo teve em conta a superfície das armaduras, diâmetro das mesmas e comprimento da interface.



## Capítulo 4 - Programa experimental

### 4.1 Introdução

A análise estrutural de elementos fabricados com materiais novos como é o caso dos varões de fibra de vidro, terá obrigatoriamente de ser aprofundada e devidamente testada, de forma a que se retire o máximo de informações para se poder implementar o seu uso em situações correntes, garantindo sempre a segurança. Deste modo, é importante observar e compreender o comportamento dos materiais, nomeadamente no que diz respeito ao *tension stiffening effect*, à abertura de fendas, ao espaçamento das fendas, e à aderência. Assim, o trabalho experimental vem complementar e ajudar a compreender o comportamento das peças a ensaiar.

Para se atingirem os objectivos inicialmente propostos para este trabalho definiu-se um programa experimental que envolveu a realização de 36 ensaios *pull out* e 12 ensaios de tirantes armados.

Para o fabrico dos tirantes de betão armado e dos cubos para os ensaios *pull out* variaram-se os seguintes materiais e características: (i) 3 tipos de BEAL, com diferentes resistências mecânicas, designados por LC40, LC55 e LC70; (ii) varões de fibra de vidro Halfen FRP FiReP<sup>®</sup> de diâmetro 12 e 16 mm; (iii) varões de aço A500 NR SD com os mesmos diâmetros. Deste modo, foi possível realizar um estudo comparativo entre os comportamentos dos varões de aço e de GFRP, analisando-se os seguintes parâmetros: tensão de aderência armadura-betão, larguras das fendas, distância entre fendas, padrão de fendilhação, rigidez nos vários estados, contribuição do betão entre fendas, extensão média das armaduras, relação entre a largura de fendas e a tensão na armadura, e a deformação dos tirantes. Para se compreender os resultados é importante conhecer todas as propriedades relevantes dos materiais utilizados.

### 4.2 Caracterização dos tirantes

No programa experimental foram definidos 12 tirantes de BEAL com as medidas  $100 \times 100 \times 1200 \text{ mm}^3$ , onde foi colocado um único varão no eixo longitudinal, ficando com as extremidades, fora do betão, com cerca de 40 cm, para que pudessem ser amarrados na fase de ensaio. Os tirantes foram produzidos com 3 tipos de BEAL com resistências à compressão de 40, 55 e 70 MPa (designados por LC40, LC55 e LC70), sendo 6 com varão de fibra de vidro e 6 com varão de aço A500 NR SD, com diâmetro de 12 e 16 mm. Abaixo estão indicados os tirantes fabricados e ensaiados:

- Tirante com LC40 e armadura de GFRP com diâmetro 12 mm
- Tirante com LC55 e armadura de GFRP com diâmetro 12 mm

- Tirante com LC70 e armadura de GFRP com diâmetro 12 mm
- Tirante com LC40 e armadura de GFRP com diâmetro 16 mm
- Tirante com LC55 e armadura de GFRP com diâmetro 16 mm
- Tirante com LC70 e armadura de GFRP com diâmetro 16 mm
- Tirante com LC40 e armadura de aço com diâmetro 12 mm
- Tirante com LC55 e armadura de aço com diâmetro 12 mm
- Tirante com LC70 e armadura de aço com diâmetro 12 mm
- Tirante com LC40 e armadura de aço com diâmetro 16 mm
- Tirante com LC55 e armadura de aço com diâmetro 16 mm
- Tirante com LC70 e armadura de aço com diâmetro 16 mm

### **4.3 Caracterização dos provetes para os ensaios *pull out***

No programa experimental foram também definidos 36 provetes de betão para os ensaios *pull out* de BEAL com as medidas 200×200×200mm<sup>3</sup>, onde foi colocado um único varão atravessando o cubo e ficando também com os 2 extremos fora do betão. Em um dos extremos do varão, o comprimento foi utilizado para amarrar o varão na fase de ensaio. Para cada tipo de provete a ensaiar foram produzidos 3 exemplares iguais. Estes provetes foram igualmente produzidos com os 3 tipos de BEAL referidos (LC40, LC55 e LC70), usando varões de fibra de vidro e de aço A500 NR SD, com diâmetro de 12 e de 16 mm, à semelhança do realizado para os tirantes. Abaixo estão indicados os provetes de ensaio *pull out* fabricados e ensaiados:

- Provetes com LC40 e armadura de GFRP com diâmetro 12 mm
- Provetes com LC55 e armadura de GFRP com diâmetro 12 mm
- Provetes com LC70 e armadura de GFRP com diâmetro 12 mm
- Provetes com LC40 e armadura de GFRP com diâmetro 16 mm
- Provetes com LC55 e armadura de GFRP com diâmetro 16 mm
- Provetes com LC70 e armadura de GFRP com diâmetro 16 mm
- Provetes com LC40 e armadura de aço com diâmetro 12 mm
- Provetes com LC55 e armadura de aço com diâmetro 12 mm
- Provetes com LC70 e armadura de aço com diâmetro 12 mm
- Provetes com LC40 e armadura de aço com diâmetro 16 mm
- Provetes com LC55 e armadura de aço com diâmetro 16 mm
- Provetes com LC70 e armadura de aço com diâmetro 16 mm

## 4.4 Composição e caracterização dos BEAL

### 4.4.1 Constituintes dos betões

Na produção dos BEAL, utilizaram-se dois tipos de cimento, dependendo do desempenho de resistência pretendido: CEM II-A/L 42.5R (Figura 4.1) na produção dos betões LC40 e LC55; CEM I 52,5R para o betão LC70 foi usado cimento. No betão LC70 usou-se adição de sílica de fumo no sentido de obter melhor desempenho de resistência. No Quadro 4.1 estão apresentadas as massas volúmicas dos ligantes usados.

**Quadro 4.1 - Massas volúmicas dos ligantes**

Ligante	Massa volúmica (kg/dm <sup>3</sup> )
CEM I 52,5R	3,17
CEM II-A/L 42,5R	3,15
Sílica de fumo	2,20

Os agregados usados neste tipo de betões são de dois tipos, agregados finos de densidade normal e agregados leves. Os agregados de densidade normal utilizados na composição dos betões foram duas areias, a areia fina 0/2 mm (FS) e a areia média 0/4 mm (MS) (Figura 4.1). No Quadro 4.2 são apresentadas as massas volúmicas das areias.

**Quadro 4.2 - Massas volúmicas das areias**

Agregado	Massa volúmica (kg/dm <sup>3</sup> )
Areia fina 0/2	2,63
Areia média 0/4	2,63



**Figura 4.1 – Fotografia de amostras de cimento II-A/L 42.5R e de areia média.**

Na produção dos betões foram usados agregados leves de argila expandida, Leca<sup>®</sup>, com duas granulometrias diferentes, densidades e resistências, sendo estas a Leca<sup>®</sup> HD4/12 e a Leca<sup>®</sup> HD2/4. Esta última foi usada apenas no betão LC70. Os grãos de Leca<sup>®</sup>, apesar de dependerem da forma como são fabricados, apresentam uma forma esférica com uma superfície fechada e rugosa (Figura 4.2). Todavia, o interior dos grãos apresenta uma estrutura porosa do tipo alveolar de baixa densidade. Além da análise granulométrica foram também analisadas outros parâmetros da Leca<sup>®</sup>, seguindo o procedimento apresentado por Costa (2007), nomeadamente (Quadro 4.3): massa volúmica das partículas saturadas,  $\rho_{PS}$ ; massa volúmica das partículas no estado anidro,  $\rho_{P0}$ ; baridade no estado anidro,  $\pi_0$ ; percentagem de absorção de saturação,  $A_s$ ; percentagem de absorção em relação ao estado de humidade natural,  $A_N$ ; teor humidade interior das partículas,  $H_p$ .

Quadro 4.3 - Propriedades dos agregados leves

Agregado	$\rho_{PS}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	$A_N$ (kg/dm <sup>3</sup> )	$H_P$ (kg/dm <sup>3</sup> )
Leca HD 4/12	1,368	0	14
Leca HD 2/4	1,383	5	4



Figura 4.2 - Leca<sup>®</sup> HD2/4 e Leca<sup>®</sup> HD4/12

#### 4.4.2 Composição dos BEAL

Como já referido, para a produção das várias peças foram usados três tipos de BEAL com composições e resistências mecânicas distintas. O estudo das composições foi elaborado através de um método desenvolvido por Costa *et al.*, (2010), tendo sempre como objectivo obter as resistências previstas. No Quadro 4.4 apresenta-se a composição para 1m<sup>3</sup> de betão.

Quadro 4.4 - Composição dos vários tipos de betão.

Constituintes	LC40		LC55		LC70	
	Massa (kg)	Volume (litros)	Massa (kg)	Volume (litros)	Massa (kg)	Volume (litros)
CEM I 525 R	-	-	-	-	500	158
CEM II-A/L 42,5 R	340	108	420	133	-	-
Sílica de Fumo	-	-	-	-	25	10
Adjuvante (3002HE)	1,7	2,0	4,2	4,0	10,0	9,0
Água efectiva	173	173	151	151	136	136
Água de absorção	9	-	10	-	12	-
Ar da pasta	-	20	-	20	-	20
Areia fina 0/2	242	92	176	67	74	28
Areia média 0/4	727	277	703	267	662	252
Leca HD2/4	-	-	-	-	54	39
Leca HD4/12	437	328	476	357	464	349

#### 4.4.3 Propriedades

Com o objectivo de obter uma caracterização dos betões fidedigna quanto à sua resistência e massa volúmica foram produzidos quatro provetes cúbicos de 150 mm de aresta para cada amassadura realizada.

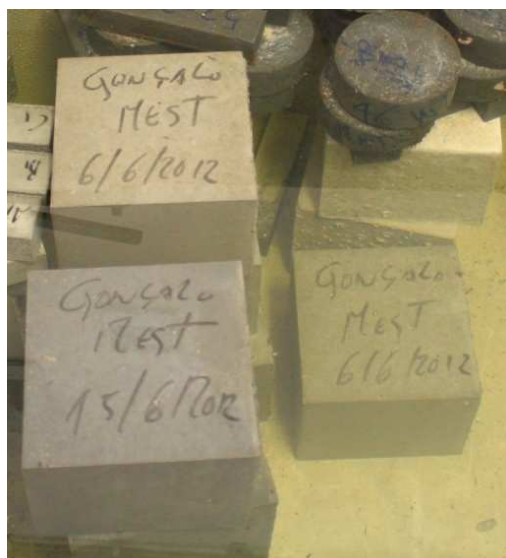


Figura 4.3 - Provetes de betão submersos em tanque de cura.

#### 4.4.3.1 Resistência à compressão

A determinação experimental da resistência dos betões à compressão ( $f_{ic}$ ) foi feita através de ensaios segundo a norma NP EN 12390 (NP EN 12390, 2009). Para isso foram usados os provetes cúbicos referidos, nos quais foi aplicada uma força com uma velocidade constante de 13,5 kN/s, até se atingir a rotura dos provetes. Neste processo foi usada uma prensa hidráulica de elevada capacidade. Estes ensaios foram realizados apenas nos dias dos ensaios dos provetes *pull out* para se ter o valor preciso da resistência do betão no dia dos ensaios. No Quadro 4.5 são apresentadas as idades dos betões aquando do ensaio de compressão, assim como os valores médios obtidos para as resistências e para as massas volúmicas.

#### 4.4.3.2 Massa volúmica

A massa volúmica foi determinada através da pesagem dos provetes cúbicos numa balança específica para o efeito. Essa massa foi dividida pelo volume do provete respectivo, obtendo-se assim a massa volúmica (NP EN 12390, 2009). Os resultados estão apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Caracterização dos vários tipos de betões

Tipo de Betão	Idade no dia do ensaio	Massa Volúmica		Compressão	
		kg	(kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>icm</sub> (MPa)	Tensão
LC40	51	6,60	1948	982	41,7
		6,57		888	
		6,55		947	
LC55	44	6,46	1926	1189	53,8
		6,56		1236	
		6,48		1207	
LC70	39	6,56	1964	1544	69,5
		6,62		1558	
		6,71		1589	
LC40	105	6,49	1934	1001	44,2
		6,52		987	
		6,57		998	
LC55	107	6,65	1968	1247	57,1
		6,69		1376	
		6,59		1228	
LC70	112	6,62	1974	1551	70,4
		6,71		1637	
		6,66		1564	

#### 4.4 Caracterização dos varões de aço

Os varões de aço usados quer nos tirantes, quer nos provetes *pull out*, são da classe A500 NR SD. Este tipo de classe apresenta uma superfície nervurada e uma ductilidade melhorada, sendo produzida através de laminagem a quente. Para ambos os tipos de ensaios realizados foram usados dois diâmetros diferentes, 12 mm (Ø12) e 16 mm (Ø16).

No caso dos varões do aço não foram realizados ensaios à tracção para avaliar a sua resistência pois o aço tem normalmente variações pouco significativas relativamente aos valores indicados pelo fabricante e/ou regulamentos. Os valores da tensão de cedência ( $f_{sym}$ ) usados nos cálculos são os previstos no EC2 e estão apresentados no quadro seguinte.

Quadro 4.6 – Propriedades do aço A500NR SD

	$f_{syk}$ (MPa)	$f_{suk}$ (MPa)	$\epsilon_{suk}$ (%)
A500NR SD	500	550	12

#### 4.5 Caracterização dos varões de fibra de vidro Halfen

Os varões de fibra de vidro são caracterizados pela sua resistência à tracção bastante elevada, aproximadamente de 1000 MPa e pelo seu comportamento linear elástico até à rotura. Foi realizado um ensaio de tracção em que foi colado um extensómetro ao varão para verificar o correcto funcionamento de todo o processo. Com base nos valores registados da extensão e da força aplicada em cada instante foi possível determinar, através da Lei de Hooke (expressão 4.1), o módulo de elasticidade do varão de GFRP, sendo o valor obtido de 62,5 GPa.

Com o objectivo de uma análise comparativa foi também calculado o valor teórico da extensão através da Lei de Hooke usando o módulo de elasticidade de 60 GPa indicado pelo fornecedor. Na Figura 4.4 é possível verificar a relação tensão-extensão experimental e teórica do varão de 12 mm. Neste ensaio o varão não foi levado à rotura devido ao esmagamento das fibras na zona de amarração que impediu o aumento da força aplicada.

$$E_f = \sigma_f / \epsilon_f \quad (4.1)$$

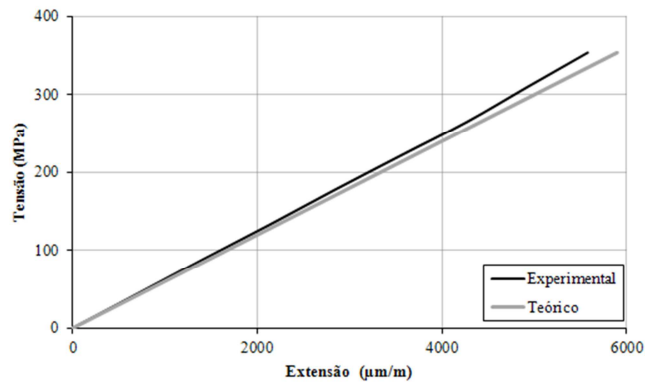


Figura 4.4 – Relação tensão-extensão de varão de GFRP em ensaio limitado

## 4.6 Fabrico das peças

### 4.6.1 Instrumentação dos varões de fibra de vidro

Com o objectivo de obter o máximo de dados durante os ensaios foi estudado um plano de instrumentação a efectuar no programa experimental. Na fase de fabrico das peças começou-se por colar extensómetros nos varões de fibra de vidro onde se pretendia obter os valores das extensões reais. Nestes varões foram colocados 13 extensómetros espaçados 7,5 cm a partir do centro do tirante. Os extensómetros usados tinham uma resistência de  $120 \pm 0,3 \Omega$ , um comprimento de 10 mm e foram fornecidos pela empresa TokyoSokkioKenkyujo., Ltd.

Para realizar a colagem dos extensómetros foi necessário preparar uma superfície lisa porque os varões apresentam uma superfície anelada (ver Figura 4.5).



Figura 4.5 - Varão Halfen FRP FiReP®

Numa primeira fase cortou-se, dado que o material composto da fibra de vidro permite o corte mas, apesar de se ter obtido uma superfície plana, havia alguns defeitos, pequenas lascas e irregularidades e, deste modo, não se conseguia uma superfície adequada e recomendada para a colagem dos extensómetros. Visto que o processo anterior não era adequado, procurou-se outra solução, usou-se uma rebarbadora com um

disco de corte de metal para fazer uma superfície lisa, tentando sempre retirar o menos material possível. O objectivo era criar uma superfície lisa na zona anelada sem fragilizar o varão na zona do extensómetro. Para permitir uma boa colagem a superfície foi lixada. Embora este processo tenha sido mais eficaz que o anterior, apresentava ainda pequenas irregularidades provocadas por alguma imprecisão no uso da rebarbadora. Assim, optou-se por utilizar uma lima metálica que geralmente se aplica nas madeiras e que permitiu criar um acabamento regular sem retirar as pequenas lascas referidas anteriormente (Figura 4.6).

Depois de se criar uma superfície regular, a superfície foi devidamente lavada e seca, e só depois é que os extensómetros foram colados. Para verificar se havia uma aderência adequada entre o extensómetro e o varão e para haver uma correcta medição durante os ensaios, foi realizado um ensaio preliminar. A colagem poderia ter alguns problemas porque a cola de Cyanoacrylate fornecida pela TokyoSokkioKenkyujo., Ltd é muito usada na colagem de extensómetros em varões metálicos mas não havia informação se o uso da mesma teria bons resultados em varões de fibra de vidro.



Figura 4.6 - Preparação de superfície e cola de Cyanoacrylate

Através de um ensaio à tracção de um varão Ø12 mm, onde foi colado um extensómetro ligado ao *datalogger*, verificou-se que a colagem foi feita com sucesso (Figura 4.7)

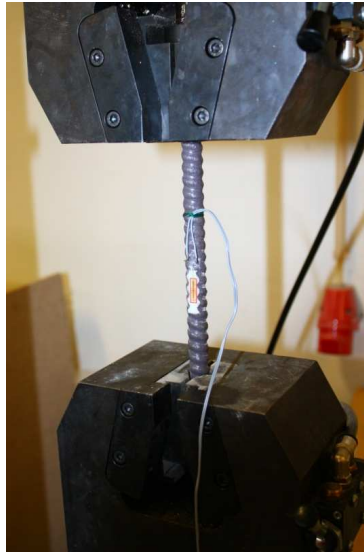


Figura 4.7- Ensaio de extensómetro em varão GFRP

Através deste ensaio verificou-se que o desvio foi, em média cerca de 4,4% (Quadro 4.7), quando comparado o valor obtido no *datalogger* (experimental) com o valor calculado teoricamente para a extensão, tendo em conta a força aplicada e o módulo de elasticidade ( $E_f$ ) apresentado pelo fabricante, 60 GPa. Neste ensaio observou-se/registou-se o problema do esmagamento das fibras na zona de amarração, como já era previsto.

