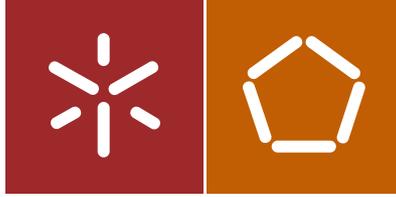




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joana Maria Leal Machado

Estudo da ligação entre componentes
estruturais de GFRP (glass fiber reinforced
polymer) e componentes estruturais em betão



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joana Maria Leal Machado

Estudo da ligação entre componentes
estruturais de GFRP (glass fiber reinforced
polymer) e componentes estruturais em betão

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

Trabalho efectuado sob a orientação de
Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente

Agradecimentos

O trabalho desenvolvido na dissertação só foi possível com a colaboração de um conjunto de pessoas que intervirão de forma construtiva na sua concretização.

Em forma de reconhecimento agradeço especialmente,

- À Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente, orientadora desta dissertação, pela paciência, pela sabedoria e ensinamentos que transmitiu, por toda a dedicação, apoio e disponibilidade prestada e pela forma cuidadosa e atenciosa que sempre demonstrou para me ajudar na organização da dissertação.
- Ao aluno de Doutoramento de Engenharia Civil, Muhammad Mastali, pela simpatia e colaboração na realização da campanha experimental, bem como na produção da argamassa e dos conectores GFRP desenvolvida na dissertação.
- À Civitest, pela produção da argamassa utilizada na campanha experimental, possibilitando assim a betonagem dos provetes utilizados no âmbito desta dissertação. Um especial agradecimento à Engenheira Delfina por se ter mostrado sempre prestável, pela simpatia, pela disponibilidade e cooperação nos trabalhos realizados.
- Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, com especial atenção para o Sr. António Matos pela simpatia e cooperação nos trabalhos realizados.
- Aos meus amigos que me acompanharam nesta longa jornada académica, pelo convívio, as palavras de encorajamento, pela boa disposição, simpatia, demonstraram sempre disponibilidade para me ajudar em tudo, em especial, à Cátia Machado, à Bárbara Ferreira, ao José Pereira e Bárbara Pereira.
- Ao meus queridos pais, por toda compreensão, apoio e confiança que sempre depositaram em mim, e por último, não menos importante, à minha querida irmã Andreia, pelo apoio sempre prestado.

Resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação decorreu no âmbito do projeto de investigação RehabGFRP que decorreu no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. No âmbito deste projeto, foi desenvolvido um novo sistema estrutural em laje sandwich formada por camada inferior de tração e nervuras transversais em material polimérico reforçado com fibra de vidro (GFRP- *glass fiber reinforced polymer*), núcleo em material leve com propriedades de isolamento térmico (espuma de poliuretano) e camada superior de compressão realizada em argamassa. Esta argamassa tem como finalidade aumentar a rigidez à flexão da laje, aumentar a resistência à encurvadura local das nervuras transversais de GFRP, contribuir para a resistência e a ductilidade no comportamento estrutural da laje e melhorar o seu desempenho termo-acústico.

O painel sandwich proposto tem como principal aplicação a reabilitação estrutura de edifícios de alvenaria onde se preservam as paredes resistentes e se pretende remodelar os pavimentos. Trata-se de um tipo de laje com peso próprio muito inferior a qualquer outra solução construtiva existente.

Neste trabalho, pretende-se estudar soluções otimizadas que garantam a ligação entre as nervuras de GFRP e a camada superior de argamassa. Para tal, são avaliadas três tipologias diferentes de conexão, nomeadamente o conector liso, o conector perfurado e o conector indentado. Todos estes conectores são realizados nas nervuras de GFRP. Para cada tipologia de conectores em estudo avalia-se também a influência de considerar duas espessuras diferentes, neste caso de 4 e de 6 mm. Para estudar as ligações mencionadas, são efetuados ensaios experimentais de tipo *pull-out*, que permitem avaliar a capacidade resistente da ligação ao arranque. Esta configuração de ensaio permite avaliar a resistência e adequabilidade do GFRP utilizado, a contribuição da aderência entre as superfícies de GFRP e de argamassa, a contribuição dos pinos de betão que se mobilizam nas aberturas do conector e a contribuição da forma das aberturas.

Previamente à realização dos ensaios experimentais é efetuado o fabrico e a produção dos diversos provetes que são utilizados no estudo. São também realizados ensaios de caracterização mecânica da argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC - *Deflection Hardening Cement Composites*) utilizada e ensaios de caracterização das soluções de GFRP definidas para a camada inferior e para as nervuras.

Palavras-chave: Painéis *sandwich*, conector em GFRP, ensaios de tipo *pull-out*, argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC).

Abstract

The work presented in this master's thesis was developed as part of the research project RehabGFRP which took place in the Department of Civil Engineering on University of Minho. A new structural sandwich slab system that consists of a lower GFRP tensile skin and GFRP transversal ribs made with polymeric material reinforced with glass fibers (GFRP - *glass fiber reinforced polymer*), an internal core made that uses lightweight material with thermal insulation properties (polyurethane foam) and a compression top layer made with special mortar. This mortar is used to increase the bending stiffness of the slab, to increase resistance to local buckling of the transverse ribs of GFRP, to contribute to the strength and ductility of the slab structural behavior and to improve their thermo-acoustic performance.

The main application of the proposed sandwich panel is in the structural rehabilitation of masonry buildings which preserve the resistant walls. It is intended to be used in the refurbishment of these buildings floors. It is a type of slab whose dead weight is lower than any other existing constructive solution.

In this work, it is intended to study optimized solutions that are able to provide the connection between the ribs of GFRP and the upper layer of mortar. As such, three different types of connection are evaluated: the plane connector, the perforated connector and the indented connector. All these connectors are made in the ribs of the GFRP. For each type of connectors under study, two different thicknesses are evaluated by considering, in this case, thicknesses of 4 mm and 6 mm. Experimental tests of pull-out type are performed in order to assess the bearing capacity of the connection. This test configuration allows to evaluate the resistance and the suitability of the used GFRP, the contribution of the adhesion between the surfaces of GFRP and mortar, the contribution of concrete pins that are mobilized in the connector openings and the contribution of the shape of the openings.

The manufacture and production of many samples used in the study is performed previously to the execution of experimental tests. Mechanical characterization tests of ultra high ductility

mortar (*DHCC - Deflection Hardening Cement Composites*) and characterization of GFRP solutions defined for the lower layer and the ribs tests, are also performed.

Keywords: Sandwich panels, GFRP connector, pull-out tests, ultra high ductility mortar (DHCC).

Índice Geral

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii

CAPÍTULO 1

Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos da dissertação	3
1.3 Organização da dissertação.....	3

CAPÍTULO 2

Estado do Conhecimento	5
2.1 Sistemas estruturais mistos GFRP-betão	5
2.1.1 Painéis sandwich desenvolvidos	11
2.2 Avaliação das propriedades dos materiais para o ensaio experimental	18
2.2.1 Propriedades da argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC)	18
2.2.2 Material Polimérico Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP)	20

CAPÍTULO 3

Produção dos provetes e conectores de GFRP	31
3.1 Introdução.....	31
3.2 Produção de argamassa	31
3.2.1 Conceção dos moldes e preparação da betonagem.....	32
3.2.2 Produção e betonagem de provetes de tipo pull-out	36
3.2.3 Argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC)	40
3.3 Laminados de GFRP	44
3.4 Caracterização mecânica da argamassa	52
3.4.1 Módulo de Elasticidade	54
3.4.2 Resistência à compressão	56
3.4.3 Ensaio de tração	59
3.4.4 Ensaaios de flexão	62

CAPÍTULO 4

Ensaaios Experimentais de tipo pull-out	77
4.1 Introdução.....	77
4.2 Configuração de ensaio pull-out	78
4.2.1 Equipamento utilizado.....	78
4.2.2 Geometria dos provetes tipo pull-out	79
4.2.3 Preparação do ensaio	83
4.3 Instrumentação	84
4.3.1 Configuração inicial	84
4.3.2 Configuração do Provede I-E4-2.....	88
4.3.3 Configuração do Provede P-E4-4.....	88
4.3.4 Configuração do Provede W-E6-4	89

4.3.5	Configuração do Provete P-E4-1	90
4.3.6	Configuração do Provete I-E4-1	91
4.4	Modos de rotura	91
4.5	Resultados Obtidos	105
4.5.1	Avaliação da capacidade de carga	105
4.5.2	Escorregamento associado à obtenção da carga máxima	114
4.5.3	Ductilidade dos provetes testados	116
4.5.4	Avaliação das extensões no GFRP	124
4.5.5	Avaliação da relação entre força e escorregamento	126

CAPÍTULO 5

Conclusões	141
5.1 Conclusões gerais	141
5.2 Desenvolvimentos futuros	142
Bibliografia.....	145

Índice de Figuras

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Esquema estrutural do painel híbrido proposto por (Mastali, 2013) e (Mastali, 2015).....	2
Figura 1.2 Representação do conector GFRP no sistema híbrido proposto por (Mastali, 2013) e (Mastali, 2015).....	2

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Sistema estrutural adaptado de (Fam e Rizkalla, 2003).....	6
Figura 2.2 Viga desenvolvida por (Deskovic et al,1995).....	7
Figura 2.3 Vigas desenvolvidas por (Canning et al.,1999) e (Hullat et al.,2000)	7
Figura 2.4 Seções das vigas estudadas adaptado de (Nordin e Tajsten,2004)	8
Figura 2.5 Aplicação de perfis tubulares de FRP adaptação de (Karbhari et al, 2000).....	9
Figura 2.6 Carbon Shell System, (Seible et al, 2004).....	10
Figura 2.7 Hybrid Tube System, (Seible et al, 2004).....	10
Figura 2.8 Solução proposta betão leve e GFRP adaptado de (Keller et al, 2007)	11
Figura 2.9 Configuração estrutural do painel sandwich GFFW, (Wang Lu, 2014)	14
Figura 2.10 Aplicação do painel sandwich GFFW adotado de (Wang Lu, 2015)	14
Figura 2.11 Painel sandwich desenvolvido por (Reis e Rizkalla, 2008).....	15
Figura 2.12 Painel sandwich desenvolvido por (Fam and Sharaf, 2010).....	16
Figura 2.13 Pormenor das nervuras de ligação dos painéis por (Fam and Sharaf, 2010)	16
Figura 2.14 Pormenor da ligação entre camada do painel sandwich desenvolvido por (Sopa et al.,2012)	17
Figura 2.15 Conectores dos painéis sandwich desenvolvidos por (Norton, 2004).....	17
Figura 2.16 Painel Sandwich desenvolvido por (Norton, 2004)	18
Figura 2.17 Configuração das mechas de filamentos	22
Figura 2.18 Configuração das mantas	22
Figura 2.19 Arranjo por partículas (Jones, 1999).....	24
Figura 2.20 Arranjo com fibras curtas (Jones, 1999)	24
Figura 2.21 Arranjo com fibras longas (Jones, 1999)	24

Figura 2.22 Rovings.....	25
Figura 2.23 Ponte de Lérida (Sobrinho e Pulido, 2002)	27
Figura 2.24 Esquema de funcionamento de dois processos de produção de compósitos (Song, 2003)	29

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Desenhos preparados para execução das cofragens	34
Figura 3.2 Colocação de cunhas metálicas	35
Figura 3.3 Aplicação do verniz tapa poros	35
Figura 3.4 Fixação das tábuas divisórias móveis à placa de madeira	36
Figura 3.5 Aplicação de óleo descofrante	36
Figura 3.6 Colocação de argamassa em cada compartimento do molde de tipo <i>pull-out</i>	39
Figura 3.7 Regularização da superfície superior do molde <i>pull-out</i>	39
Figura 3.8 Aspeto dos provetes após desmoldagem	40
Figura 3.9 Materiais nos recipientes utilizados para produção da argamassa DHCC	42
Figura 3.10 Mistura dos materiais pesados (areia,cimento, cinzas volantes e fíler de cálcario)	43
Figura 3.11 Adição de água e superplastificante	43
Figura 3.12 Fibras utilizadas nas amassaduras	44
Figura 3.13 Homogeneização da mistura para obtenção da argamassa DHCC	44
Figura 3.14 Disposição e quantificação das camadas do laminado de GFRP designado de Rib 1	45
Figura 3.15 Disposição e quantificação das camadas do laminado de GFRP designado de Rib 2.....	45
Figura 3.16 Fabricação dos conectores de GFRP pelo processo VARTM	46
Figura 3.17 Geometria das amostras GFRP e dos <i>tabs</i>	48
Figura 3.18 Configuração do Ensaio de tração direta	49

Figura 3.19 Falhas ocorridas nas amostras dos laminados de GFRP com espessura de 6 mm (rib1).....	50
Figura 3.20 Falhas ocorridas nas amostras dos laminados de GFRP com espessura de 4 mm (rib2).....	50
Figura 3.21 Resultados de tensão e extensão obtidos nas amostras de GFRP com espessura de 6 mm (Rib1)	51
Figura 3.22 Resultados de tensão e extensão obtidos nas amostras de GFRP com espessura de 4 mm (Rib2)	51
Figura 3.23 Regularização dos provetes utilizados na caracterização mecânica	53
Figura 3.24 Esquema representativo dos ciclos de carga-descarga	55
Figura 3.25.Montagem do ensaio para determinação do módulo de elasticidade	56
Figura 3.26 Montagem do ensaio de compressão	57
Figura 3.27 Curvas Tensão versus deslocamento dos ensaios de compressão	58
Figura 3.28.Modo de rotura à compressão do Cilindro 1 e do Cilindro 2.....	59
Figura 3.29 Geometria e forma dos provetes de tipo <i>dogbone</i> e <i>tabs</i> utilizados	61
Figura 3.30 Curva Tensão-Deslocamento associado ao ensaio de tração efetuados em provetes de tipo <i>dogbone</i>	61
Figura 3.31 Modos de rotura obtidos nos provetes de tipo <i>dogbone</i>	62
Figura 3.32 Configuração do ensaio TPB	64
Figura 3.33 Ensaio de flexão em 3 pontos	65
Figura 3.34 Curva Tensão-Deslocamento medido a meio do provete prismático pelo transdutor LVDT125468	66
Figura 3.35 Alguns exemplos do modo de rotura nos prismas ensaiados à flexão em 3 pontos	66
Figura 3.36 Configuração do ensaio NTPB	68
Figura 3.37 Ensaio de flexão em 3 pontos com entalhe	69
Figura 3.38 Curva Tensão-Deslocamento medido à boca de entalhe no transdutor LVDT164441	70

Figura 3.39 Exemplos do modo de rotura apresentado pelos prismas sujeitos à flexão em 3 pontos com entalhe	70
Figura 3.40 Configuração do ensaio FPB	72
Figura 3.41 Ensaio de flexão em 4 pontos	73
Figura 3.42 Curva Tensão-Deslocamento obtido no transdutor 125468 colocado a meio do provete prismático	74
Figura 3.43 Exemplos de alguns dos modos de rotura dos provetes prismáticos sujeito à flexão em 4 pontos	75
Figura 3.44 Esquema de identificação do ensaio e correspondente amassadura	75

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Configuração do ensaio do tipo <i>pull-out</i>	79
Figura 4.2 Esquema dos provetes de tipo <i>pull-out</i>	81
Figura 4.3 Quantidades e designações dos provetes de tipo <i>pull-out</i>	82
Figura 4.4 Preparação dos provetes	83
Figura 4.5 Regularização da superfície que servirá de apoio à fixação das barras de aço	84
Figura 4.6 Vista Frontal da Montagem do ensaio <i>Pull-out</i>	85
Figura 4.7 Posicionamento da instrumentação e elementos de monitorização do ensaio <i>Pull-out</i>	87
Figura 4.8 Configuração do esquema de montagem do provete I-E4-2	88
Figura 4.9 Configuração do esquema de montagem do provete P-E4-4	89
Figura 4.10 Vista em planta do provete W-E6-4	89
Figura 4.11 Esquema da instrumentação do provete P-E4-1	90
Figura 4.12 vista em planta da instrumentação do provete I-E4-4	91
Figura 4.13 Provetes de DHCC com Conectores Indentados com espessura de 4 mm	93
Figura 4.14 Provetes de DHCC com Conectores Indentados com espessura de 6 mm	94
Figura 4.15 Provetes de DHCC com Conectores Perfurados com espessura de 4 mm	95

Figura 4.16 Provetes de DHCC com Conectores Perfurados com espessura de 6 mm.....	96
Figura 4.17 Provetes de DHCC com Conectores Lisos de espessura de 4 mm	97
Figura 4.18 Provetes de DHCC com Conectores Lisos com espessura de 6 mm	98
Figura 4.19 Conectores GFRP Indentados com espessura de 4 mm	99
Figura 4.20 Conectores GFRP Indentados com espessura de 6 mm	100
Figura 4.21 Conectores GFRP Perfurados com espessura de 4 mm	101
Figura 4.22 Conectores GFRP Perfurados com espessura de 6 mm	102
Figura 4.23 Conectores GFRP Lisos com espessura de 4 mm.....	103
Figura 4.24 Conectores GFRP Lisos com espessura de 6 mm.....	104
Figura 4.25 Cargas máximas atingidas nos provetes testados, organizadas por ordem crescente	110
Figura 4.26 Cargas máximas atingidas pelos conectores lisos - valores em ordem crescente	111
Figura 4.27 Resultados das cargas máximas atingidas em conectores perfurados - valores em ordem crescente	112
Figura 4.28 Resultados das cargas máximas atingidas pelos conectores indentados - valores em ordem crescente	113
Figura 4.29 Parâmetros definidos para a ductilidade	116
Figura 4.30 Atrito e efeito de pino existente no provete P-E4-4.....	117
Figura 4.31 Parâmetros associados à rigidez elástica.....	121
Figura 4.32 Destacamento da camada de argamassa superior junto à ranhura do conector GFRP	127
Figura 4.33 Marcas derivadas do atrito existente entre conector GFRP e provete de argamassa I-E4-4.....	128
Figura 4.34 Curvas de Força-escorregamento obtidos para os conectores indentados 4 mm espessura.....	128
Figura 4.35 Danos ocorridos em alguns provetes com conectores indentados de espessura de 4 mm	130

Figura 4.36 Curvas de força-escorregamento obtidos para os conectores indentados 6 mm espessura	131
Figura 4.37 Fissura ocorrida no provete P-E4-3	133
Figura 4.38 Curvas de Força-escorregamento obtidos para os conectores perfurados 4 mm espessura	133
Figura 4.39 Danos provocados nos provetes com conectores perfurados de espessura de 6 mm	135
Figura 4.40 Curvas de Força - escorregamento obtidos para os conectores perfurados 6 mm espessura	135
Figura 4.41 Danos provocados nos provetes com conectores lisos de espessura de 4 mm	137
Figura 4.42 Curvas de Força-escorregamento obtidos para os conectores lisos de espessura de 4 mm	138
Figura 4.43 Curvas de Força-escorregamento obtidos para os conectores lisos de espessura de 6 mm	140

Índice de Tabelas

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 Características típicas das fibras de vidro tipo E mais comercializadas (Keller, 2003).....	21
Tabela 2.2 Processos de fabrico de compósitos (Kleinberg M.)	28

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 Lista de provetes e sua correspondência com as amassaduras realizadas	38
Tabela 3.2 Composição da argamassa DHCC para 1 m ³	41
Tabela 3.3 Proporções da mistura DHCC	41
Tabela 3.4 Propriedades das amostras de GFRP	48
Tabela 3.5 Tensão, módulo de elasticidade e extensão de rotura obtidos nos provetes de GFRP ensaiados.....	51
Tabela 3.6. Resultados dos Módulos de Elasticidade obtidos em cilindros	55
Tabela 3.7 Resultados das resistências à compressão dos cilindros.....	57
Tabela 3.8 - Resultados obtidos no ensaio de tração em provetes de tipo <i>dogbone</i>	60
Tabela 3.9 Resultados obtidos em ensaios de flexão em 3 pontos para a determinação da resistência à flexão.....	65
Tabela 3.10 Resultados obtidos para a resistência à flexão em ensaio de 3 pontos com entalhe	69
Tabela 3.11 Resultados de resistência à flexão obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos	73

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 Resultados das cargas máxima especificado as datas de betonagem, ensaio, dias de cura e amassadura dos provetes testados	107
Tabela 4.2 Resultados da carga máxima média, desvio-padrão, coeficiente de variação	109
Tabela 4.3 Escorregamento associado à obtenção da carga máxima médio, desvio-padrão e coeficiente de variação	115

Tabela 4.4 Índice de Ductilidade 1	119
Tabela 4.5 Rigidez elástica dos provetes testados	123
Tabela 4.6 Extensões obtidas no conector GFRP dos provetes testados	124

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O presente texto refere-se à Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, realizada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, subordinada ao tema “*Estudo da ligação entre componentes estruturais de GFRP (glass fiber reinforced polymer) e componentes estruturais em betão*”.

No âmbito do projeto RehabGFRP que decorre no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, está a ser desenvolvido um novo sistema estrutural em laje sandwich formada por camada inferior de tração e nervuras transversais em material polimérico reforçado com fibra de vidro (GFRP – *glass fiber reinforced polymer*), núcleo em material leve e com propriedades de isolamento térmico (espuma de poliuretano), e camada de compressão em argamassa.

O painel sandwich híbrido proposto é composto por uma camada inferior realizada em laminado reforçado com fibra de vidro (GFRP) e uma camada superior realizada com argamassa de ultra elevada ductilidade. Entre estas duas camadas, existem nervuras de GFRP uniformemente espaçadas que estabelecem a ligação entre a lâmina inferior de GFRP e a camada superior de argamassa e também espuma de poliuretano (PUR) que garante o espaçamento entre as camadas extremas, tal como se mostra na Figura 1.1 e na Figura 1.2. A camada superior de argamassa tem como finalidade aumentar a resistência e a ductilidade do painel e permitir uma aplicação fácil dos materiais de revestimento. A utilização de argamassa na camada superior de compressão irá também aumentar a rigidez à flexão, aumentar a resistência à encurvadura local das nervuras transversais de GFRP, contribuir para a resistência e ductilidade do comportamento estrutural da laje, melhorar o desempenho termo-acústico e a resistência ao impacto do painel, fornecer proteção extra contra incêndio ao respetivo núcleo e permitir a instalação na face superior da laje de elementos cerâmicos ou outros materiais convencionais de acabamento.

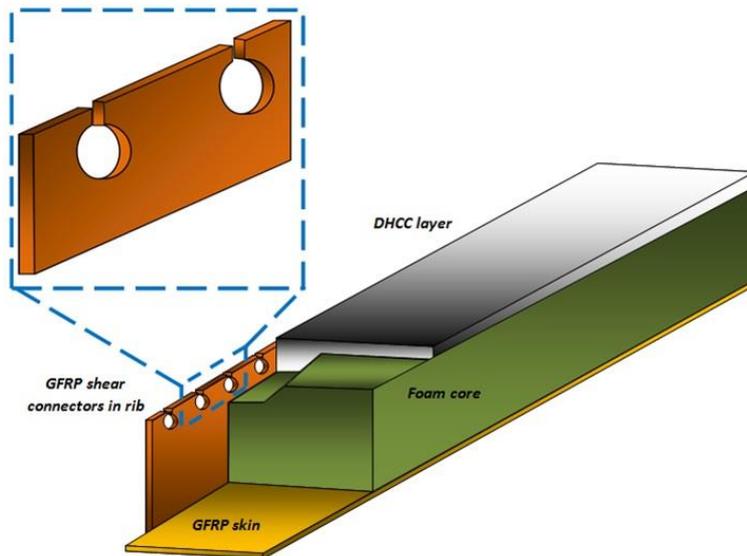


Figura 1.1 Esquema estrutural do painel híbrido proposto por (Mastali, 2013) e (Mastali, 2015)

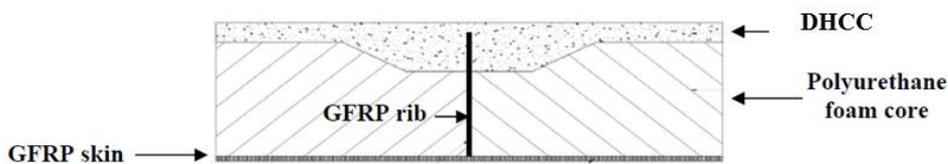


Figura 1.2 Representação do conector GFRP no sistema híbrido proposto por (Mastali, 2013) e (Mastali, 2015)

Dado tratar-se de um tipo de laje com peso próprio muito inferior a qualquer outra solução construtiva existente, a sua aplicação é especialmente vocacionada para a reabilitação estrutural de edifícios de alvenaria onde se preservam as paredes resistentes e se pretende remodelar os pavimentos. Tendo em conta a configuração da solução proposta e a necessidade de garantir o funcionamento conjunto dos vários materiais envolvidos, torna-se necessário desenvolver soluções para:

- garantir a ligação entre as nervuras de GFRP e a camada superior de argamassa, definindo a geometria dos elementos de conexão e avaliando variantes com interesse;
- garantir uma execução eficaz e económica dessa mesma ligação.

No seguimento de estudos preliminares já realizados, propõe-se que estas ligações possam adotar geometrias indentadas na extremidade superior das nervuras, ficando estas embebidas na camada de argamassa. Deste modo, a capacidade resistente da ligação resulta da aderência entre as superfícies de GFRP e de argamassa, do impedimento ao movimento que o argamassa o envolvente proporciona às zonas embebidas e dos pinos de argamassa que se foram através das aberturas efetuadas na zona embebida.

Para dar resposta às necessidades identificadas, foram realizados ensaios experimentais de tração e corte que permitiram avaliar o comportamento estrutural de diferentes tipologias para a ligação em estudo.

1.2 Objetivos da dissertação

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

- definir e caracterizar experimentalmente o comportamento à tração direta e ao corte de conectores em FRP realizados com geometrias indentadas e perfuradas, de modo a determinar a capacidade resistente, a deformabilidade e a sensibilidade a fenómenos de instabilidade;
- através da caracterização experimental referida, identificar e descrever os modos de rotura de conectores de FRP inseridos em lajes de argamassa e, mais precisamente, identificar a componente da ligação que origina o colapso (escorregamento do perfil face à laje de argamassa, rotura na laje de argamassa ou rotura no conector de FRP);

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, de forma enquadrar os diferentes assuntos abordados nas várias fases em que se dividiu o trabalho.

O **Capítulo 1 - Introdução** apresenta o tema a ser desenvolvido, onde se dá ênfase ao enquadramento e pertinência do estudo de painéis *sandwich* híbridos e sistemas mistos GFRP-betão. Os objetivos a concretizar com a realização deste trabalho são igualmente abordados.

No **Capítulo 2 - Estado do Conhecimento** é apresentada informação relevante, recolhida de trabalhos publicados por vários autores no âmbito do tema e tarefas desenvolvidas nesta dissertação. Este capítulo aborda e discute os principais conceitos inerentes aos painéis *sandwich*, bem como sistemas estruturas mistos GFRP-betão. Também é efetuada uma avaliação dos materiais a utilizar no âmbito deste estudo, nomeadamente, do material polimérico reforçado com fibras de vidro (GFRP) e da argamassa de ultra elevada ductilidade DHCC. A recolha de informação documentada permite justificar a atualidade e a pertinência da abordagem deste tema.