Quadro 4.7 - Valores de ensaio a extensómetro

Força (kN)	Valores obtidos do <i>datalogger</i>	Extensão ensaio ( $\Delta$ ) $\times 10^{-3}$ (mm)	Tensão (MPa)	Extensão de cálculo $\times 10^{-3}$ (mm)	Diferença (extensão ensaio - cálculo) (%)
0	3208	0	0	0	0
5	3914	706	44,21	736,8	4,367
10	4618	1410	88,42	1473,7	4,515
15	5336	2128	132,63	2210,5	3,876
20	6035	2827	176,84	2947,3	4,256
25	6755	3547	221,05	3684,1	3,867
30	7480	4272	265,26	4421,0	3,487
35	8127	4919	309,47	5157,8	4,855
40	8785	5577	353,68	5894,6	5,695

Média = 4,365

Com os extensómetros colados foi necessário soldar os fios e verificar se os mesmos estavam bem soldados através de um voltímetro. Estes fios foram ligados posteriormente ao *datalogger* que recebe a informação dos extensómetros e a partir do qual são realizadas as leituras das extensões.

Na fase de ligações foi necessário fazer uma boa amarração dos fios e proteger o conjunto para que durante a betonagem das peças não fosse nada danificado ou desligado (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Colagem e ligação de extensómetro

Depois de executar as ligações foi necessário colocar uma cola de modo que tanto o extensómetro como as ligações por solda e os fios permaneçam fixos durante a betonagem das peças. Foi também aplicada uma camada fina de um material com propriedade viscosa de modo que o betão não interaja directamente com a cola, esse material foi aplicado por cima do extensómetro (Figura 4.9). Esta interacção directa poderia afectar o funcionamento do extensómetro e até mesmo as ligações efectuadas com recurso a solda por estanho.



Figura 4.9 - Protecção do extensómetro

#### 4.6.1 Instrumentação dos varões de aço

A instrumentação dos varões de aço foi efectuada de forma muito idêntica à dos varões de fibra de vidro. Nos varões de aço, o número de extensómetros foi de 11 espaçados 7,5 cm a partir do centro do varão. Os extensómetros usados foram iguais aos usados nos varões de fibra de vidro, tendo também uma resistência de  $120\pm 0,3 \Omega$  e um comprimento de 10 mm. Na zona da colocação dos extensómetros foi feito um pequeno desbaste com recurso a rebarbadora de forma a criar-se uma superfície plana que seguidamente foi lixada para se obter uma boa colagem do extensómetro. Após a colagem dos extensómetros foram soldados os fios. Neste caso foi necessário ter a atenção que o aço é condutor eléctrico e que os fios não podiam ficar em contacto com o varão (Figura 4.10). Para isso foi aplicada uma pequena tira plástica para protecção da zona da solda. De seguida foi aplicada cola por cima do extensómetro de modo a proteger o extensómetro e as ligações (Figura 4.11) e logo de seguida uma camada de material viscoso para protecção e não haver contacto com o betão, o que poderia provocar danos no extensómetro ou nas ligações (Figura 4.12).



Figura 4.10 - Colagem do extensómetro em armadura de aço



Figura 4.11 – Execução de ligações e colagem de protecção do extensómetro

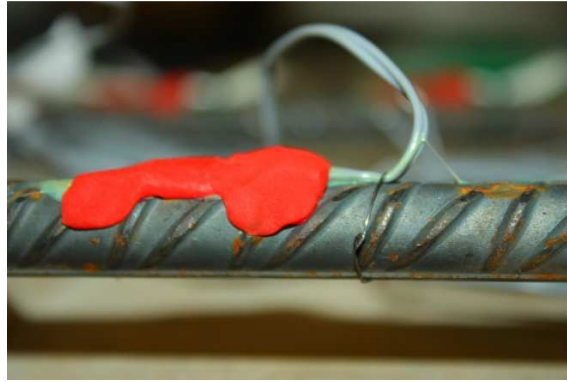


Figura 4.12 - Aplicação de camada viscosa de protecção do extensómetro

#### 4.6.3 Produção das peças

Para as betonagens dos tirantes e cubos para os ensaios de *pull out* foram feitas cofragens específicas com as medidas pretendidas. As betonagens de ambos os provetes ocorreram em simultâneo, para cada tipo de betão e de armadura. Em cada amassadura de betão betonaram-se 2 tirantes, 6 cubos *pull out* e 4 cubos para ensaio de compressão. Os tirantes foram atravessados longitudinalmente pelos varões de fibra de vidro Halfen já preparados com os 13 extensómetros e pelos varões metálicos com 11 extensómetros. Na cofragem dos tirantes foi aplicada uma capa plástica em algumas faces para proteger a cofragem. Esta medida justificou-se porque estavam previstas 6 betonagens, cuja humidade poderia danificar o aglomerado usado, e também para garantir uma superfície bem acabada no betão. Após toda a cofragem montada eram colocados os varões, tendo-se em atenção que a posição dos extensómetros teria de estar sempre correcta, assim como a posição do varão que teria de ser centrada no tirante (Figura 4.13). A betonagem dos tirantes foi executada na horizontal e, portanto, o fio ligado ao extensómetro saiu transversalmente evitando ao máximo qualquer influência nos ensaios.



Figura 4.13 - Colagem de capa plástica e preparação da cofragem

Após todas as verificações dos parâmetros referidos foram executadas as amassaduras com as proporções indicadas anteriormente para cada betão. De seguida foi executada a betonagem e a compactação com recurso a um vibrador de agulha (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Execução de amassadura e betonagem dos tirantes

Os cubos de ensaios *pull out* foram betonados em cofragem específica que permitia produzir cubos de 200 mm de aresta e colocar os varões na posição correcta (Figura 4.15). Para a produção destes cubos foi tida em conta o disposto na norma EN 10080 (EN 10080, 2005). Após verificadas todas as medidas, realizou-se a betonagem e a compactação com o vibrador de agulha.



Figura 4.15 - Preparação e betonagem de cubos para ensaios de pull out

### 4.7 Descrição dos ensaios

Com a finalidade de obter os resultados foram então ensaiadas as peças fabricadas. O pórtico de reacção usado era constituído por dois pilares e quatro vigas metálicas com reforços para ter maior rigidez. Os primeiros ensaios foram os ensaios de *pull out* com varões de fibra de vidro. Para estes ensaios e para os ensaios dos tirantes com varões de fibra de vidro foi necessário projectar um sistema de amarração específico. Para os

ensaios das peças com varões de aço a amarração foi feita através de peças metálicas já existentes no laboratório.

#### **4.7.1 Sistema de amarração para os varões de fibra de vidro**

A fibra de vidro, sendo um material compósito, tem características especiais que diferem do aço. Como o aço é correntemente usado na construção, já existem diversos sistemas para o amarrar, como é o caso do sistema de cunhas usadas para amarração dos cabos de pré-esforço. Nos casos das armaduras de fibra de vidro os sistemas são praticamente inexistentes e por isso houve necessidade de projectar um sistema capaz de amarrar os varões de 12 e 16 mm de diâmetro. O sistema teve de ter em consideração alguns factores importantes como o facto dos varões de fibra de vidro terem uma fraca resistência ao esforço perpendicular ao sentido longitudinal das fibras. Desde uma fase inicial foram pensadas várias formas de fazer a amarração, desde a colagem de tubos de aço exteriormente aos varões e que envolveriam os varões na zona de amarração permitindo assim usar um sistema de cunhas sem esmagar o varão. Outra alternativa era usar tubos de aço cortados ao meio que posteriormente seriam também colados e amarrados naquela zona por um sistema de aperto com recurso a parafusos. No entanto, estes processos eram aparentemente difíceis de executar e pouco económicos, visto que se teria de usar colas de alta resistência. Foi então pensado um sistema de amarração, produzido em aço, que faria a amarração directamente no varão através de um pequeno canal para o varão. Esse canal teria uma superfície com um coeficiente de atrito o mais alto possível com o objectivo de tentar evitar ao máximo o escorregamento dos varões. Um factor importante para o sucesso do sistema de amarração era a definição do comprimento de amarração adequado, para diminuir as forças de compressão transversal no varão e ao mesmo tempo aumentar a força de amarração. Por isso, tentou-se aproveitar o maior comprimento possível mediante os comprimentos que as peças fabricadas permitiam. Assim, definiu-se 30 cm para cada sistema de amarração e foi então desenhado um sistema que forma 2 L's que se agrupam com o auxílio de parafusos de alta resistência (da classe 8.8), conforme se pode ver Figura 4.16.



Figura 4.16 - Sistema de amarração de armaduras de GFRP

#### 4.7.2 Ensaios *pull out*

Para executar os ensaios *pull out* foi estudado um sistema para fixar o provete e aplicar a força de tracção. O sistema implicou usar: um pórtico, um actuador com a capacidade de 180 kN em tracção e com célula de carga incorporada, o conjunto de garras projectado especificamente para ensaios com varões de fibra de vidro, 3 LVDTs para medir o deslocamento do varão em relação ao betão e a deformação do sistema, 2 chapas metálicas de reacção e quatro varões de aço (Figura 4.17). Nestes ensaios foi necessário usar os dois conjuntos de garras porque num ensaio preliminar houve escorregamento do varão em relação à garra.

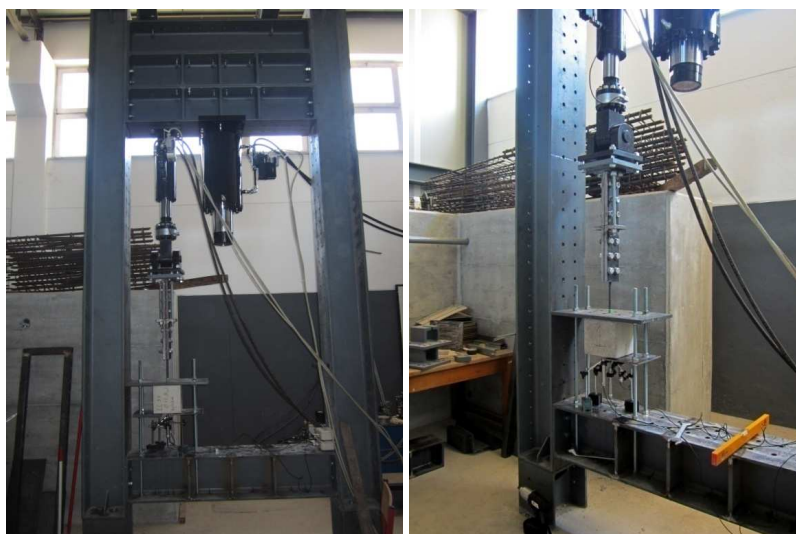


Figura 4.17 - Ensaio de *pull out* de provetes com armaduras de GFRP

Para os varões de aço, o sistema de amarração consistia no encaixe de uma placa de aço, soldada a uma das extremidades do varão, numa peça metálica cúbica com uma ranhura de encaixe do varão (ver Figura 4.18). Para os varões de aço foram coladas duas cantoneiras de forma a fazer reacção à força do actuador. A instrumentação usada foi a mesma usada nos provetes com varões de fibra de vidro.



Figura 4.18 - Ensaio de *pull out* de provetes com armaduras de aço

#### 4.7.3 Ensaios dos tirantes

Os ensaios dos tirantes armados foram executados na vertical e, tal como nos ensaios *pull out*, foram usados os sistemas de amarração para cada tipo de varões. Para a execução dos ensaios com toda a segurança e precisão houve necessidade de ajustar o pórtico em altura. Os ensaios de cada um dos 12 tirantes consistiram em aplicar uma força de tracção, individualmente a cada tirante armado, que se encontrava amarrado pelas extremidades dos varões que atravessavam longitudinalmente o tirante. Desta forma e com aumento progressivo da força de tracção com controlo de deslocamento à velocidade de 0,01mm/s, foi possível obter dados acerca do comportamento do mesmo (Figura 4.19 e Figura 4.20).



Figura 4.19 - Ensaio de tirantes com armaduras de GFRP



Figura 4.20 - Exemplo de ensaio de tirante com armadura de aço

#### 4.7.4 Instrumentação exterior dos tirantes

A instrumentação exterior dos ensaios aos tirantes implicou a aplicação de 2 transdutores de deslocamento com a finalidade de medir o deslocamento ocorrido ao longo do tirante. Estes LVDTs foram fixados às extremidades do tirante de betão e mediram a deformação de todo o tirante. Para se conseguir esta medição os transdutores de deslocamento foram fixados em varões de aço liso que por sua vez eram apoiados a chapas metálicas fixas ao topo oposto do tirante. Para este processo foi elaborado um sistema de roscas de modo a que o conjunto, transdutor de deslocamento, varão de aço e chapa funcionasse sem folgas e permitisse leituras precisas (Figura 4.21).



Figura 4.21 - Transdutores de deslocamento durante os ensaios

#### 4.7.5 Aquisição de dados

Na aquisição de dados foi usado um computador com software informático, denominado *Dynatester*. Este equipamento, além de fazer as leituras dos instrumentos de medição, permite controlar o actuador. Além deste computador, foi usado um *datalogger*, já referido anteriormente, que possibilitou a leitura dos extensómetros colocados nos varões. Os dados foram adquiridos através do *datalogger*, do software que recolhia a informação dos LVDTs e da célula de carga. Visto se tratar de sistemas de leituras distintos houve a necessidade de sincronizar a hora de modo que na fase de análise não houvessem dúvidas nos dados das leituras (Figura 4.22).

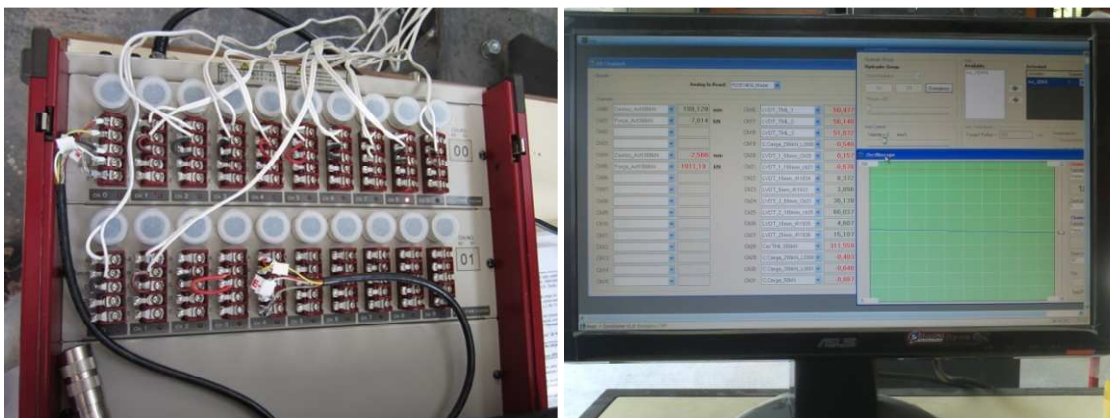


Figura 4.22 - Datalogger e Dynatester



## Capítulo 5 - Análise de resultados

### 5.1 Tensão de aderência

Os ensaios de aderência tiveram como principal objectivo obter as tensões de aderência da ligação entre: os varões de aço e o BEAL; os varões de fibra de vidro e o BEAL. Da interface dos varões de aço-BEAL já existem bastantes conhecimentos, que podem ser aplicados através dos regulamentos, mas no caso dos varões de fibra de vidro existe escassez de informação.

Durante os 36 ensaios *pull out* foram obtidos dois tipos de rotura: (i) rotura frágil e radial do provete de betão; (ii) rotura por deslizamento do varão. A primeira, ocorre devido a tensões de tracção que o varão provoca na matriz do BEAL ao tentar deslizar. A força na armadura aumenta ao longo do ensaio e ao atingir a tensão máxima de tracção do betão este fendilha com propagação brusca e radial da fendilhação no provete, diminuindo instantaneamente a força e terminando o ensaio (Figura 5.1). Na Figura 5.2 pode ver-se o estado final do ensaio.

A rotura por deslizamento do varão em relação ao provete de betão é a desejada para o estudo da aderência entre o varão e o betão. Neste ensaio, a tensão na ligação armadura-betão aumenta até atingir um ponto máximo, antes de haver deslizamento significativo. Depois, a tensão de aderência diminui gradualmente até valores próximos de zero (Figura 5.3).

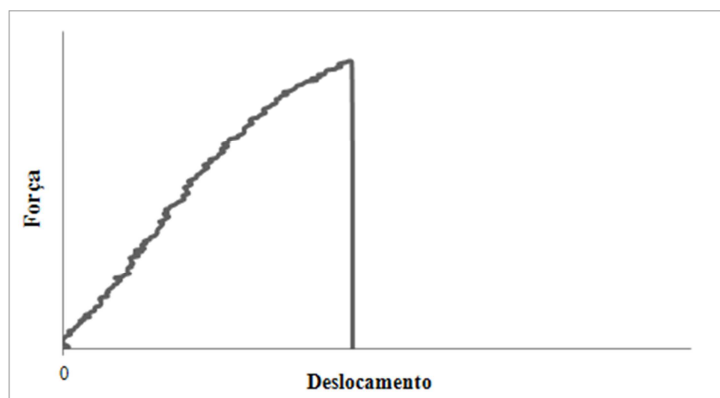


Figura 5.1 - Comportamento típica de ensaio *pull out* com rotura do betão.



Figura 5.2 - Rotura de betão em ensaio de arrancamento



Figura 5.3 - Curva típica de ensaio de arrancamento com deslizamento

Na Figura 5.4 podem ver-se o início do deslizamento do varão dentro do betão. Este deslizamento era notório visto que o betão que circundava o varão era esmagado. O deslizamento era também perceptível pela diminuição da força aplicada pelo actuador.



**Figura 5.4 - Deslizamento de armadura em ensaio de arrancamento**

### **5.1.1 Tensão de aderência nas armaduras de aço**

Durante estes ensaios houve a necessidade de reduzir os comprimentos de amarração nos provetes com varão de diâmetro 12mm; a redução foi de  $2 \times \emptyset$ , ou seja, de  $5 \times \emptyset$  (60mm) para  $3 \times \emptyset$  (36mm). Esta redução deveu-se ao facto de não se conseguir ensaiar com comprimento de  $5 \times \emptyset$ , porque a tensão de cedência da armadura era atingida antes de haver deslocamento do varão dentro do cubo, ou então o cubo entrava em rotura devido a tensões de tracção. Os resultados dos ensaios dos provetes com varões de aço estão no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Tensões de aderência em provetes com armaduras de aço

$f_{icm}$ em cubos (MPa)	Diâmetro do varão (mm)	Força (kN)	Comprimentos de amarração (mm)	Tensão de aderência (MPa)
44,2	12	11,62	36	8,5
		19,62	36	14,4
		18,06	36	13,3
	16	52,88	58	18,1
		71,28	60	23,6
		48,15	60	15,9
57,1	12	24,52	35	18,5
		34,61	34	27,0
		31,01	36	22,8
	16	67,04	58	23,0
		70,43	63	22,2
		54,33	63	17,1
70,4	12	47,71	32	39,5
		39,83	35	30,1
		39,83	37	28,5
	16	68,65	65	21,0
		82,68	58	28,3
		81,94	57	28,6

Nos ensaios de provetes com varões de aço foram obtidos os dois tipos de rotura referidos, embora a rotura tivesse sido, em quase todos os ensaios, do 1º tipo, ou seja, o provete entrou em rotura devido às tensões de tracção. Os provetes em que se obteve o deslizamento do varão em relação ao betão foram apenas os provetes com betão de 40 MPa de resistência à compressão e diâmetro de 12 mm. Na da Figura 5.5 é visível o aumento da tensão média de aderência com o aumento da resistência à compressão do betão, sendo isso mais notório nos varões de diâmetro 12 mm. Para os varões de diâmetro 12 mm, a tensão média de aderência obtida foi de 12,1 MPa para o betão LC40, de 22,8 MPa para LC55 e de 32,7 MPa para LC70. No diâmetro 16mm o aumento da tensão é menos acentuado quando se aumenta a resistência do betão, como se pode ver na Figura 5.5. O valor da tensão média de aderência para LC40 é de 19,2 MPa, para LC55 obteve-se 20,8 MPa e para o betão mais resistente, LC70, obteve-se 26 MPa.

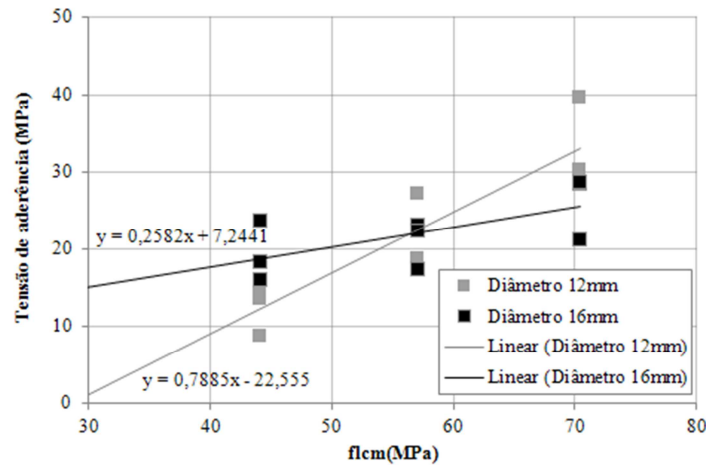


Figura 5.5 - Tensão tangencial - resistência do betão à compressão (varões de aço)

Após os ensaios foi possível verificar, através da inspeção dos provetes, alguns factores associados, designadamente o atrito mecânico, a adesão e a forma radial de como se formam as fendas. Na Figura 5.6 é visível o efeito do atrito mecânico e da adesão.



Figura 5.6 – Efeito do atrito mecânico e a forma da abertura de fendas nos pull out com aço

### 5.1.2 Tensão de aderência nas armaduras de GFRP

Os ensaios permitiram avaliar a tensão de aderência entre os dois materiais. Nestes ensaios *pull out* não se obteve um deslizamento significativo do varão em relação ao betão. O provete de betão acabou por entrar em rotura sempre antes de se existir deslizamento significativo.



Figura 5.7 - Rotura do provete

Os resultados dos ensaios de tensão de aderência dos provetes com varões de fibra de vidro são apresentados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Tensões de aderência em armaduras de GFRP

$f_{cm}$ em cubos (MPa)	Diâmetro do varão (m)	Força (kN)	Comprimentos de amarração (mm)	Tensão de aderência (MPa)
41,7	12	65,98	137	12,7
		81,62	140	15,4
		90,00	140	17,0
	16	80,55	119	13,4
		102,81	120	17,0
		91,68	121	15,0
53,8	12	59,33	62	25,3
		52,64	62	22,5
		54,95	60	24,3
	16	48,40	60	16,0
		58,05	60	19,2
		60,33	60	20,0
69,5	12	59,39	58	27,1
		72,74	58	33,3
		64,73	60	28,6
	16	72,94	62	23,4
		63,44	58	21,8
		68,43	58	23,5

A Figura 5.8 mostra o aumento da tensão de aderência com o aumento da resistência à compressão do betão, sendo que o diâmetro 12 mm tem maiores valores da tensão de

aderência. Para o betão LC40 obteve-se uma tensão média de aderência de 15,1 MPa, para LC55 obteve-se 24,0 MPa e para LC70 obteve-se 29,7 MPa. No diâmetro 16 mm a evolução da tensão média de aderência é muito idêntica, como se pode verificar no Figura 5.8, sendo o valor de tensão de aderência para LC40 de 15,20 MPa, para LC55 obteve-se 18,4 MPa e para o betão mais resistente, LC70, obteve-se 22,8 MPa.

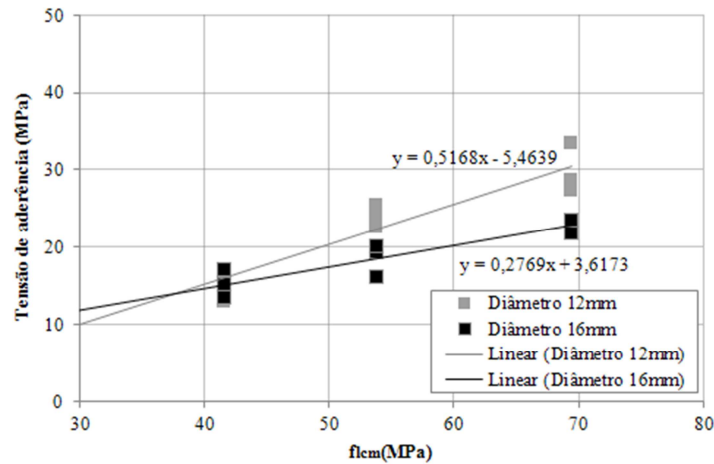


Figura 5.8 - Tensão tangencial - resistência do betão à compressão (varões GFRP)

Após a execução dos ensaios foi possível verificar através da visualização dos provetes alguns factores como o atrito mecânico entre o varão e o betão e a forma radial de como se formam as fendas, que neste caso originava a separação do betão (Figura 5.9).



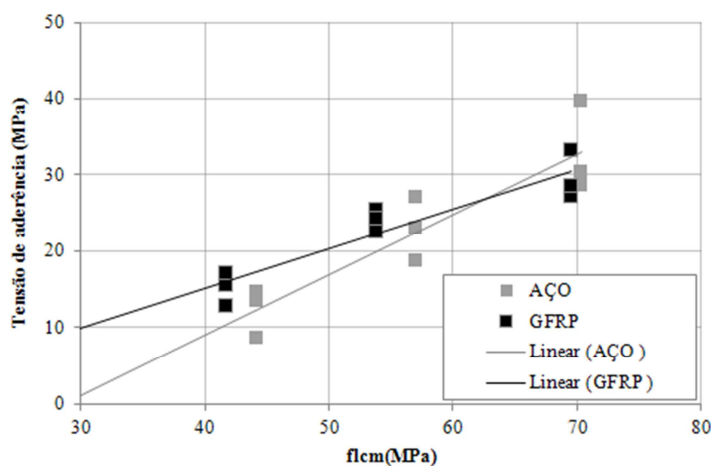
Figura 5.9 – Efeito do atrito mecânico e a forma da abertura de fendas nos *pull out* com GFRP

### 5.1.3 Comparação de resultados

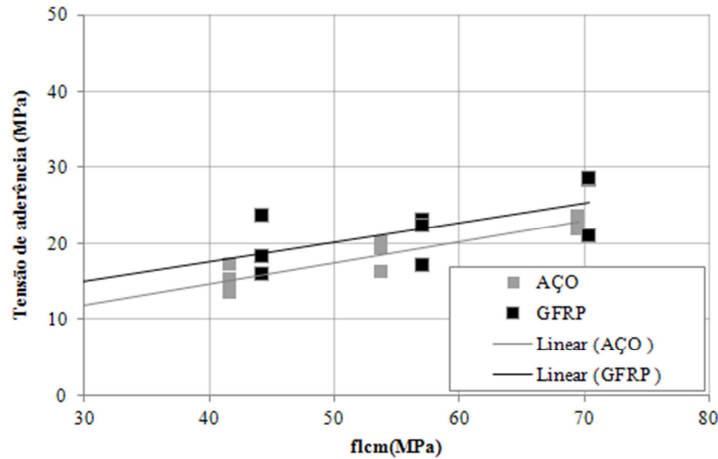
Com os resultados obtidos nos ensaios pode-se comparar a evolução da tensão da aderência, tangencial, para os varões de diâmetros 12 mm e 16 mm e para os dois tipos de material, GFRP e aço, em provetes de BEAL com três níveis de resistência. Nesta

análise deve ter-se em conta que apesar de os valores serem calculados em função dos comprimentos de amarração, estes não eram iguais nos provetes com varões de aço e de fibra de vidro.

Para o diâmetro de 12 mm verificou-se que os valores da tensão de aderência são próximos para os dois tipos de varões. Registou-se também o aumento da tensão tangencial com o aumento da resistência à compressão do betão para os dois tipos de varão. Para o LC40 e LC55 os provetes com varões de fibra de vidro têm maior tensão de aderência, no LC40 a diferença é de cerca de 3 MPa. Contudo, para o betão LC55 o valor tende a aproximar-se do valor de tensão de aderência do varão de aço, tendo uma diferença de cerca de 1,5 MPa. Para o valor de LC70, os provetes com varão de aço têm maior tensão tangencial quando comparado com os provetes com varões de fibra de vidro e a diferença é aproximadamente de 3 MPa. No diâmetro de 16 mm verificou-se que os valores para os dois materiais são semelhantes para os dois tipos de varões e é também notório o aumento da tensão tangencial com o aumento da resistência à compressão do betão, para os dois tipos de varão. Porém, neste diâmetro, esse aumento é menos acentuado quando comparado com o diâmetro 12 mm. Os provetes com varões de aço têm maior tensão de aderência, no LC40 a diferença é cerca de 4 MPa, e no LC55 a diferença é menor, cerca de 2 MPa. Quando se utiliza o betão LC70, os provetes com varão de aço continuam a ter valores maiores de aderência quando comparado com os provetes com varões de fibra de vidro, a diferença foi de aproximadamente 3 MPa (Figura 5.10).



a) Diâmetro 12 mm



b) Diâmetro 16 mm

**Figura 5.10 - Evolução da tensão da aderência para os diâmetros de 12 mm e 16 mm**

Através da expressão 8.2 do subcapítulo 8.4.2 do EC2 foram obtidos os valores da tensão de aderência para os varões de aço com os dois diâmetros usados e os para as propriedades dos betões fabricados. Esses valores estão demonstrados no Quadro 5.3 onde se compara o valor obtido através do EC2 com o valor obtido experimentalmente. No Quadro 5.4 pode comparar-se também o valor do obtido através do EC2 com o valor obtido experimentalmente para varões de GFRP. Importa referir que nos valores obtidos pela expressão 8.2 não foi aplicado o coeficiente parcial de segurança relativo ao betão, usou-se o valor  $f_{ctk,0.05}$  em vez do valor  $f_{ctd}$ . Através dos valores apresentados é possível verificar que existe uma grande diferença dos valores obtidos pelo EC2 em relação aos valores obtidos experimentalmente. Todos os valores obtidos experimentalmente são superiores, chegando a ser 5 vezes superior ao valor obtido pelo EC2, no caso do betão com resistência de cerca de 70 MPa (Quadro 5.3).

**Quadro 5.3 - Tensão de aderência prevista pelo EC2 e a tensão obtida experimentalmente para varões de aço**

Resistência do betão (MPa)	Diâmetro do varão (mm)	Valor da tensão de aderência (MPa)	Tensão de aderência média para varões de aço (MPa)
44,2	12	4,8	12,1
44,2	16	4,8	19,2
57,1	12	5,9	22,8
57,1	16	5,9	20,8
70,4	12	6,9	32,7
70,4	16	6,9	26,0

À semelhança dos valores para os varões de aço, os valores obtidos para os varões de GFRP apresentaram também grandes diferenças em relação aos valores previstos pelo EC2, sendo os valores experimentais bastante superiores. No betão de resistência à compressão próxima dos 70 MPa essa relação de valores, experimental e de cálculo, é superior a 4 vezes.

**Quadro 5.4 - Tensão de aderência prevista pelo EC2 e a tensão obtida experimentalmente para varões de GFRP**

Resistência do betão (MPa)	Diâmetro do varão (m)	Valor da tensão de aderência (MPa)	Tensão aderência média para varões de GFRP (MPa)
41,7	12	4,5	15,1
41,7	16	4,5	15,2
53,8	12	5,6	24,0
53,8	16	5,6	18,4
69,5	12	6,8	29,7
69,5	16	6,8	22,8

## 5.2 Tirantes de betão com varões de aço

O estudo dos tirantes com varões de aço tiveram como objectivo avaliar vários parâmetros, entre eles, o *tension stiffening effect*, a largura das fendas, a distância entre fendas e o seu padrão. Estes tirantes tiveram também o objectivo obter dados para realizar uma comparação directa com os resultados dos tirantes com varões de GFRP.

### 5.2.1 Análise das curvas dos tirantes

Os tirantes com varões de aço mostraram comportamento idêntico em todos os ensaios, ainda que com ligeiras diferenças. No tirante de betão LC40 e com armadura de aço de diâmetro 12 mm, a primeira fenda ocorreu para uma força de 20,40 kN com uma perda de força instantânea de 1,28 kN e um aumento do deslocamento do tirante de 0,063 mm. Antes da formação destas fendas, a rigidez era de 275 kN/mm. Após a formação das primeiras fendas ocorreram pequenos picos de força com reduzidas perdas de força. Ocorreram também dois picos mais acentuados com maiores deslocamentos e perdas de força correspondentes à formação de novas fendas. A última fenda ocorreu para uma

força de 26,0 kN e um deslocamento no tirante de 0,57 mm. A partir deste ponto iniciou-se a fase de estabilização da fendilhação. O estado II decorreu até um deslocamento total de 2,34 mm e uma força de 58 kN, ponto de início da cedência do aço. A rigidez do tirante no estado II foi de 19,7 kN/mm. Depois da cedência do aço há um aumento considerável do deslocamento até se atingir a rotura.

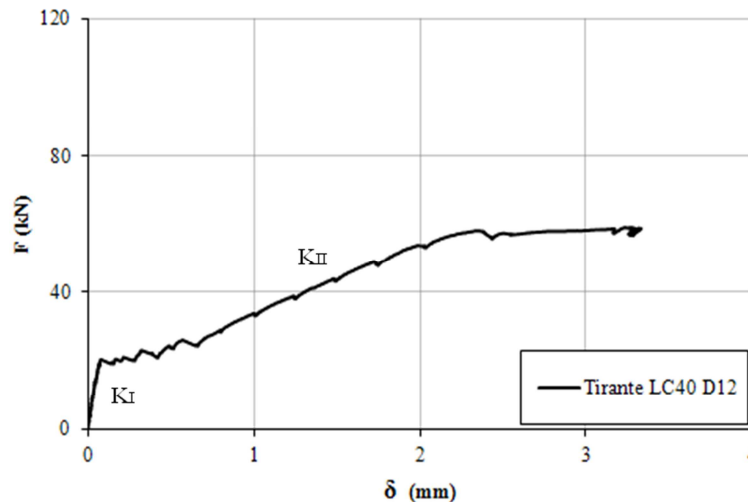


Figura 5.11 - Curvas representativas do comportamento do tirante LC40 D12 com varão de aço

Nos tirantes com betão LC40 e no tirante LC70 D16 o modo como se formam as fendas é diferente dos restantes tirantes. Nos tirantes com betão LC40 e no tirante LC70 D16, a fase de formação de novas fendas provocou uma maior deformação do tirante entre a primeira e a última fenda. Nos restantes tirantes, a formação das fendas foi praticamente instantânea, havendo uma perda de força quase nula. Veja-se a Figura 5.12 onde é apresentado o tirante LC70 D12. Este comportamento poderá ser eventualmente explicado pela hipótese de existirem secções de betão de menor homogeneidade, podendo influenciar a simultaneidade de formação das fendas, associadas às tensões de tracção no betão; por outro lado, o comportamento médio na formação das fendas é semelhante nessa fase, não sendo significativa essa alternância de carga-deslocamento. No tirante LC70 D16, a formação das fendas processou-se de maneira idêntica à dos betões menos resistentes, em que a maior força de aderência por unidade de comprimento e a maior resistência à tracção do betão conduz à formação de maiores fendas e, conseqüentemente, a maior redução de força.

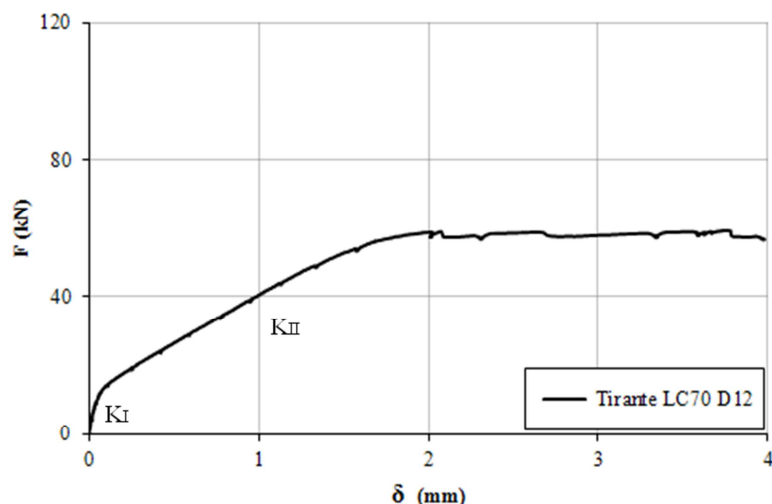


Figura 5.12 - Curvas representativas do comportamento do tirante LC70 D12

No que diz respeito à largura das fendas, registou-se no tirante LC40 D12 uma abertura de 0,1 mm quando se formou a primeira fenda. Após a abertura de todas as fendas, com um deslocamento total de 0,84 mm e uma força 30 kN, apenas a fenda 5 teve um aumento da sua largura em 0,1 mm tendo as restantes mantido a sua largura (ver Figura 5.15). No nível de força de 40 kN, as fendas já tinham larguras maiores, onde a fenda 2 tinha 0,25 mm, a fenda 3 tinha 0,4 mm, a fenda 5 tinha 0,3 mm e a fenda 6 tinha 0,2 mm. No final do ensaio, e antes da entrada em cedência do aço, com uma força aplicada de 55 kN, a fenda 1 encontrava-se com 0,5 mm (apesar da largura não ser constante em todo o perímetro do tirante), a fenda 2 com 0,45 mm e a fenda 3 com 0,7 mm. As restantes fendas não foram alvo de uma observação mais detalhada porque tinham uma largura menor. Pôde ainda verificar-se que a distância média entre fendas foi de 0,17 m e a maior distância foi de 0,21 m.

Através dos extensómetros foi também possível monitorizar as deformações sofridas pela armadura do tirante. Os extensómetros na posição 0,375 m e 0,75 m não adquiriram dados, sendo os valores apresentados, nessas coordenadas, calculados através das médias dos extensómetros mais próximos. Quando estava aplicada uma força de 20 kN ainda não se tinha formado nenhuma fenda e pôde verificar-se através dos dados adquiridos pelos extensómetros que as extensões ainda eram muito pequenas, sendo o maior valor de  $97 \times 10^{-6}$  (m/m). Para uma força de 30 kN de tracção, já no estado II, é notório um aumento das extensões com a formação das fendas. Podemos verificar em várias zonas, a uma distância de 0,825 m e 0,9 m à extremidade esquerda, onde a primeira corresponde a uma zona não fendilhada e a segunda a uma zona próxima da fenda, em que a diferença entre as extensões é de  $709 \times 10^{-6}$  (m/m). Também nas posições 0,45 m, 0,525 m e 0,6 m, através dos valores adquiridos, respectivamente de  $893 \times 10^{-6}$  (m/m), de  $1816 \times 10^{-6}$  (m/m) e de  $494 \times 10^{-6}$  (m/m), foi notório a formação da fenda 6. Claro que os valores maiores correspondem às secções próximas da fenda. Para a força aplicada de 40 kN, à excepção do extensómetro na posição 0,45 m, as extensões

creceram proporcionalmente, isto é, o valor de incremento foi idêntico na generalidade das secções/extensómetros, continuando os valores mais elevados na proximidade de fendas e os valores mais baixos nas zonas não fendilhadas. Para forças maiores, os dados das leituras dos extensómetros indicaram um maior aumento na proximidade das fendas 3 e 6. Na posição 0,3 m foi registada uma extensão de  $5314 \times 10^{-6}$  (m/m), sendo este o maior valor registado pelos extensómetros. Na proximidade da fenda 6, posição 0,525 m, houve também um aumento grande da extensão,  $3658 \times 10^{-6}$  (m/m). Este valor foi superior aos valores das extensões mais próximas, onde se registou  $2368 \times 10^{-6}$  (m/m) e  $2136 \times 10^{-6}$  (m/m) para as posições 0,45m e 0,6m. Para uma distância à extremidade superior a 0,6 m houve pouca variação dos valores, sendo estes muito idênticos.