O **Capítulo 3 - Produção dos provetes e conectores GFRP** apresenta o procedimento de produção e execução dos provetes de argamassa com conectores em GFRP realizados com geometria lisa, geometria indentada e geometria perfurada destinados à realização de ensaios

experimentais. É apresentado o modo de produção das placas de GFRP e procede-se à caracterização experimental das amostras de GFRP testadas. Do mesmo modo, apresentam-se os procedimentos necessários à produção de argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC) e relatam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização experimental deste material.

O **Capítulo 4 - Análise experimental – Ensaios de tipo *pull-out*** apresenta os resultados obtidos na realização de ensaios de tipo *pull-out*, tendo em conta as diferentes tipologias de conectores adotadas. Faz-se a descrição de todos os ensaios efetuados, discutem-se os aspetos mais relevantes e avaliam-se de forma crítica os resultados obtidos.

Finalmente, no **Capítulo 5 - Conclusões** é apresentada uma síntese do trabalho realizado, realçando as conclusões mais importantes. Neste ponto final são também sugeridos desenvolvimentos futuros que possam dar continuidade ao trabalho iniciado na presente dissertação.

CAPÍTULO 2

Estado do Conhecimento

2.1 Sistemas estruturais mistos GFRP-betão

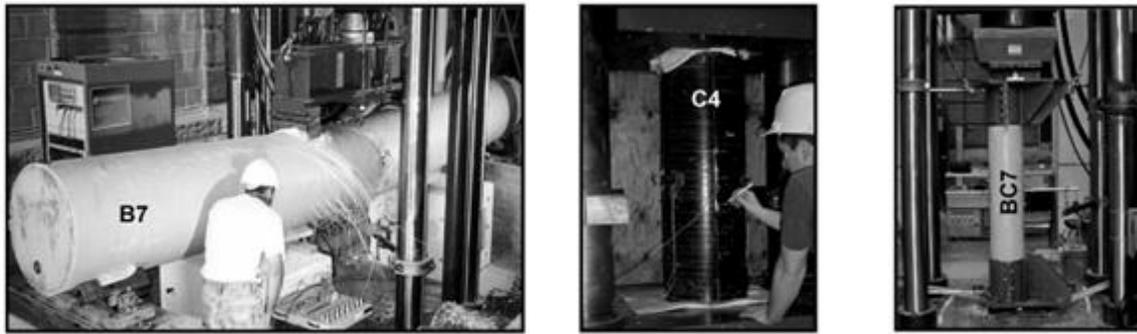
Os sistemas mistos GFRP-betão apresentam cada vez mais uma grande diversificação e aplicação na construção civil, quer na reabilitação de construções, nomeadamente na reparação e no reforço de estruturas, quer mesmo em construções novas. Os materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP) apresentam elevada resistência, leveza e durabilidade.

A colagem de laminados de GFRP constitui um método eficiente para o reforço de elementos estruturais de betão. Relativamente ao reforço com chapas de aço esta solução apresenta como vantagens:

- a maior facilidade de aplicação,
- o menor peso próprio e a resistência a ambientes corrosivos.

Os sistemas de reforço CFRP apresentam uma solução mais rígida mas com elevado custo face aos sistemas de reforço com GFRP. Sendo que os sistemas de reforço GFRP apresentam uma melhor relação benefício-custo.

A utilização de tubos circulares de GFRP preenchidos com betão constitui uma solução que permite tirar partido das melhores propriedades de cada um dos seus elementos constituintes. O betão é um material que resiste muito bem a esforços de compressão permitindo evita a rotura do tubo devido a fenómenos de encurvadura. O tubo tem como principal função o confinamento do betão, o que permite aumentar a resistência e a ductilidade do sistema. Sendo que o tubo para além de confinar o betão funciona simultaneamente como cofragem, permitindo rentabilizar o tempo de construção. Esta solução tem sido utilizada em pilares de estruturas marítimas, constituindo uma boa alternativa neste campo de aplicação com exigências particulares em termos de agressividade ambiental. (Fam e Rizkalla, 2003) e (Fam et al, 2007) testaram a utilização desta solução em elementos estruturais a funcionar como vigas e pilares.



a) Viga

b) Pilar

c) Viga-Pilar

Figura 2.1 Sistema estrutural adaptado de (Fam e Rizkalla, 2003)

Deskovic et al estudaram vigas híbridas constituídas por perfis de GFRP ligados a banzos comprimidos de betão e de betão reforçado com fibras, respetivamente. Nenhuma destas soluções utilizaram mecanismos de conexão de corte. Desenvolveram uma viga que combinava simplesmente de betão, GFRP e CFRP (Deskovic et al, 1995). A solução desenvolvida era constituída por numa camada superior de betão, lateralmente confinada por GFRP. A espessura deste confinamento foi dimensionada de modo a resistir à betonagem e, mais tarde, para resistir às tensões de corte geradas na interface betão-GFRP. A forma tubular do perfil GFRP permite um bom comportamento à instabilidade. A face inferior da viga foi reforçada com um laminado de CFRP garantindo maior rigidez de flexão e maior resistência. A ligação entre os diferentes materiais é feita através da resina epóxi. Nestes estudos verificou que a rotura ocorria devido a separação prematura do betão, na interface betão-epóxi.

No decorrer das investigações e com o objetivo de melhorar as ligações da interface betão-GFRP percebeu-se que reforçando a viga com conectores de esforço transverso na interface GFRP-betão o mecanismo de rotura das vigas sujeita à flexão se iniciava com a rotura do CFRP.

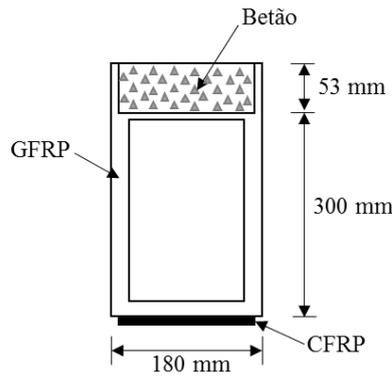


Figura 2.2 Viga desenvolvida por (Deskovic et al, 1995)

Foram desenvolvidos estudos em vigas no sentido de investigar estruturas mistas FRP - betão (Canning et al, 1999) e (Hullat et al., 2000). Para tal foram desenvolvidas duas secções, uma retangular e outra em T. Ver Figura 2.3.

A primeira era composta por um perfil retangular de GFRP, cujas paredes eram constituídas por painéis sandwich preenchidos com espuma. A lâmina de betão encontrava-se rodeado por GFRP. O banzo inferior da viga estava reforçado com um compósito unidirecional de CFRP combinado com um compósito de GFRP.

Na viga em T, à semelhança da viga retangular, o perfil usado era de GFRP, embora as paredes deste não fossem sandwich, mas simplesmente de GFRP com reforços transversais. A lâmina de betão era mais larga que o perfil e estava rodeada por GFRP tal como na secção retangular. A face inferior da viga encontrava-se reforçada da mesma forma que na viga retangular

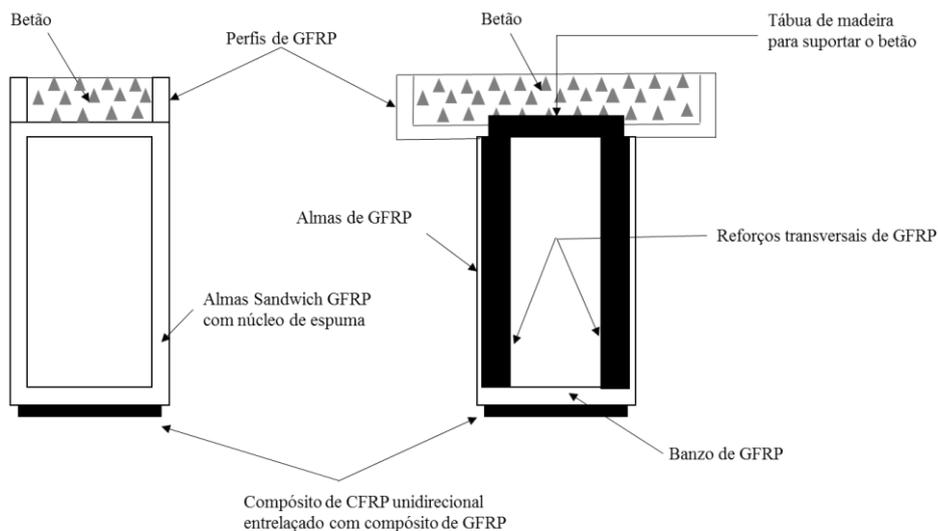


Figura 2.3 Vigas desenvolvidas por (Canning et al., 1999) e (Hullat et al., 2000)

Uma solução muito semelhante às descritas anteriormente, com a diferença de terem utilizado um perfil I de GFRP desenvolvido por (Nordin H. e Tajsten B., 2004). Neste estudo, foram testadas três vigas a flexão em 4 pontos:

- uma viga constituída apenas pelo perfil de FRP, Viga A da Figura 2.4;
- uma viga mista com o betão ligado ao perfil através de parafusos, Viga B da Figura 2.4;
- uma viga mista com a ligação feita com resina epóxi, Viga C da Figura 2.4.

Os modos de colapso foram diferentes nas três vigas.

Neste estudo concluiu-se que as vigas reforçadas com betão para além de apresentarem uma força de rotura superior, também apresentavam uma elevada rigidez.

Os sistemas de ligação em estudados eram eficientes, sendo que a ligação feita com a resina epóxi conferia à estrutura maior rigidez e um aumento ligeiro da resistência comparativamente com as restantes ligações.

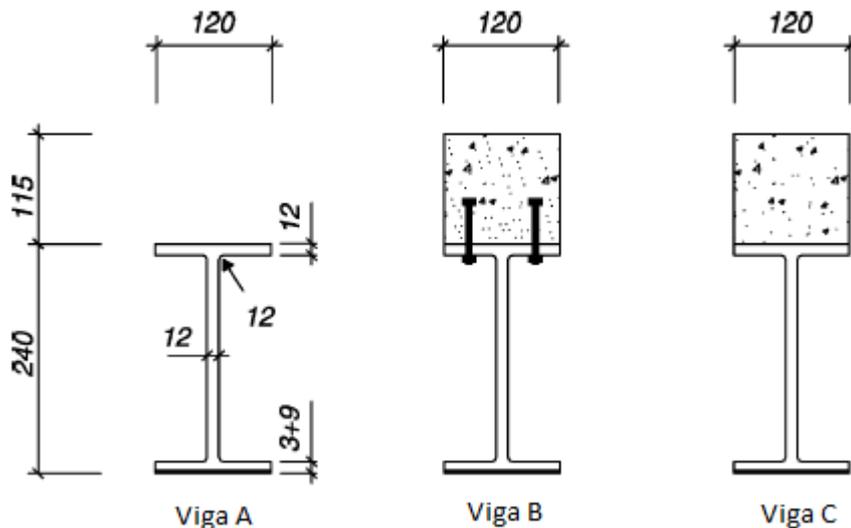
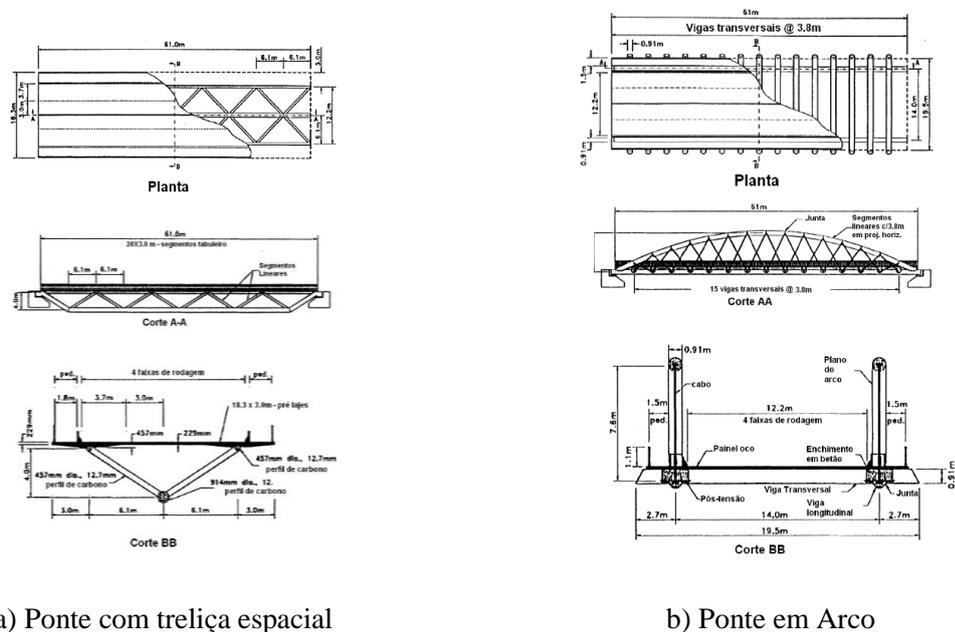


Figura 2.4 Seções das vigas estudadas adaptado de (Nordin e Tajsten, 2004)

Estruturas mistas em casca para coluna. Estruturas baseadas em perfis tubulares de FRP servem tanto como cofragem como de reforço, servem de substituto à utilização do aço, conseguido assim uma solução construtiva mais rápida. O método construtivo é bastante simples, consistindo apenas em colocar o perfil no local desejado e preenchê-lo com betão.

Estes elementos podem ser aplicados como pilares e vigas e apresentam um comportamento praticamente linear, sendo que a fendilhação ocorre muito antes de atingir a carga última. No decorrer dos testes realizados verificou-se ainda que ocorria um deslizamento entre o betão e o FRP levando a diminuição de rigidez da estrutura. Este aspeto aponta para a necessidade de incluir conectores para transmissão de esforço transversal, especialmente em elementos que se encontrem a flexão. (Karbhari et al, 2000)

As boas perspetivas que este método conduziram à elaboração de sistemas estruturais para pontes, nos quais as vigas e os pilares podem ser fabricados a partir de perfis tubulares de FRP. Dois exemplos destes sistemas são representados de seguida, um é constituído por treliça espacial e o outro corresponde a uma solução em arco.



a) Ponte com treliça espacial

b) Ponte em Arco

Figura 2.5 Aplicação de perfis tubulares de FRP adaptação de (Karbhari et al, 2000)

Foram desenvolvidos e estudados dois sistemas híbridos para a aplicação em elementos estruturais de tabuleiros de pontes, tendo desenvolvido diferentes tipos de conexão de corte por (Seible et al, 2004).

- O *Carbon Shell System* é composto por tubos em CFRP com nervuras interiores de modo a melhorar a aderência ao betão leve, com o qual são preenchidos. Este sistema foi aplicado nos pilares e na superestrutura dos Kings Stormwater Channel Bridge. O tabuleiro desta ponte constituído por painéis pré-fabricados de FRP, que foram ligados as vigas encaixando-os aos

conectores no sistema em casca e depois procede-se ao preenchimento do sistema com o betão leve. Formando assim a estrutura representa na Figura 2.6 retirada (Seible et al, 2004).

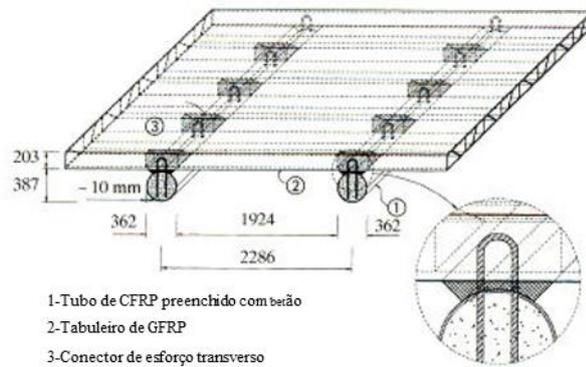


Figura 2.6 Carbon Shell System, (Seible et al, 2004)

-Já o *Hybrid Tube System* consiste num tabuleiro constituído por GFRP que é encaixado no banzo superior de vigas ocas de FRP permitindo a transferência de tensões entre as vigas e o tabuleiro. Os conectores deste sistema são em CFRP e são encaixados no banzo superior das vigas permitindo fazer a ligação entre a viga e o tabuleiro. Ver Figura 2.7 retirado de (Seible et al, 2004).

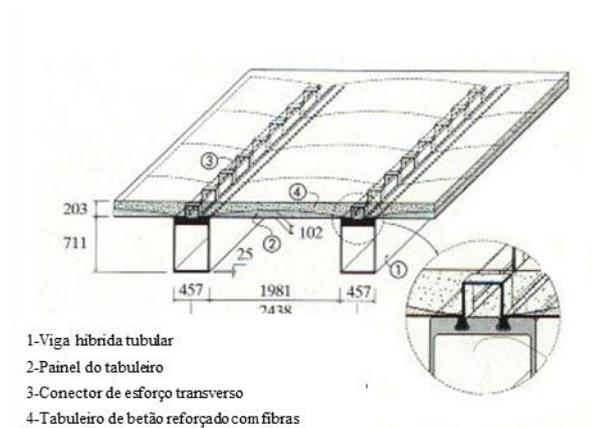


Figura 2.7 Hybrid Tube System, (Seible et al, 2004)

Nestes sistemas estruturais híbridos, as vantagens potenciais da ligação de elementos de GFRP a lajes/ viga comprimidas de betão advém do aumento da rigidez de flexão com a correspondente diminuição da deformabilidade e do aumento da capacidade resistente, garantindo em simultâneo um bom aproveitamento das propriedades dos elementos de GFRP, pelo travamento que o betão lhes confere.

Em 2007, Keller et al. apresentou outra solução que consiste num painel com nervuras em T sobre o qual é aplicada uma camada de betão leve e outra camada mais fina, de um betão que apresenta elevada resistência. Os perfis de GFRP funcionam como elemento resistente a tração enquanto a camada mais fina de betão de elevada resistência resiste aos esforços de compressão (Figura 2.8). Foram testadas a flexão oito vigas. Em metade delas o esforço de corte era transmitido apenas pela alma e banzo superior das nervuras do painel de GFRP, enquanto, na outra metade dos perfis foi aplicada uma camada de resina epóxi, de forma a melhorar a conexão entre o betão leve e o GFRP. A segunda revelou-se como sendo a mais resistente. Em ambos os casos apresentavam rotura por esforço transversal no núcleo que era constituído por betão leve. Nas vigas onde não foi aplicada resina epóxi verificou-se ainda um descolamento prematuro na zona de interface com o GFRP está apresentava uma rotura dúctil, ao contrário das vigas coladas, que exibiram uma rotura frágil. (Keller et al, 2007)

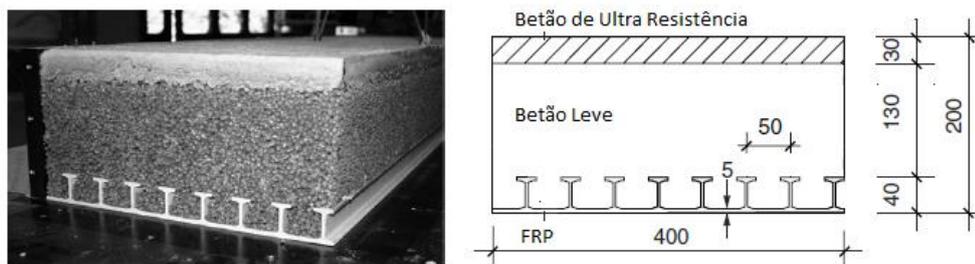


Figura 2.8 Solução proposta betão leve e GFRP adaptado de (Keller et al, 2007)

2.1.1 Painéis sandwich desenvolvidos

Nos últimos 20 anos foram desenvolvidos um grande número de investigações experimentais e analíticas no âmbito do estudo à flexão de painéis sandwich em pontes em que são composto por camadas contendo material compósito e o núcleo com espuma.

Sharaf et al. efetuou testes de flexão em quatro pontos em painéis sandwich de parede constituído por lâminas em GFRP e o núcleo de espuma. Os resultados dos testes indicam que uma maior densidade do núcleo de espuma gera um aumento da resistência à flexão última e um aumento da rigidez estrutural. O escorregamento horizontal entre a lâmina de GFRP e o núcleo de espuma podem acelerar a ocorrência de delaminação interfacial do painel desenvolvido por (Sharaf et al, 2010).

Russo e Zuccarello realizaram ensaios de flexão a três pontos, flexão a quatro pontos, ensaios de corte, ensaios de compressão e tração em tabuleiro em sandwich com espuma PVC e uma camada de poliéster no núcleo. Os resultados do teste mostraram que a resistência à flexão última do tabuleiro depende do modo de rotura. Um modelo numérico também foi criado para estudar a influência do esforço transversal no modo de rotura. Em suma, devido a rotura por instabilidade local e a rotura ocorrida pela delaminação restringem a aplicação na prática dos tabuleiros sandwich propostos. (Russo e Zuccarello, 2007)

Steeves e Fleck conduziram a investigações experimentais e analíticas sobre mecanismos de colapso de vigas em sandwich simplesmente apoiadas constituídas por lâminas em GFRP e o núcleo constituído por espuma em PVC carregado em 3 pontos à flexão. Os resultados dos testes demonstraram que o modo de rotura é influenciado pela geometria da viga e pela densidade do núcleo de espuma. Mas a resistência à flexão última máxima e a rigidez inicial dos painéis sandwich são pequenos porque não existem treliças ou fibras inseridas que permitam melhorar a rigidez do núcleo. (Steeves e Fleck, 2004)

Reis e Reis e Rizkalla desenvolveram um novo tipo de painéis que continham laminados de GFRP na face superior e inferior do painel, o núcleo de espuma e a ligação entre as camadas era realizada com recurso a utilização de fibras de GFRP. A delaminação ocorreu entre os laminados de GFRP e o núcleo, não ocorre devido a utilização da inserção de fibras entre as camadas. A força atingida pelo painel foi afetada principalmente pela densidade das fibras GFRP, pela espessura dos laminados de GFRP e pela altura do painel. Este tipo painéis sandwich são usados para tabuleiros de pontes pedonais, pois apresentam resistência à flexão última e a rigidez relativamente baixas, não preenchendo os requisitos para utilizar em projetos de pontes de estrada. (Reis, 2005) e (Reis e Rizkalla, 2008)

Realizaram-se teste de flexão para estudar o desempenho do núcleo constituído por espuma de poliuretano, para produção de um tabuleiro de ponte constituído por GFRP. Estes tabuleiros continham furos retangulares, sendo que o processo adotado para o fabrico do tabuleiro de GFRP foi a pultrusão (Zi et al, 2008). Os resultados mostram que a resistência à flexão e a rigidez foram significativamente melhorados em comparação com os tabuleiros de controlo, não foram preenchidos os furos com a espuma de poliuretano. De modo a evitar a rotura entre

a malha de GFRP-banzo foram desenvolvidas ligações entre a malha de GFRP do tabuleiro e o banzo durante o processo de pultrusão, as fibras das treliças da estrutura foram alargadas para metade da largura dos banzos. Assim, o modo de rotura ocorre devido à força adesiva da interface. No entanto, o tamanho deste tipo de tabuleiro de ponte é restringido devido à utilização do processo de pultrusão, este processo de fabrico não permite produzir malhas de GFRP em duas direções. (Zi et al, 2008)

Os estudos anteriormente mencionados avaliaram o comportamento de painéis sandwich carregados à flexão unidirecional não tendo em consideração a flexão bidirecionais, portanto, os efeitos da carga concentrada no desempenho mecânico do painel sandwich desenvolvidos foram ignorados.

Dawood et al. realizou ensaios de flexão bidirecionais para estudar o desempenho 3D de tabuleiros sandwich em GFRP com inserção de fibras. Os resultados demonstraram que o desempenho dos tabuleiros foram controlados em função da altura do tabuleiro e a rigidez do núcleo ao corte. O principal modo de rotura do tabuleiro ocorreu devido à instabilidade local do tabuleiro. As influências da espessura da lâmina da face, densidade e volume das fibras de inserção, altura do tabuleiro, e aspetos relacionados com o desempenho à flexão do tabuleiro também foram investigados. No entanto, a lâmina da face inferior do tabuleiro não pode por em causa a resistência à tração quando sujeitas a cargas aplicadas devido à presença de efeitos de encurvadura locais. (Dawood et al, 2010)

Em 2014, Wang Lu et al. investigou um painel sandwich inovador constituído com lâminas de GFRP nas faces do painel e o núcleo de espuma- rede GFRP, sistema designado de painel GFFW, fabricado através do processo de moldagem por transferência de resina por vácuo, designado de VARTM-Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding. O painel sandwich desenvolvido encontra-se representado na Figura 2.9. (Wang Lu, 2014)

Estes autores desenvolveram e testaram um tipo de treliça que faz a ligação do núcleo de espuma. Apresenta uma configuração em rede constituída por GFRP.

Um programa experimental foi realizado para validar a eficácia deste tipo de painéis em termos de capacidade à flexão. Os resultados experimentais indicam que em comparação com os painéis sandwich tradicional, a presença da rede no painel GFFW forneceu um aumento máximo de cerca de 410 % em termos de capacidade de flexão última.

Malhas de GFRP mais espessas e maiores aumentam significativamente a capacidade de flexão última e a rigidez inicial de flexão do painel GFFW.

O tabuleiro em GFFW foi aplicado na ponte de treliças em Xangai Figura 2.10a; e a Figura 2.10b mostra os tabuleiros de pontes em GFFW que serviram para pavimentar uma estrada pantanosa funcionando como placa de suporte.

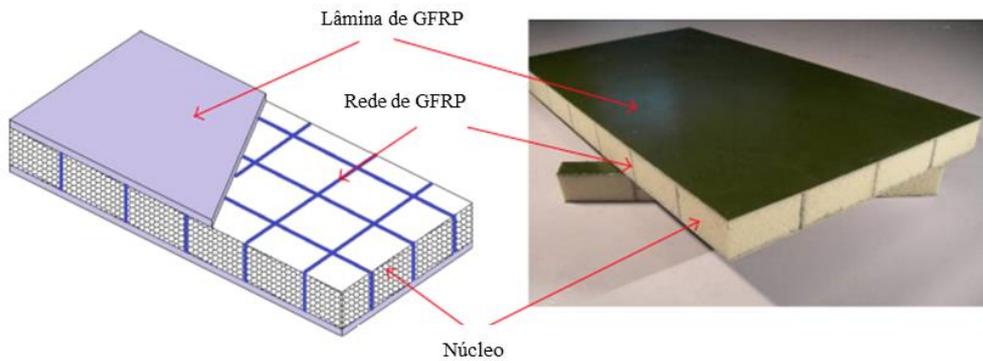


Figura 2.9 Configuração estrutural do painel sandwich GFFW, (Wang Lu, 2014)



a) Ponte de treliças com tabuleiros GFFW



b) Estrada pantanosa pavimentada com GFFW

Figura 2.10 Aplicação do painel sandwich GFFW adotado de (Wang Lu, 2015)

A delaminação entre as lâminas de GFRP e o núcleo de espuma ocorre frequentemente em painéis sandwich tradicionais, o que conduz a uma perda significativa da capacidade de carga e desempenho à flexão destes painéis.

Em 2008, Reis and Rizkalla propôs um novo tipo de painel de sandwich constituído por camadas superior e inferior em laminados de GFRP ligados entre si através de fibras de vidro de espessura unidirecional para evitar a delaminação entre os laminados de GFRP e o núcleo de espuma (Figura 2.11). O aumento da capacidade de carga e da capacidade de flexão foi

causada devido ao melhoramento da ação do compósito entre laminado GFRP e do núcleo através da colocação de fibras de vidro com espessura unidirecionais.