Nos restantes tirantes com armadura de diâmetro 12 mm, os valores obtidos pelos extensómetros apresentaram uma ordem de grandeza próxima do tirante referido. Para os tirantes com armaduras de diâmetro 16 mm os valores obtidos são inferiores como se pode verificar na Figura 5.13 onde é apresentado o tirante LC40 D12 e o LC55 D16.

Devido a alguns extensómetros terem sido danificados houve falta de informação em algumas sessões de vários tirantes. Deste modo, não se apresentam alguns gráficos visto que não existem dados suficientes para os completar.

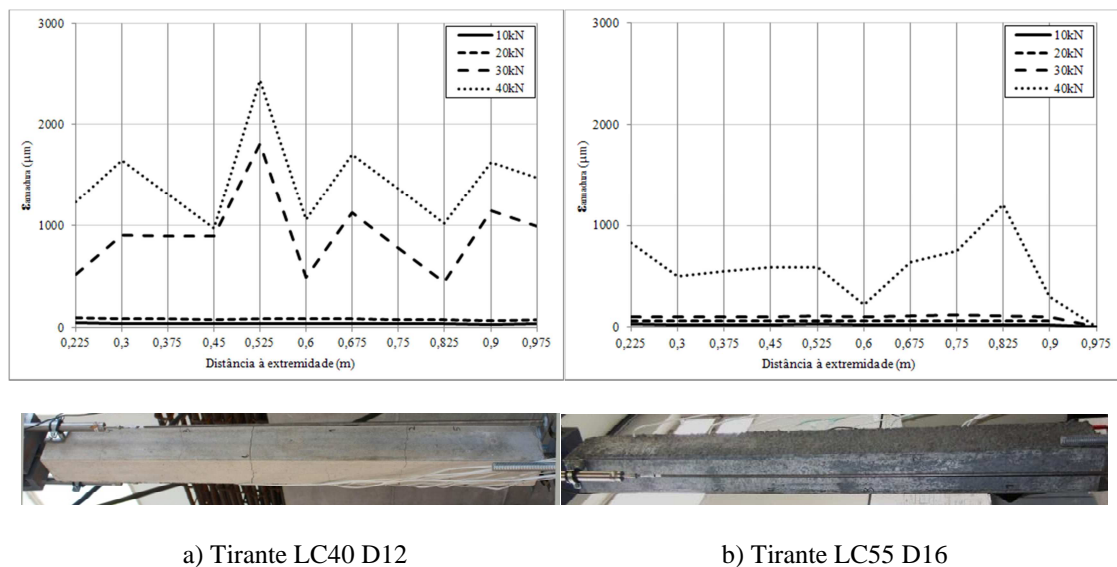


Figura 5.13 - Análise das extensões nas armaduras de aço durante ensaio de tracção dos tirantes

## 5.2.2 Análise comparativa dos tirantes com armaduras de aço

Com os dados analisados nos subcapítulos anteriores é possível fazer uma análise comparativa entre os vários tipos de tirantes. Com esta análise, poder-se-á verificar as reais diferenças que ocorrem quer seja com diferentes betões e com varão do mesmo diâmetro, quer seja com diferentes diâmetros do varão e com o mesmo betão, variando

assim a taxa de armadura. Outra análise possível e importante é a diferença de comportamentos dos tirantes com armadura de GFRP e de aço, e que será apresentada mais adiante.

Nos tirantes de BEAL com varões de aço foi possível verificar diferenças no comportamento com o aumento da carga aplicada. Nos tirantes com varão de diâmetro 12 mm a formação das 1<sup>as</sup> fendas teve uma evolução contrária à resistência do betão, isto é, no LC40 a formação das fendas ocorreu para o maior valor registado, 20,4 kN enquanto que para o LC55 e LC70 ocorreu aos 12,5 kN e 12,0 kN. Naturalmente que este comportamento não está de acordo com a previsão teórica. Por um lado, pode representar a variabilidade do ensaio de um tirante de cada tipo, que não traduz o valor médio (no caso de se ensaiarem vários exemplares de cada tipo), além da variabilidade significativa da resistência à tracção do betão; contudo, a diferença é muito elevada. Por outro lado, e apesar de estes betões apresentarem geralmente reduzidos valores de retracção (devido à cura interna melhorada proporcionada pela humidade dos agregados leves), podem já existir valores significativos de auto-tensões em alguns provetes, resultantes da retracção, que não foram contabilizados nesta análise. A segunda hipótese é a mais provável, pois a reduzida secção transversal ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ) aumenta bastante a retracção de secagem e a cura interna é menos eficiente (Costa, 2012).

No estado I, a rigidez teve o seu valor mais baixo, 163 kN/mm, para o LC55; o valor mais alto, de 275 kN/mm, obteve-se para o LC40, sendo este o betão de menor resistência. Para o LC70, obteve-se uma rigidez de 274 kN/mm. No estado II, foi também verificado que o aumento da resistência do betão não influenciou significativamente a rigidez dos tirantes, verificando-se que: para o tirante com LC40 foi registada uma rigidez de 19,7 kN/mm, para o tirante com LC55 a rigidez foi de 17,4 kN/mm e de 26,1 kN/mm para o LC70.

No que diz respeito à largura das fendas e à distância entre elas verificou-se que a largura não foi influenciada significativamente pela variação da resistência do betão, como se pode ver no Quadro 5.5. Para a fenda característica foi considerada a fenda de maior largura e, portanto, a mais relevante. No tirante LC40, a fenda característica tinha 0,7 mm de largura máxima, enquanto que para o LC55 e o LC70 a largura era de 0,5 mm e 0,6 mm. Quanto à distância média entre fendas foi verificado que a menor distância foi registada no tirante com LC55 com 0,119 m e uma distância máxima de 0,165 m que também foi a menor registada nos 3 betões. Para o LC40 registou-se 0,168 m, sendo esta a maior distância média, e para o LC70 registou-se 0,156m verificando-se o esperado para este parâmetro. A distância máxima entre fendas de 0,230m registou-se para o LC70 e o valor intermédio foi registado no LC40 com 0,210m.

Nos tirantes com varão de diâmetro 16 mm, a formação das 1<sup>a</sup> fendas, apesar dos valores para LC40 e LC55 serem muito próximos, teve uma evolução de aumento tendencial ao aumento da resistência do betão. No LC40, a formação das fendas ocorreu para o menor valor registado, 20,5 kN, enquanto para o LC55 e LC70 ocorreu aos 20,6 kN e 31,4 kN, sendo este último o maior valor registado para este diâmetro. No estado I,

a rigidez teve o seu valor mais baixo, 235,0 kN/mm para o LC55, sendo o valor mais alto de 297,0 kN/mm obtido para o LC70. Para o LC40 obteve-se uma rigidez intermédia de 257,0 kN/mm mas próxima da rigidez do tirante com LC55. Através dos valores anteriores verificou-se também que o aumento da resistência do betão não influenciou significativamente a rigidez do tirante no estado I. No estado II, foi também verificado que o aumento da resistência do betão não influenciou aparentemente a rigidez dos tirantes, verificando-se que para o tirante com LC40 foi registado o valor 32,9 kN/mm, no tirante com LC55 a rigidez foi de 32,1 kN/mm e a maior rigidez foi observada para o LC70 com 33,8 kN/mm.

No que diz respeito à largura das fendas e a distância entre elas verificou-se que a largura não foi também muito influenciada pela resistência do betão como se pode ver no Quadro 5.15. No tirante de LC40, a fenda característica tinha 0,30 mm de largura, enquanto que para o LC55 e LC70 era de 0,30 mm e 0,20 mm, respectivamente. Quanto à distância média entre fendas foi verificado que a menor distância foi registada no tirante com LC70 com 0,125 m. Este tirante teve uma distância máxima de 0,19m que também foi a menor registada nos 3 betões. Para o LC40 registou-se uma distância média entre fendas de 0,13 m e uma distância máxima de 0,195 m. No tirante de LC55 registou-se uma distância média entre fendas de 0,153 m, sendo este o valor mais alto, e uma distância máxima de 0,200 m. No que diz respeito à distância entre fendas não se observou uma relação directa com o aumento da resistência à compressão do betão; contudo, os valores da distância máxima entre fendas no tirantes são muito próximos, variando apenas 0,01 m, já os valores da distância média entre fendas tiveram uma variação inferior a 0,03 m.

No quadro seguinte pode-se verificar também que existem algumas diferenças no comportamento dos tirantes quando se analisa a influência do diâmetro dos varões. No que diz respeito à formação das 1<sup>as</sup> fendas, os valores para os LC40 são muito próximos, 20,4 kN para D12 e 20,5 kN para D16. Contudo, para o LC55 e LC70 os valores já mostraram algumas diferenças, nos tirantes LC55 a diferença foi de 8,2 kN e nos tirantes de LC70 a diferença foi de 19,4 kN. Os tirantes com diâmetros diferentes também mostraram algumas diferenças na rigidez. Para o LC40 no estado I houve uma diminuição de 275,0 kN/mm no D12 para 257,0 kN/mm no D16. No estado II há um aumento de 19,7 kN/mm no D12 para 32,9 kN/mm para o D16. Para os LC55 e LC70 houve um aumento da rigidez no estado I e no estado II.

A largura e distância das fendas foram também influenciadas pela variação do diâmetro dos varões. É notória uma diminuição destes 2 parâmetros quando se passa do D12 para o D16, no LC40; no entanto, no LC55 houve um aumento da distância média entre fendas quando comparado o D12 com o D16. No LC70 a largura da fenda manteve-se aproximadamente igual nos 2 diâmetros mas a distância média e a distância máxima diminuíram no diâmetro 16mm (Quadro 5.5).

Quadro 5.5 - Parâmetros observados de tirantes com varão de aço

Classe de resistência do betão	Diâmetro do varão (mm)	Formação das fendas (kN)	$K_I$ (kN/mm)	$K_{II}$ (kN/mm)	$W_{55kN}$ (mm)	$S_{r,méd}$ (m)	$S_{r,máx}$ (m)
LC40	12	20,40	275	19,7	0,70	0,168	0,210
LC55		12,50	163	17,4	0,50	0,119	0,165
LC70		12,00	214	26,1	0,60	0,156	0,230
LC40	16	20,45	257	32,9	0,30	0,130	0,195
LC55		20,69	235	32,1	0,30	0,153	0,200
LC70		31,40	297	33,8	0,20	0,125	0,190

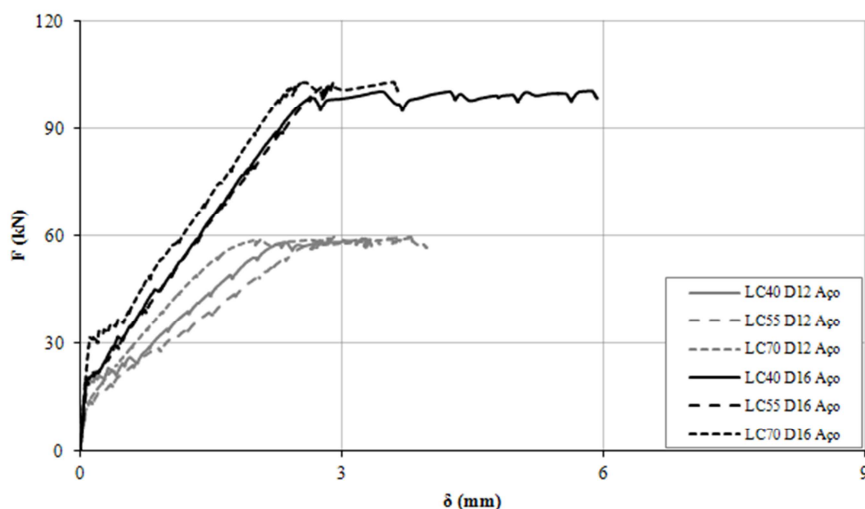
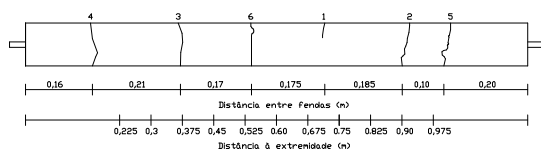


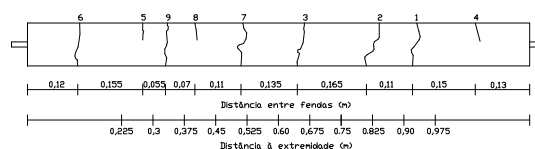
Figura 5.14 - Tirantes com armaduras de aço

### 5.2.3 Padrão de fendilhação

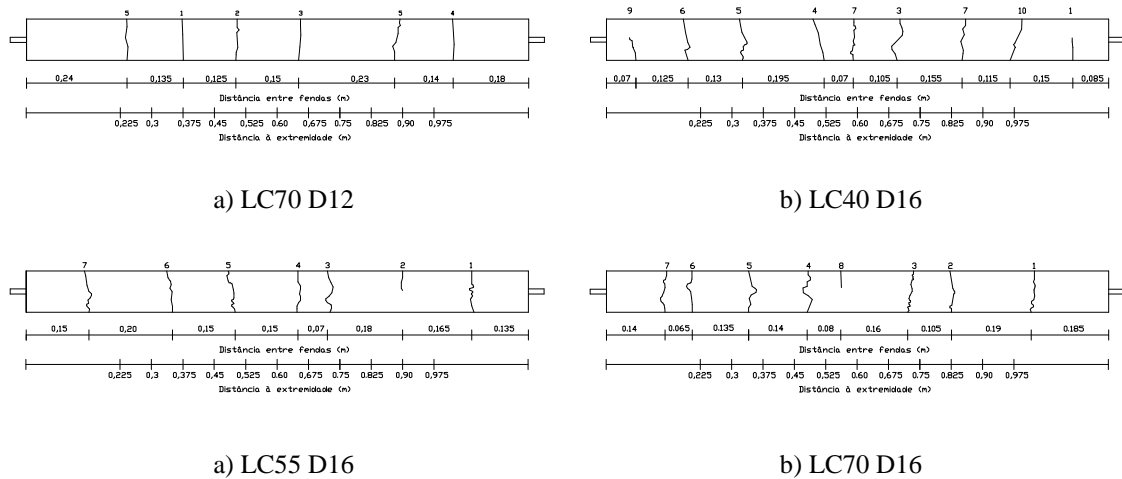
Quanto ao padrão das fendas, estas apresentaram uma fendilhação transversal com algumas variações no seu desenvolvimento e alguma inclinação relativamente à normal do eixo. Estas fendas, na sua generalidade, formaram-se em todo o perímetro dos tirantes. Nos tirantes com armaduras de aço não foram visíveis fendas de aderência como se verifica na Figura 5.15, onde não foi notada nenhuma fenda longitudinal.



a) LC40 D12



b) LC55 D12



**Figura 5.15 - Padrão de fendilhação de tirantes com armaduras de aço**

### 5.3 Tirantes de betão com varões de GFRP

À semelhança dos tirantes de betão com varões de aço, os ensaios dos tirantes de betão com varões de GFRP tiveram como objectivo estudar o seu comportamento, principalmente no que diz respeito ao *tension stiffening effect*, à largura das fendas, à distância entre fendas e ao seu padrão.

Nestes tirantes, ao contrário dos tirantes de betão com varões de aço, era desconhecido o seu comportamento, devido ao seu uso recente na construção e à escassez de informação. Verifica-se inclusive que o EC2 não prevê a utilização deste material. Deste modo, considera-se que a análise do comportamento dos tirantes com BEAL e varões de fibra de vidro é um estudo importante.

#### 5.3.1 Análise do comportamento dos tirantes

Os tirantes com varões de GFRP, à semelhança dos tirantes de betão com armaduras de aço, também mostraram um comportamento idêntico em todos os ensaios, ainda que com algumas diferenças. No tirante LC40 D12, a 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> fendas formaram-se aos 29,1 kN e em simultâneo, enquanto que as fendas 4, 5 e 6 formaram-se aos 31,5 kN. Antes da formação das fendas a rigidez era de 278,0 kN/mm. A abertura das fendas neste tirante provocou uma perda de força, como é possível verificar na Figura 5.16. Esta perda de força foi de aproximadamente 5 kN quando na formação das primeiras fendas e de 3 kN nas fendas 4, 5 e 6. A fase de formação de fendas terminou com a formação da 6<sup>a</sup> fenda, com um deslocamento total de 2,5 mm. Na fase de estabilização das fendas a rigidez foi de 6,8 kN/mm.

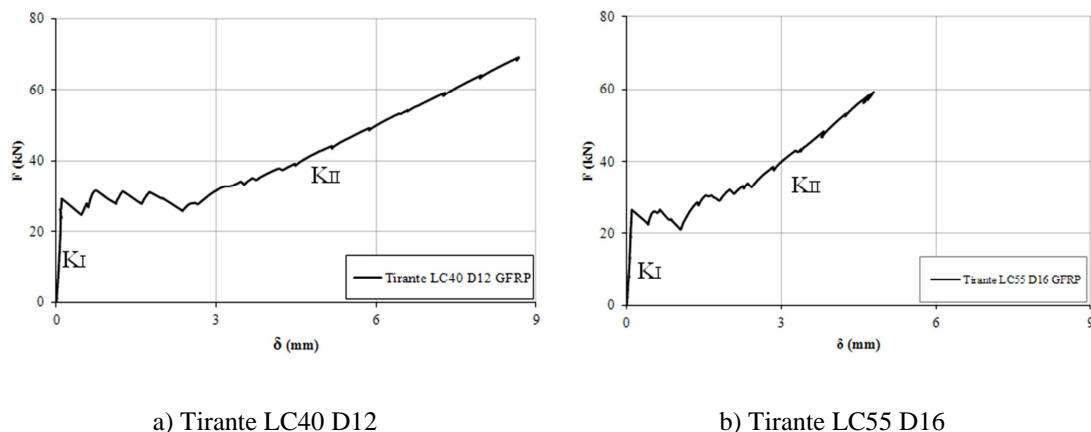


Figura 5.16 - Curvas representativas dos tirantes com armaduras GFRP

No que diz respeito à largura das fendas no tirante LC40 D12, registou-se uma abertura de 0,3 mm a 0,4 mm quando se formaram as duas primeiras fendas. Após a abertura de todas as fendas e com um deslocamento total no tirante de 2,5mm, as fendas aumentaram a sua largura; aos 35 kN a fenda 1 tinha 0,5 mm, a fenda 4 tinha 0,6 mm e a fenda 6 tinha 0,8 mm. Aos 40 kN a fenda 1 tinha 0,8 mm, a fenda 2 tinha 0,6 mm, a fenda 4 tinha 1,0mm e a fenda 6 tinha 1,2 mm (Figura 5.20). No final do ensaio, e com 70 kN de força aplicada no tirante, a fenda 1 encontrava-se com 1,6 mm, a fenda 4 com 1,7 mm e a fenda 6 com 1,8 mm, sendo estas as fendas de maior largura. A fenda característica deste tirante foi a fenda 6 com 1,8 mm de largura. Pôde ainda verificar-se que a distância média das fendas é de 0,132 m, sendo a maior distância entre elas de 0,190 m. As restantes fendas não foram alvo de uma observação detalhada porque tinham uma largura menor.