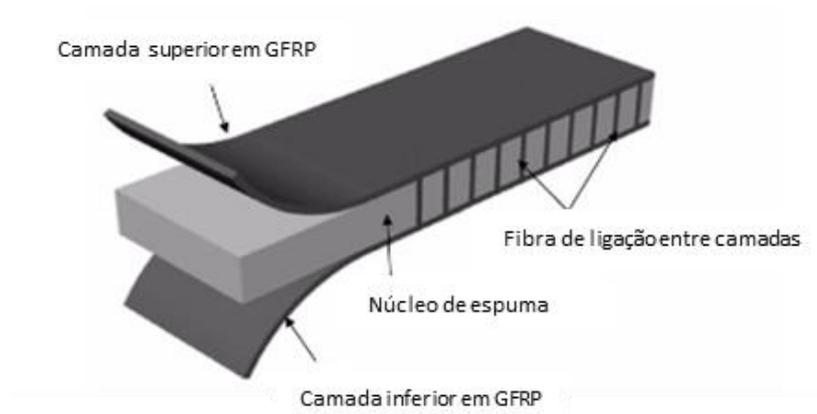


Figura 2.11 Painel sandwich desenvolvido por (Reis e Rizkalla, 2008)

Estudo de um painéis sandwich sujeito à flexão constituídos por núcleo em poliuretano, camada superior e inferior de GFRP e nervuras de várias configurações para ligar a camada superior e inferior de GFRP (Figura 2.13). Para assim, tornar possível o aumento da rigidez à flexão e ao corte do painel sandwich. Os estudos mostraram que usando as nervuras, a resistência e a rigidez dos painéis aumenta em comparação com os painéis sandwich sem os reforços internos. Este nível de aumento era dependente da configuração das nervuras Figura 2.12.

No painel sem nervuras, a deformação ao corte do núcleo contribuiu para a deformação à flexão a meio vão em mais de 50%. Ao utilizar as nervuras, a deformação ao corte dos painéis foi limitada entre 15-20% da deformação por flexão total.(Fam e Sharaf, 2010)

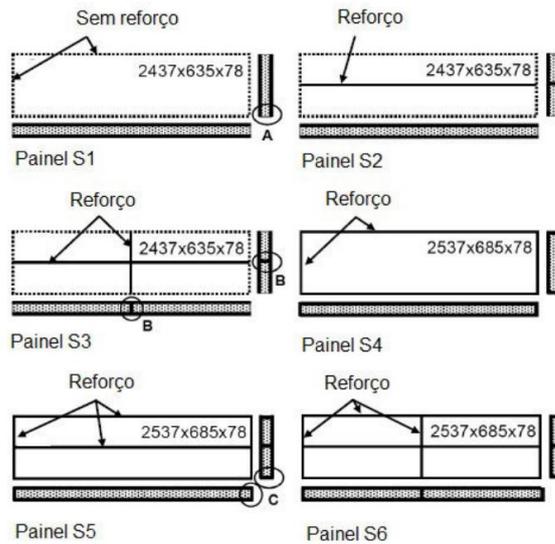


Figura 2.12 Painel sandwich desenvolvido por (Fam and Sharaf, 2010)

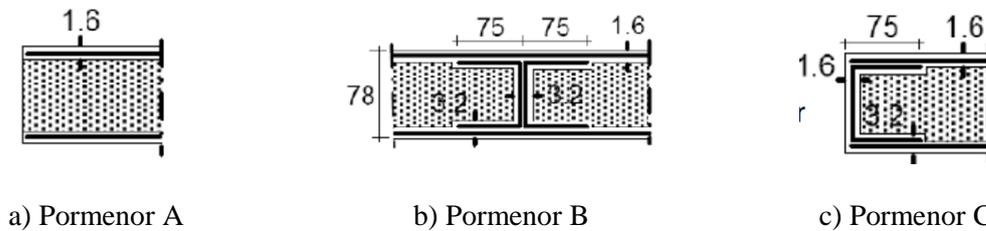


Figura 2.13 Pormenor das nervuras de ligação dos painéis por (Fam and Sharaf, 2010)

Em 2012, Sopal et al. foi desenvolvido um painel sandwich GFRP constituído por lâminas onduladas de GFRP, no núcleo de espuma são adicionadas fibras GFRP que tem como função melhorar as características estruturais do painel.

O reforço com fibras no núcleo de espuma impedir a delaminação entre camadas de GFRP e a o núcleo de espuma, enquanto as lâminas onduladas de GFRP servem para aumenta a resistência ao corte e a rigidez à flexão do painel sandwich GFRP proposto. Ver Figura 2.14.

Os resultados experimentais mostraram que adição da lâmina ondulada de GFRP influência significativamente a resistência ao corte e a rigidez à flexão. Existe um bom comportamento a resistência à fadiga, pois o aparecimento de fendas no núcleo ocorro lentamente.



Figura 2.14 Pormenor da ligação entre camadas do painel sandwich desenvolvido por (Sopa et al., 2012)

Norton propôs um painel composto por duas lâminas constituídas por tecidos em fibra de vidro do tipo E (E-glass) e treliças em malha de GFRP que atuam como membros de suporte à flexão nas vigas. Cada camada de fibra de vidro é constituída por dois tecidos ortogonais que foram ligados por fibras na direção perpendicular formando um material GFRP 3D.

O núcleo é constituído por Balsa e foi inserido entre as treliças de malha em GFRP. As treliças de GFRP foram fabricadas através do processo de moldagem por transferência de resina por vácuo, designado de VARTM-Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding, em que se utilizou uma resina epóxi para fazer a impregnação das fibras de vidro. Optou-se por colocar uma camada de betão na camada superior do painel de forma a obter um painel sandwich híbrido.

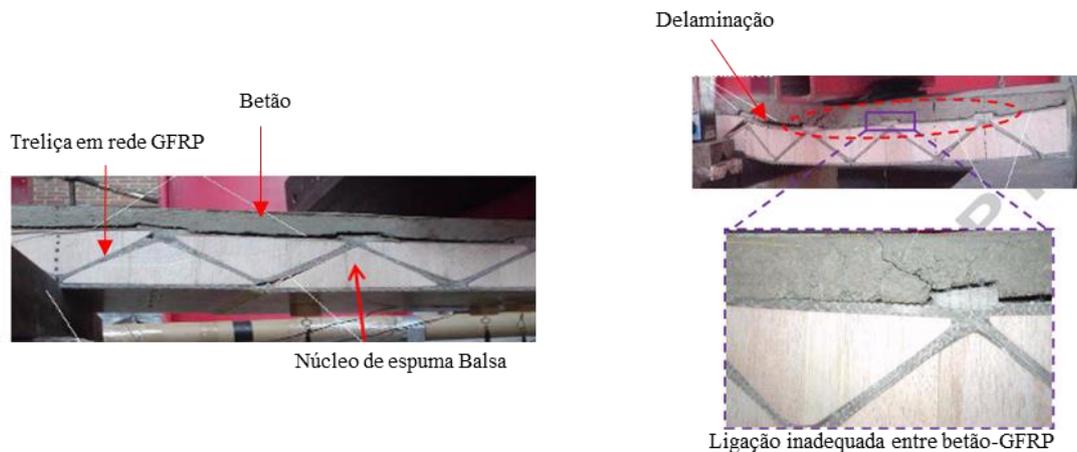
Com a utilização de conectores de aço e de material compósito (GFRP) foi possível efetuar a ligação entre a camada superior de betão e a camada inferior de GFRP (Figura 2.15).



Figura 2.15 Conectores dos painéis sandwich desenvolvidos por (Norton, 2004)

A ligação entre o betão e o GFRP era insuficiente (Norton, 2004). Os autores deduziram através dos resultados obtidos no ensaio experimental que induzindo rugosidade à superfície superior da camada de GFRP ou utilizando um agente de ligação entre GFRP-betão, uma ligação mais forte se estabeleceria entre o betão e a camada superior GFRP. O que levaria a assegurada a ligação correta entre betão-GFRP. Já que nos ensaios efetuados ocorreram

deficiências devido à dificuldade de ligação betão-GFRP, nomeadamente com a ocorrência de delaminação. Ver Figura 2.16.



a) Componentes do panel sandwich proposto por Norton b) Delaminação e ligação inadequada entre o betão-GFRP

Figura 2.16 Painel Sandwich desenvolvido por (Norton, 2004)

2.2 Avaliação das propriedades dos materiais para o ensaio experimental

O painel híbrido proposto é composto por diferentes materiais. A camada superior de compressão é composta por uma argamassa específica composta por cimento reforçado com fibras para ter um comportamento de endurecimento devido à deformação por flexão (*deflection hardening*) designada de DHCC-*Deflection Hardening Cement Composites*.

A camada inferior de tração é composta por um laminado de GFRP e os conectores a utilizar também são em GFRP, é importante referir algumas propriedades, características, bem como vantagens e desvantagens da aplicação de perfis em GFRP.

2.2.1 Propriedades da argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC)

Os compósitos de matriz cimentícia com endurecimento em tração (*FRCC-fiber reinforced cement composites*) cada vez mais se realizam mais estudo de caracterização mecânica destes tipos de compósitos. Pois apresentam grandes vantagens relativamente aos betões convencionais, mesmo quando comparados com os betões reforçados com fibras convencionais. Podem ser classificados em duas categorias segundo (Naaman e Reinhard, 2005):

-Compósito de matriz cimentícia que apresenta comportamento de amolecimento (*SSCC-strain softening cement composites*)

-Compósito de matriz cimentícia que apresenta um comportamento de endurecimento (*SHCC-strain hardening cement composites*).

A extensão do FRCC é avaliada através de ensaios de tração direta em provetes tipo *dogbone*. Se a resistência à tração aumentar com a extensão, logo após início de fendilhação, pode se considerar que o FRCC, se enquadra na categoria SHCC, caso contrário, é considerado como SSCC.

A fase designada de Strain Hardening de um SHCC é caracterizada pela formação de padrões difuso de fendilhação, nomeadamente, surgirem múltiplas micro-fendas no desenvolvimento da rotura pela macro-fenda. Geralmente, a macro fenda ocorre para uma extensão de tração superior a 1,5%. A formação de múltiplas fissuras significam que a ação de ponte entre fibras impede o desenvolvimento da abertura da fenda, no que resulta, na formação de várias microfissuras nas imediações da fenda principal que leva posteriormente a rotura da estrutura.

Relativamente ao estudo em flexão, o SHCC apresenta-se em duas categorias:

-*deflection softening* e;

-*deflection hardening*.

Durante a fase *deflection hardening* de um DHCC, argamassa de ultra elevada ductilidade pois apresenta várias micro-fendas que se formam quando o provete é ensaiado à tração, até a formação da rotura pela macro fissura. Segundo (*Zollo, 1997*) o nível de *deflection hardening* é influenciado pelos mecanismos de reforço e das propriedades da matriz das fibras, também é condicionado pela geometria e dimensões da seção transversal do provete testado, sendo que estes condicionalismos influenciam a orientação e distribuição das fibras. A capacidade de desenvolver múltiplas fissuras difusas até atingir níveis de deformações mais elevados, apresenta grandes vantagens em termos de durabilidade do materiais, uma vez que quanto menor for a dimensão da fenda maior será a resistência à penetração dos agentes ambientais agressivos no material em estudo.

A argamassa reforçada com fibras desenvolvida no âmbito do presente estudo é uma argamassa do tipo DHCC. Tanto o SHCC e DHCC apresentam formação de múltiplas fendas, que levam a que estes materiais apresentem ultra elevada ductilidade, uma vez que durante a formação das múltiplas fendas, existe elevada energia absorvida e a extensões de tração última, para a

argamassa SHCC e a deformação por flexão última, para a argamassa DHCC são bastante elevados comparativamente com os registados no início da fissuração do provete.

Segundo (Zollo, 1997) os parâmetros com maior influência no comportamento mecânico de um FRCC são: o tipo de material, a geometria, a orientação, a distribuição e o teor de volume de fibras, as propriedades da matriz, a ligação fibra-matriz. A ligação entre a fibra e a matriz é um requisito importante no desenvolvimento do FRCC (Pakravan et al, 2012).

Com base nos resultados obtidos nos estudos efetuados por (Pakravan et al, 2012) “*investigation on polymeric fibers as reinforcement in cementitious composites: Flexural performance*”, foi realizada uma avaliação comparativa da eficácia das fibras de PP (Polipropileno), fibras PAN (poliacrilonitrila) e fibras de Nylon no aumento da resistência à flexão e avaliação do desempenho em termos de ductilidade do cimento reforçado com as fibras, verificou-se que as fibras PAN foram as mais eficazes, tanto no desempenho de ductilidade como em termos de resistência. As fibras PAN registaram os melhores resultados em termos de controlo da largura de fenda.

2.2.2 Material Polimérico Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP)

Os materiais compósitos (GFRP) são constituídos por duas fases :

-as fibras de reforço, que têm como função aumentar o desempenho mecânico do material, garantindo maior resistência e rigidez ao compósito e;

-matriz polimérica, permite efetuar as transferências de cargas entre as fibras e o compósito, tem a função de proteger as fibras da exposição aos agentes ambientais agressivos, dos danos mecânicos e dos fenómenos de instabilidade. (Cabral-Fonseca, 2005) e (Correia, 2004)

Além da matriz e das fibras, este tipo de materiais ainda é possível incluir materiais de enchimento (fillers) e aditivos. Sendo que os aditivos são adicionados à matriz com a finalidade de melhorar características específicas do material, como por exemplo, melhorar a resistência ao fogo, à fadiga, a resistência aos agentes ambientais agressivos, entre outras. (Cabral-Fonseca, 2005) e (Correia, 2004)

Fibras de Reforço

As fibras de reforço FRP são de origem sintética ou natural, sendo que as sintéticas são as mais usadas e estas podem ainda ser divididas em três tipos: vidro, carbono e aramida. (Cabral-Fonseca, 2005) e (Correia, 2004).

As fibras de vidro são o reforço utilizado nos GFRP. Estas fibras são as mais utilizadas e as mais produzidas na indústria da construção. Existem quatro tipos diferentes de fibras de vidro, tendo cada tipo, características e aplicações específicas. (Cabral-Fonseca, 2005) e (Correia, 2004).

- as fibra de vidro tipo E, são os produtos mais comercializados (80-90%), é caracterizado como um bom isolante elétrico e térmico e são de entre todas as fibras em estudo as mais baratas;
- as fibras do tipo S, são muito utilizadas na indústria aeroespacial e possuem uma resistência mecânica melhorada, contudo são 3 a 4 vezes mais caras que as de tipo E.
- as fibras AR, contêm uma maior quantidade de zircônio comparativamente com as restantes fibras. Sendo que apresentam uma resistência alcalina superior podendo ser utilizadas em compósitos cimentícios como o GRC (betão reforçado com fibra de vidro) e;
- as fibras do tipo C, que apresentam uma resistência à corrosão melhorada, não são muito utilizadas na indústria da construção.

As principais características das fibras de vidro tipo E mais comercializadas e mais baratas, encontra-se apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Características típicas das fibras de vidro tipo E mais comercializadas (Keller, 2003)

Propriedades	Unidade	Vidro-E
Resistência à tração	MPa	3500
Módulo de elasticidade	GPa	73
Extensão na rotura	%	4,5
Peso específico	g/cm ³	2,6
Coefficiente de dilatação térmica	10 ⁻⁶ / K	5,0-6,0
Diâmetros das fibras	µm	3-13
Estrutura das fibras	—————	Isotrópica

As fibras de reforço encontram-se divididas essencialmente em duas formas:

-mechas de filamentos contínuos torcidas e não torcidas (Fiberline Composites, 1995)



Figura 2.17 Configuração das mechas de filamentos

-mantas de fios curtos ou contínuos, com diferentes direções (Fiberline Composites, 1995)

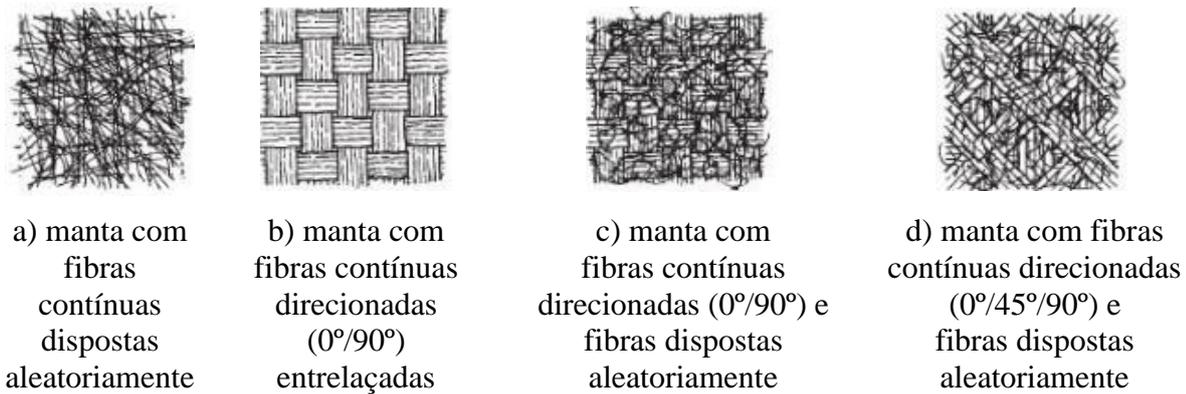


Figura 2.18 Configuração das mantas

O comprimento das fibras interfere nas propriedades mecânicas pois as fibras contínuas permitem obter maiores valores de resistência e rigidez. Os compósitos constituídos por fibras curtas distribuídas aleatoriamente têm propriedades quase isotrópicas, sendo que a grande desvantagem é a redução da fluência da matriz, pois apresenta um comportamento visco-elástico.

Matriz polimérica

A matriz desempenha um papel muito importante nos materiais compósitos, sendo de seguida apresentada algumas das suas funções :

- Serve como ligação entre as várias fibras assegurando ao mesmo tempo a transmissão e a distribuição de tensões entre elas. Por norma, apenas as tensões associadas a esforço transversal e a esforço de corte interlaminar, é suportada pela matriz;
- Protege as fibras de danos exteriores provocados por abrasão e de ataques químicos resultantes do ambiente exterior.
- Funciona como barreira à propagação de fissuras ao manter as fibras devidamente afastadas, devido à relativa flexibilidade e plasticidade evita a propagação de fissuras frágeis entre fibras;
- Evita a encurvadura das fibras quando estas se encontram sujeitas a tensões de compressão.

As resinas poliméricas utilizadas na matriz podem ser divididas em dois grupos:

-resinas termoendurecíveis, são os materiais mais utilizados no fabrico de FRP, nomeadamente devido à capacidade de adesão e impregnação das fibras, o que permite uma melhor transferência de esforço e um suporte físico contra a instabilidade das fibras sob ações de compressão. Resultam de um processo de cura (endurecimento) em ação do calor provoca reações químicas de polimerização da resina. Após o processo de cura, estes polímeros não podem ser novamente processados. As resinas mais comuns são: poliéster, epóxi, fenólica e poliamida (Cabral-Fonseca, 2005) e (Correia, 2004)

-resinas termoplásticas, o material pode alternar entre um estado plástico e um estado rígido quando aquecido ou arrefecido, respetivamente. A vantagem de aplicar polímeros termoplástico reside no facto destes poderem ser reciclados, contudo devido à viscosidade que apresentam, dificultam a impregnação das fibras e apresentam dificuldade em termos de capacidade de adesão face aos materiais termoendurecíveis. Estes são materiais com maior resistência a impactos e micro-fissurações, nomeadamente por apresentarem maior ductilidade e tenacidade. Em termos de resinas termoplásticas são de destacar o polipropileno, o policloreto de vinil, o nylon e o poliuretano. (Cabral-Fonseca, 2005) e (Correia, 2004)

Arranjos geométricos do reforço e da matriz

A união geométrica do material de reforço e da matriz pode apresentar-se de três modos distintos. (Jones, 1999)

No primeiro caso, o material de reforço é composto por partículas que se encontra dispersas por toda a matriz, isto é, o reforço não é direcional. Ver Figura 2.19.

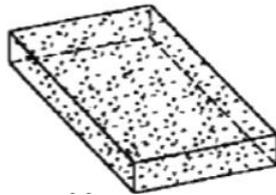


Figura 2.19 Arranjo por partículas (Jones, 1999)

O segundo caso caracteriza-se por fibras curtas distribuídas aleatoriamente pela matriz, podendo existir uma certa orientação das fibras e, conseqüentemente, uma direção preferencial de reforço. Ver Figura 2.20.

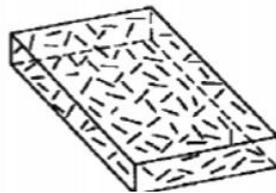


Figura 2.20 Arranjo com fibras curtas (Jones, 1999)

O terceiro arranjo geométrico caracteriza-se por fibras longas distribuídas na matriz, normalmente, de forma orientada, tem como objetivo introduzir um reforço direcional. Ver Figura 2.21.

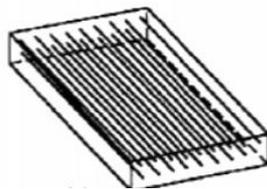


Figura 2.21 Arranjo com fibras longas (Jones, 1999)

Relativamente à disponibilidade no mercado, as fibras em forma de fio podem apresentar várias formas: *rovings*, mantas, tecidos 2D e 3D, malhas e entrelaçados. (Moura, 2005)

- Os *rovings* (Figura 2.22) é um cordão de filamentos contínuos enrolado numa bobine, pode destinar-se à produção de fibras descontínuas, tecido, ou ser processado para a obtenção de malhas ou híbridos;



Figura 2.22 Rovings

- As mantas possuem as fibras distribuídas aleatoriamente e são agregadas com material ligante, este material deve ser solúvel na impregnação. As fibras dispersas na manta podem ser contínuas ou descontínuas. Podendo a manta ser distinguida em três tipos: as mantas de filamentos cortados com baixas propriedades mecânicas *CSM(Chopped Strand Mat)*, as mantas de filamentos contínuos que promovem elevada conformabilidade designadas de *CRM(Continuous Random Mat)* e as mantas de superfície que caracterizam-se pela sua leveza;
- Os tecidos são compostos por fibras contínuas, e podem ser de vários tipos: entrelaçados, unidirecionais e híbridos. São divididos em dois grupos: Os tecidos 2D e os tecidos 3D. Os tecidos 2D caracterizam-se por ligações entre feixes de fibras longas. Este materiais apresentam uma boa resposta mecânica transversalmente ao plano das fibras comparativamente ao laminado unidirecional. Os tecidos 3D são obtidos por processos especiais de tecelagem que ligam as múltiplas camadas de fibras com as mais variadas orientações. Esta tecnologia permite confeccionar forma para painéis e perfis para aplicação estrutural;
- As malhas são produzidos pela ligação sucessiva de camadas de fibras alinhadas. Sendo este modo de reforço utilizado devido a facilidade de distribuição da carga pelas fibras, permite elevados módulos de tração e flexão;
- Entrelaçados, estes materiais são substancialmente mais caros que as mantas, pois permite obter resistência específica muito mais elevada. Apresenta-se com configuração tubular ou plana.

Vantagens da aplicação de perfis GFRP (Correia, 2004)

Os perfis de GFRP apresentam as seguintes vantagens em relação aos materiais tradicionais aço e betão:

- baixo peso específico;
- elevada relação entre a resistência mecânica e o peso próprio;
- elevada resistência à fadiga;
- elevada resistência à corrosão;
- transparência electromagnética;
- facilidade no transporte para o estaleiro e na instalação em obra e;
- baixos custos de manutenção.

Desvantagens da aplicação de perfis GFRP (Correia, 2004)

Face aos materiais tradicionais os perfis GFRP têm as seguintes desvantagens:

- reduzido módulo de elasticidade;
- comportamento frágil;
- necessidade do desenvolvimento de novas formas estruturais e sistemas de ligação;
- ausência de regulamentação específica;
- custos iniciais ainda pouco competitivos na maior parte das aplicações.

Campo de aplicação dos perfis GFRP (Correia, 2004)

Os perfis de GFRP, por apresentarem baixo peso próprio tornado a estrutura mais leve e maior durabilidade quando expostos a ambientes agressivos visto apresentarem elevada resistência à corrosão.

Sendo que, inicialmente os perfis GFRP foram utilizados em elementos não estruturais ou estruturas secundárias, devido às propriedades já referenciada anteriormente houve a necessidade de ampliar o campo de aplicação, nomeadamente são aplicados em:

- saneamento básico;
- indústria de pesca;
- os portos de navegação;
- a indústria petroquímica;

- estação de tratamento de águas residuais;
- as centrais termoelétricas;
- transporte ferroviário.

Para aplicações em elementos não estruturais ou estruturas secundárias, a indústria da pultrusão desenvolveu produtos constituídos por perfis pultrudidos de GFRP, sendo apresentado de seguida alguns exemplos, como:

- bancos de jardim;
- portas;
- passadiços;
- painéis de fachada.

Nos últimos anos começou-se aplicar GFRP em elementos estruturais, sendo estas estruturas maioritariamente constituída por perfis GFRP, nomeadamente são aplicadas:

- nas coberturas;
- em edifícios e;
- em pontes pedonais e rodoviárias.

Um exemplo da aplicação dos perfis GFRP é a ponte pedonal de Lérida, em Espanha (Figura 2.23), foi construída em 2001 (Sobrino e Pulido, 2002). Os elementos estruturais desta ponte eram todos constituídos por perfis de GFRP, com ligações aparafusadas em aço inoxidável.



Figura 2.23 Ponte de Lérida (Sobrino e Pulido, 2002)

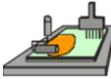
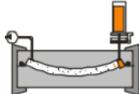
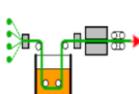
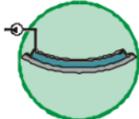
~

Produção de compósitos e estruturas sandwich

As estruturas em *Sandwich* podem ser fabricadas através de diversos processos, nomeadamente, moldagem por saco de vácuo (*vacum bag*), por autoclave, por transferência de resina, moldagem manual, entre outros. As técnicas de produção são divididas em três tipos: por molde aberto, como por exemplo a moldagem manual; por molde fechado, que é o caso da moldagem por transferência de resina (RTM), ou continuamente, tal como a pultrusão, muito usada na produção de perfis em GFRP. (Charles, 1997)

Na Tabela 2.2 são apresentados algumas das tecnologias de produção de compósitos mais comuns.

Tabela 2.2 Processos de fabrico de compósitos (Kleinberg M.)

Resina líquida					Resina de elevada viscosidade
Moldagem manual	Enrolamento filamental	RTM	Infusão de resina líquida	Pultrusão	Pré-impregnado
					

Processo de Molgem por Transferência de Resina (RTM) incorpora vários processos diferentes, como por exemplo, o MIT (*Multiple Insert Tooling*), o CCBM (*Closed Cavity Bag Molding*), o VARTM (*Vaccum Assisted Resin Transfer Molding*), entre outros. Todos eles apresentam caraterísticas em comum (Potter, 1997). Nas várias tipologias de moldagem, o reforço e o núcleo, são colocados na cavidade do molde, sendo este fechado sob pressão, onde posteriormente é injetada uma resina líquida pré-catalisada que serve para impregnar as fibras de reforço. Depois do molde estar todo preenchido é deixado a curar durante um período de tempo. Até ser possível retirar o compósito ser provocar nenhum dano que ponha em causa a resistência do compósito produzido.