Através dos extensómetros foi também possível monitorizar as deformações sofridas pela armadura dos tirantes. Nos extensómetros localizados na posição 0,375 m, 0,675 m e 0,825 m não foi possível registar leituras, sendo que os valores apresentados são estimados pela média dos extensómetros mais próximos. Na Figura 5.18 é possível verificar que os extensómetros registaram a abertura da fenda 1, localizada na posição 0,45m, para uma força de 30 kN. Este extensómetro sofreu um aumento de  $2904 \times 10^{-6}$  (m/m) quando comparado com o momento antes da abertura da fenda. Para uma força aplicada de 40 kN de tracção, no estado II, é possível verificar que todos os extensómetros registaram valores de deslocamento com variações de entre  $3500 \times 10^{-6}$  e  $6000 \times 10^{-6}$  (m/m). Claro que maiores valores correspondem às secções próximas das fendas. Esta situação pode verificar-se na posição 0,975 m e 1,05 m, em que a primeira corresponde a zona não fendilhada e a segunda corresponde à fenda 5 (Figura 5.20), tendo estes dois uma diferença de  $1630 \times 10^{-6}$  (m/m). A mesma situação verificou-se também na posição 0,15 m, 0,225 m e 0,3m, sendo que 0,15 m e 0,3 m correspondem a zona fendilhada e 0,225 m a zona não fendilhada. Para forças de tracção maiores, os dados das leituras dos extensómetros indicaram um aumento proporcional dos deslocamentos. Foi também notória uma aproximação dos valores dos extensómetros

para as forças maiores aplicadas nos tirantes. Este facto deve-se à menor contribuição do betão nessa situação.

Nos tirantes com armadura de diâmetro 16 mm, as extensões obtidas são consideravelmente inferiores, aproximadamente  $2000 \times 10^{-6}$  (m/m) devido à maior rigidez das armaduras deste diâmetro (ver Figura 5.17). Foi também notório que à medida que a resistência do betão aumenta, a contribuição do mesmo também aumenta, levando a menores extensões.

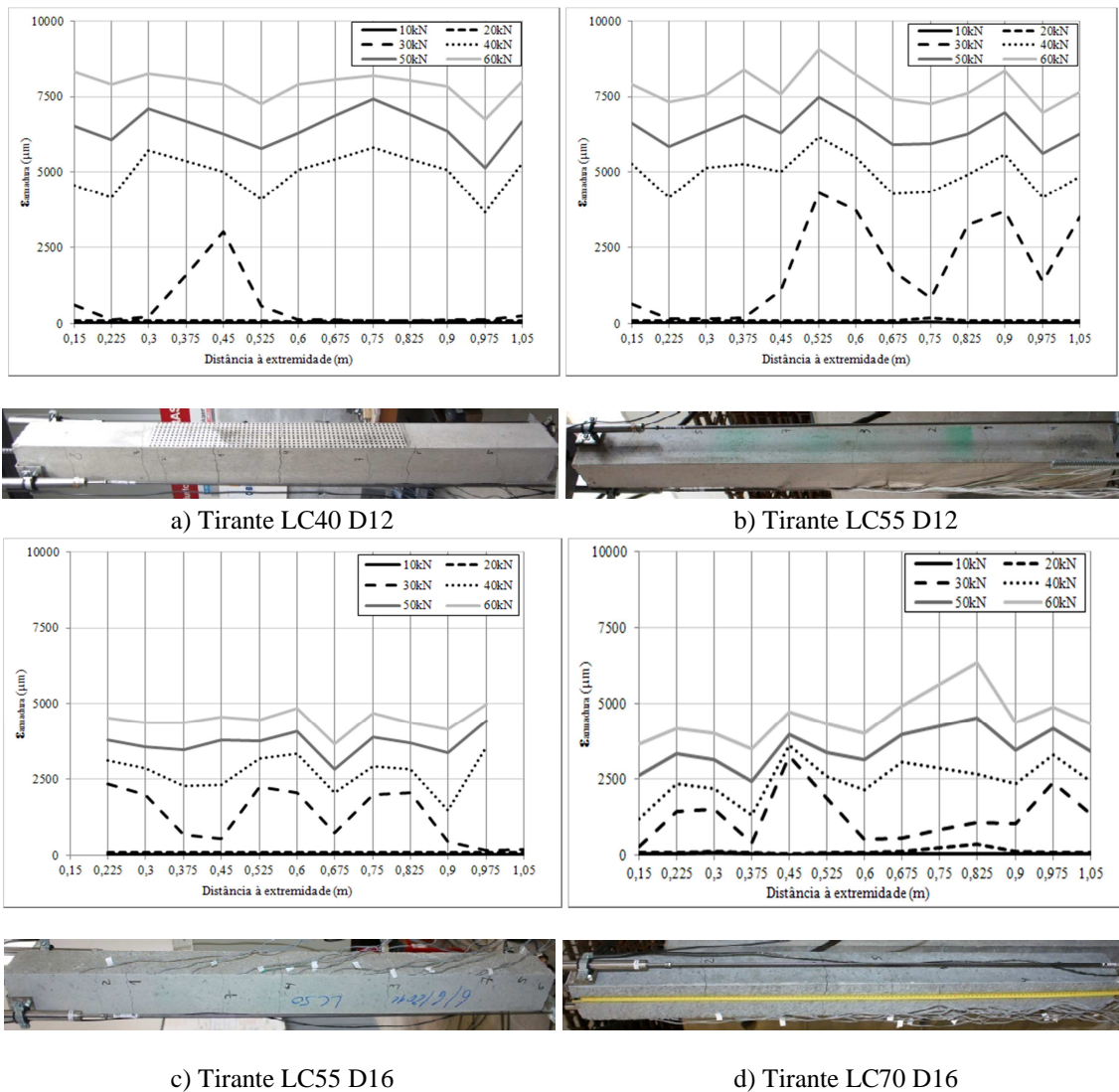


Figura 5.17 - Análise das extensões nas armaduras de GFRP

### 5.3.2 Análise comparativa dos tirantes com armaduras de GFRP

Com os dados analisados nos subcapítulos anteriores é possível fazer uma análise comparativa entre os vários tipos de tirantes. Através desta análise é possível verificar as diferenças ocorridas com os diferentes tipos de betão e diâmetros da armadura.

Nos tirantes com varão de diâmetro 12 mm, a formação das 1<sup>as</sup> fendas teve uma evolução tendencialmente contrária à da resistência do betão, o que não era esperado. Nos tirantes com LC40 D12 a formação da 1<sup>a</sup> fenda ocorreu para 29,2 kN. Nos tirantes com LC55 e LC70 a formação das fendas ocorreu aos 24,8 kN e 16,03 kN, sendo o último o menor valor registado para este diâmetro. Conforme foi referido para os tirantes de aço, a provável existência de auto-tensões de retracção, influenciadas pela reduzida secção transversal, poderá ser a principal causa deste desvio.

A rigidez antes da formação da 1<sup>a</sup> fenda (estado I) teve o seu valor mais alto de 278 kN/mm para o tirante LC40 D12. O valor menor de rigidez foi de 227 kN/mm no tirante LC70 D12. Para o LC55 obteve-se uma rigidez de 235 kN/mm. Com estes valores verificou-se que o aumento da resistência do betão provocou uma diminuição da rigidez nos tirantes no estado I.

No estado II verificou-se que o aumento da resistência do betão não influenciou directamente a rigidez dos tirantes, verificando-se que para o tirante com LC40 e LC55 foi registado 6,8 kN/mm tendo sido este o menor valor e no tirante com LC70 obteve-se 7,0 kN/mm.

No que diz respeito à largura das fendas e à distância entre elas, no tirante com varão de diâmetro 12mm, verificou-se que houve uma diminuição da largura com o aumento da resistência do betão, como se pode ver no Quadro 5.6. No tirante de LC40, a fenda característica tinha 1,8 mm de largura, enquanto que para o LC55 e LC70 era de 1,7 mm e 1,3 mm. Quanto à distância média entre fendas, foi verificado que a menor distância foi registada no tirante com LC55 com 0,133 m e uma distância máxima de 0,215 m, que foi a maior registada nos 3 betões. Para o LC70 registou-se 0,117 m sendo esta a menor distância média. Para o LC40 registou-se 0,132 m, sendo este o valor intermédio. A distância máxima entre fendas de 0,200 m registou-se para o LC70 e o menor valor foi registado no LC40 com 0,190 m. Assim, no que diz respeito à distância entre fendas não houve uma relação directa com o aumento da resistência do betão.

Nos tirantes com varão de diâmetro 16mm, não se registou um aumento da força aplicada na formação das 1<sup>as</sup> fendas com o aumento da resistência do betão. No LC40 a formação das fendas ocorreu para uma força de 29,74 kN, enquanto no LC55 e LC70 ocorreu aos 26,49 kN e 19,60 kN, sendo este último o menor valor registado para este diâmetro. Nestes tirantes, os valores não estão de acordo com o esperado, pelo motivo acima referido.

No estado I, a rigidez teve o seu valor mais alto de 287 kN/mm para o LC40, o valor menor de 218 kN/mm obteve-se para o LC70, sendo este o betão de maior resistência. Para o LC55 obteve-se uma rigidez intermédia de 282 kN/mm sendo este valor próximo à rigidez do tirante com LC40. Através dos valores anteriores verificou-se que existe uma relação entre o aumento da resistência do betão e a rigidez do tirante no estado I, sendo que à medida que a resistência do betão aumenta obtiveram-se menores valores da rigidez nos tirantes no estado I. Contudo, estes valores não estão de acordo com os resultados teóricos esperados.

Após a formação das fendas (estado II) foi também verificado que o aumento da resistência do betão levou a uma diminuição da rigidez dos tirantes, em que, para o tirante com LC55 e LC70 foi registado o valor 9,8 kN/mm, sendo este o menor valor observado. No tirante com LC40 obteve-se uma rigidez de 11,0 kN/mm. Também no estado II os valores obtidos não estão de acordo com o esperado teoricamente.

No que diz respeito à largura das fendas e à distância entre estas verificou-se que a largura não foi influenciada directamente pela resistência do betão. No tirante de LC40 D16 a fenda característica tinha 1,20 mm de largura, enquanto que para o LC55 e LC70 era de 1,1 mm e 1,5 mm. Quanto à distância média entre fendas verificou-se que a menor distância média registada foi 0,113 m no tirante com LC55 e uma distância máxima de 0,240 m, a qual foi a maior dos 3 betões. Para o LC40 registou-se uma distância média de 0,127 m e uma distância máxima de 0,210 m. No tirante de LC70 registou-se 0,186 m de distância média, sendo este o valor mais alto, e uma distância máxima de 0,250 m. Assim, no que diz respeito à distância entre fendas não houve uma relação directa com o aumento da resistência do betão, à excepção da distância máxima entre fendas, que sofreu um aumento tendencial, ainda que não constante. Contudo, os valores da distância máxima entre fendas são muito próximos no LC55 e LC70, variando apenas 0,01 m, já os valores da distância média apresentaram uma variação inferior a 0,06 m.

No Quadro 5.6 podemos verificar também que existem diferenças no comportamento dos tirantes com varões de GFRP quando comparados os dois diâmetros. No que diz respeito à força que originou a formação das primeiras fendas, nos tirantes com LC40 as forças são muito próximas, 29,17 kN para D12 e 29,74 kN para D16; contudo, para os LC55 e LC70, as diferenças são maiores, ainda que pequenas. Nos tirantes LC55 a diferença foi de 1,66 kN e nos tirantes de LC70 a diferença foi de 3,30 kN. Os tirantes também mostraram algumas diferenças na rigidez para diâmetros diferentes: no estado I, para LC40 houve um aumento de 278 kN/mm no D12 para 287 kN/mm no D16; no estado II, a rigidez foi de 6,8 kN/mm no D12 e 11,00 kN/mm para D16. Assim, é notório um aumento de rigidez entre os dois tirantes. Para os tirantes com LC55 a rigidez foi mais baixa no tirante com varões de diâmetro 12 mm, tanto no estado I como no estado II. Nos tirantes de LC70 foi registada, no estado I, uma diminuição de 227 kN/mm no D12 para 218 kN/mm no D16 e um aumento da rigidez, no estado II, de 7,0 kN/mm para 9,8 kN/mm.

No que diz respeito à largura das fendas, registaram-se algumas diferenças nos tirantes de LC40 e LC55, sendo a fenda maior para o D12; já nos tirantes com LC70, a maior fenda foi registada para o tirante com D16. Quanto à distância média entre fendas foi verificado o valor mais baixo nos D16 para os LC40 e LC55; contudo, para o LC70, o menor valor foi registado para o D12. Já na distância máxima entre as fendas verificou-se que esta foi menor para os D12 nos 3 tipos de betão (Quadro 5.6).

Quadro 5.6 - Quadro de resumo dos tirantes com varões de GFRP

Classe de resistência do betão	Diâmetro do varão (mm)	Formação das fendas (kN)	$K_I$ (kN/mm)	$K_{II}$ (kN/mm)	$W_{55kN}$ (mm)	$S_{r,méd}$ (m)	$S_{r,máx}$ (m)
LC40	12	29,17	278	6,8	1,40	0,132	0,190
LC55		24,80	235	6,8	1,30	0,133	0,215
LC70		16,03	227	7,0	1,10	0,117	0,200
LC40	16	29,74	287	11,0	1,20	0,127	0,210
LC55		26,46	282	9,8	1,10	0,113	0,240
LC70		19,60	218	9,8	1,50	0,186	0,250

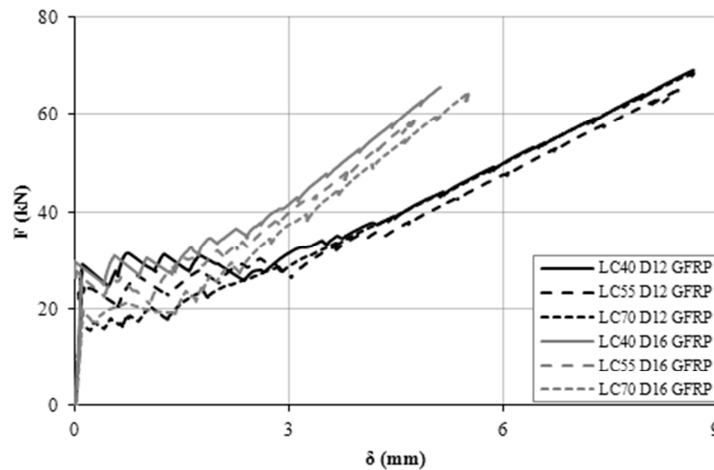
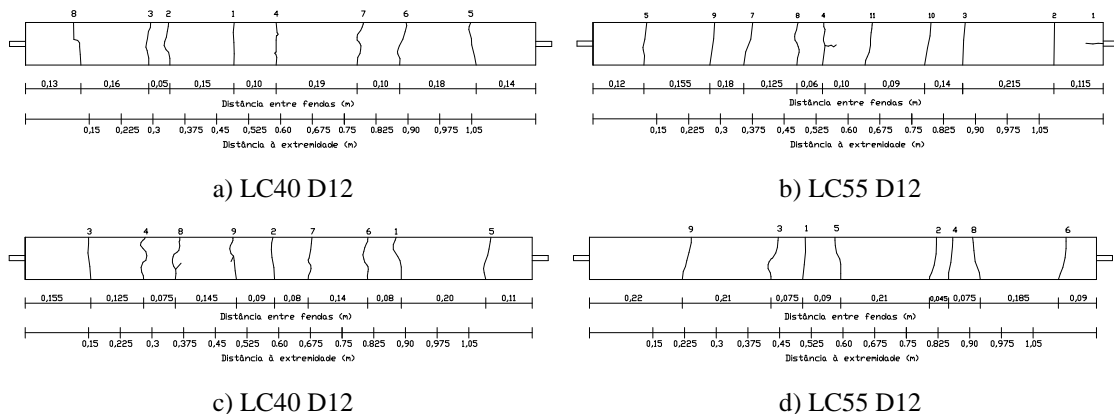


Figura 5.18 - Tirantes com armaduras de GFRP

### 5.3.3 Padrão da fendilhação

À semelhança dos tirantes com armaduras de aço, os tirantes com armaduras de GFRP apresentaram um padrão de fendilhação transversal com pequenas irregularidades e alguma inclinação. Em alguns tirantes foram também detectadas fendas de aderência, longitudinais. Este padrão está demonstrado na Figura 5.19.



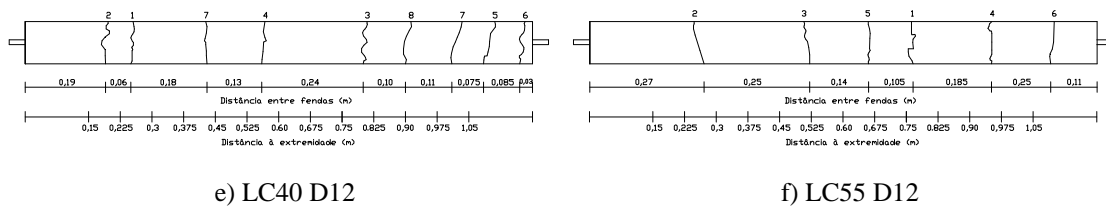


Figura 5.19 - Padrão de fendilhação em tirantes com armaduras GFRP

## 5.4 Comparação de tirantes com varões de aço e varões de GFRP

Através dos dados obtidos nos ensaios é possível fazer uma análise comparativa entre os tirantes com armaduras de aço e os tirantes com varões de GFRP. Para esta análise utilizaram-se os seguintes parâmetros: a força que origina a formação de fendas, a rigidez no estado I e no estado II, a largura da fenda característica e as distâncias médias e máximas entre as mesmas.

### 5.4.1 Diâmetro 12 mm

Quando comparados os tirantes com o mesmo diâmetro e o mesmo tipo de betão verificaram-se algumas diferenças nos valores registados. Nos tirantes de LC40 e diâmetro 12 mm, a formação das fendas no tirante com varão de aço ocorreu para um valor de 20,4 kN. A rigidez no estado I foi muito próxima nos 2 tirantes, no tirante de aço foi de 275 kN/mm e 278 kN/mm no tirante com varão GFRP. No estado II, a rigidez é muito mais baixa, de 6,8 kN/mm no tirante com varão GFRP foi e de 19,7 kN/mm no tirante com varão de aço, sendo a do aço três vezes superior à do tirante com o varão de GFRP. Esta diferença deve-se ao módulo de elasticidade inferior das armaduras de GFRP (60 GPa). No que diz respeito à largura das fendas, foi registada uma largura de 0,7 mm no tirante com varão de aço, sendo esta bastante inferior à de 1,7 mm do tirante com varão de GFRP. As menores distâncias entre fendas foram registadas no tirante com varão de GFRP, a distância média foi de 0,132 m e a distância máxima 0,190 m. No tirante com varão de aço, a distância média foi de 0,168 m e a distância máxima 0,210 m, sendo assim superiores em 0,04 m na distância média e 0,02 m na distância máxima (Quadro 5.7).