O preenchimento total da cavidade do molde com resina só é conseguida através da aspiração o ar existente. É fundamental no fabrico de um compósito garantir que ele é bem executado, ou seja, sem bolhas de ar, sem zonas secas no reforço (as fibras devem estar totalmente saturadas) e com a geometria pretendida atribuída pelo molde a utilizar. Para uma boa impregnação da resina há que ter em conta as propriedades químicas e reológicas da resina a utilizar, temperatua do molde, densidade, orientação das fibras de reforço, pressão de injeção. As propriedades mecânicas de um compósito são influenciadas pelo teor de vazios, a geometria e a fração

volumétrica (%) das fibras de reforço utilizadas. As propriedades mecânicas são melhoradas com o aumento da fração volumétrica das fibras mas é necessário muito cuidado, quanto mais volume de fibras tiver o compósito maior terá que ser a pressão de injeção, o que poderá afetar as propriedades do compósito final. (Hiller et al, 2006)

Na Figura 2.24 é apresentado o modo de funcionamento do processo RTM convencional e uma modificação deste, o VARTM, onde é possível visualizar muitas semelhanças entre estes dois processos de produção de compósitos. (Song, 2003)

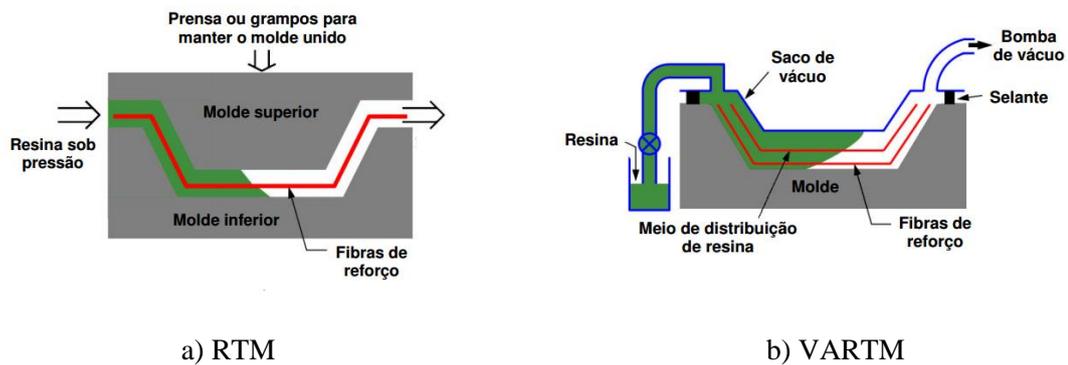


Figura 2.24 Esquema de funcionamento de dois processos de produção de compósitos (Song, 2003)

Os processos de moldagem por transferência de resina, RTM, ou os processos de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo, VARTM, permitem obter laminados com elevada fração volúmica de fibra e baixa taxa de vazios. As resinas mais utilizadas para proceder a impregnação das fibras são geralmente de poliéster não saturado, de epóxi, viniléster e fenólica.

CAPÍTULO 3

Produção dos provetes e conectores de GFRP

3.1 Introdução

No presente capítulo é apresentada toda a descrição do processo de produção da argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC-Deflection Hardening Cement Composites) bem como o processo de fabrico e produção dos conectores de GFRP.

Esta argamassa apresenta diversas vantagens, tais como a facilidade de aplicação e de manuseamento, o que possibilita maior versatilidade na forma das cofragens e formas de aplicação. Esta argamassa poderá ser uma boa solução em estruturas pré-fabricadas e em obras de reabilitação, uma vez que é um material de baixo peso volúmico. Além da sua leveza apresenta uma boa resistência pois incorpora fibras de vidro.

As amassaduras executadas no âmbito do presente trabalho foram realizadas na empresa CiviTest - Pesquisa de novos materiais para Engenharia Civil, Lda, especializada no desenvolvimento e produção de betões com fibras.

As cofragens utilizadas foram concebidas especificamente para o presente trabalho, de modo a rentabilizar o tempo de betonagem e conseguir as geometrias pretendidas.

3.2 Produção de argamassa

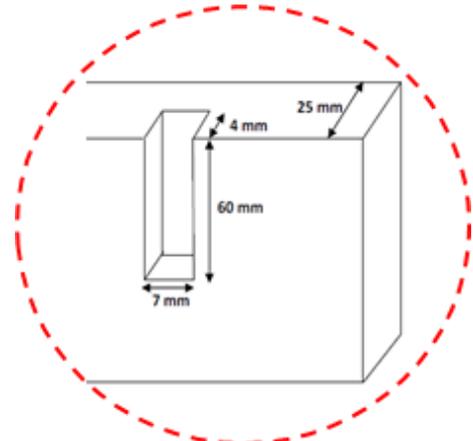
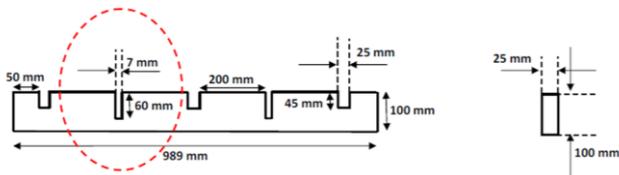
A produção de argamassa e dos provetes de ensaio *pull-out* é uma das tarefas mais importantes no presente trabalho, pois é com base nos provetes executados que se realiza o programa experimental que é proposto neste trabalho. A argamassa em estudo incorpora fibras PAN (poliacrilonitrila) para conferir maior resistência e ductilidade ao comportamento estrutural da laje.

3.2.1 Conceção dos moldes e preparação da betonagem

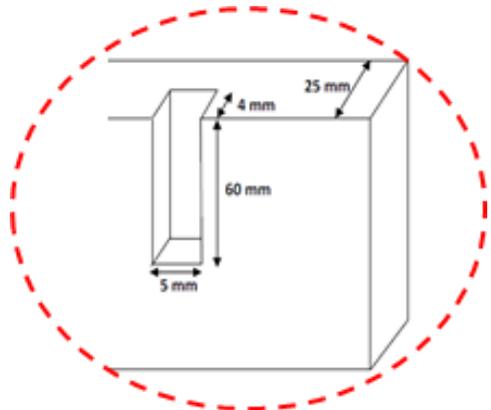
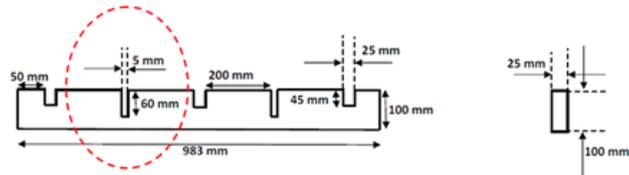
As cofragens necessárias para execução de provetes de betão foram elaboradas em madeira visto ser um material de baixo custo comparativamente com os materiais metálicos. Estas cofragens foram construídas especialmente para este trabalho. Os modelos de cofragens utilizados permitem a execução de provetes *pull-out*. É um sistema de cofragem simples de executar, composto por tábuas e ranhuras estrategicamente colocadas, para tornar mais fáceis e rápidas as operações de moldagem e desmoldagem dos moldes, rentabilizando o tempo de execução e produção dos provetes.

A moldagem e desmoldagem dos moldes e a produção da argamassa (DHCC) foi realizada na empresa CiviTest - Pesquisa de novos materiais para Engenharia Civil, Lda.

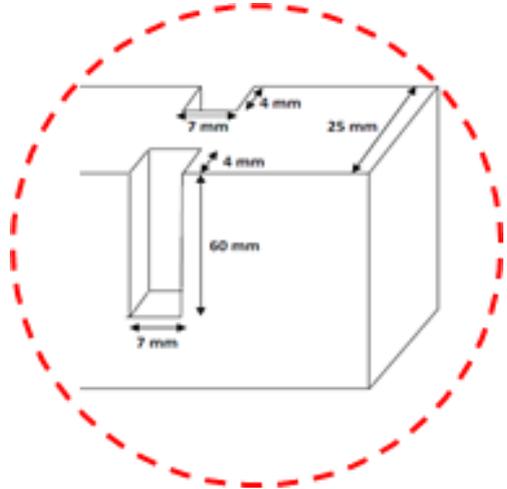
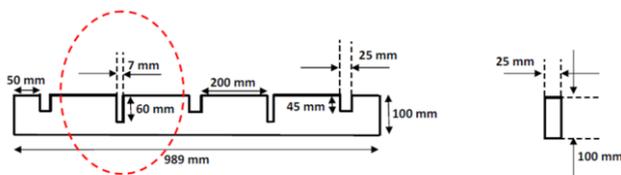
Neste trabalho foram utilizadas duas cofragens, tal como se mostra na Figura 3.1. Uma das cofragens foi executada para fixar conetores de espessura de 4 mm e a outra para fixar conetores de 6 mm de espessura, pelo que o tamanho das ranhuras para o encaixe da cofragem é ajustado.



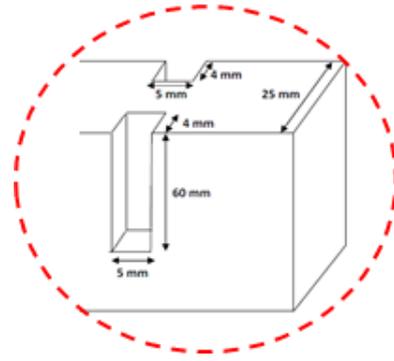
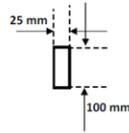
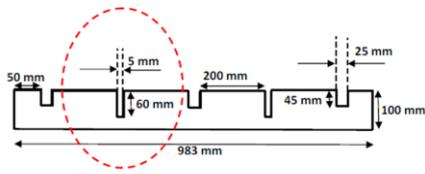
a) Configuração da Parede 1 do molde *pull-out* para fixar conectores de 6 mm de espessura



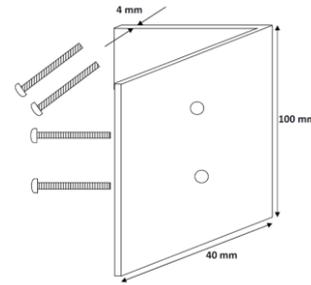
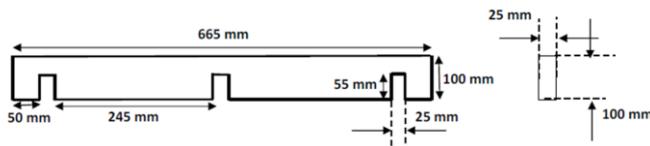
b) Configuração da Parede 1 do molde *pull-out* para fixar conectores de 4 mm de espessura



c) Configuração da Parede 2 do molde *pull-out* para fixar conectores de 6 mm de espessura

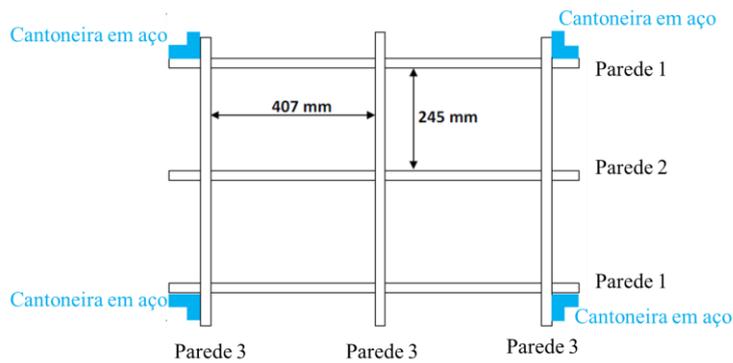


d) Configuração da Parede 2 do molde *pull-out* para fixar conectores de 4 mm de espessura

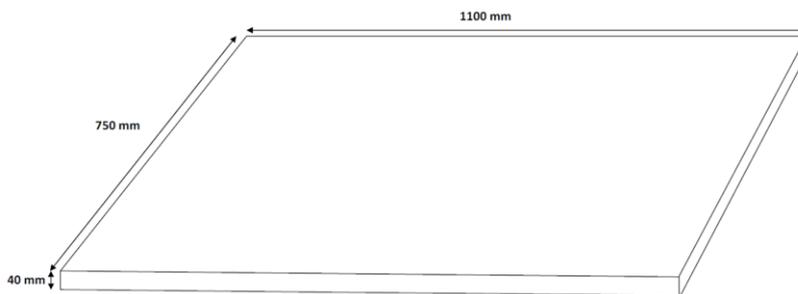


e) Configuração da Parede 3

f) Esquema representativo da cantoneira



g) Planta dos moldes *pull-out* com o posicionamento das tábuas divisórias

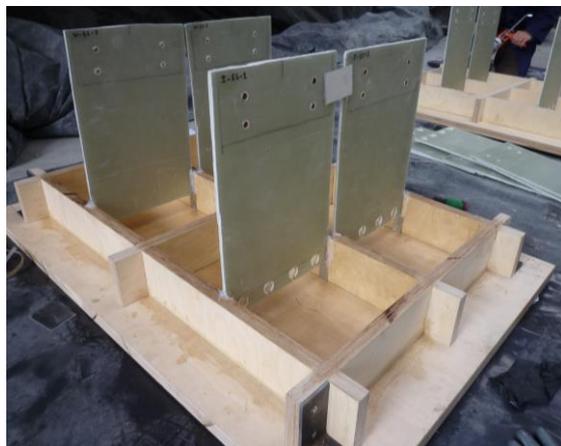


h) Base de apoio da cofragem

Figura 3.1 Desenhos preparados para execução das cofragens

Os conectores de GFRP são fixados nas ranhuras das tábuas divisórias da cofragem, com recurso a cunhas metálicas que são coladas com cola quente na parte inferior das mesmas, de forma posicionar corretamente o conector e a minimizar as excentricidades que poderiam

ocorrer aquando da betonagem dos moldes. É necessário garantir a perpendicularidade do conector face ao provete de argamassa, pelo que adicionalmente se coloca cola quente na zona de encaixe, tal como se pode observar na Figura 3.2.



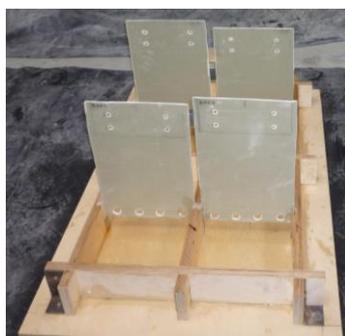
a) Molde geral com a colocação das cunhas



b) Pormenorização da colocação de uma cunha

Figura 3.2 Colocação de cunhas metálicas

As tábuas da cofragem são inicialmente revestidas com camadas de um verniz tapa poros (Figura 3.3), que tem como principal função a impermeabilização dos moldes e garante deste modo que estes não absorvam água de amassadura durante o processo de betonagem e que não sejam danificados. Garante-se assim a possibilidade da reutilização dos moldes.



a) Molde pincelado com verniz tapa poros



b) Verniz tapa poros

Figura 3.3 Aplicação do verniz tapa poros

Cada molde é composto por tábuas divisórias móveis de madeira colocadas sobre uma placa de madeira. A placa de madeira referida serve de base do molde e é fixada às restantes tábuas com quatro cantoneiras de aço colocadas em cada canto do molde (Figura 3.4). Para uma melhor impermeabilização dos moldes e uma melhor fixação das tábuas divisórias à placa base de madeira é aplicado silicone em todo o contorno exterior do molde. Como as divisórias são

móveis, permitem mais rápidas as operações de montagem das cofragens e a descofragem dos moldes e permitem ainda a reutilização das cofragens.



Figura 3.4 Fixação das tábuas divisórias móveis à placa de madeira

Antes da execução das amassaduras foram ainda preparados moldes prismáticos, moldes cilíndricos e moldes de tipo *dogbone* para o ensaio de aplicando óleo descofrante em todas as superfícies interiores dos moldes e em todas as superfícies que pudessem estar em contacto com a argamassa. Para facilitar o processo de descofragem. Como se pode visualizar a aplicação do óleo descofrante na Figura 3.5.



a) Molde pincelado com óleo descofrante



b) Pormenor da aplicação do óleo descofrante

Figura 3.5 Aplicação de óleo descofrante

3.2.2 Produção e betonagem de provetes de tipo *pull-out*

Os provetes *pull-out* foram executados com argamassa de ultra elevada ductilidade, DHCC, com recurso a uma betoneira existente na empresa CiviTest. Para a produção de todos os provetes *pull-out* planeados foram necessários três dias de betonagem. Em cada dia de betonagem realizaram-se duas amassaduras. No primeiro dia de betonagem, e para a primeira amassadura efetuada, o volume de argamassa produzido foi de 48 litros. Nesta amassadura, executaram-se quatro provetes de tipo *pull-out* com o molde destinado a conectores com 6 mm de espessura, um provete de tipo *pull-out* no molde destinado a conectores de 4 mm, nove

provetes prismáticos, um provete cilíndrico (com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm) e dois provetes de tipo *dogbone*. Na segunda amassadura, ajustou-se o volume de argamassa a ser produzido sendo considerado um volume total de 41 litros. Betonaram-se três provetes de tipo *pull-out* com o molde destinado a conectores com espessura de 4 mm, três provetes prismáticos, um provete cilíndrico e um provete de tipo *dogbone*.

Nos restantes dias de betonagem, foi considerado um volume de 41 litros para cada amassadura efetuada. Na 3ª e na 5ª amassaduras foram betonados quatro provetes de tipo *pull-out* com o conector de GFRP de 6 mm e dois moldes prismáticos, por cada amassadura. Na 4ª amassadura e na 6ª amassadura foram betonados quatro provetes de tipo *pull-out* com o conector GFRP de 4 mm de espessura e três provetes prismáticos, em cada amassadura.

Cada molde prismático dá origem a três provetes prismáticos de dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$.

A necessidade de duas amassaduras por dia de betonagem é justificada pelo facto da betoneira utilizada não ter capacidade preparar material suficiente para moldar todos os provetes de uma só vez e de existirem apenas dois moldes de tipo *pull-out* (um molde para os conectores de 4 mm de espessura e outro molde para os conectores com 6 mm de espessura).

Todos os moldes prismáticos, cilíndricos e do tipo *dogbone* são colocados na mesa vibratória logo após correspondente a betonagem, por forma a melhorar a homogeneização da mistura e possibilitar a diminuição do número de vazios e poros na argamassa produzida.

O registro das betonagens com a especificação do tipo de provete produzido, as amassaduras efetuadas e os dias de betonagens correspondentes à fabricação dos provetes encontra-se detalhado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Lista de provetes e sua correspondência com as amassaduras realizadas

1º Dia de Betonagem: 15-04-2015		2º Dia de Betonagem: 20-04-2015		3º Dia de Betonagem: 23-04-2015	
1ª Amassadura	2ª Amassadura	3ª Amassadura	4ª Amassadura	5ª Amassadura	6ª Amassadura
I-E6-1	P-E4-2	P-E6-2	I-E4-3	I-E6-3	W-E4-1
I-E6-2	W-E4-2	P-E6-1	I-E4-2	P-E6-4	W-E4-4
W-E6-3	W-E4-3	I-E6-4	P-E4-4	W-E6-4	P-E4-1
W-E6-2	-----	P-E6-3	I-E4-4	W-E6-1	I-E4-1
P-E4-3	-----	-----	-----	-----	-----
9 provetes prismáticos	3 provetes prismáticos	6 provetes prismáticos	3 provetes prismáticos	6 provetes prismáticos	3 provetes prismáticos
1 provete cilíndrico	1 provete cilíndrico	-----	-----	-----	-----
2 provetes do tipo <i>dogbone</i>	1 provete do tipo <i>dogbone</i>	-----	-----	-----	-----
Nota 1: cada molde prismático foi submetido à mesa vibratória logo após a betonagem dos mesmos; em cada molde prismático produziram-se três provetes prismáticos de dimensões 160×40×40 mm ³					
Nota 2: Os provetes cilíndricos e do tipo <i>dogbone</i> foram submetido à mesa vibratória logo após a betonagem dos mesmos		-----		-----	
Nota 3: Os provetes cilíndricos têm 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento		-----		-----	

Cada molde destinado aos provetes de tipo *pull-out* contém quatro compartimentos. Cada compartimento do molde é preenchido com argamassa por fases. Primeiro, coloca-se argamassa de um dos lados do conector em GFRP, permitindo a passagem da argamassa pelos furos do conector, e só depois é colocado argamassa do outro lado do conector. A colocação da argamassa (DHCC) é feita através da face superior do provete, tal como se pode visualizar na Figura 3.6.



a) Colocação de argamassa do lado direito



b) Colocação de argamassa do lado esquerdo

Figura 3.6 Colocação de argamassa em cada compartimento do molde de tipo *pull-out*

A superfície superior do provete de argamassa é regularizada, após o preenchimento dos compartimentos do molde, para garantir a uniformização da sua espessura (todos os provetes *pull-out* apresentam uma altura de 10 cm). A regularização e os excessos de argamassa existentes nos moldes são retirados com o auxílio de uma colher. Esta regularização é dificultada pelas fibras PAN que existem na argamassa.

A Figura 3.7 mostra o trabalho regularização dos provetes de tipo *pull-out* e a configuração do molde de tipo *pull-out*, imediatamente após a realização da betonagem.



a) Uso da colher na regularização



b) Regularização do molde *pull-out*



c) Configuração do molde *pull-out* após a regularização da superfície

Figura 3.7 Regularização da superfície superior do molde *pull-out*

A desmoldagem dos provetes é feita no dia em que se vai betonar, exceto a última desmoldagem que foi realizada no dia em que efetuou o transporte dos provetes para o Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, LEST-UM, onde foram posteriormente realizados os ensaios experimentais. Esta desmoldagem é feita quando a argamassa já tem resistência suficiente para ser possível manusear os provetes e não haver risco de incluir dano nos provetes. A seguir, estes são acomodados, em paletes de madeira, em primeira estância na CIVITEST e depois junto ao Laboratório de Estrutura da Universidade do Minho, LEST-UM, para aguardar o tempo necessário para se proceder aos respetivos ensaios de *pull-out* e de caracterização do material.

A Figura 3.8 apresenta alguns dos provetes *pull-out*, os provetes prismáticos, os provetes cilíndricos e os provetes de tipo *dogbone* obtidos após a desmoldagem.



Figura 3.8 Aspeto dos provetes após desmoldagem

3.2.3 Argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC)

Num âmbito mais alargado do presente trabalho, procura-se uma solução estrutural de laje para a reabilitação de edifícios existentes, onde se associam elementos estruturais de GFRP e uma camada fina de argamassa. Este conjunto deverá ser leve, resistente e apresentar boas características de ductilidade, tendo-se optado pelo uso de uma argamassa de ultra elevada ductilidade designada (DHCC-Deflection Hardening Cement Composites) que apresenta uma boa resistência e melhora a ductilidade do painel, tal como é pretendido.

Esta argamassa de ultra elevada ductilidade foi desenvolvida por (Mastali, 2013) e (Mastali, 2015). É constituída por uma base cimentícia hidráulica reforçada com fibras discretas curtas e longas, designadas de fibras PAN (Poliacrilonitrila).

Na composição da argamassa DHCC foram utilizadas dois tipos de fibras de Policrilonitrila (PAN), as fibras discretas curtas designadas por PAN 6 e as fibras longas PAN 12.

O comprimento, diâmetro, e resistência à tração, das fibras curtas PAN 6 é igual a 6 mm, 58 µm, e 564 MPa, respetivamente. As fibras longas PAN 12 têm 12 mm de comprimento, 26 µm de diâmetro, e 6856 MPa resistência à tração. A geometria das secções transversais das fibras PAN 6 e PAN 12 é em forma de feijão e círculos, respetivamente, contendo uma configuração triedral.

Os materiais utilizados na composição de DHCC são: cimento (CEM 42.5R) produzido pela SECIL-Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., fíler de calcário, superplastificante Sika 3002 HE, areia fina, aditivos modificadores de viscosidade (VMA- Viscosity Modification Admixture), cinzas volantes, e água. A composição da mistura do material DHCC utilizada, com dosagem de cada componente por m³ é apresentadas na Tabela 3.2 e a proporção da mistura DHCC baseada numa relação de peso entre os vários componentes é proposta na Tabela 3.3.

Tabela 3.2 Composição da argamassa DHCC para 1 m³

Cimento	Cinzas Volantes	Fíler calcário	Areia Fina	Água	SP	VMA	Pan 6	Pan 12
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(l)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
545.54	545.54	104.14	218.22	104.14	32.74	3.50	11.70	35.10

Tabela 3.3 Proporções da mistura DHCC

Cimento/ L*	Cinzas Volantes/ L	Fíler de calcário / L	Areia/ L	Mistura**/ L	Água/ L	Fibras/ L
0.5	0.5	0.09	0.2	0.033	0.388	0.04
*L: Ligante (cimento + cinzas volantes)						
** Mistura: VMA(Viscosity Modification Agent) + Superplastificante						

Para a realização das amassaduras são necessários diversos materiais e equipamentos. Para além dos materiais já apresentados são necessários outros equipamentos que permitem realizar a mistura dos materiais na produção da argamassa. É necessária a utilização de uma betoneira com capacidade de 60 litros, uma balança, vários recipientes para acomodar os agregados e a água, recipientes para transportar a argamassa produzida na betoneira para os diferentes moldes a betonar, luvas, colheres, máscaras faciais para proteção contra a inalação de pó e poeiras dos materiais que são introduzidos na betoneira. Todos estes equipamentos e materiais foram disponibilizados pela empresa CiviTest.

A sequência da realização nas amassaduras é apresentada de seguida:

1º Passo – Todos os materiais são pesados e colocados em recipientes individuais (Figura 3.9). Com recurso a uma balança eletrónica, é pesado o recipiente e só depois é colocado o material que se pretende pesar para se obterem de forma exata as dosagens definidas.



Figura 3.9 Materiais nos recipientes utilizados para produção da argamassa DHCC

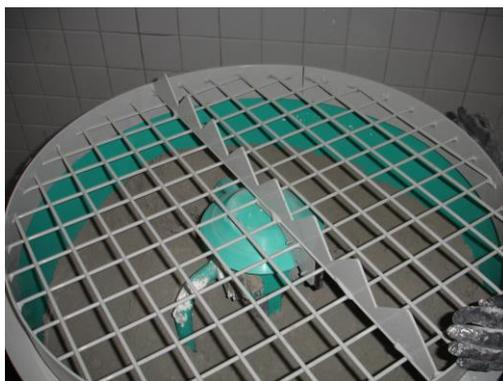
2º Passo- Com a betoneira ligada no movimento do sentido dos ponteiros do relógio inicia-se o processo de betonagem com a adição da areia, cimento, cinza volante e fíler de calcário e vai-se alternando o movimento da betoneira no decorrer da amassadura. Esta betoneira apresenta dois sentidos de movimento (no sentido do movimentos dos ponteiros dos relógios e no sentido contrário aos ponteiros dos relógios), o que se verificou ser uma característica muito importante na produção deste tipo de material. A velocidade da betonagem é sempre a mesma, a única coisa que muda é o sentido do movimento da betoneira, possibilitando uma melhor homogeneização da mistura. Ver Figura 3.10.



a) Betoneira utilizada nas amassaduras



b) Colocação dos materiais pesados



c) Aspetto da mistura dos materiais pesados (antes da adição de VMA, SP e água)

Figura 3.10 Mistura dos materiais pesados (areia, cimento, cinzas volantes e fíler de cálcario)

3º Passo- Depois de se colocar os materiais mais pesados e sólidos, procede-se a colocação gradual da água, do superplastificante e dos aditivos modificadores de viscosidade (VMA-Viscosity Modification Admixture). O VMA é diluído em água e procede-se a sua colocação na betoneira misturado com os restantes materiais, tal como se apresenta na Figura 3.11.



Figura 3.11 Adição de água e superplastificante

4º Passo- São adicionadas as fibras PAN de forma gradual. Primeiro, são colocadas as fibras longas PAN 12 e depois as fibras curtas PAN 6. O aspeto das fibras está patente na Figura 3.12.



a) Fibras PAN 6



b) Fibras PAN 12

Figura 3.12 Fibras utilizadas nas amassaduras

5º Passo- Depois de se adicionar todos os materiais, é necessário continuar com alternância dos sentidos dos movimentos da betoneira para que todos os materiais se possam ligar entre eles. Assim, quando for visível que existe uma boa homogeneização da mistura dá-se por concluída a operação de amassadura e a betoneira é desligada. A argamassa produzida na betoneira é colocada em baldes, onde será posteriormente usada para moldar os provetes previstos. O aspeto da argamassa é visível na Figura 3.13.

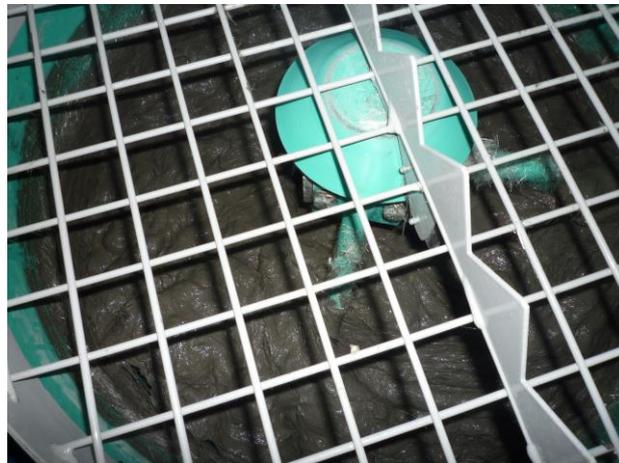


Figura 3.13 Homogeneização da mistura para obtenção da argamassa DHCC

3.3 Laminados de GFRP

Os laminados de GFRP são fabricados com espessuras de 6 mm e 4 mm sendo designados como Rib1 e Rib2, respetivamente.

Para a produção dos laminados de GFRP utilizam-se fibras do tipo UNIE640 (600 g/m² na direção de 0° e 40 g/m² na direção de 90°) e fibras do tipo do tipo EBX400 (400 g/m² na direção de +45° e 400 g/m² na direção -45°).

Para assegurar uma adequada capacidade de resistência ao corte, os laminados de GFRP incluem camadas realizadas com uma manta do tipo EBX400 (400 g/m² na direção de +45° e 400 g/m² na direção -45°) com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$. Deste modo, três camadas de fibras do tipo EBX400 fornecem um milímetro de espessura, na zona interna do laminado de GFRP.

Para as camadas externas do laminado de GFRP são usadas fibras do tipo UNIE640 (com orientações de 0° e 90°) que conferem um milímetro de espessura ao laminado.

Para o Rib 1 (conector com 6 mm de espessura) foram adotadas 15 camadas de fibra do tipo EBX400, com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, assegurando uma espessura de 5 mm para as camadas internas, e duas camadas do tipo UNIE640, colocadas na zona externa do laminado, que fornecem 1 mm de espessura aos laminados de GFRP (Figura 3.14). Obtém-se assim um laminado de GFRP (conector) com espessura total de 6 mm. No Rib 2, foram aplicadas 9 camadas de fibras do tipo EBX 400, obtendo-se assim uma espessura de 3 mm para a zona interna do laminado e o outro milímetro é dado pelas 2 camadas externas do tipo UNIE640 (Figura 3.15).

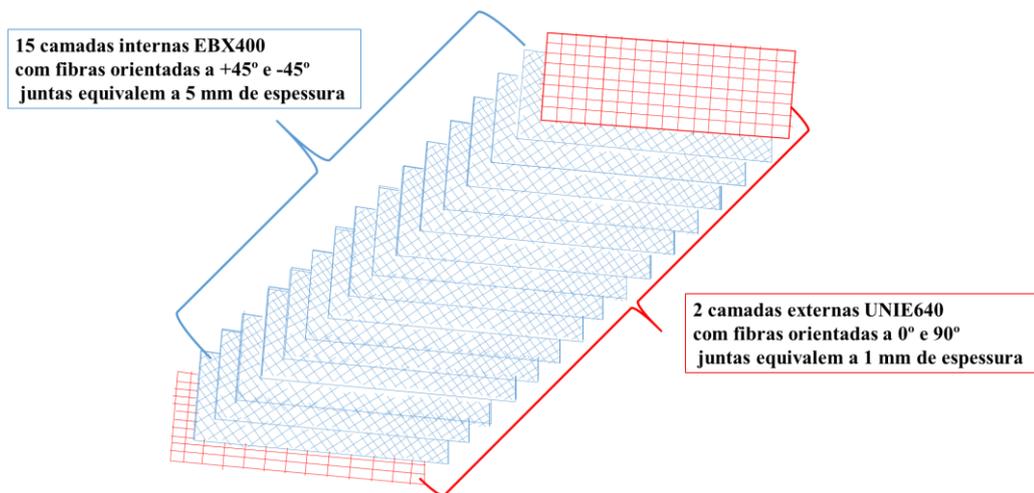


Figura 3.14 Disposição e quantificação das camadas do laminado de GFRP designado de Rib 1

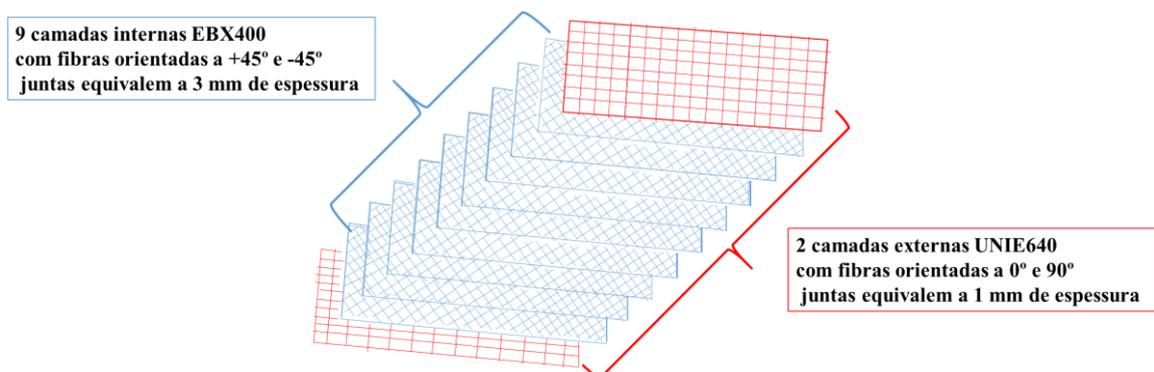


Figura 3.15 Disposição e quantificação das camadas do laminado de GFRP designado de Rib 2

As nervuras e os revestimentos são compostos, em volume, por 60% de fibras e 40% de resina. Todos os laminados GFRP foram fabricados utilizando a técnica VARTM - *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*). Esta técnica consiste na colocação das camadas de fibra de vidro seca no interior de um molde que é fechado e onde é injetada resina a baixa pressão por vácuo, tal como se mostra na Figura 3.16.

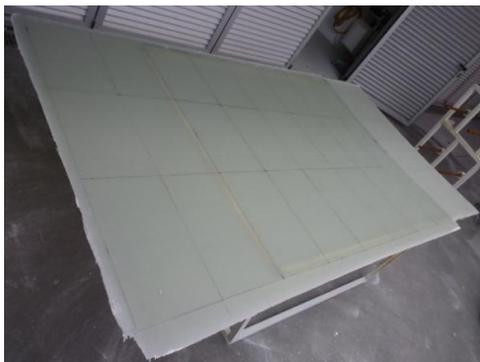
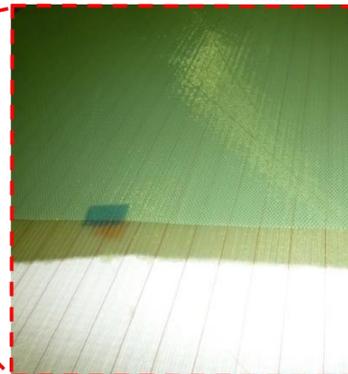


a) Lay-out camadas de fibras

b) Processo de vácuo das camadas de fibras



c) Injeção de resina



d) Corte das placas de GFRP



e) Processo de perfuração

Figura 3.16 Fabricação dos conectores de GFRP pelo processo VARTM

A técnica de moldagem por transferência de resina por vácuo (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding* – VARTM) foi o processo adotado para produzir os conectores de GFRP. Neste processo de fabrico, as camadas de fibras são colocadas sobre uma mesa plana (Figura 3.16a),

em seguida, as fibras são cobertas por um saco de vácuo (em película filme) fechado por uma fita vedante e o conjunto mantido sob condição de controlo para aproximar a pressão necessária no interior do conjunto (Figura 3.16b).

Como se mostra na Figura 3.16c, existe uma entrada de resina ligada ao seu abastecimento e uma linha de vácuo ligada a uma bomba de vácuo. Depois de assegurar a evacuação do ar, a resina é injetada dentro do painel sandwich através do tubo de entrada, fluindo até se concluir a impregnação total do painel (ver Figura 3.16c). A injeção de resina é realizada a baixa pressão por vácuo, para evitar a formação de bolhas de ar. As placas de GFRP são curadas durante aproximadamente 24 h e depois desmoldadas. Em seguida, procede-se à demarcação do painel de GFRP e posteriormente são cortadas para obtenção dos laminados de GFRP pretendidos (Figura 3.16d). Finalmente, os laminados de GFRP são perfurados para se obter a geometria dos conectores projetados. (Figura 3.16e).

A resina do tipo Distitron 3501S1 foi utilizada para impregnar as fibras. De acordo com o fornecedor, esta resina apresenta as seguintes propriedades: resistência à tração igual a 65 MPa, módulo de elasticidade igual a 4100 GPa o alongamento até à rotura igual a 2%.

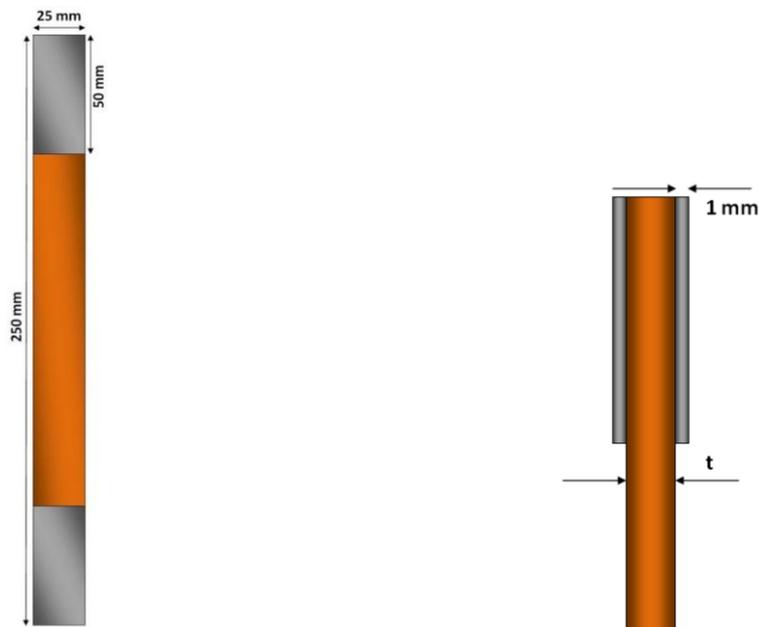
Na Tabela 3.4 encontra-se resumida a informação relativa à caracterização dos laminados de GFRP com espessura de 6 mm (Rib1) e com espessura de 4 mm (Rib2) com a designação das amostras de GFRP e a indicação da direção em que as mesmas foram cortadas na placa original. Para caracterização do laminado de GFRP com espessura de 6 mm (Rib 1), foram cortadas duas amostras (C1 e C2) na direção das fibras orientadas a 0°, outras três amostras (C6, C7 e C8) na direção das fibras orientadas a 90 °, e três amostras (C3, C4 e C5) com orientações de ± 45°. Todas as amostras foram cortadas e preparadas com base nas recomendações da norma ASTM D3039/D 3039M-00.

Para a caracterização do laminado de GFRP com espessura de 4 mm (Rib 2), foram cortadas três amostras (C9, C10 e C11) na direção das fibras orientadas a 0°, quatro amostras (C12, C13, C14 e C15) na direção das fibras orientadas a 90° e três amostras (C16, C17 e C18) na direção das fibras orientadas em ± 45°. As amostras foram ensaiadas à tração e apresentam dimensões de 250 × 25 mm². As amostras são preparadas e ensaiadas com controlo de deslocamento, aplicado com uma velocidade de 2 mm /min.

Tabela 3.4 Propriedades das amostras de GFRP

	Designação das amostras de GFRP	Espessura	Direção das amostras de GFRP
Rib 1	C1, C2	6 mm	0°
	C3, C4, C5		45°
	C6, C7, C8		90°
Rib 2	C9, C10, C11	4 mm	0°
	C16, C17, C18		45°
	C12, C13, C14, C15		90°

Para fornecer ancoragem adequada durante os ensaios e para dissipar as tensões de aperto, são coladas guias de alumínio retangulares, designadas por *tabs*, de dimensão $50 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ são coladas às extremidades das amostras de GFRP em ambas as faces, com recurso a uma cola de elevada resistência e rigidez para evitar o seu deslizamento no decorrer do ensaio (Figura 3.17). Antes da colagem dos *tabs*, estes devem ser limpos e polidos para aumentar a aderência entre os dois materiais. A Figura 3.18 mostra detalhes da configuração e dispositivos de monitorização utilizados para realizar o ensaio de tração longitudinal, enquanto a Figura 3.19 e a Figura 3.20 representa os modos de rotura evidenciados nos ensaios com as amostras de GFRP realizados.



a) Dimensões das amostras e dos *tabs* (vista frontal)

b) Espessura dos *tabs* (vista lateral)

Figura 3.17 Geometria das amostras GFRP e dos *tabs*

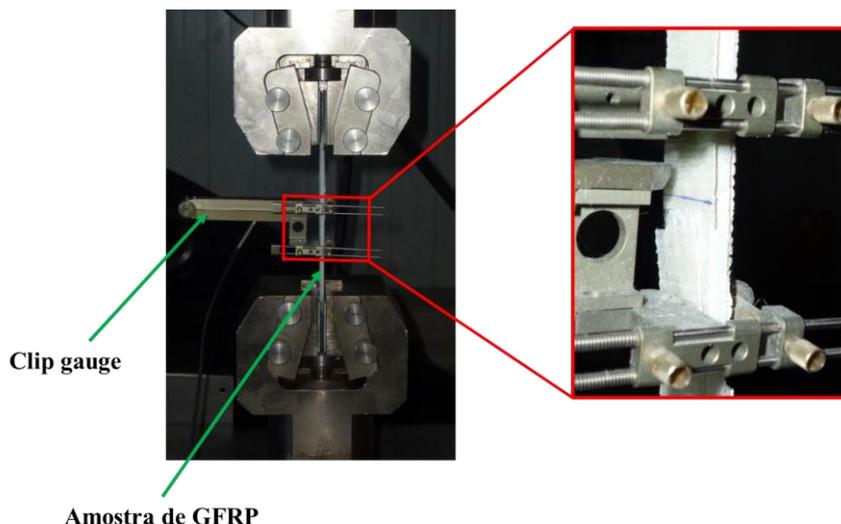


Figura 3.18 Configuração do Ensaio de tração direta

A rotura ocorreu na zona de medição abrangida pelo clip gauge, em todas as amostras testadas. Apesar disso, as roturas ocorreram em zonas distintas entre si e foram de diferentes tipos.

Tendo em consideração os modos de rotura previstos pela norma ASTM D3039/D3039M-00, nos testes realizados foram observados os seguintes tipos (Figura 3.19 e Figura 3.20): A rotura angular ocorre na base da amostra em estudo designado por AGB (*A-angle, G-gauge, B-bottom*) e na zona intermédia da amostra AGM (*A-angle, G-gauge, M-middle*) ao nível do clip gauge; Rotura lateral na zona intermédia da amostra (LGM, *L-lateral, G-gauge, M-middle*); Rotura lateral na base da amostra (LGB- *L-lateral, G-gauge, B-bottom*); Falha explosiva na zona intermédia da amostra (EGM, *E-explosive, G-gauge, M-middle*). Cada uma das siglas mencionadas correspondem ao tipo de rotura, área e o local onde ocorrem, respetivamente.

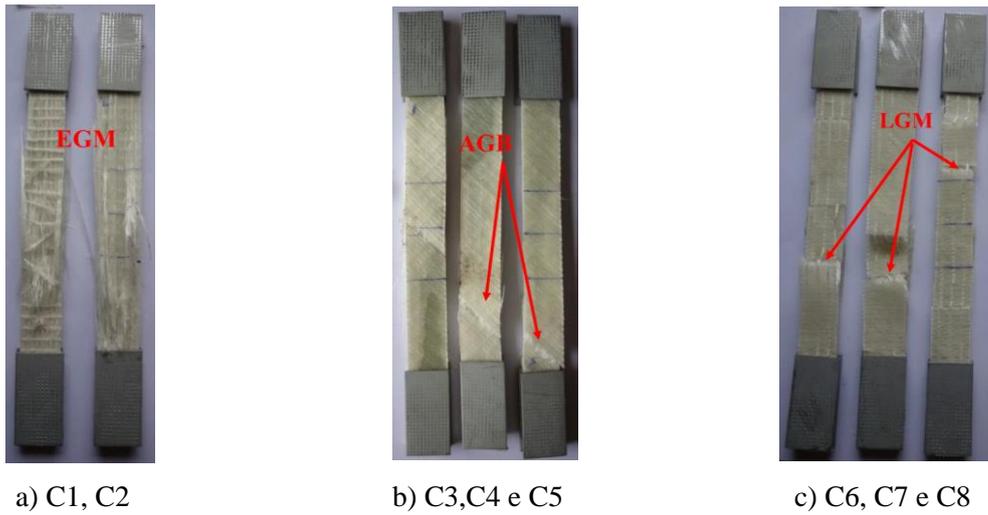


Figura 3.19 Falhas ocorridas nas amostras dos laminados de GFRP com espessura de 6 mm (Rib1)

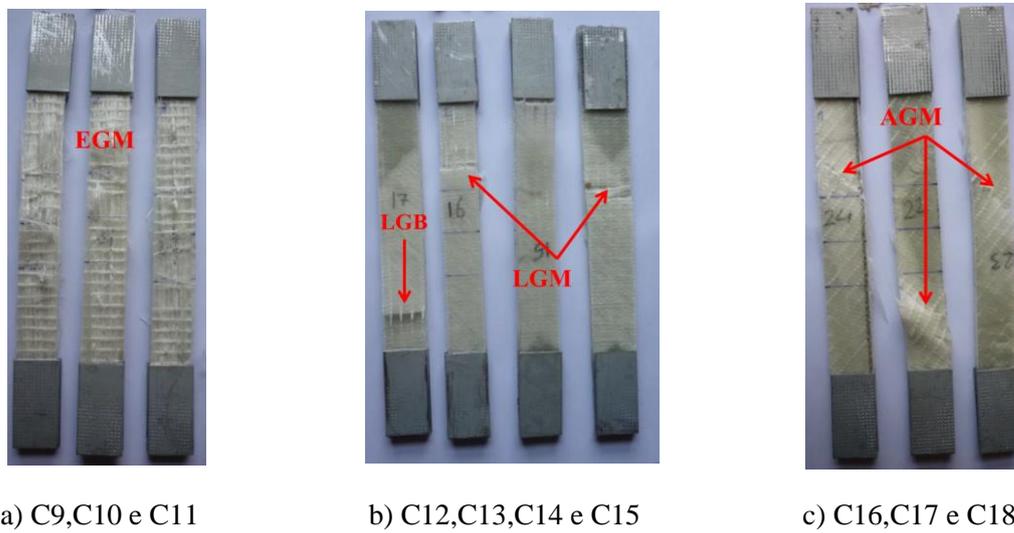


Figura 3.20 Falhas ocorridas nas amostras dos laminados de GFRP com espessura de 4 mm (Rib2)

A Figura 3.21 e a Figura 3.22 representam a resposta que compara valores de tensão aplicada com valores de extensão medidos no provete, durante a realização dos ensaios de tração direta sobre as amostras de GFRP. Os resultados do ensaio de tração direta são apresentados na Tabela 3.5.

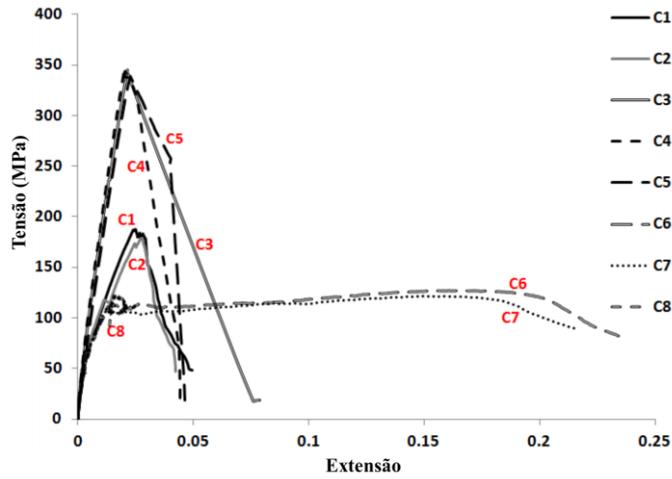


Figura 3.21 Resultados de tensão e extensão obtidos nas amostras de GFRP com espessura de 6 mm (Rib1)

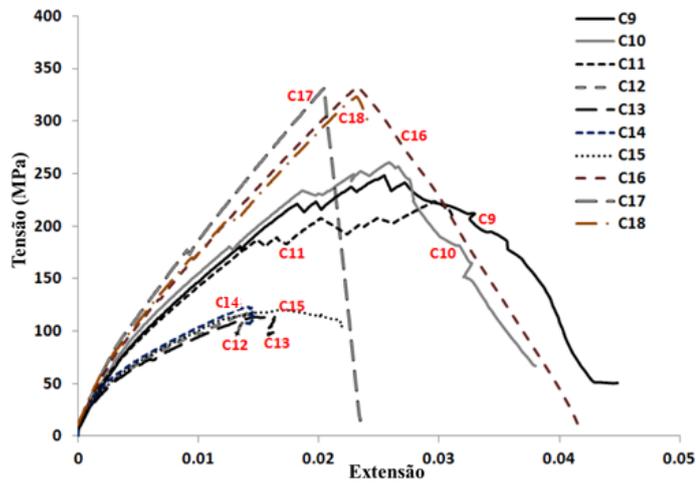


Figura 3.22 Resultados de tensão e extensão obtidos nas amostras de GFRP com espessura de 4 mm (Rib2)

Tabela 3.5 Tensão, módulo de elasticidade e extensão de rotura obtidos nos provetes de GFRP ensaiados

	Orientação das amostras de GFRP em relação ao painel original	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Extensão de rotura (%)
Rib 1 (6 mm)	0°	180.00	12.34	2.46
	45°	332.82	15.53	2.00
	90°	124.15	12.61	15.95
Rib 2 (4 mm)	0°	237.48	11.40	2.54
	45°	317.18	15.47	2.04
	90°	118.63	7.95	1.35

As amostras cortadas do painel original com orientação a $\pm 45^\circ$ correspondem àquelas onde se obteve o máximo valor na força de tração e o máximo valor de módulo de elasticidade. Em geral, nos vários provetes testados, a resposta tensão-extensão é composta por uma fase linear inicial seguida de uma fase de comportamento não-linear que depende do arranjo, da quantidade de fibras existentes no laminado e da sua orientação em relação à direção da carga aplicada.

Para o laminado de GFRP com espessura de 6 mm (Rib1) pela diminuição da proporção de fibras de reforço eficazes (percentagem avaliada na direção do carregamento), a fase de comportamento não linear é mais pronunciada e a resistência à tração é menor devido à menor quantidade de fibras de reforço eficazes na direção do carregamento.

No laminado de GFRP com espessura de 4 mm (Rib2), a diminuição da quantidade de fibras de reforço eficazes conduz a uma menor resistência à tração. Não foi possível estabelecer uma relação direta entre a quantidade de fibras de reforço eficazes e a fase de comportamento não linear nas amostras de GFRP testadas.

3.4 Caracterização mecânica da argamassa

A caracterização mecânica da argamassa é uma etapa fundamental na validação das propriedades e o comportamento da argamassa em estudo. Os ensaios de caracterização foram realizados nas instalações do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, LEST-UM.

O processo de caracterização mecânica da argamassa permite avaliar as propriedades da argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC) tendo em conta as várias amassaduras efetuadas. A caracterização mecânica da argamassa inclui diversos ensaios, nomeadamente o estudo da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da resistência à flexão em provetes de argamassa.

Previamente à realização dos ensaios de caracterização mecânica da argamassa, os provetes cilíndricos, prismáticos e os *dogbones* foram regularizados com recurso a uma máquina existente no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho-(LEST-UM). Como se apresenta na Figura 3.23



a) Máquina utilizada para regularização dos provetes



b) Provete prismático regularizado



c) Provete *dogbone* antes da regularização



d) Provete *dogbone* depois da regularização



e) Provete cilíndrico antes da regularização



f) Provete cilíndrico depois da regularização

Figura 3.23 Regularização dos provetes utilizados na caracterização mecânica

3.4.1 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é determinado através da aplicação de ciclos de carga e descarga entre níveis de carregamento que solicitam o comportamento elástico da argamassa em análise. Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade foram realizados em dois provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Os ensaios foram realizados 61 dias após as correspondentes betonagens.

Os ensaios para determinação do módulo de elasticidade são realizados numa prensa constituída por um grupo hidráulico associado a um atuador com 200 kN de capacidade máxima de carga e um transdutor interno para controlo de ensaio.

Na configuração de ensaio, visualiza-se a existência de dois anéis posicionados no centro dos provetes e separados entre si a 1/3 da altura do provete, o que corresponde a 66.66 mm. No anel superior são colocados três LVDT's (LVDT 125468; LVDT 164440, LVDT 164441), dispostos simetricamente entre si e formando ângulos de 120°. As leituras dos LVDT's registam o deslocamento relativo entre os anéis. Os três LVDT's utilizados tem um campo de leitura de +/- 5 mm. Como representado na Figura 3.25.

O ensaio é não destrutivo. A determinação do módulo de elasticidade baseia-se num procedimento de carga e descarga em regime elástico do comportamento do material, repetido ao longo de vários ciclos até se obter convergência de valores entre ciclos.

Para a determinação do módulo de elasticidade não foi possível ensaiar nenhum provete cilíndrico à compressão previamente para se poder tirar a tensão máxima. Sendo assim, considerou-se uma amplitude de 60 kN que corresponde ao patamar superior de tensão máxima de 7.45 MPa, em cada ciclo (Figura 3.24). O patamar de tensão máxima deve ser mantido constante durante 60 s. A frequência utilizada foi de 2 Hz e a velocidade de ensaio usada foi de 2 kN/s. Para este ensaio foram considerado cinco ciclos de carga-descarga.