Nos tirantes de LC55 e diâmetro 12 mm a formação das fendas no tirante com varão de aço ocorreu para uma força de 12,50 kN. Esta força é aproximadamente metade da força registada no tirante com varão GFRP, onde a fendilhação começou aos 24,80 kN. A rigidez no estado I foi menor no tirante com varão de aço, 163 kN/mm, e 235 kN/mm no tirante com varão GFRP. No estado II, a menor rigidez verificou-se no tirante com varão de GFRP, com 6,8 kN/mm, enquanto no tirante com varão de aço a rigidez foi de 17,4 kN/mm. Quanto à largura das fendas foi verificada uma largura de 0,3 mm no tirante com varão de aço, valor bastante inferior a 1,3 mm medidos no tirante com varão de GFRP. A menor distância média entre fendas foi registada no tirante com varão de

aço, embora os valores sejam muito aproximados. No tirante com varão de aço a distância média foi de 0,119 m e no tirante com varão de GFRP foi de 0,133 m. No tirante com varão de aço a distância máxima foi de 0,165 m e no tirante com varão GFRP a distância máxima foi de 0,215 m, sendo assim superior em 0,05 m (Quadro 5.7).

Nos tirantes de LC70 e diâmetro 12 mm a formação das fendas ocorreu para uma força de 12,0 kN, sendo inferior à força necessária para formação das fendas no tirante com varão GFRP, que ocorreu aos 16,0 kN. A rigidez no estado I foi maior no tirante com varão de aço, 214,0 kN/mm, e 227,0 kN/mm no tirante com varão GFRP. No estado II, a menor rigidez verificou-se no tirante com varão GFRP, com 7,0 kN/mm, enquanto no tirante com varão de aço foi de 26,1 kN/mm. Quanto à largura das fendas foi verificado que no tirante com varão de aço a largura era 6 vezes inferior à largura registada no tirante com varão de GFRP. A menor distância média entre fendas foi registada no tirante com varão GFRP, 0,117 m, e no tirante com varão de aço foi de 0,156 m. No tirante com varão de aço, a distância máxima foi de 0,230 m e no tirante com varão GFRP a distância máxima foi de 0,200 m, sendo assim maior em 0,03 m no tirante de varão de aço (Quadro 5.7).

Através desta análise comparativa verificou-se que as maiores diferenças no comportamento dos tirantes com os dois tipos de varão ocorreram na largura das fendas e na rigidez no estado II. A largura das fendas foi sempre maior nos tirantes com varões de GFRP, chegando a ultrapassar 3 vezes os valores registados nos tirantes com varões de aço. Este resultado está de acordo com o comportamento esperado, uma vez que a diferença é inversamente proporcional à diferença de módulos de elasticidade. Quanto à rigidez no estado II ( $K_{II}$ ), esta foi significativamente superior nos tirantes com varões de aço, chegando a ser 3 vezes superior aos correspondentes com varões de GFRP, em alguns tirantes. A força que originou a formação das primeiras fendas nos tirantes foi superior nos tirantes com varões de GFRP (Quadro 5.7), embora este resultado não seja conclusivo, pois tem provavelmente maior influência de auto-tensões já instaladas.

**Quadro 5.7 - Comparação de tirantes de aço e GFRP de diâmetro 12 mm**

Tipo de varão	BEAL	Diâmetro do varão (mm)	Formação das fendas (kN)	$K_I$ (kN/mm)	$K_{II}$ (kN/mm)	$W_{55kN}$ (mm)	$S_{r,méd}$ (m)	$S_{r,máx}$ (m)
Aço	LC40	12	20,40	275	19,7	0,70	0,168	0,210
	LC55		12,50	163	17,4	0,50	0,119	0,165
	LC70		12,00	214	26,1	0,60	0,156	0,230
GFRP	LC40	12	29,17	278	6,8	1,40	0,132	0,190
	LC55		24,80	235	6,8	1,30	0,133	0,215
	LC70		16,03	227	7,0	1,10	0,117	0,200

### 5.4.2 Diâmetro 16 mm

Nos tirantes com armaduras de 16 mm também é possível fazer uma análise comparativa entre os tirantes, verificando as diferenças entre os dois tipos de armaduras usadas e retirando conclusões sobre as mesmas.

No tirante de LC40 com armadura de aço de 16 mm, a formação das fendas ocorreu para uma força de 20,45 kN, sendo inferior à força necessária para formação das fendas no tirante com varão GFRP, que ocorreu aos 29,74 kN. A rigidez no estado I foi inferior no tirante com varão de aço, 257 kN/mm, em relação a 287 kN/mm no tirante com varão GFRP. No estado II, a menor rigidez verificou-se no tirante com varão GFRP com 11,0 kN/mm, enquanto no tirante com varão de aço foi de 32,9 kN/mm. Quanto à largura das fendas foi registado um valor de 0,3 mm no tirante com varão de aço e 1,2 mm no tirante com varão de GFRP, tendo, o tirante de aço, fendas de menor largura. A menor distância média entre fendas foi registada no tirante com varão GFRP, embora os valores sejam muito semelhantes. No tirante com varão de GFRP, a distância média foi de 0,127 m e no tirante com varão de aço foi de 0,130 m. No tirante com varão de aço, a distância máxima foi de 0,195 m e no tirante com varão GFRP essa distância foi de 0,210 m, sendo assim 0,015 m superior no tirante de varão de GFRP (Quadro 5.8).

No tirante de LC55 com varão de aço de 16 mm, a formação das fendas ocorreu para uma força de 20,7 kN sendo inferior à força necessária para a formação da primeira fenda no tirante com varão GFRP, que ocorreu aos 26,5 kN. A rigidez no estado I foi inferior no tirante com varão de aço, 235,0 kN/mm, e 282,0 kN/mm no tirante com varão GFRP, tendo este uma rigidez superior. No estado II, a menor rigidez verificou-se no tirante com varão GFRP, com 9,8 kN/mm, enquanto que no tirante com varão de aço foi 32,1 kN/mm, sendo a rigidez no tirante com varão de aço 3 vezes superior. Quando à largura das fendas foi registado um valor de 0,3 mm no tirante com varão de aço, tendo assim uma largura bastante inferior ao 1,1 mm do tirante com varão de GFRP. A menor distância média entre fendas foi registada no tirante com varão GFRP embora com distâncias de valor muito aproximado. Neste tirante, a distância média foi de 0,127 m e no tirante com varão de aço foi de 0,130 m. No tirante com varão de aço a distância máxima foi de 0,195 m e no tirante com varão GFRP a distância máxima foi de 0,210 m sendo superior 0,015 m no tirante de varão de GFRP (Quadro 5.8).

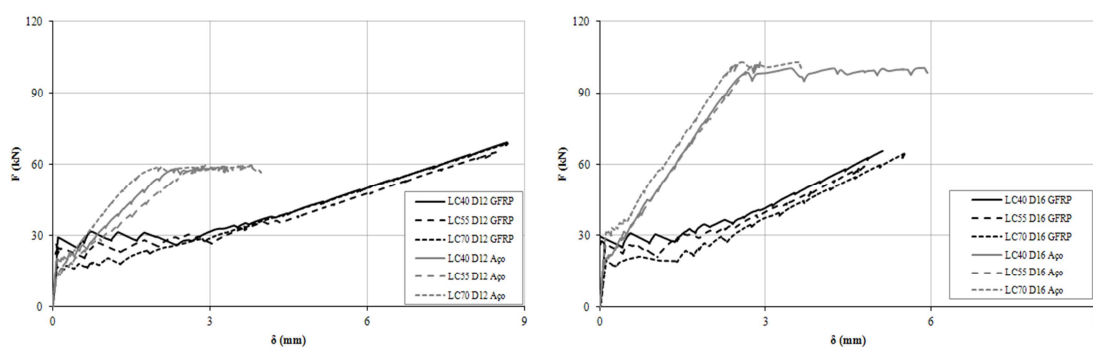
No tirante de LC70 com varão de aço de diâmetro 16mm a formação das fendas ocorreu para uma força de 31,4 kN sendo assim superior à força necessária para formação das fendas no tirante com varão GFRP, que ocorreu aos 19,6 kN. A rigidez no estado I foi maior no tirante com varão de aço, sendo este de 297,0 kN/mm, e 218,0 kN/mm no tirante com varão GFRP, obtendo-se uma rigidez menor no tirante com varão GFRP. No estado II, a rigidez mais baixa verificou-se no tirante com varão GFRP, com 9,8 kN/mm, enquanto no tirante com varão de aço foi verificado 33,8 kN/mm, sendo assim muito superior. Quanto à largura das fendas foi registado que a largura era bastante menor nos tirantes com varões de aço. No que diz respeito à maior distância média entre fendas foi registada no tirante LC70 com varão de GFRP. No tirante com varão GFRP a

distância média foi 0,186 m e no tirante com varão de aço foi 0,125 m. No tirante com varão de aço, a distância máxima registada foi 0,190 m e no tirante com varão GFRP a distância máxima foi de 0,250 m sendo maior 0,06 m no tirante de varão de GFRP (Quadro 5.8).

Desta análise comparativa verificou-se que as maiores diferenças no comportamento dos tirantes com os dois tipos de varão ocorreram na largura das fendas. A largura das fendas foi sempre maior nos tirantes com varões de GFRP, chegando a ultrapassar 3 vezes os valores registados nos tirantes com varões de aço (Figura 5.21). Verificou-se também que a rigidez ( $K_{II}$ ) é significativamente superior nos tirantes com varões de aço, aproximadamente o triplo em alguns tirantes. A força que originou a formação das primeiras fendas nos tirantes também se mostrou, na quase totalidade dos tirantes, inferior nos tirantes com varões de aço (Quadro 5.8).

Quadro 5.8 - Comparação de tirantes de aço e GFRP de diâmetro 16 mm

Tipo de varão	Classe de resistência do betão	Diâmetro do varão (mm)	Formação das fendas (kN)	$K_I$ (kN/mm)	$K_{II}$ (kN/mm)	$W_{55kN}$ (mm)	Sr.méd (m)	Sr,max (m)
Aço	LC40	16	20,45	257	32,9	0,45	0,130	0,195
	LC55		20,69	235	32,1	0,75	0,153	0,200
	LC70		31,40	297	33,8	0,60	0,125	0,190
GFRP	LC40	16	29,74	287	11,0	1,20	0,127	0,210
	LC55		26,46	282	9,8	1,10	0,113	0,240
	LC70		19,60	218	9,8	1,50	0,186	0,250



a) Tirantes com varões de 12 mm

b) Tirantes com varões de 16 mm

Figura 5.20 - Gráfico de comparação da relação F- $\delta$  entre varões de aço e GFRP

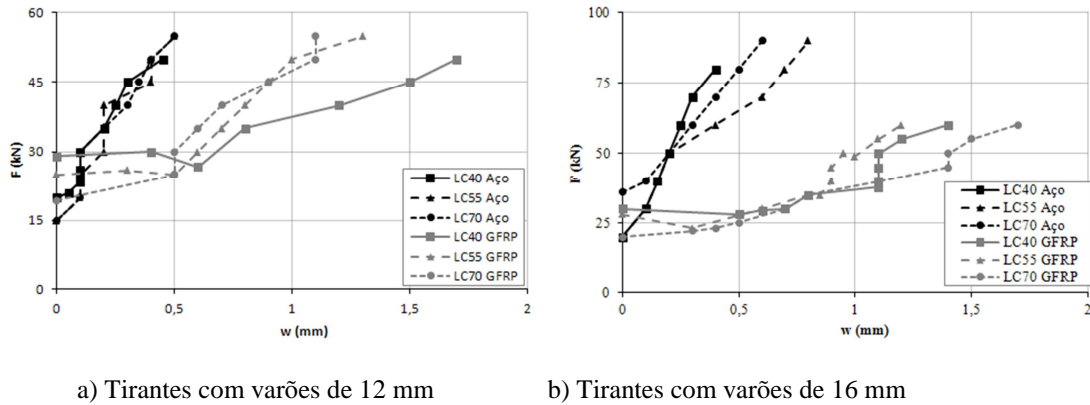


Figura 5.21 - Relação força e a largura das fendas - comparação entre os tirantes com varões de aço e de GFRP

### 5.5 Relação entre a largura da fenda característica e a tensão na armadura

Neste subcapítulo é abordada a relação da largura das fendas com a tensão na armadura. Para realizar esta análise foram adquiridos dados durante os ensaios, nomeadamente a leitura da largura das fendas e as extensões através dos extensómetros ligados ao *datalogger*. Sabendo a extensão nas secções mais próximas das fendas pode-se determinar a tensão instalada no varão através da Lei de Hooke (expressão 5.1):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (5.1)$$

onde:

$\sigma$  - tensão;

$\varepsilon$  - deformação específica, (adimensional);

E - módulo de elasticidade do varão.

Para a demonstração da evolução das fendas características e a comparação das mesmas nos tirantes é importante referir que a tensão máxima foi limitada a 550 MPa em ambos os tipos de tirantes.

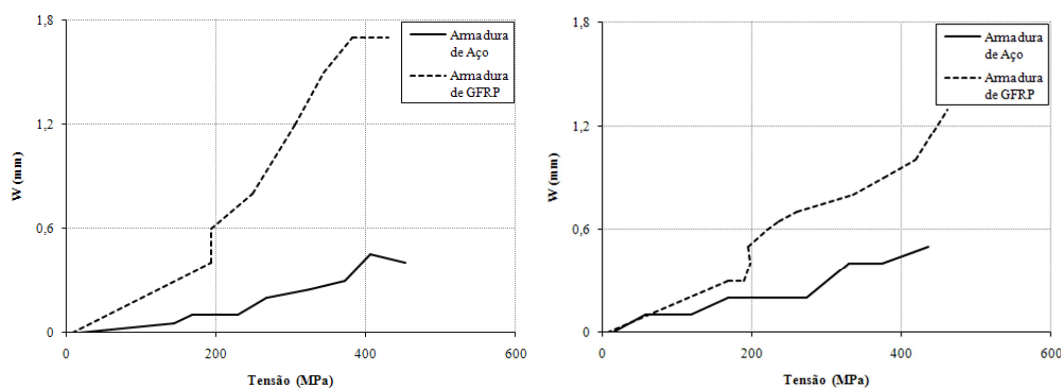
Na Figura 5.22 é possível verificar a evolução da largura da fenda característica e a tensão no varão, nos tirantes com varão de 12 mm de aço e de GFRP, com BEAL de resistência à compressão de cerca de 40 MPa. No tirante com varão de aço não foi possível obter a tensão na fenda característica devido ao não funcionamento do extensómetro localizado na posição da fenda. Como alternativa foi escolhida a fenda com maior largura onde estivesse localizado um extensómetro, escolhendo-se a fenda 2 (ver Figura 5.15).

No tirante com varão de aço, o aumento da tensão no varão não foi sempre proporcional ao aumento da largura da fenda, ficando evidente que o betão não influencia significativamente a tensão no varão naquela secção após a formação da fenda. A

formação da fenda e consequente aumento da tensão no varão mostraram-se bastante estáveis até à tensão de 68,8 MPa. Nesta fase, a largura da fenda foi de 0,1 mm. Para valores de tensão superiores, a largura da fenda aumentou significativamente, tendo aos 121,8 MPa uma largura de 0,45 mm (corresponde à maior largura registada e a uma força aplicada de 50 kN). Para 55 kN de força aplicada, que corresponde a uma tensão de 136,0 MPa, a fenda teve uma diminuição da sua largura. Este facto deve-se a um ajustamento da ligação varão-betão que estará certamente relacionado com o aumento da largura de outras fendas e consequente diminuição da fenda nesta secção. O tirante LC40 D12 com varão de GFRP sofreu também um aumento não linear da largura da fenda com o aumento da tensão no varão.

Na Figura 5.22 é apresentada a evolução da tensão no varão e a respectiva largura da fenda nos tirantes com varões de 16 mm, de aço e de GFRP. É importante referir que os valores apresentados nos tirantes com varões de diâmetro 16 mm têm como limite 90 kN de tracção nos tirantes com varões de aço e 60 kN de tracção nos tirantes de varões de GFRP. Os valores apresentados correspondem às fendas características número 1 no tirante com varão de aço e no tirante com varão de GFRP.

O tirante com varão de aço apresentou uma tensão elevada, tendo uma largura da fenda reduzida. No início, a uma tensão de 31,8 MPa correspondia uma largura de 0,1 mm. No entanto, quando a largura da fenda aumentou para 0,15 mm a tensão já era de 285,4 MPa, havendo assim um grande aumento. No período seguinte, a tensão e a largura da fenda tiveram uma evolução aproximadamente linear, ainda que com algumas oscilações, como é visível na Figura 5.23. Para a força de tracção de 80 kN, que corresponde a uma tensão de 553,2 MPa, a largura da fenda registada foi de 0,4 mm. No tirante com varão de GFRP a fenda formou-se com 0,5 mm, tendo uma tensão instalada no varão de 34,92 MPa. De seguida, a fenda teve um aumento linear e proporcional à tensão aplicada, ainda que tendo algumas oscilações, como se pode ver quando a fenda registava 0,6 e 0,7 mm e as tensões instaladas eram muito próximas, 83,7 MPa e 93,5 MPa. A evolução da fenda apresentou uma estabilização quando atingiu a largura de 1,1 mm, onde se registou um aumento de 199,4 MPa para 254,6 MPa. Posteriormente, a largura aumentou até 1,4 mm, sendo a tensão no varão de 304,3 MPa, o que corresponde a uma força de 60 kN. De seguida são apresentados os gráficos (Figura 5.22) que relacionam a largura da fenda com a tensão no varão.



a) LC40 D12

b) LC55 D12

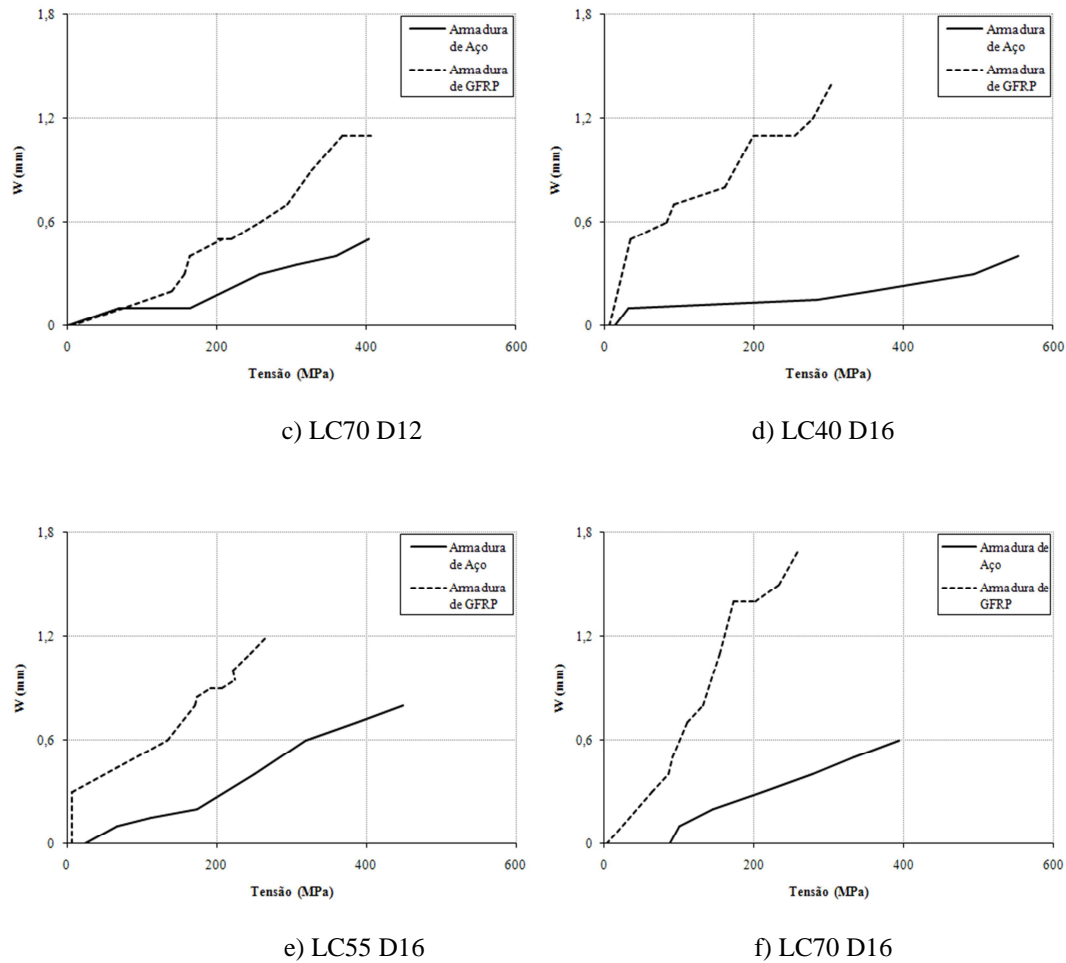


Figura 5.22 – Relação da largura da fenda com a tensão

Na Figura 5.22 é possível verificar que, para a mesma tensão, a largura das fendas nos tirantes com armaduras de GFRP é cerca de 3,2 vezes superior à largura das fendas dos tirantes com armaduras de aço. Esta diferença deve-se essencialmente à diferença do módulo de elasticidade, sendo cerca de 3,3 vezes inferior nas armaduras de GFRP em relação ao aço. Assim, verifica-se que a largura das fendas é, de um modo geral para o mesmo nível de tensão, inversamente proporcional ao módulo de elasticidade. Verificou-se ainda que nos tirantes com armaduras de GFRP de 16 mm, para tensões de valor reduzido, as fendas apresentam uma largura significativa.