Para o primeiro cilindro a ser submetido a compressão foi utilizada uma tensão inicial 0.04 MPa e no segundo cilindro considerou-se tensão inicial de 0.03 MPa. Sendo que o cálculo do módulo de elasticidade secante estabilizado é realizado segundo a norma EN 12390-13 (2012).

O módulo de elasticidade secante estabilizado, $E_{c,s}$, é calculado de acordo com a equação (3.1),

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (3.1)$$

em que,

σ_a – é a tensão máxima aplicada, em MPa;

σ_b – é a tensão inicial, em MPa;

$\varepsilon_{a,3}$ – é a extensão para a tensão σ_a medida no 3º ciclo de carga;

$\varepsilon_{b,2}$ – é a extensão para a tensão σ_b medida no 2º ciclo de carga.

Os valores obtidos do ensaio de módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 3.6, com indicação dos provetes testados, amassadura, tempo de cura (idade), módulo de elasticidade obtida para cada provete e a média do módulo de elasticidade.

Tabela 3.6. Resultados dos Módulos de Elasticidade obtidos em cilindros

Provete	Amassadura	Idade (dias)	E_{cm} (GPa)	$E_{cm,média}$ (GPa)
C1	1ª	61	7,61	8,28
C2	2ª	61	8,94	

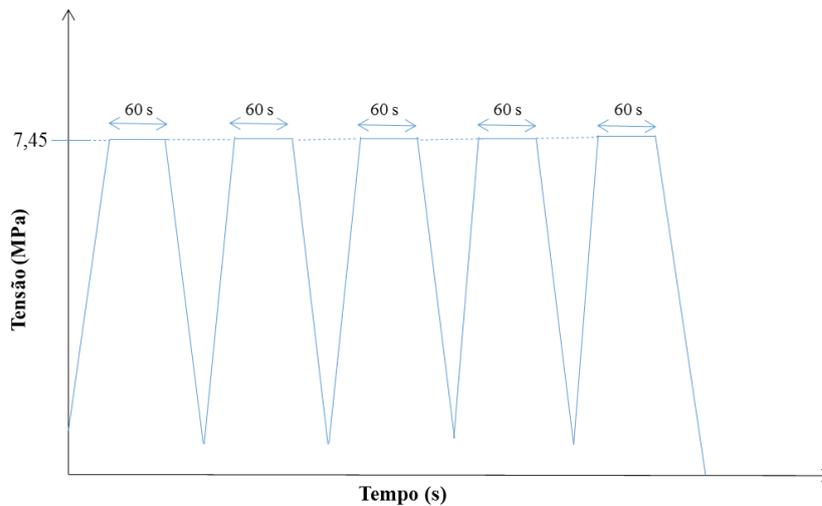


Figura 3.24 Esquema representativo dos ciclos de carga-descarga



Figura 3.25. Montagem do ensaio para determinação do módulo de elasticidade

3.4.2 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão da argamassa em estudo é realizada recorrendo ao ensaio à compressão definido na norma EN 13279-2 (2004). Sendo o ensaio à compressão um ensaio destrutivo opta-se por realizá-lo depois do ensaio de determinação do módulo de elasticidade. Os ensaios à compressão foram realizados nos provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, aos 61 dias após a betonagem. Por indisponibilidade de moldes, aos só foi possível betonar dois provetes cilíndricos. Os dois provetes cilíndricos disponíveis para ensaio correspondem a amassaduras diferentes. Um corresponde à primeira amassadura realizada (Cilindro 1) e Cilindro 2 corresponde à segunda amassadura, realizada no primeiro dia de betonagem. Para os restantes dias de betonagem não foi possível utilizar os moldes cilíndricos visto que estavam indisponíveis.

Os ensaios de compressão são realizados numa prensa constituída por um grupo hidráulico associado a um atuador com 2000 kN de capacidade máxima de carga, um transdutor interno e um transdutor externo para controlo de ensaio.

Os ensaios de compressão foram realizados com controlo de deslocamento a uma velocidade constante de 0.002 mm/s imposta no êmbolo do atuador, até à rotura do provete. A resistência à compressão da argamassa é avaliada através da determinação da tensão máxima de compressão. A montagem do ensaio de compressão é representada na Figura 3.26.



Figura 3.26 Montagem do ensaio de compressão

A tensão de compressão é determina-se através da relação entre a força máxima aplicada pelo atuador e a área de contacto dos provetes, tal como definido na Equação(3.2).

$$f_c = \frac{F_{max}}{A_c} \quad (3.2)$$

em que :

- f_c representa a resistência à compressão expressa em N/mm²;
- F_{max} representa a carga máxima de compressão atingida expressa em N e;
- A_c é área transversal do cilindro expressa em mm.

Na Tabela 3.7 encontram-se os resultados obtidos para a resistência à compressão nos dois cilindros existentes.

Tabela 3.7 Resultados da resistências à compressão dos cilindros

Provete	Amassadura	Idade (dias)	Área (mm ²)	F_{max} (N)	σ (MPa)	$\sigma_{média}$ (MPa)
C1	1 ^a	61	7853,98	152100	19,37	20,65
C2	2 ^a	61	7853,98	172200	21,93	

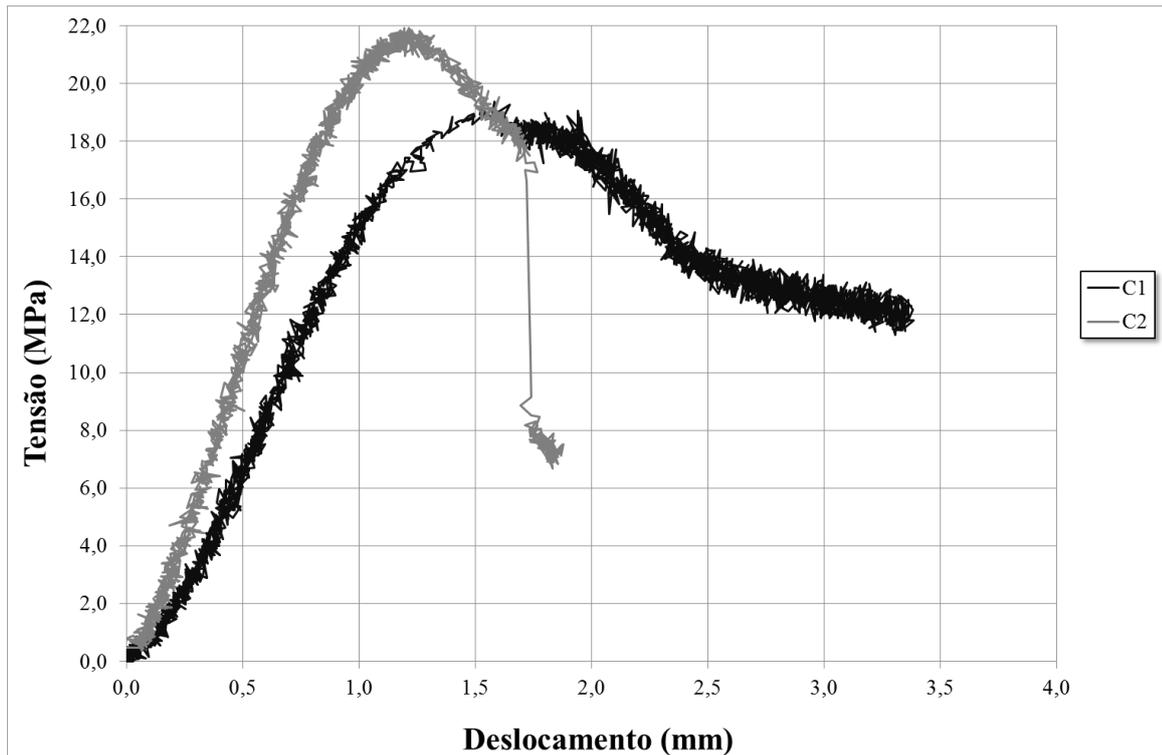


Figura 3.27 Curvas Tensão versus deslocamento dos ensaios de compressão

Com base na observação da Figura 3.28 e pela análise da Figura 3.27 é perceptível que o Cilindro 2 obteve a resistência à compressão mais elevada. Contudo, teve também a rotura mais frágil dos dois cilindro em estudo.



a) Rotura do Cilindro 1



b) Rotura do cilindro 2



c) Rotura dos dois cilindros ensaiados

Figura 3.28. Modo de rotura à compressão do Cilindro 1 e do Cilindro 2

3.4.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em aplicar uma carga de tração ao provete, até que este atinja a rotura. No início de cada ensaio é necessário garantir que os provetes se encontram perfeitamente alinhados com o equipamento. São colocadas chapas metálicas em ambas as faces dos provetes, designadas de *tabs*, posicionadas tanto no topo como no fundo do provete, com recurso a cola de elevada resistência. Antes de se iniciar o ensaio deve-se polir os *tabs*, para aumentar a aderência entre os *tabs* e as amarras que fixam o provete de ensaio. Este processo melhora as condições do ensaio.

Os ensaios de tração foram realizados na empresa CiviTest, uma vez que o equipamento disponível no Laboratório de Estrutura da Universidade do Minho não era apropriado.

Para obtenção da resistência à tração apenas foram considerados 2 dos 3 provetes *dogbones* produzidos visto que um deles foi destruído. Um dos provetes corresponde à primeira amassadura e o outro à segunda amassadura efetuada no primeiro dia de betonagem.

A geometria e as dimensões dos provetes de tipo *dogbone* encontra-se ilustrada na Figura 3.29 a). A única diferença existente entre os dois provetes testados é a espessura, sendo que o provete da primeira amassadura designado de P1 apresenta um espessura de 1,2 mm, enquanto que o provete correspondente à segunda amassadura e o designado de P2 contém um espessura de 1,4 mm. A variação da espessura está associada à regularização, que foi necessário efetuar nos provetes visto que estes apresentavam uma superfície superior do molde bastante irregular devido à utilização de fibras PAN na produção da argamassa. O provete P1 apresentava uma superfície superior mais irregular levando assim à obtenção de uma espessura ligeiramente inferior à espessura medida no provete P2.

Os ensaios para determinação da resistência à tração são realizados numa prensa constituída por um grupo hidráulico associado a um atuador com 50 kN de capacidade máxima de carga e um transdutor interno para controlo de ensaio. Os dois ensaios de determinação da resistência à tração foram realizados na empresa CiviTest.

Os ensaios são efetuados com controlo de deslocamento com uma velocidade de ensaio de 0.10 mm/min.

Para determinação da tensão de tração, visto que não existem normas para provetes de tipo *dogbone*, recorre-se novamente à equação (3.2), considerando que A_c é agora a área da secção transversal do provete de tipo *dogbone*.

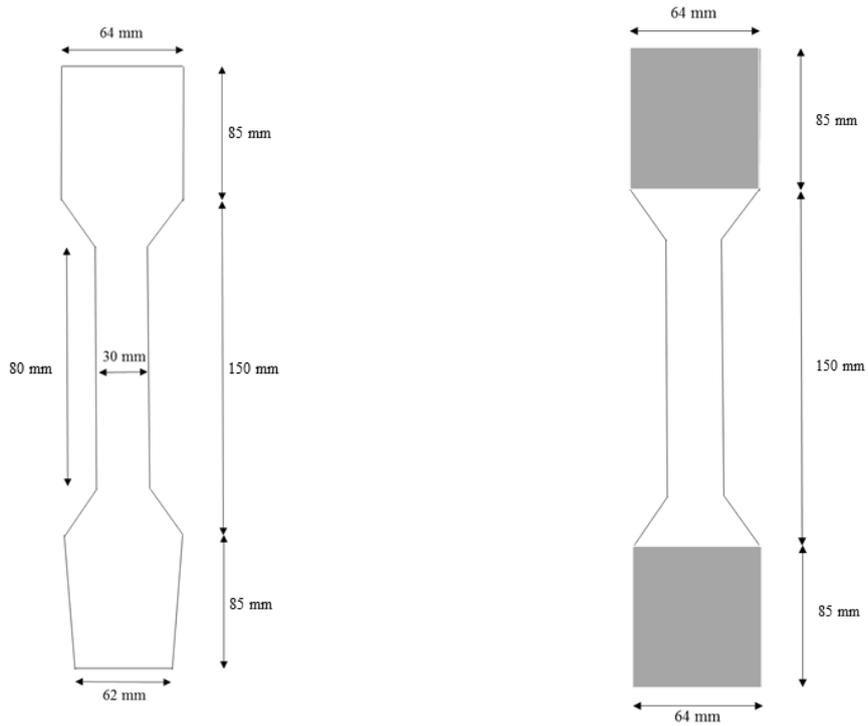
Atendendo à aplicação da equação (3.2) encontra-se na Tabela 3.8 os resultados obtidos das resistências à tração nos provetes de tipo *dogbone* testados.

Tabela 3.8 - Resultados obtidos no ensaio de tração em provetes de tipo *dogbone*

Provete	Amassadura	Idade (dias)	σ_t^{max} (MPa)	$\sigma_t^{max}, média$ (MPa)
P1	1 ^a	85	2,87	2,95
P2	2 ^a	85	3,02	

A área transversal do provete P1 é $30 \times 12 \text{ mm}^2$ e a área transversal do provete P2 é $30 \times 14 \text{ mm}^2$, tal como se pode visualizar no esquema do provete de tipo *dogbone* ilustrado na Figura 3.29 a), as dimensões de 12 mm e 14 mm correspondem à espessura dos provetes P1 e P2, respetivamente.

Na Figura 3.29 b) observam-se as dimensões dos *tabs* metálicos utilizados. Estes apresentam uma área retangular de $64 \times 85 \text{ mm}^2$, em que a largura o *tab* apresenta 64 mm e o seu comprimento corresponde a 85 mm.



a) Geometria e dimensões do provete dog bone b) Geometria e dimensões dos tabs metálicos

Figura 3.29 Geometria e forma dos provetes de tipo *dogbone* e *tabs* utilizados

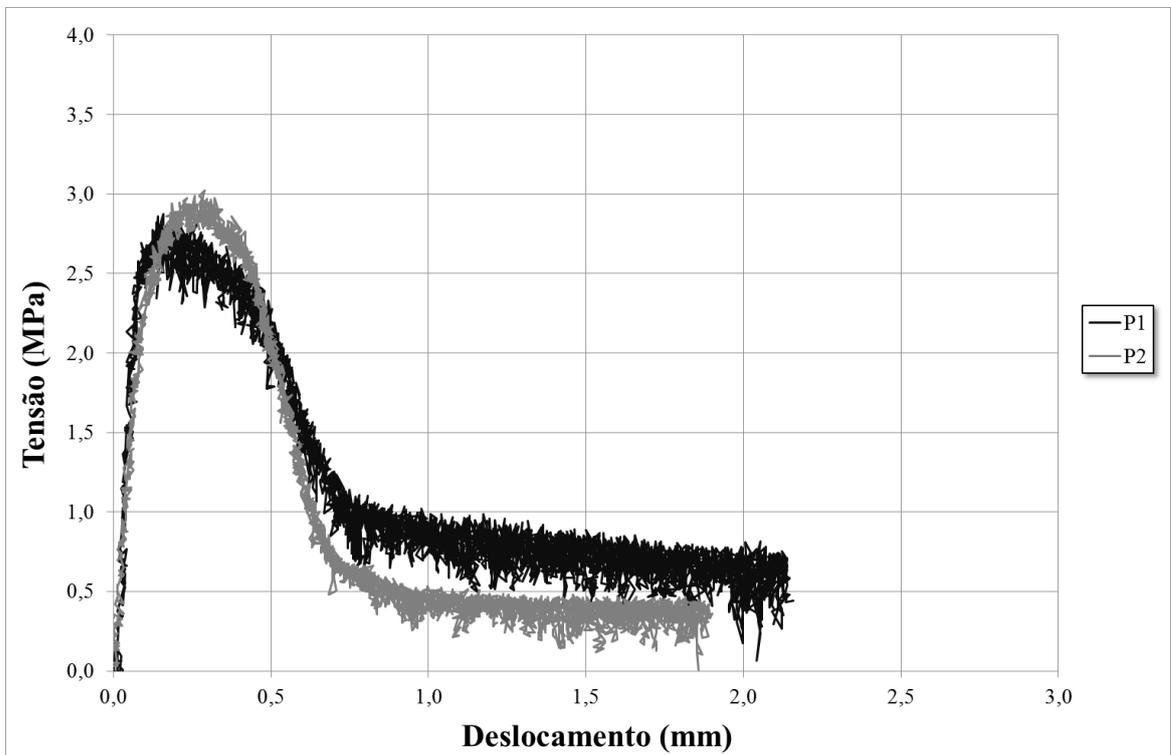


Figura 3.30 Curva Tensão-Deslocamento associado ao ensaio de tração efetuados em provetes de tipo *dogbone*

Os desenvolvimentos das curvas tensão-deslocamento, tal como se pode visualizar na Figura 3.30 são muito semelhantes. Pode-se constatar que no provete P2 se obteve a maior tensão de tração. O provete P2 apresenta uma perda de carga mais acentuada e rápida do que o provete P1 após ser atingida a carga máxima. A Figura 3.31 apresenta os modos de rotura associados ao ensaio de tração efetuados nos provetes de tipo *dogbone*.



a) Face frontal do provete P1



b) Face retaguarda do provete P1



c) Face frontal do provete P2



d) Face retaguarda do provete P2

Figura 3.31 Modos de rotura obtidos nos provetes de tipo *dogbone*

3.4.4 Ensaio de flexão

Para análise da flexão dos provetes são realizados três tipos de ensaio, nomeadamente, ensaio de flexão em três pontos (TPB-Three Point Bending); ensaio de flexão em quatro pontos (FPB-Four Point Bending) e ensaio de flexão em três pontos com entalhe (NTPB-Notched Three Point Bending)

Os ensaios de flexão em provetes de argamassa são realizados numa prensa constituída por um grupo hidráulico, um atuador com 25 kN de capacidade máxima de carga e um transdutor interno para controlo de ensaio. Todos os provetes de argamassa submetidos aos ensaios de flexão são normalizados apresentam uma geometria de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ conforme a norma EN 1015-11 (1999).

Os ensaios de flexão foram realizados com controlo de deslocamento com uma velocidade de 0.005 mm/s, de forma a ser possível obter a resposta para além do pico de carga.

Ensaio de flexão em três pontos (TPB-Three Point Bending)

O equipamento utilizado neste ensaio é composto por um suporte (base metálica), onde é colocado o provete prismático simplesmente apoiado em dois apoios, que controla os deslocamentos verticais, permitindo a rotação e os deslocamentos horizontais, um braço hidráulico para aplicação da carga, transdutores e um computador para registar a deformação vertical no provete segundo o seu eixo vertical para cada ciclo de carga. Este ensaio tem a designação de flexão em três pontos.

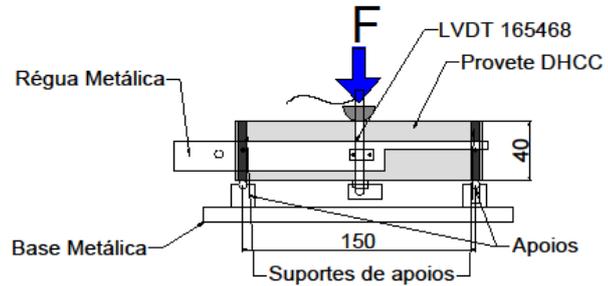
O ensaio de flexão foi controlado por meio de um LVDT externo (LVDT 164442) montado no atuador, que apresenta um campo de medição de $\pm 10 \text{ mm}$. A deformação por flexão foi medida por outro transdutor ligado ao provete de argamassa, colocado a meio do provete na zona inferior do mesmo (LVDT 125468). Este transdutor apresenta um campo de aplicação de $\pm 5 \text{ mm}$, como apresentado na Figura 3.32.

Foram ensaiados à flexão em três pontos sete provetes escolhidos aleatoriamente a partir de várias amassaduras efetuadas.

Na Figura 3.32 são apresentadas representações da instrumentação e imagem do esquema experimental efetuado na face frontal e na retaguarda do provete prismático, para a realização do ensaio de flexão em 3 pontos (TPB-Three Point Bending).



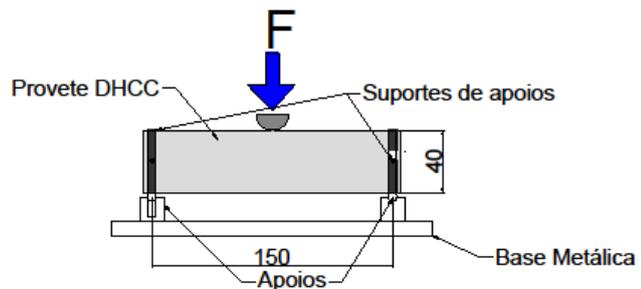
a) Vista Frontal



b) Esquema Vista Frontal



c) Vista da retaguarda



d) Esquema da Vista retaguarda

Figura 3.32 Configuração do ensaio TPB

A resistência à flexão, f , expressa em N/mm^2 , é determinada tendo em conta a área do provete e a correspondente altura, aplicando-se a equação (3.3), definida pela norma EN 1015-11 (1999),

$$f = 1,5 \times \frac{Fl}{bd^2} \quad (3.3)$$

onde,

- F é a carga máxima aplicada (N);
- l é a distância entre apoios (mm);
- b é a largura do provete (mm);
- d é a altura do provete (mm).

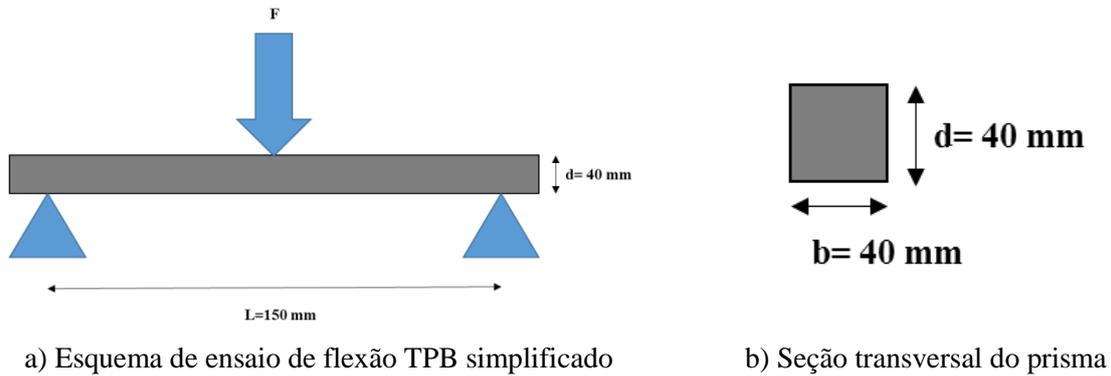


Figura 3.33 Ensaio de flexão em 3 pontos

Na Tabela 3.9 são indicados os resultados de resistência à flexão obtidos no ensaio de flexão em 3 pontos.

Tabela 3.9 Resultados obtidos em ensaios de flexão em 3 pontos para a determinação da resistência à flexão

Provete	Amassadura	Idade (dias)	σ_{\max} (MPa)	$\sigma_{\max, \text{média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
3A	3 ^a	57	7,131	7,890	0,998	12,65
3C	3 ^a	57	6,823			
4A	4 ^a	57	8,261			
4B	4 ^a	57	7,703			
5A	5 ^a	54	8,516			
5B	5 ^a	54	9,846			
5C	5 ^a	54	6,955			

O Figura 3.34 apresenta as curvas força-deslocamentos obtidos a meio do provete prismáticos quando submetido ao ensaio de flexão em 3 pontos (TPB), sendo que as curvas evidenciam desenvolvimentos similares, o provete 5B é o que tem maior resistência à flexão e o provete 3 contém o pior registo de resistência à flexão. Todos apresentam rotura frágil, visto que após atingir o pico, a carga diminui brutalmente, sem recuperação.

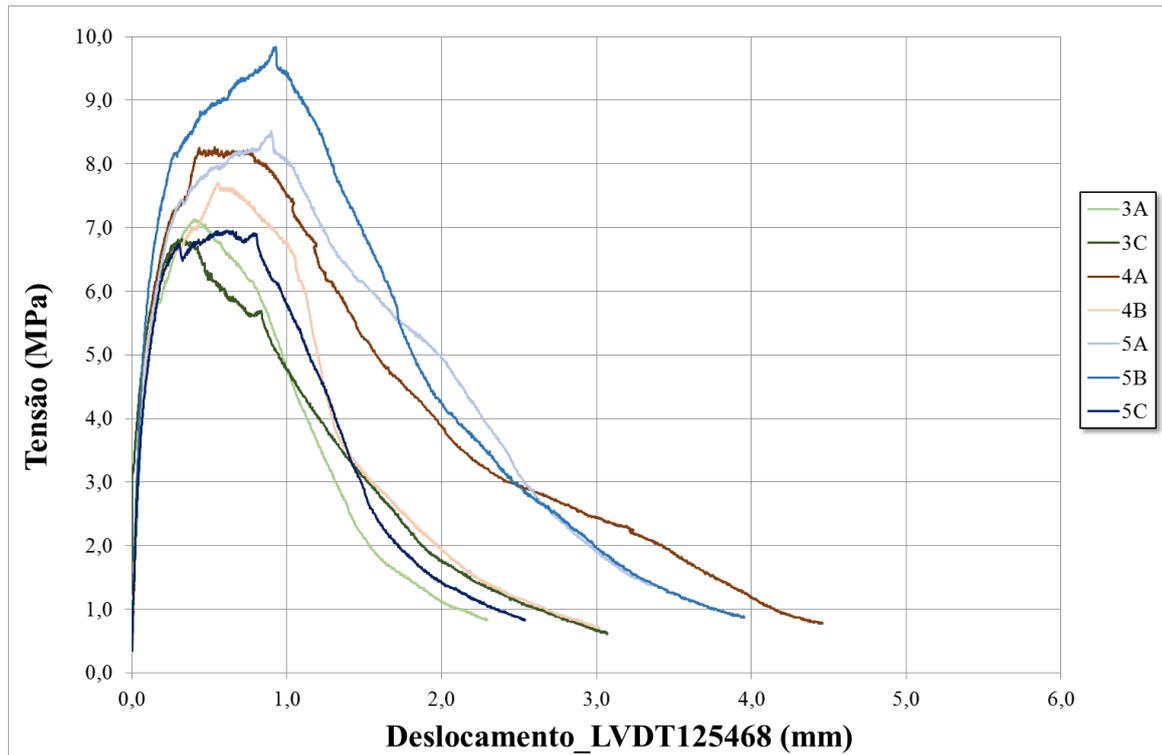


Figura 3.34 Curva Tensão-Deslocamento medido a meio do provete prismático pelo transdutor LVDT125468

No Figura 3.35 apresentam-se alguns exemplos dos modos de rotura obtidos nos provetes prismáticos, quando estes são submetidos a flexão em 3 pontos (TPB).

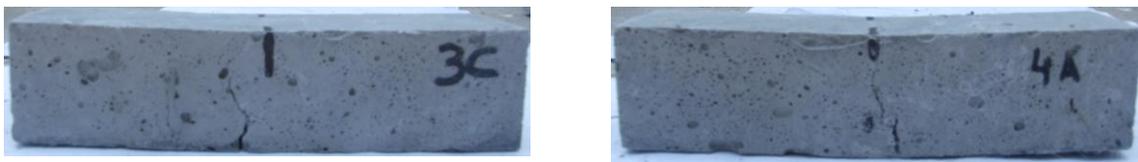


Figura 3.35 Alguns exemplos do modo de rotura nos prismas ensaiados à flexão em 3 pontos

Ensaio de flexão em três pontos com entalhe

Para obter a resistência à flexão e para ser possível medir a abertura da fenda foram realizados ensaios de flexão em três pontos com entalhe (NTPB- Notched Three Point Bending).