## 5.6 Análise comparativa da largura das fendas e distância máxima experimental com a previsão do EC2

Para a comparação da largura das fendas e do espaçamento máximo com o previsto pelo EC2, definiu-se para os tirantes com varão de aço de 12 mm que a força para avaliar a largura máxima da fenda característica era 40 kN, que correspondente a uma tensão de 353,8 MPa. Nos tirantes com varões de aço de 16mm a força usada para a avaliação foi

de 70 kN, que correspondente a uma tensão de 347,7 MPa. Assim, é possível fazer uma comparação directa dos valores de largura de fenda obtidos pelo EC2 com os valores obtidos experimentalmente. Nos tirantes com armaduras de GFRP foi definida uma avaliação para 65 kN de força, em ambos os diâmetros, porque este foi o valor máximo atingido nestes tirantes. Esta força corresponde a uma tensão bastante inferior à tensão de rotura destes varões.

Através dos valores obtidos experimentalmente e da sua comparação com os previstos pelo EC2 (Equações 3.12 e 3.13) concluiu-se que, para o diâmetro 12 mm, existe uma diferença no que diz respeito à largura das fendas e ao seu espaçamento. Em ambos os tipos de tirantes, a diferença entre o valor experimental e o valor teórico chega a ser o dobro. Nos tirantes com armaduras de GFRP a diferença apresentada tem uma grande diferença (Quadro 5.10). Esta diferença leva a concluir que a previsão do EC2 aplicada para às armaduras de aço não é correcta para armaduras de GFRP, devido ao seu módulo de elasticidade ser muito inferior. Para o diâmetro de 16 mm os valores teóricos aproximam-se dos valores registados experimentalmente em ambos os materiais ainda que com uma diferença considerável nos valores do espaçamento máximo. Os valores teóricos previsto pelo EC2 e experimentais para os tirantes estão apresentados no Quadro 5.9.

**Quadro 5.9 – Largura de fendas teórica (EC2) e experimental em tirantes com armaduras de aço**

Classe de resistência do betão	Diâmetro do varão (mm)	Valores Teóricos		Valores Experimentais	
		$W_{0,7F}$ (mm)	$S_{r,máx}$ (m)	$W_{0,7F}$ (mm)	$S_{r,máx}$ (m)
LC40	12	0,54	0,510	0,25	0,210
LC55		0,54	0,510	0,20	0,165
LC70		0,54	0,510	0,30	0,230
LC40	16	0,50	0,413	0,30	0,195
LC55		0,45	0,413	0,60	0,200
LC70		0,43	0,413	0,40	0,190

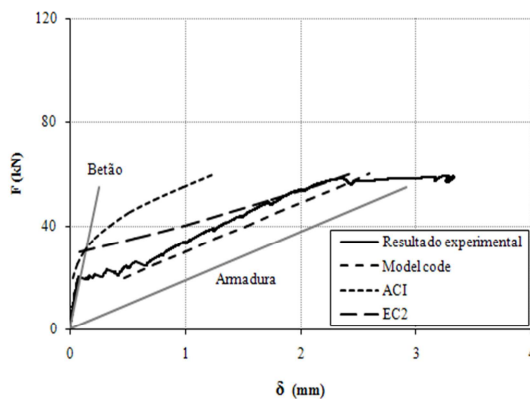
**Quadro 5.10 – Largura de fendas teórica (EC2) e experimental em tirantes com armaduras de GFRP**

Classe de resistência do betão	Diâmetro do varão (mm)	Valores Teóricos		Valores Experimentais	
		$W_{65kN}$ (mm)	$S_{r,máx}$ (m)	$W_{65kN}$ (mm)	$S_{r,máx}$ (m)
LC40	12	3,54	0,510	1,70	0,210
LC55		3,25	0,510	1,70	0,165
LC70		2,84	0,510	1,30	0,230
LC40	16	1,60	0,413	1,50	0,195
LC55		1,46	0,413	1,30	0,200
LC70		1,33	0,413	1,80	0,190

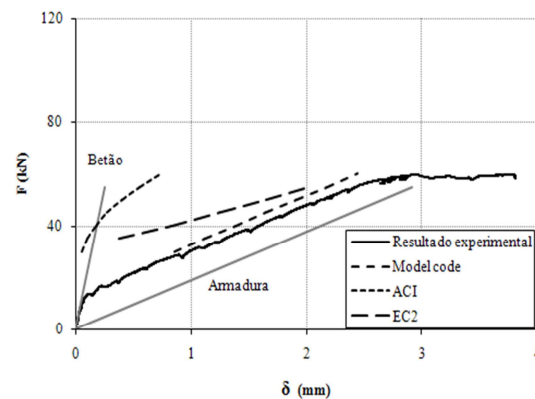
## 5.7 Previsão da deformação dos tirantes pelo MC90, ACI e EC2

Usando as expressões recomendadas pelo MC90, ACI 224-77 e EC2 para o cálculo da deformação de tirantes armados, já apresentadas no Capítulo 3, foi possível definir os gráficos que comparam os resultados teóricos com os resultados experimentais.

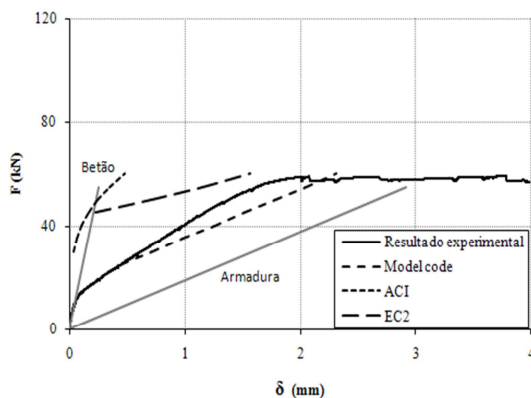
A previsão do MC90 revelou-se ser a melhor porque as deformações são quase coincidentes com os resultados experimentais nalguns casos. Veja-se, por exemplo, o tirante com armadura de aço de diâmetro 16 mm e LC55. Nos tirantes com varões de GFRP é também notória uma grande semelhança entre os valores teóricos e os valores experimentais, principalmente nos tirantes com LC55. A previsão do EC2 é também bastante próxima dos resultados experimentais nos tirantes com varões de aço (Figura 5.23). Contudo, nos tirantes com varões de GFRP a deformação teórica é inferior à deformação real do tirante. No caso do ACI 224-77 há um grande afastamento aos valores experimentais em relação à previsão regulamentar, quer no que diz respeito aos tirantes com varões de aço, quer nos tirantes com varões de GFRP (Figura 5.24); por isso, este não é o regulamento mais recomendável para prever a deformação dos tirantes. Em seguida são apresentados os gráficos com a relação força-deslocamento dos tirantes, com varões de aço e GFRP, com as curvas obtidas usando as expressões dos referidos regulamentos (Figura 5.23 e 5.24).



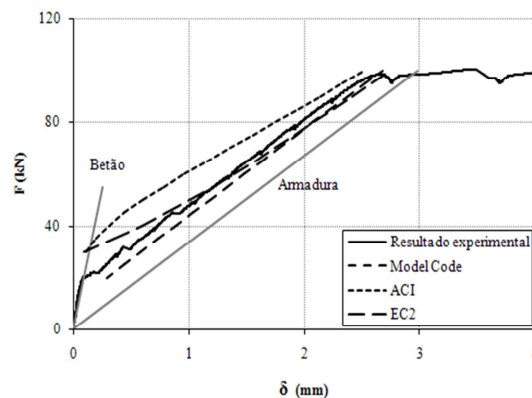
a) LC40 D12



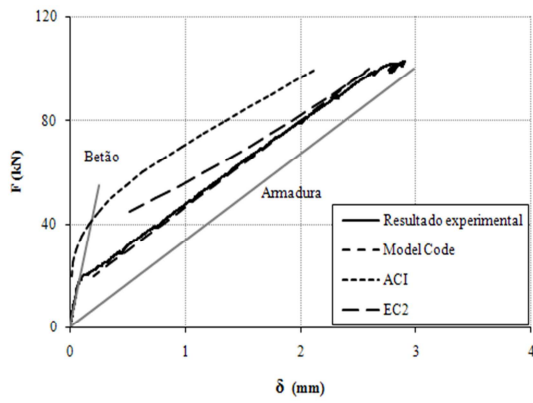
b) LC55 D12



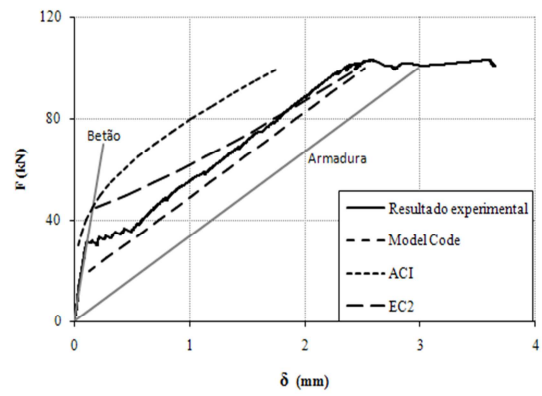
c) LC70 D12



d) LC40 D16

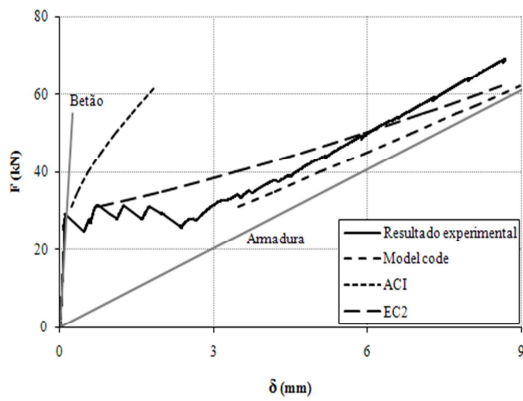


e) LC55 D16

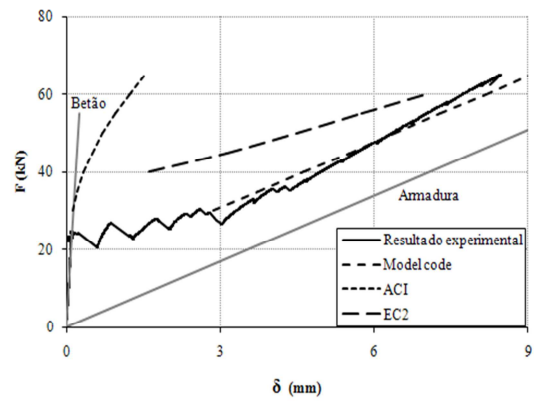


f) LC70 D16

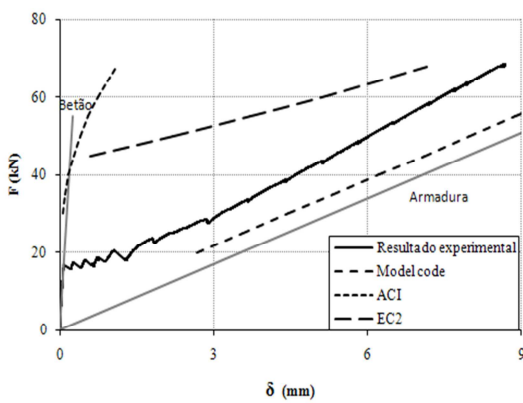
Figura 5.23 – Comparação da relação F- $\delta$  dos códigos com a experimental para tirantes de aço



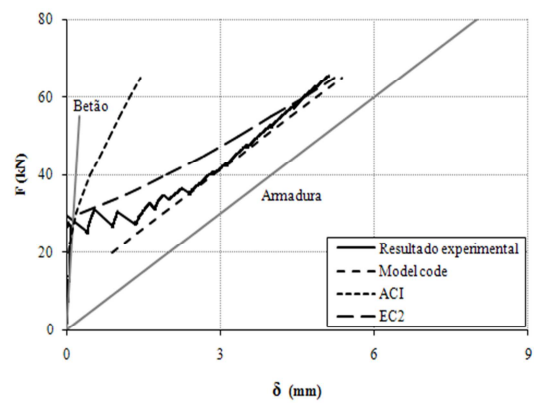
a) LC40 D12



b) LC55 D12



c) LC70 D12



d) LC40 D16

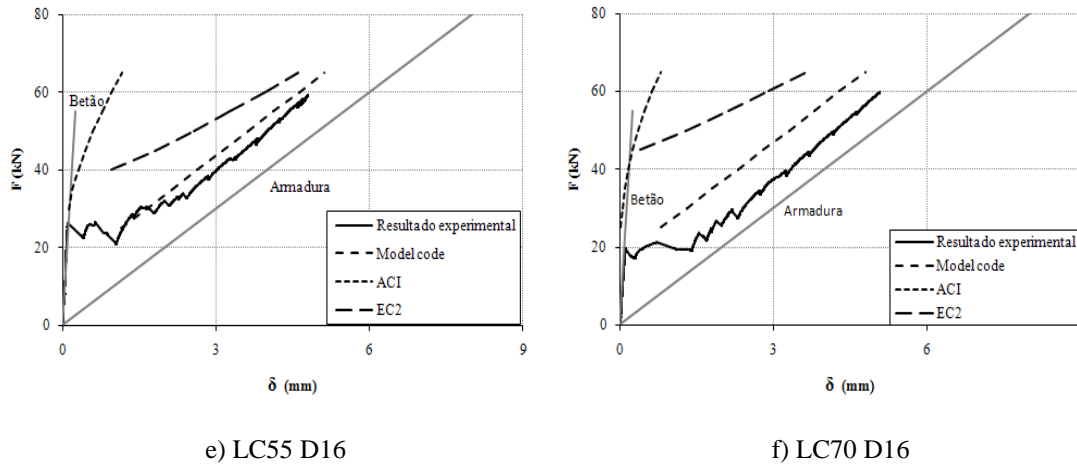


Figura 5.24 – Comparação da relação F-δ dos códigos com a experimental para tirantes de GFRP

### 5.8 Contribuição do betão entre fendas – *tension stiffening effect*

A contribuição do betão entre fendas na deformação total dos tirantes pode ser determinada com base nas deformações nos estados não fendilhado e fendilhado e conhecendo a deformação média experimental. Para calcular a referida contribuição do betão usou-se a expressão 7.18 do EC2 (expressão 5.2):

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \quad (5.2)$$

onde:

- $\alpha$  parâmetro de deformação considerando que poderá ser, por exemplo, uma extensão, uma curvatura ou uma rotação;
- $\alpha_I, \alpha_{II}$  valores do parâmetro calculado, respectivamente, para os estados não fendilhado e totalmente fendilhado;
- $\zeta$  coeficiente de distribuição (que tem em conta a contribuição do betão traccionado entre fendas) obtido pela expressão 5.3 (7.19 do EC2):

$$\zeta = 1 - \beta (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2 \quad (5.3)$$

onde:

- $\zeta = 0$  para secções não fendilhadas;
- $\beta$  coeficiente que tem em conta a influência na extensão média da duração do carregamento ou da repetição do carregamento:
  - = 1,0 para um carregamento de curta duração;
  - = 0,5 para um carregamento de longa duração ou para carregamentos

repetidos;

- $\sigma_s$  tensão nas armaduras de tracção, calculada na hipótese de secção fendilhada;
- $\sigma_{sr}$  tensão nas armaduras de tracção, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação.

A comparação que se apresenta foi efectuada para as mesmas forças aplicadas nos tirantes. Definiu-se como referencia as forças  $0,5F_{m\acute{a}x}$  e  $0,6F_{m\acute{a}x}$ , sendo  $F_{m\acute{a}x}$  a força máxima suportada pelos varões de aço. Nesta análise conclui-se que o coeficiente de distribuição  $\zeta$  é mais elevado nos tirantes com varões de GFRP, provavelmente devido à maior compatibilidade elástica entre os módulos de elasticidade destes varões e o BEAL. É também notório que o coeficiente de distribuição aumenta, em quase todos os tirantes, quando se passa de  $0,5F_{m\acute{a}x}$  para  $0,6F_{m\acute{a}x}$ , sendo assim possível concluir que a contribuição do betão tende a diminuir para maiores níveis de tensão no varão.

**Quadro 5.11 - Coeficiente de distribuição experimental**

Tirante	$\zeta_{exp}(0,5F_{m\acute{a}x})$	$\zeta_{exp}(0,6F_{m\acute{a}x})$
LC40 D12 Aço	0,48	0,54
LC55 D12 Aço	0,59	0,68
LC70 D12 Aço	0,35	0,40
LC40 D16 Aço	0,67	0,72
LC55 D16 Aço	0,68	0,74
LC70 D16 Aço	0,51	0,62
LC40 D12 GFRP	0,53	0,60
LC55 D12 GFRP	0,61	0,69
LC70 D12 GFRP	0,58	0,62
LC40 D16 GFRP	0,74	0,76
LC55 D16 GFRP	0,82	0,81
LC70 D16 GFRP	0,92	0,96

### 5.9 Contribuição do betão entre fendas - *tension stiffening effect* - usando o modelo do MC90

Apesar do modelo de cálculo do MC90 ter sido criado para estimar a contribuição do betão entre fendas para varões de aço, pode ser usado com alguma reserva para estimar a contribuição do betão com armaduras de GFRP, tendo sempre em conta que este modelo foi criado para varões de aço. Tendo como base este modelo determinou-se o valor experimental de  $\beta t$  (Figura 5.25) para todos os tirantes (Quadro 5.12). Estes cálculos foram realizados para  $0,5F_{m\acute{a}x}$  dos varões de aço. Através dos valores

calculados usando a Expressão 3.8 concluiu-se que os tirantes com varões de GFRP tem menores valores de  $\beta_t$ . Assim, é notória uma menor contribuição do betão nestes tirantes, estando este factor relacionado com o menor módulo de elasticidade da armadura GFRP, visto que os betões usados e as tensões de aderência não demonstraram grandes variações. Através dos valores obtidos foi também possível concluir que o aumento da resistência do betão contribuiu para um aumento do valor de  $\beta_t$ , à excepção dos tirantes de varões GFRP de diâmetro 16 mm.

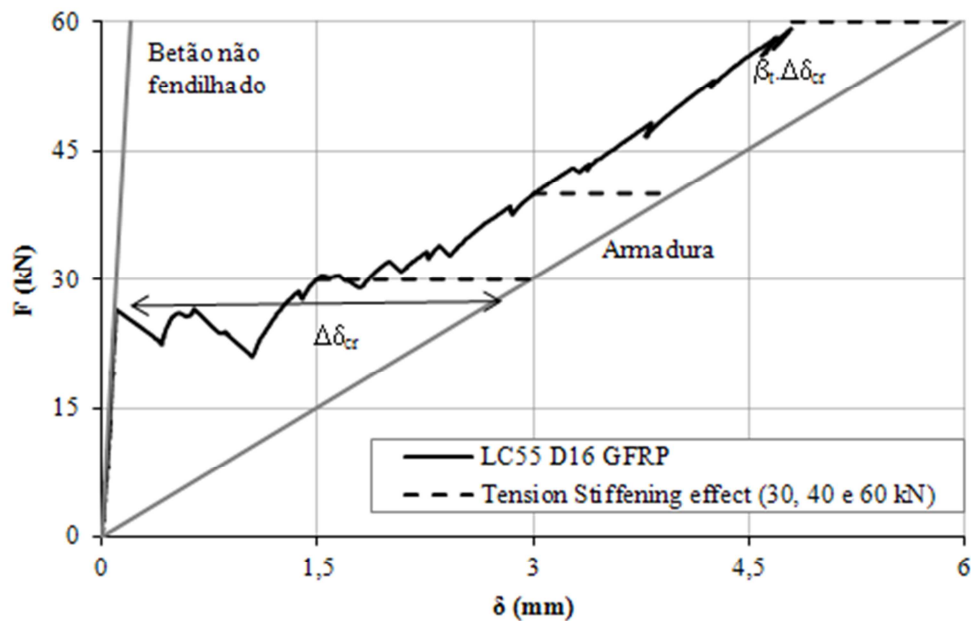


Figura 5.25 - Coeficiente experimental  $\beta_t$ . Tirante LC55 D16 GFRP.

Quadro 5.12 - Coeficiente experimental  $\beta_t$

Tirante	$\beta_t$	
	Aço	GFRP
LC40 D12	0,74	0,48
LC55 D12	0,99	0,49
LC70 D12	1,49	0,74
LC40 D16	0,82	0,50
LC55 D16	0,88	0,40
LC70 D16	0,86	0,25

### 5.10 Análise da extensão média das armaduras nos tirantes

Os ensaios realizados e a instrumentação usada permitiram a avaliação da extensão média ( $\epsilon_{sm}$ ) ocorrida nos varões. A análise da extensão média é um parâmetro

importante porque permite avaliar directamente a deformação de elementos estruturais de betão armado. Esta avaliação tem sentido para uma análise aos Estados Limite de Utilização, por isso, a tensão nos varões deve ser relativamente pequena. Esta análise das extensões realizou-se para cerca de 50% da tensão máxima admissível dos varões de aço.

Deste modo definiu-se para os tirantes com varões de diâmetro 12 mm que a extensão média ( $\epsilon_{sm}$ ) era avaliada para uma força de 30 kN, correspondente a uma tensão de 264,9 MPa. Nos tirantes com varões de aço e diâmetro 16 mm a força usada para a avaliação foi de 50 kN, correspondente a uma tensão de 248,4 MPa. No Quadro 5.13 apresenta-se, além dos valores das extensões médias, a extensão na armadura numa secção não fendilhada ( $\epsilon_{sI}$ ) e totalmente fendilhada ( $\epsilon_{sII}$ ). Desta forma é possível fazer uma comparação directa entre os valores teóricos, mínimo e máximo, e os valores obtidos experimentalmente.

Nos tirantes com varões de GFRP, a força usada para a avaliação da extensão média foi a mesma dos tirantes com varões de aço.

A extensão média ( $\epsilon_{sm}$ ) experimental foi obtida através da média de todos os valores dos extensómetros em funcionamento e para o nível de tensão referido anteriormente. Os resultados estão apresentados no Quadro 5.13.

**Quadro 5.13 - Comparação da extensão teórica numa secção não fendilhada e totalmente fendilhada com a extensão média experimental nos tirantes com armaduras de aço**

BEAL do tirante	Diâmetro do varão (mm)	$\epsilon_{sI}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\epsilon_{sII}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\epsilon_{sm}$ experimental ( $\mu\text{m/m}$ )
LC40	12	113	1325	925
LC55	12	101	1325	775
LC70	12	94	1325	657
LC40	16	188	1242	1425
LC55	16	168	1242	1283
LC70	16	157	1242	905

Em dois tirantes com varões de diâmetro 16 mm verifica-se que a extensão média experimental é ligeiramente superior ao valor máximo teórico. Estes valores não eram expectáveis e é difícil encontrar uma explicação plausível para este resultado.

Para os tirantes com varões de GFRP a extensão média ( $\epsilon_{sm}$ ) experimental obteve-se através da média dos valores dos extensómetros em funcionamento e para a tensão referida anteriormente (ver Quadro 5.14).

**Quadro 5.14 - Comparação da extensão teórica numa secção não fendilhada e totalmente fendilhada com a extensão média experimental nos tirantes com armaduras de GFRP**

BEAL do tirante	Diâmetro do varão (mm)	$\epsilon_{sI}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\epsilon_{sII}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\epsilon_{sm}$ experimental ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
LC40	12	113	4417	2686
LC55	12	107	4417	1891
LC70	12	96	4417	3322
LC40	16	189	4140	3636
LC55	16	179	4140	3698
LC70	16	159	4140	3456



---

## Capítulo 6 - Conclusões

### 6.1 Considerações gerais

As conclusões e a divulgação de um trabalho experimental são um dos pontos importantes de uma investigação, e portanto devem ser cuidadosamente apresentadas. No estudo realizado sobre o comportamento dos tirantes de BEAL armado e sobre a aderência, onde as recomendações regulamentares são abordadas, foi possível retirar conclusões importantes. As conclusões podem servir para a elaboração de novos estudos ou para aplicação directa em situações práticas de engenharia. Deve ter-se em atenção que as conclusões retiradas desta análise não devem ser extrapoladas para outras situações não enquadráveis, principalmente no caso dos tirantes. As principais conclusões do presente trabalho estão detalhadas no subcapítulo 6.2.

### 6.2 Principais conclusões

Relativamente à tensão de aderência entre as armaduras de GFRP e os BEAL foram registadas tensões elevadas e semelhantes às obtidas para armaduras de aço A500 NR, sendo as últimas ligeiramente superiores. Foi também possível verificar que, tanto nos ensaios com armaduras de GFRP como nos com armaduras de aço, as tensões obtidas experimentalmente são bastante superiores às de cálculo previstas pelo EC2, o que é justificado pelo elevado desempenho da matriz ligante dos BEAL. Ainda assim, e uma vez que a rotura predominante foi a fractura radial do betão, sugere-se que, para melhor avaliação da tensão de aderência experimental, os provetes devem ser confinados. Neste tipo de ensaios deve ter-se em atenção que, quando a matriz ligante tem elevada resistência, a força de arrancamento pode ultrapassar a força de cedência do varão. Quanto à influência do BEAL, concluiu-se que, em ambos os tipos de armadura, as tensões de aderência aumentam à medida que se aumenta a resistência do betão.

A deformação dos tirantes no estado I foi semelhante nos dois tipos de armaduras, uma vez que o betão não fendilhado tem elevada contribuição. Contudo, no estado II a deformação nos tirantes com armaduras de GFRP foi bastante superior, devida ao módulo de elasticidade mais baixo, chegando mesmo a ser 4 vezes superior à deformação dos tirantes com armaduras de aço. No estado II, o aumento da resistência à compressão do betão apresenta baixa influência na rigidez.

O aumento do diâmetro das armaduras tende a aumentar a rigidez dos tirantes no estado II, uma vez que são essas armaduras que condicionam o comportamento nesse estado; esse aumento de rigidez é maior no caso das armaduras de aço, comparativamente às de GFRP, conforme esperado, uma vez que apresentam maior valor do módulo de elasticidade.

A largura das fendas nos tirantes com armaduras de GFRP é cerca do triplo da largura das fendas dos tirantes com armaduras de aço, para tensões iguais. Esta diferença deve-se essencialmente ao menor valor do módulo de elasticidade das armaduras de GFRP, que é cerca de 1/3 do valor do aço. Assim, conclui-se que a largura das fendas é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade.

O espaçamento máximo entre fendas, nos tirantes com varões de GFRP, foi maior nas situações com varões de 16 mm de diâmetro, embora com o espaçamento médio idêntico nos dois diâmetros caracterizados. Nos tirantes com varões de aço, os espaçamentos médios e máximos foram superiores nos tirantes com diâmetro 12mm (LC40 D12 e LC70 D12).

O padrão de fendilhação obtido foi igual nos tirantes com varões de aço e varões de GFRP. A fendilhação observada foi predominantemente transversal ao eixo dos tirantes, com pequenas irregularidades e por vezes, com inclinação.

A previsão do EC2 sobrestima a largura das fendas e o espaçamento máximo entre fendas nos tirantes de aço. Para os tirantes com armaduras de GFRP, a previsão não é recomendada para estimar esses parâmetros com estas armaduras. A extensão média teórica é sobrestimada pelo EC2, uma vez que os resultados experimentais são, na generalidade, inferiores à previsão.

O *tension stiffening effect*, avaliado através do coeficiente  $\beta_t$ , mostrou que este efeito na deformação total é cerca de metade nos tirantes com armaduras de GFRP, em relação aos tirantes com armaduras de aço, o que sugere que quanto maior for a diferença de módulos de elasticidade entre a armadura e o betão, maior é essa contribuição.

O ACI revelou uma previsão no cálculo da deformação bastante inferior aos valores experimentais, quer no caso dos tirantes com varões de aço, quer no caso dos varões de GFRP. O regulamento que apresentou resultados de deformação mais próximos dos resultados experimentais foi o MC90.

Este estudo carece de mais informação no caso dos tirantes, sendo aconselhado aumentar o número de tirantes para cada situação. Considera-se também importante variar a taxa de armadura e a secção de betão.

### **6.3 Recomendação de novos estudos**

A continuidade deste estudo é importante visto tratar-se de um estudo novo, combinando o uso de varões de GFRP com BEAL, que pode contribuir para o aumento da vida útil das estruturas. Assim, apresentam-se de seguida algumas recomendações para estudos a realizar no futuro:

- estudo idêntico mas com maior número de provetes; no mínimo, três exemplares iguais para cada tipo de tirante, para se poder concluir com maior certeza sobre o comportamento de cada tipo de tirante.
- estudo com diferentes tipo de tirantes, isto é, variando, além das propriedades do betão, a secção transversal e a taxa de armadura.
- estudo sobre o comportamento de tirantes sujeito a cargas cíclicas.
- estudo com outro tipo de elementos estruturais (vigas, pilares, etc.) mas fabricado com BEAL e com varões de GFRP.

## Referências Bibliográficas

- AAS-Jakobsen (2013). AAS-JAKOBSEN company, [http://www.aaj.no/bruuer/pdf/Sundoy\\_referanse\\_eng.pdf](http://www.aaj.no/bruuer/pdf/Sundoy_referanse_eng.pdf). (consultado em Março de 2013).
- ABB (2013). ABB company, [www.abb.com](http://www.abb.com), (consultado em Fevereiro de 2013).
- Abdelmonem Masmoudi, Mongi Ben Ouezdou, Jamel Bouaziz (2012). *New parameter design of GFRP RC beams*, Constr. Building Materials, Elsevier vol. 29: pp. 627-632.
- American Concrete Institute (1991). Committee 408. *Mechanical Reinforcing, Bar anchorages and Splices*.
- American Concrete Institute (1997). *Cracking of Concrete Members in Direct Tension*. ACI 224.2R-92.
- American Concrete Institute (1997). *Recommended practice for evaluation of strength test results of concrete*. ACI 214-77.
- American Concrete Institute (1999). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*. ACI 213R-87.
- American Concrete Institute (2001). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*. ACI, Farmington, Michigan. ACI 440.1R-01.
- Asik, M. (2006). *Structural Lightweight Concrete With Natural Perlite Aggregate and Perlite Powder*. Tese de Mestrado, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Turkey.
- Biswarup Saikia, Phanindra Kumar, Job Thomas, K.S. Nanjunda Rao, Ananth Ramaswamy (2007). *Strength and serviceability performance of beams reinforced with GFRP bars in flexure*, Constr. Building Materials, Elsevier vol. 21, issue 8: pp. 1709-1719.
- Carmo, R. (2010). *Apontamentos de Betão Estrutural do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*. Coimbra.
- Castro, C. M. d. (2002). *Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com armadura sob acções repetidas*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CEB-217 (1993). *Bulletin d'Information N. 217 - Selected justification notes*. Comité Euro International du Béton, April.
- Chandra, S.; Berntsson, L. (2002). *Lightweight Aggregate concrete*. Noyes Publication, U.S.A.

Costa, H. (2007). *Composição e Caracterização Mecânica de Betões Estruturais de Agregados Leves*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Costa, H. (2013) *Betões Estruturais de Agregados Leves. Aplicações em Prefabricação e Reforço de Estruturas*. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Coimbra.

Costa, H.; Júlio, E; Lourenço, J. (2010). *A New Mixture Design Method for Lightweight Aggregate Concrete*, 8<sup>th</sup> fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Copenhagen – Denmark.

Costa, H.; Júlio, E; Lourenço, J. (2012). *New Approach for Shrinkage Prediction of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete*, Constr. Building Materials, Elsevier vol. 35: pp. 84-91.

EuroLightCon (1998). *LWAC Material Properties State-of-the-Art*. The European Union – Brite EuRam III.

EuroLightCon (2000a). *Mechanical properties of lightweight aggregate concrete*. The European Union – Brite EuRam III.

EuroLightCon (2000b). *The economic potential of lightweight aggregate concrete in c.i.p. concrete bridges*. The European Union – Brite EuRam III.

Fernandes, C; Rodrigues, H; Costa, A; Arêde, A; Varum, H (2007). *Influência do mecanismo de aderência aço-betão no comportamento de elementos de betão armado com armadura lisa sujeitos a cargas cíclicas*. Comunicação da Universidade de Aveiro - Departamento de Engenharia Civil, Aveiro (<http://hdl.handle.net/10773/8247>).

Fernandes, R. M. (2000). *A influência de ações repetidas na aderência aço-concreto*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FIB (2000). *Bond of reinforcement in concrete. Bulletin n.10*. Fédération Internationale du Béton.

Forbes Aird (1996). *Fiberglass and composite materials. An Enthusiast's Guide to High Performance Non-Metallic Materials for Automotive Racing and Marine Use*. Published by The Berkley Publishing Group, HP books, ISBN: 1-55788-239-8.

Fusco, P.B. (1995). *Técnica de armar as estruturas de concreto*. São Paulo, Pini, ISBN: 8572660577.

Gordon, J. E., (1991). *The New Science of Strong Materials: Or Why You Don't Fall Through the Floor*. Princeton University Press, ISBN: 0691125481.

Goto, Y. (1971). *Cracks formed in concrete around deformed tension bars*. ACI Journal, v.68, n.4, p.244-51.

H. Mazaheripour, J.A.O. Barros, J.M. Sena-Cruz, M. Pepe, E. Martinelli (2013). *Experimental study on bond performance of GFRP bars in self-compacting steel fiber reinforced concrete*. Composite Structures journal, Elsevier, vol. 95: pp. 202-212.

Halfen FRP FiReP® (2010). *Halfen FRP FiReP® - Technical product information*. (www.halfen.de).

Houssam Toutanji, Yong Deng (2003). “*Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods*”. Construction and Building Materials journal, Elsevier, vol. 17, issue 1: pp. 69-74.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. (1977). *Construções de betão: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de betão armado*. 1.ed. Rio de Janeiro, Interciência. v.1.

Louro, Andrea S. A. (2011). *Estudo da aderência aço – betão em elementos estruturais de BA*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

M. Baena, A. Turon, Li, Torres, C. Miàs. (2011). *Experimental study and code predictions of fibre reinforced polymer reinforced (FRP RC) tensile members*, Composite Structures, Elsevier, vol. 93, issue 10: pp. 2511–2520.

Maranha, Paulo, (2011). *Apresentação das aulas - Reforço de estruturas e fundações de edifícios e pontes*.

Mathieu Robert, Brahim Benmokrane (2010). *Effect of aging on bond of GFRP bars embedded in concrete*. Cement & Concrete Composites, Elsevier, vol. 32, issue 6: pp. 461-467.

Melo, J. (2009). *Influência do escorregamento na resposta cíclica de elementos de BA*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Mohamed S. Issa, Ibrahim M. Metwally, Sherif M. Elzeiny (2011). *Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars*. Engineering Structures, Elsevier, vol. 33, issue 5: pp. 1754-1763.

Model Code 90 (1990). *Model Code for Concrete Structures*. CEB-FIP Comité Euro-International du Béton – Fédération Internationale de la Précontrainte.

Nasseh, Jorge (2007). *Métodos avançados de construção em composites*. Rio de Janeiro (www.barracudatec.com.br).

EN 10080 (2005). *Steel for the reinforcement of concrete — Weldable reinforcing steel — General*. BSI British Standard and the European Standard.

NP EN 12390 (2009). *Ensaaios do betão endurecido*. IPQ, Portugal.

NP EN 1504-4, (2006) *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 4: Structural bonding*.

NP EN 1992-1-1 (2010). Eurocódigo 2 – *Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. IPQ, Portugal.

NP EN 206-1 (2007). *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. IPQ, Portugal.

Periyasamy, Aravin Prince (2012). Apresentação: *Glass fiber Manufacture and Applications*.

Rahman, A.H., Kingsley, C., Richard, J. and Crimi, J. (1998). *Experimental Investigation of the Mechanism of Deterioration of FRP Reinforcement for Concrete*. Proceedings of the 2nd International Conference on Fibre Composites in Infrastructure ICCI'98, vol. 2, pp.501-511.

Rayner, M Mayer (1993). *Design with Reinforced Plastic: A Guide for Engineers and Designer*. Boume Press Ltd, United Kingdom, ISBN: 0850722942.

Saleh Hamed Alsayed (1998). *Flexural Behaviour of concrete Beams Reinforced with GFRP Bars*. Cement & Concrete Composites, Elsevier, vol. 20, issue 1: pp. 1-11.

Sayed, Firas Ahmad (2012). *Mise en précontrainte des Bétons Fibrés à Ultra Performance (BFUP) à l'aide de Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PFRC)*. Thèse de doctorat d'Université Paris-Est.

Silva, B. (2007). *Betão Leve Estrutural Com Agregados de Argila Expandida*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.

Silva, R. D. d. (2006). *Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Sooriyaarachchi, Harsha (2006). *Tension stiffening effect in gfrp reinforced concrete elements*. A Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the faculty of engineering of The University of Sheffield.

Tassios, T.P. (1979). *Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions*, CEB, Bulletin d'Information, AICAP-CEB Symposium, Structural Concrete Under Seismic Actions, n.131, p.67-122.

Varum, H. (2003). *Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings* PhD Thesis, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Wai How Soong, J. Raghavan, Sami H. Rizkalla (2011). *Fundamental mechanisms of bonding of glass fiber reinforced polymer reinforcement to concrete*. Construction and Building Materials journal, Elsevier, vol. 25, issue 6: pp. 2813-2821.

Wikipédia (2013), The Free Encyclopedia, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). (consultado em Abril de 2013).