Para este ensaio foram utilizados sete provetes escolhidos aleatoriamente a partir de várias amassaduras.

O entalhe é realizado a meio vão do provete de argamassa e tem profundidade de corte igual a 10 mm e largura igual a 2 mm. Este ensaio foi realizado para determinar a contribuição das fibras para a resistência residual pós-fissuração.

Para este ensaio, coloca-se uma régua metálica que é fixa ao provete nos alinhamentos dos suportes na face frontal do provete. De seguida, coloca-se com recurso a cola quente as cantoneiras e batentes de alumínio que serviram para fixar os LVDT's. Na face da retaguarda do provete é utilizada apenas uma cantoneira em alumínio colocada num dos lados da abertura e um batente aplicado no outro lado da abertura para se poder fixar o transdutor que vai determinar a abertura da fenda e assegurar o controlo do ensaio.

O LVDT 125468 é colocado na face frontal do provete e tem como função medir a deformação por flexão do provete. Este apresenta um campo de leitura de ± 5 mm. Na retaguarda do provete é instalado o LVDT 164441 que têm um campo de leitura ± 5 mm. Este transdutor mede a evolução da abertura da fenda (CMOD-Crack Mouth Opening Displacement). O ensaio de flexão foi controlado por meio de um LVDT externo (LVDT 164442) montado no atuador, que apresenta um campo de leitura de ± 10 mm. A configuração deste ensaio encontra-se ilustrada Figura 3.36.

Foram ensaiados à flexão em três pontos com entalhe em sete provetes provenientes de várias amassaduras.

Na Figura 3.36 são apresentados esquemas representativos da instrumentação e imagem do esquema experimental efetuado nas faces frontal e retaguarda do provete prismático para a realização do ensaio de flexão em 3 pontos com entalhe (NTPB-Notched Three Point Bending).

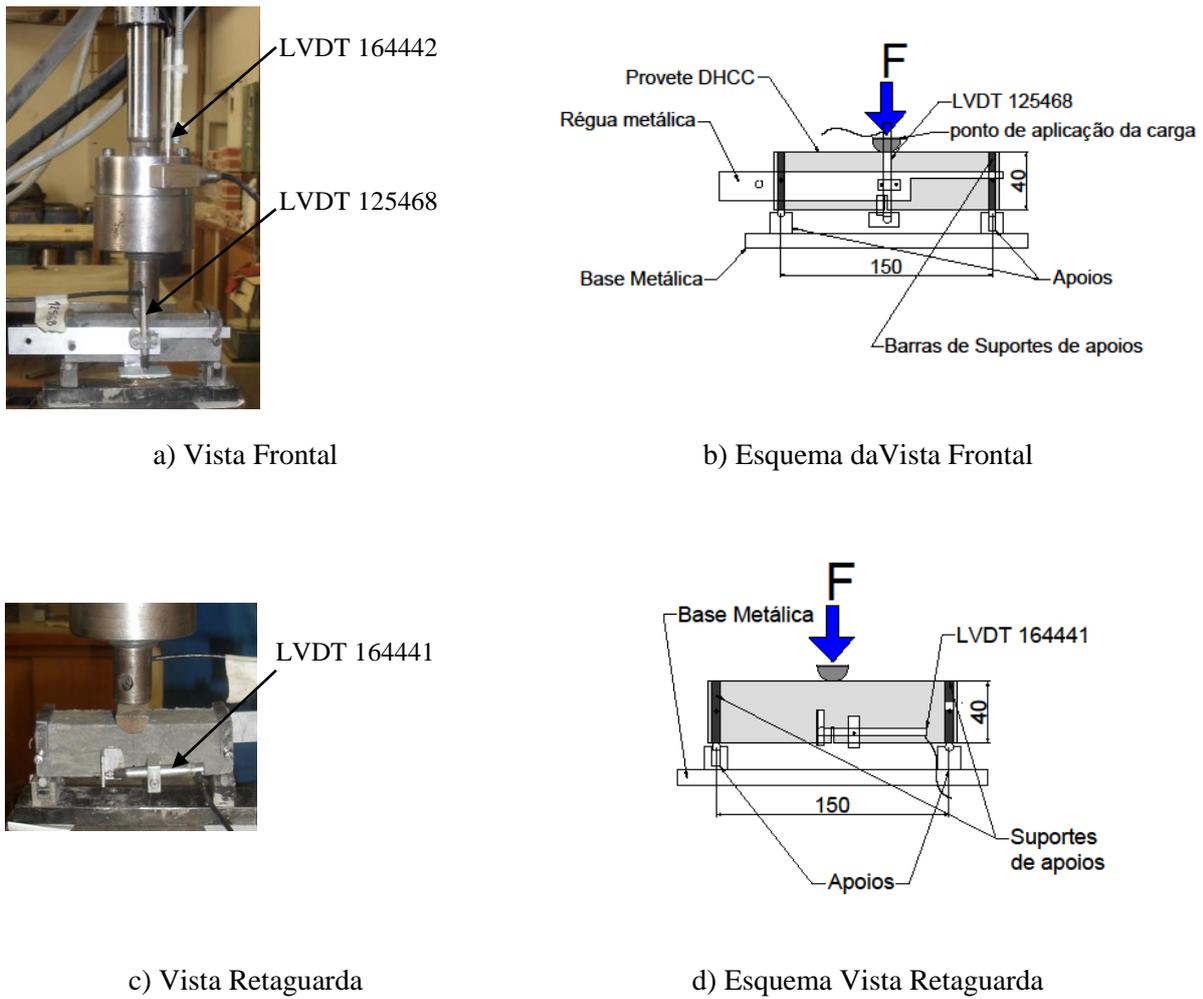
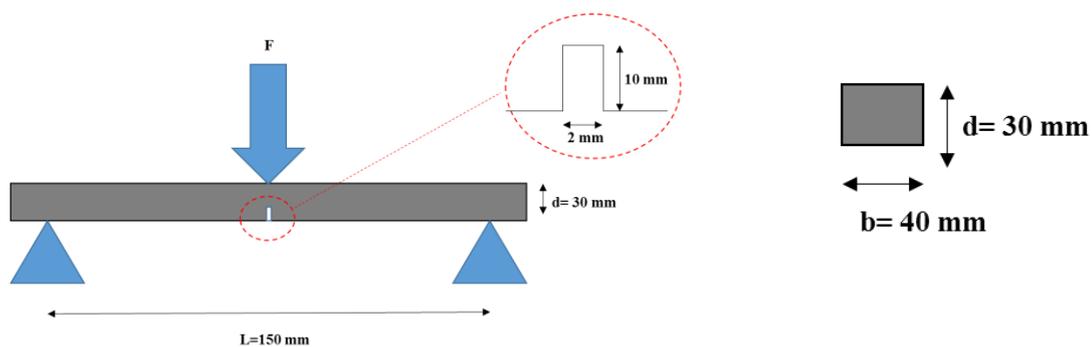


Figura 3.36 Configuração do ensaio NTPB

A resistência à flexão, f , expressa em N/mm^2 , é determinada tendo em conta a área do provete e a correspondente altura, sendo aplicada a equação (3.3) referida anteriormente no ensaio de flexão de três pontos (TPB).



a) Ensaio de flexão NTPB simplificado e pormenorização do entalhe

b) Seção transversal do prisma

Figura 3.37 Ensaio de flexão em 3 pontos com entalhe

Na Tabela 3.10 apresentam-se os resultados obtidos para a tensão de flexão máxima atingida nos sete provetes testados. A Figura 3.38 representa o desenvolvimento da curva tensão-deslocamento associado ao deslocamento da fissura desenvolvida na boca de entalhe (CMOD_LVDT164441), sendo de constatar que as curvas apresentam desenvolvimentos semelhantes.

Tabela 3.10 Resultados obtidos para a resistência à flexão em ensaio de 3 pontos com entalhe

Provete	Amassadura	Idade (dias)	σ_{\max} (MPa)	$\sigma_{\max, \text{média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
1A	1 ^a	61	7,491			
1B	1 ^a	61	7,752			
1C	1 ^a	61	7,391			
1D	1 ^a	61	7,586	7,262	0,666	9,17
2A	2 ^a	61	7,838			
2B	2 ^a	61	7,033			
6A	6 ^a	54	5,744			

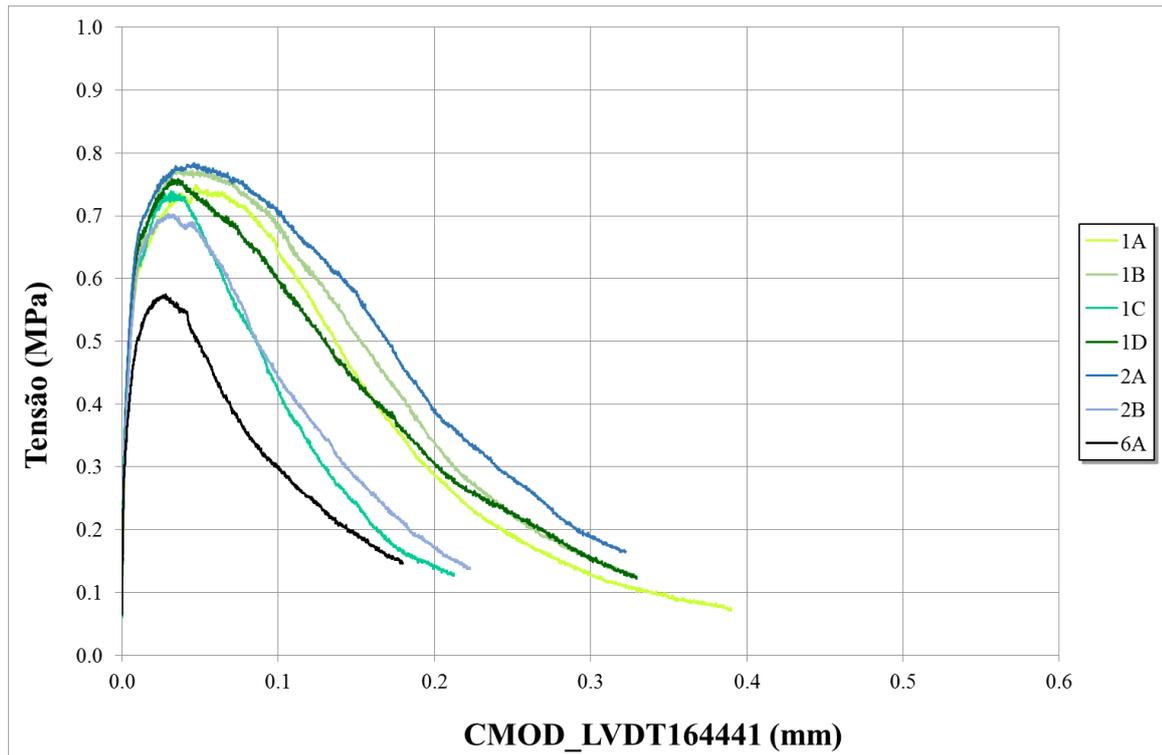


Figura 3.38 Curva Tensão-Deslocamento medido à boca de entalhe no transdutor LVDT164441

Nos cálculos efetuados só se consideraram os resultados dos provetes testados em que se verificou que a fenda se desenvolveu no alinhamento do entalhe realizado. Apresentam-se na Figura 3.39 alguns exemplos associados ao desenvolvimento da fenda no entalhe.

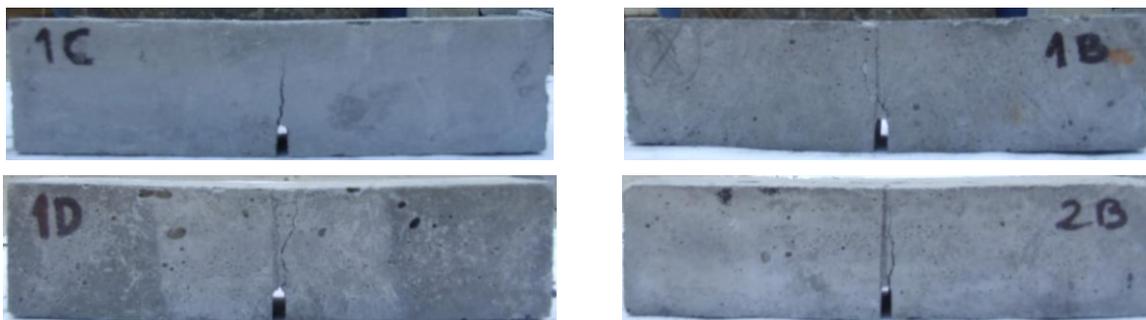


Figura 3.39 Exemplos do modo de rotura apresentado pelos prismas sujeitos à flexão em 3 pontos com entalhe

Ensaio de flexão em quatro pontos

O equipamento utilizado neste ensaio é composto por um suporte (base metálica), onde é colocado o provete. Este tipo de ensaio consiste em sujeitar um provete prismático apoiado em quatro apoios, a um carregamento cíclico transmitido através dos dois apoios internos, localizados a um terço dos extremos da viga e simétricos em relação ao centro do provete. O

carregamento deve ser realizado na direção vertical, perpendicularmente ao eixo longitudinal do provete. Este ensaio tem a designação de flexão em quatro pontos (FPB-Four Point Bending).

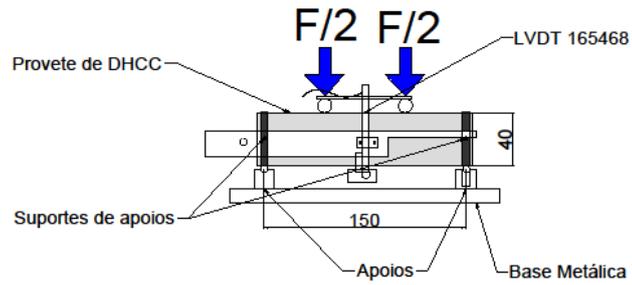
O ensaio de flexão foi controlado por meio de um LVDT externo (LVDT 164442) montado no atuador, que apresenta um campo de leitura de ± 10 mm. A deformação vertical foi medida por outro LVDT ligado ao provete de argamassa e colocado a meio do provete na zona inferior do mesmo (LVDT 125468) e com comprimento de leitura de ± 5 mm. O esquema deste ensaio é ilustrado na Figura 3.40.

Foram ensaiados oito provetes de diferentes amassaduras efetuadas aleatoriamente à flexão em quatro pontos.

Na Figura 3.40 são apresentados esquemas representativos da instrumentação e imagem do esquema experimental efetuado nas faces frontal e retaguarda do provete prismático para a realização do ensaio de flexão em 4 pontos (FPB-Four Point Bending).



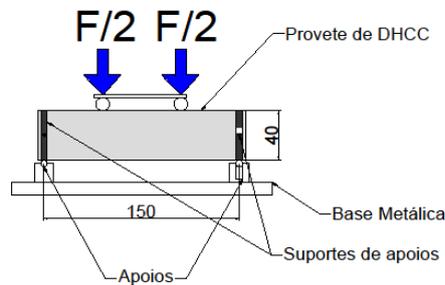
a) Vista Frontal



b) Esquema da Vista Frontal



c) Vista Retaguarda



d) Esquema da Vista Retaguarda

Figura 3.40 Configuração do ensaio FPB

A resistência à flexão, f , expressa em N/mm^2 , é determinada tendo em conta a área do provete e a correspondente altura. A equação aplicada é muito parecida com a recomendada pela norma EN1015-11 (1999). Existe uma pequena diferença entre a equação proposta na norma EN1015 11 (1999) e a equação adotada para o cálculo da resistência à flexão em 4 pontos: para a flexão em 4 pontos (FPB) o L representa a diferença entre a distância entre apoios e a distância entre cargas aplicadas ($L-L_i$) enquanto o L da equação (3.3) é a distância entre apoios:

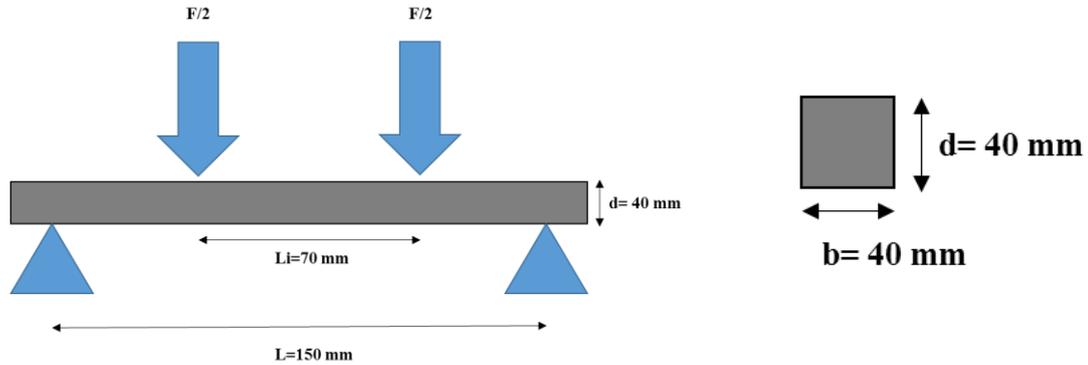
A equação (3.4) é utilizada para obter a resistência à flexão em 4 pontos (FPB),

$$f = 1,5 \times \frac{F \times (L - L_i)}{bd^2} \quad (3.4)$$

em que:

- F é a carga máxima aplicada (N);
- L é a distância entre apoios (mm);

- L_i é a distância entre as cargas aplicadas;
- b é a largura do provete (mm);
- d é a altura do provete (mm).



a) Esquema de ensaio de flexão FPB simplificado

b) Seção transversal do prisma

Figura 3.41 Ensaio de flexão em 4 pontos

Na Tabela 3.11 apresentam-se os valores das tensões de tração máximas obtidas nos 8 provetes testados.

Tabela 3.11 Resultados de resistência à flexão obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos

Provete	Amassadura	Idade (dias)	σ_{max} (MPa)	$\sigma_{max,média}$	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
				(MPa)		
1E	1 ^a	61	7,8417			
1F	1 ^a	61	7,1278			
3D	3 ^a	57	8,1333			
3E	3 ^a	57	7,6083	7,6183	0,5489	7,21
3F	3 ^a	57	6,7444			
5D	5 ^a	54	7,3252			
5E	5 ^a	54	8,6184			
6B	6 ^a	54	7,5469			

Pela análise da Figura 3.42 verifica-se que inicialmente quase todos os provetes testados apresentam desenvolvimento semelhante, em que todos apresentam diferentes valores de resistência à flexão. O provete 5E obteve o maior valor de resistência à flexão e o provete 3F obteve o pior resultado de resistência à flexão. Os restantes provetes apresentam valores de carga muito próximos entre si. Nestes ensaios, foi visível a microfissuração do provete de

argamassa. Este efeito que está muito associado ao uso da argamassa DHCC, que apresenta uma ultra elevada ductilidade e tem como característica principal a ocorrência de microfissuração.

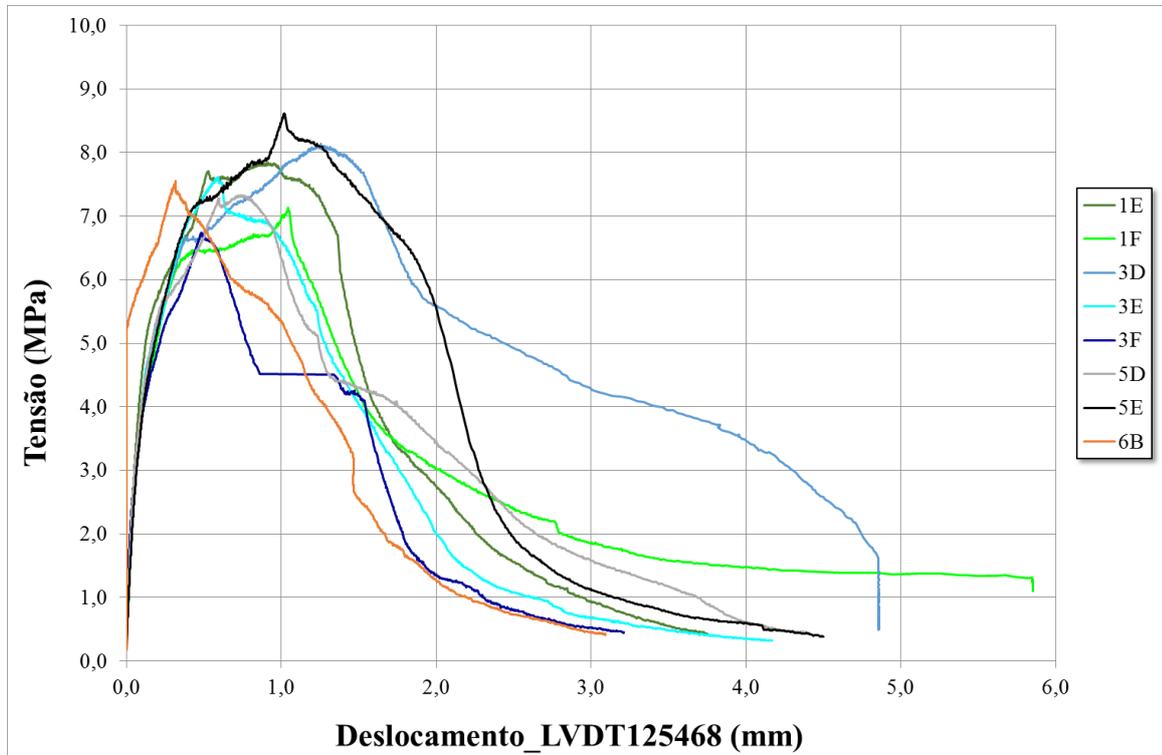


Figura 3.42 Curva Tensão-Deslocamento obtido no transdutor 125468 colocado a meio do provete prismático

Os provetes testados apresentam microfissuração visível, que está associada à utilização de fibras PAN, a ação de ponte entre fibras faz com se desenvolvam microfissuras nas imediações da macro-fenda é uma das propriedades da argamassa DHCC, ocorre desenvolvimento de microfissuras difusas até atingir níveis elevados de deformação, isto é, quando ocorre a macrofissura, que conduz à rotura do provete GFRP (Figura 3.43).

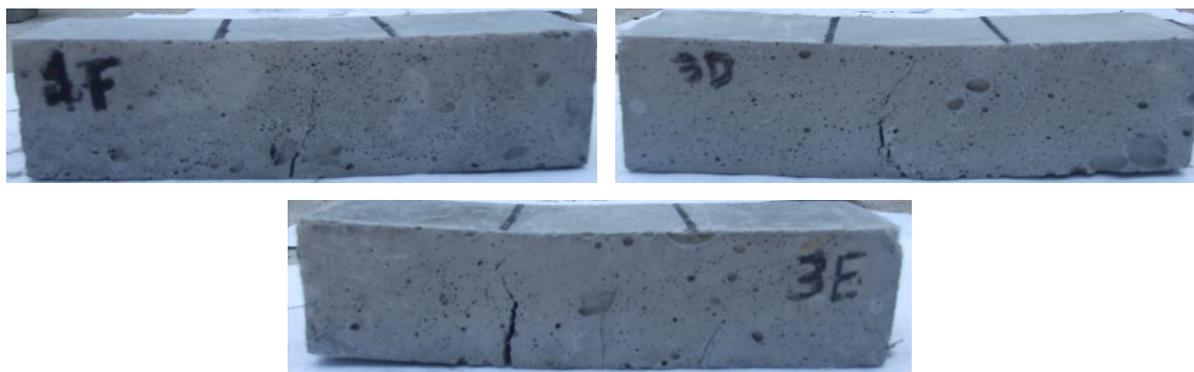


Figura 3.43 Exemplos de alguns dos modos de rotura dos provetes prismáticos sujeito à flexão em 4 pontos

Apresenta-se o esquema da Figura 3.44 onde é visível a organização dos ensaios de flexão pelo tipo de ensaio efetuado, pelo número de provetes ensaiados dependendo da amassadura efetuada.

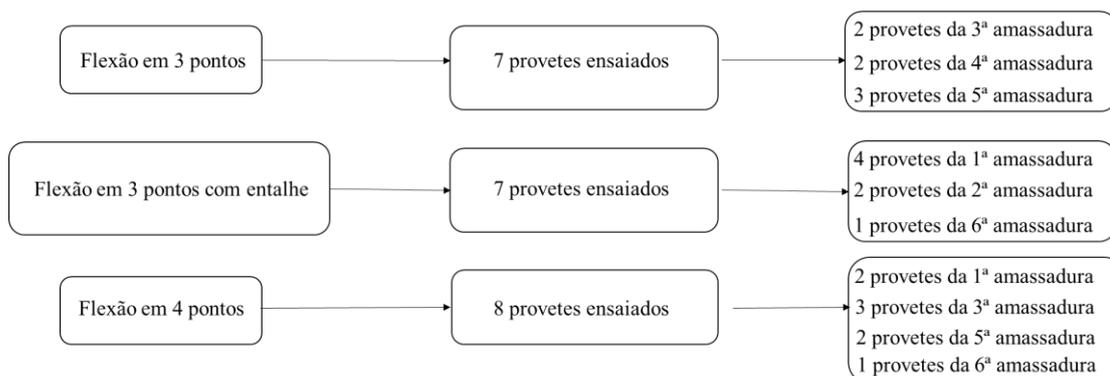


Figura 3.44 Esquema de identificação do ensaio e correspondente amassadura

CAPÍTULO 4

Ensaio Experimentais de tipo *pull-out*

4.1 Introdução

No presente capítulo é apresentado todo o programa experimental relativo aos ensaios de arranque de tipo *pull-out* realizados e são apresentados os resultados obtidos. A campanha experimental é executada com recurso a provetes prismáticos retangulares de argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC) com conectores de GFRP embebidos.

No ensaio de tipo *pull-out*, a força de tração é aplicada diretamente ao conector de GFRP. A campanha experimental apresentada neste capítulo tem como objetivo principal estudar o conector que fica embebido na argamassa que apresenta geometria e tipologias diferentes de conexão. Com base nas variações de geometria impostas, na existência de furos e na espessura do conector GFRP (4 mm ou 6 mm), pretende-se comparar os aspetos mais condicionantes para o comportamento do conector quando este é submetido a uma força de tração. Estas condicionantes são estudadas a partir dos resultados obtidos em ensaios de arranque (de tipo *pull-out*) realizados.

O ensaio de tipo *pull-out* permite quantificar a capacidade resistente do conector quando este sujeito à aplicação de uma força de tração. Este ensaio permite fazer comparações entre os desempenhos das diferentes soluções apresentadas.

4.2 Configuração de ensaio pull-out

O ensaio de tipo *pull-out* é um ensaio de arranque, onde o elemento de betão é fixo à base da prensa de ensaio e a força de tração é diretamente aplicada no conector. Este ensaio é realizado com controlo de deslocamento. Durante a realização do ensaio, a carga é transmitida do atuador para a amarra metálica e desta para o conector em GFRP.

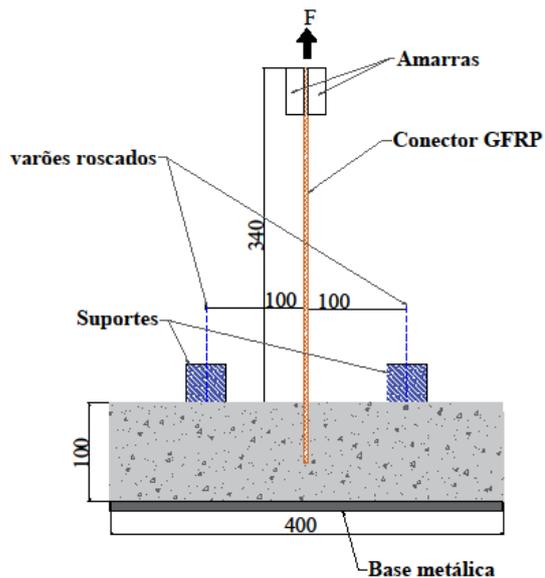
O transdutor interno da máquina serve de controlo ao ensaio, impondo uma velocidade de ensaio de 0.5 mm/min. A força de tração aplicada pelo atuador é determinada com a utilização de uma célula de carga de 200 kN de capacidade máxima de carga.

4.2.1 Equipamento utilizado

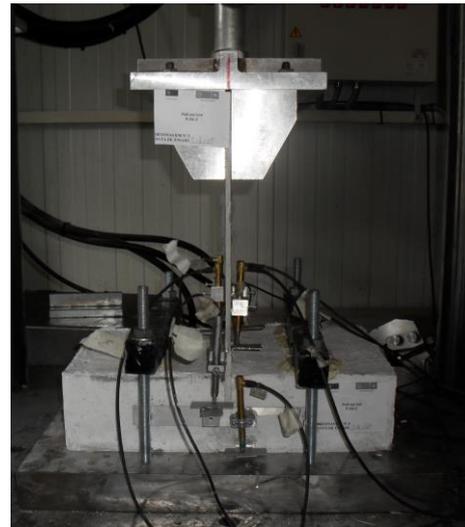
Os ensaios *pull-out* utilizados na campanha experimental são realizados no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, LEST-UM na prensa MicroTeste (SCM4000).

Os equipamentos utilizados nos ensaios de tipo *pull-out* são : grupo hidráulico, prensa, amarras e computador. Para além dos materiais referidos ainda são necessários outros acessórios como varões roscados, parafusos e barras de aço.

O ensaio de arranque (*Pull-out*) utilizado para este trabalho baseia-se na aplicação de tração direta ao perfil de GFRP. Para a realização do ensaio utiliza-se uma amarra de chapas dentadas fixa no conector GFRP e o provete de argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC) é fixo à base da prensa MicroTeste (SCM4000) através de duas barras de aço de seção quadrada com 40 mm de aresta. Estas barras de aço são presas a uma base fixa por meio de quatro varões roscados, tal como representado na Figura 4.1.



a) Esquema de ensaio



b) Configuração de ensaio

Figura 4.1 Configuração do ensaio do tipo *pull-out*

Na campanha experimental efetuada no âmbito deste trabalho, é utilizada uma célula de carga de 200 kN, que tem como função controlar a força de tração aplicada pelo atuador, o que permite uma precisão nos resultados obtidos.

O carregamento é aplicado com controlo de deslocamento e utiliza-se uma velocidade inicial de ensaio de 0.5 mm/min, a exceção do provete I-E6-1, primeiro provete ensaado, utilizou-se uma velocidade inicial de 0.6 mm/min. Para melhor compreensão do desenvolvimento da curva força-escorregamento após atingir o pico carga optou-se por baixar a velocidade inicial ligeiramente para os restantes ensaios efetuados. Depois de se atingida a carga máxima, quando se atingia aproximadamente um deslocamento interno igual a 10 mm, a velocidade era aumentada para 1.2 mm/min, de modo a que o ensaio decorresse o mais rápido possível, e sem que houvesse qualquer perda ou dano da informação recolhida relativamente ao comportamento do provete de tipo *pull-out*.

4.2.2 Geometria dos provetes tipo *pull-out*

A análise experimental teve início depois dos 40 dias de idade de tempo de cura da argamassa. Os provetes do tipo *pull-out* foram realizados em argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC) e com conectores em GFRP. As características geométricas dos provetes de argamassa

são sensivelmente iguais. A área de contacto com a argamassa varia consoante existem aberturas (conectores perfurados e indentados) ou não (conectores lisos), dependendo assim da tipologia do conector GFRP que se está a ensaiar, já que a profundidade de conector inserido na laje de argamassa é sempre a mesma.

Os conectores estão embebidos nas lajes de argamassa ultra elevada ductilidade, DHCC, a uma profundidade de 60 mm, o que garante um recobrimento de 40 mm, que é dado pela distância entre a extremidade inferior do conector GFRP e a face inferior da laje de de argamassa.

As lajes de argamassa possuem uma geometria de $400 \times 250 \times 100 \text{ m}^3$. Os conectores de GFRP a utilizar possuem a geometria de $400 \times 250 \times 4 \text{ m}^3$ ou $400 \times 250 \times 6 \text{ m}^3$ (4 mm e 6 mm de espessura, respetivamente). Esquemas dos provetes e as respetivas dimensões são apresentadas na Figura 4.2.

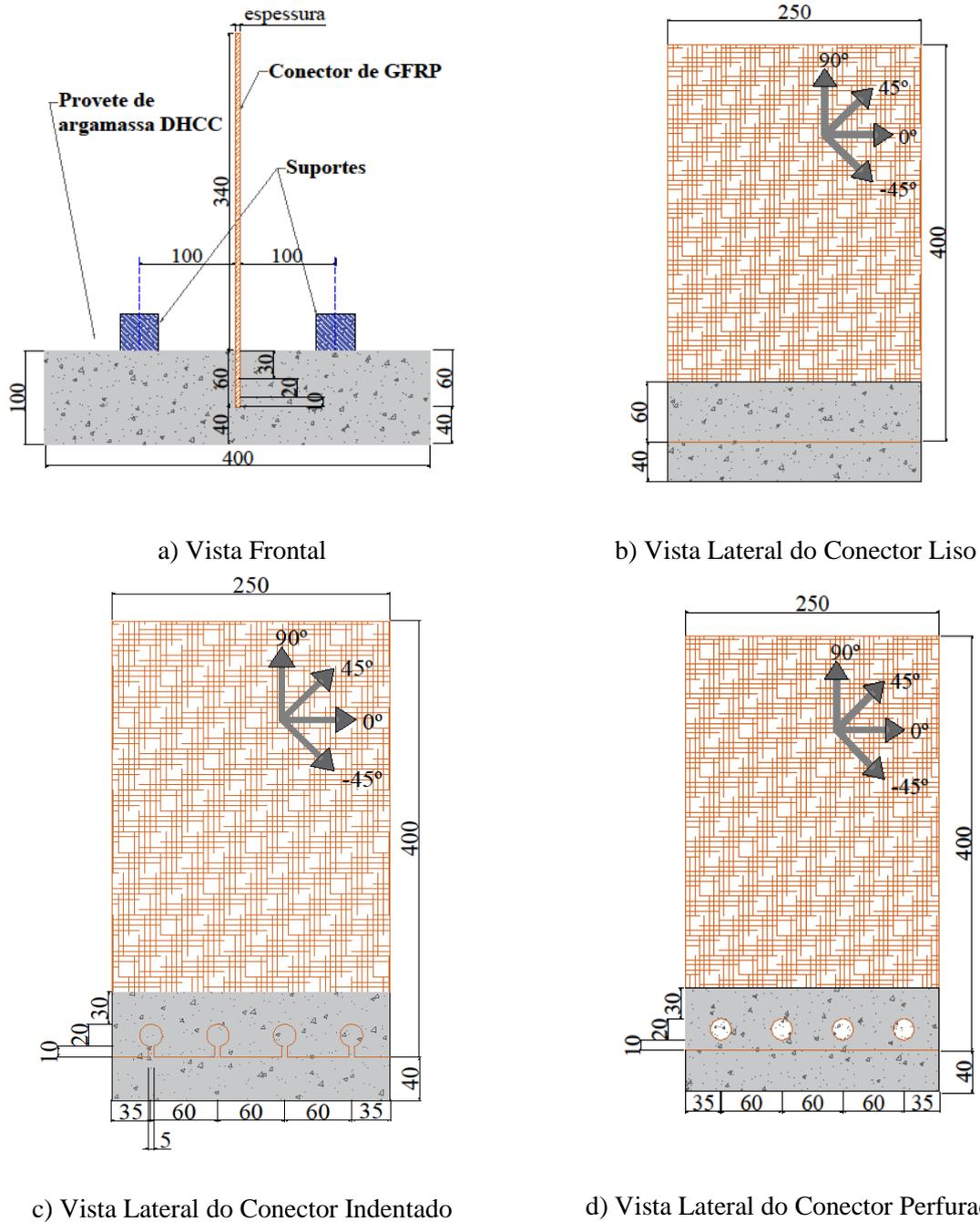


Figura 4.2 Esquema dos provetes de tipo *pull-out*

O ensaio de arranque (tipo *pull-out*) foi efetuado em vinte e quatro provetes. Desse total, oito provetes foram ensaiados com conectores GFRP lisos. Estes conectores caracterizam-se pela ausência de aberturas (Liso-W) onde quatro deles apresentam espessura de 4 mm (W-E4-1;W-E4-2;W-E4-3;W-E4-4) e os outros quatro apresentam 6 mm de espessura (W-E6-1;W-E6-2;W-E6-3;W-E6-4).

Para campanha experimental são estudados oito conectores GFRP perfurados (Perfurado-P), caracterizam-se pela existência de aberturas no conector apresentam quatro furos com diâmetro de 20 mm cada, sendo que a configuração do conector perfurado é ilustrada na Figura 4.2d. Para tal são ensaiados quatro provetes com conectores GFRP de espessura de 4 mm (P-E4-1; P-E4-2; P-E4-3 e P-E4-4) e outros quatro provetes com conectores GFRP com 6 mm de espessura (P-E6-1; P-E6-2; P-E6-3 e P-E6-4).

Além das geometrias já apresentadas, ainda são ensaiados oito provetes com conectores GFRP do tipo indentado (Indentado-I). Estes conectores apresentam furos com diâmetro de 20 mm, semelhantes aos conectores perfurados, mas com a diferença conterem rasgos com 10 mm de altura e 5 mm de comprimento, realizados na parte inferior do conector. A configuração do conector indentado encontra-se representada na Figura 4.2c. Para a tipologia correspondente aos conectores indentados são ensaiados quatro provetes com conectores GFRP com espessura de 4 mm (I-E4-1, I-E4-2, I-E4-3 e I-E4-4) e quatro provetes com conectores GFRP de 6 mm de espessura (I-E6-1, I-E6-2, I-E6-3 e I-E6-4).

A organização, as quantidades e as respetivas designações atribuídas aos provetes, atendendo às diferentes tipologias de conexão e espessuras de conectores (4 mm ou 6 mm), são esquematizadas na Figura 4.3.

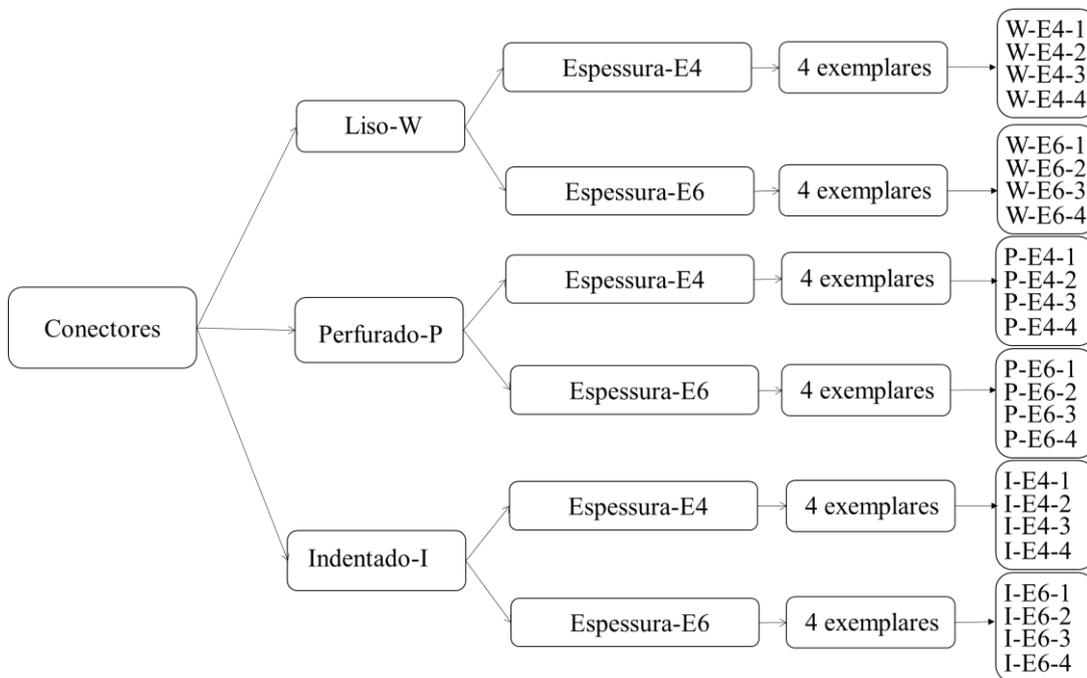


Figura 4.3 Quantidades e designações dos provetes de tipo *pull-out*

4.2.3 Preparação do ensaio

A preparação do ensaio de tipo *pull-out* requer cuidados especiais: a preparação dos provetes e a organização da instrumentação e dos equipamentos necessários à sua realização, de modo a facilitar e otimizar o tempo de execução do ensaio.

O primeiro passo é efetuar devidamente a limpeza de poeiras e excedentes de argamassa resultantes da descofragem. Os provetes prismáticos de argamassa são pintados de branco, o que possibilita a visualização da evolução da fendilhação no provete de argamassa à medida que está a decorrer o ensaio, como se apresenta na Figura 4.4.

Na face frontal e na retaguarda dos provetes são executados furos para instalação da régua que tem como função o suporte dos transdutores que servirão para medir a deformação na argamassa e no conector GFRP (os designados LVDT's) e de alguns elementos que servirão de apoio aos transdutores (batentes e cantoneiras de alumínio) (Figura 4.4a). Os furos são executados a 50 mm de altura do provete de argamassa e localizam-se a 100 mm de distância de cada extremidade. Estes furos têm 6 mm de diâmetro. Nos conectores de GFRP foram realizados furos com um diâmetro de 8 mm na zona superior para permitir a fixação das amarras da prensa sendo esta furação realizada anteriormente à betonagem. No final, os provetes têm a configuração que se apresenta na Figura 4.4b).

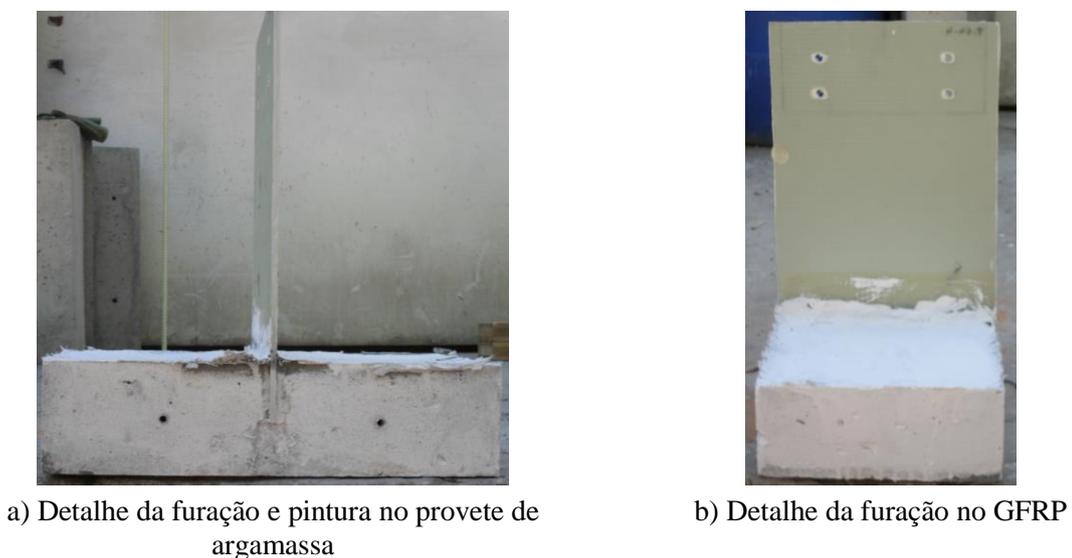


Figura 4.4 Preparação dos provetes

Este ensaio utiliza uma prensa convencional, onde é fixada uma chapa metálica perfurada através da colocação de varões roscados que apresentam um diâmetro 24 mm à base da prensa. De seguida, o provete é colocado sobre a base metálica, centrado com o atuador. Devem

evitar-se excentricidades no conector GFRP: as amarras têm de ficar alinhadas com o conector GFRP, para evitar danos no provete, devido a acumulação de esforços quando se procede a fixação da amarra ao conector.

São colocados varões roscados com diâmetro de 16 mm na chapa metálica de base, nos quais se colocam as barras de aço, tornando assim possível a fixação do provete e impedindo o seu levantamento. Estas barras apresentam 40 mm de aresta e ficam posicionadas sobre o elemento de argamassa, a 100 mm de cada extremidade. As barras de aço ficam alinhadas com os furos que são efetuados no provete de argamassa para fixar a régua. Antes de se proceder à fixação das barras de aço que funcionaram como apoios regulariza-se a superfície do provete de argamassa que está em contacto com as barras. Para tal, aplica-se uma camada de betume que é coberta por plástico para ser possível colocar as barras e efetuar o nivelamento da superfície de contacto, otimizando assim as condições de apoio, como se pode observar na Figura 4.5. Quando se verificar que o betume endureceu remove-se o plástico e fixam-se as barras de aço à chapa metálica. A amarra de chapas dentadas é acoplada ao atuador sendo aparafusada ao conector de GFRP por meio de parafusos de diâmetro de 8 mm.

A fixação da régua ao provete de betão é feita com recurso a parafusos localizados no mesmo alinhamento varões roscados que fixaram as barras de aço que servirão de apoio tanto na face frontal como na retaguarda do provete de argamassa.



a) Aplicação do betume e colocação do plástico



b) Nivelamento da superfície de apoio

Figura 4.5 Regularização da superfície que servirá de apoio à fixação das barras de aço

4.3 Instrumentação

4.3.1 Configuração inicial

O esquema de instrumentação do provete e os suportes necessários para a colocação dos vários transdutores apresentam-se na Figura 4.6.

Na Figura 4.6 representa-se a configuração do ensaio de arranque e o posicionamento dos LVDT's (Linear Variable Differential Transformer) no provete, sendo visível também o posicionamento do perfil GFRP. Para efetuar a medição dos deslocamentos utilizam-se 8 transdutores de deslocamento, quatro deles com comprimento de leitura de +/- 2 mm (LVDT 1, LVDT 2, LVDT 3, e LVDT 4), dois com +/- 4 mm (LVDT 6 e LVDT 8) e dois com +/- 10 mm (LVDT 5, e LVDT 7). Os transdutores de deslocamento com maior comprimento de leitura registam o escorregamento entre o GFRP e o betão (LVDT 5 e LVDT 7) e o deslocamento da laje de DHCC (LVDT 6 e LVDT 8) devido à flexão. Os LVDT 1, LVDT 2, LVDT 3 e LVDT 4 são utilizados para medir a deformação do GFRP.

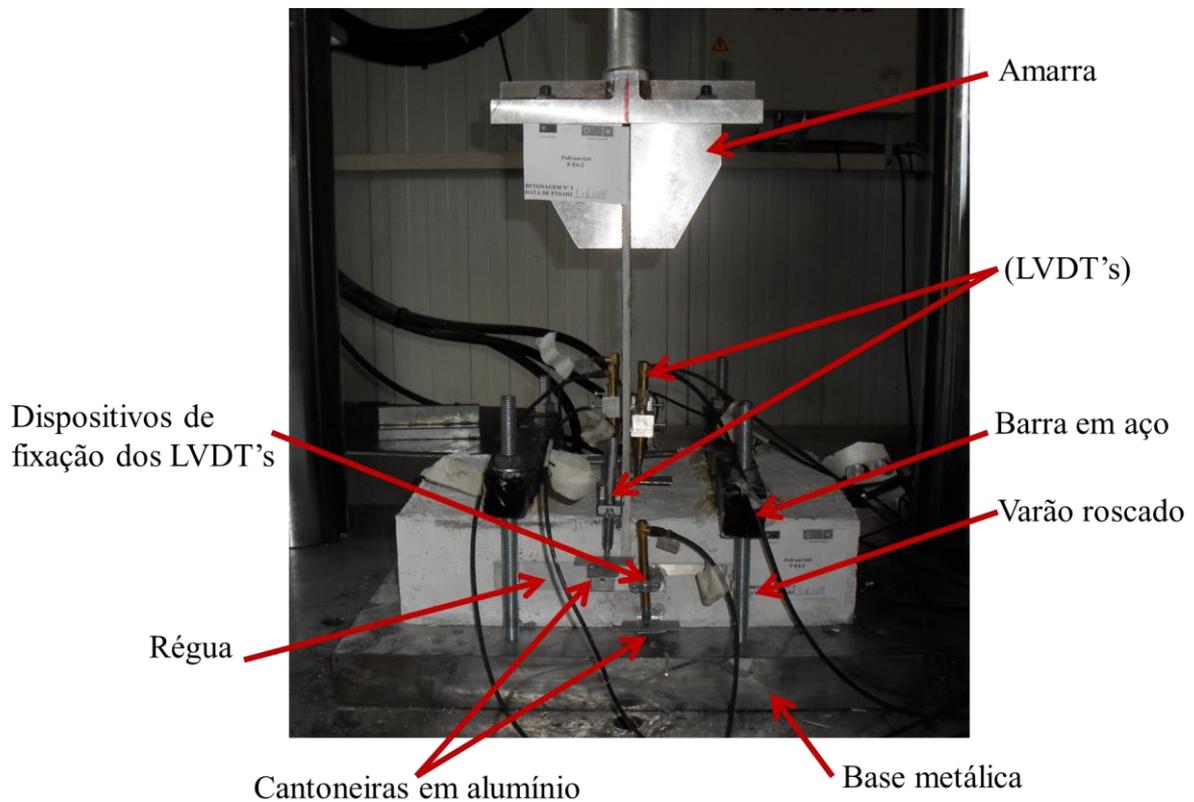


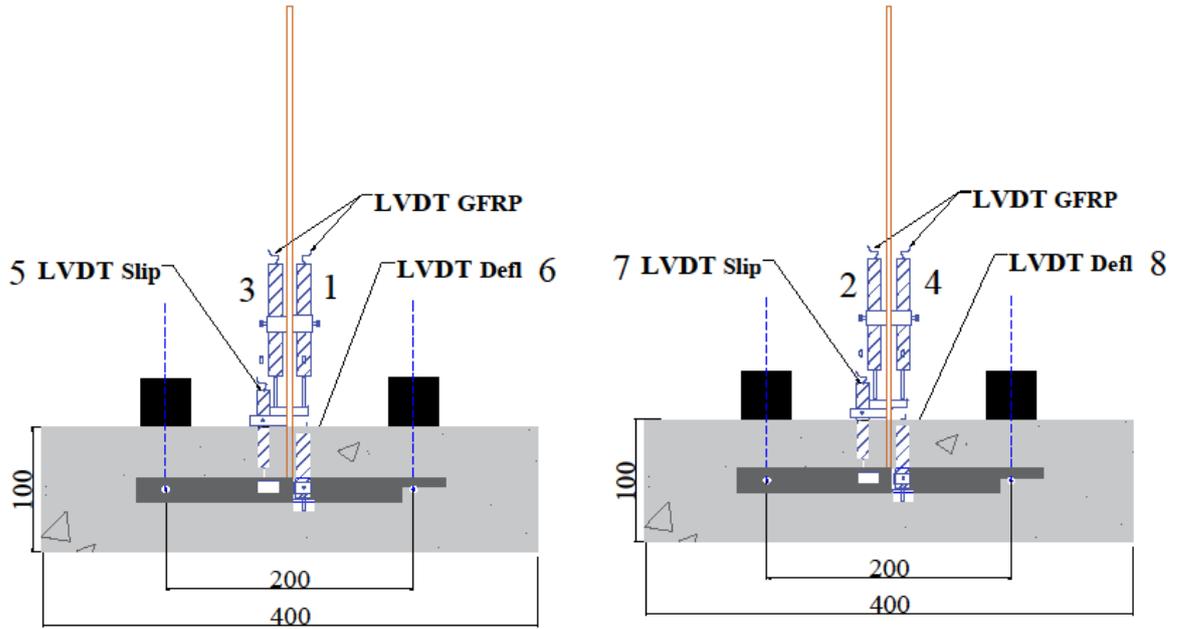
Figura 4.6 Vista Frontal da Montagem do ensaio *Pull-out*

Como se pode observar na Figura 4.7, existem dois transdutores que são utilizados para determinar o escorregamento entre o provete de argamassa e o conector de GFRP que são os LVDT's Slip nas Vistas Laterais e Frontal que correspondem em planta ao LVDT 5 e ao LVDT 7. O LVDT 5 é colocado na face frontal e o LVDT 7 é colocado na retaguarda do provete de argamassa. O batente de alumínio é colado com recurso a cola quente a 10 mm acima do elemento de argamassa.

São instalados dois transdutores que servem para obter a deformação por flexão, designados por LVDT Defl na Vista Lateral e Frontal, que correspondem ao LVDT 6 colocado na face frontal e ao LVDT 8 colocado na face da retaguarda do provete de argamassa. Os batentes são colados a meio do provete de argamassa.

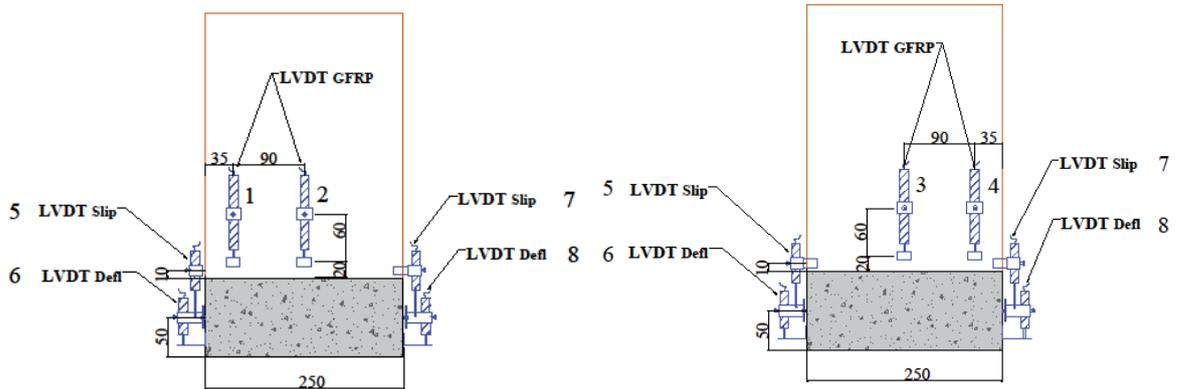
Relativamente aos transdutores colocados no conector GFRP, as cantoneiras de alumínio são coladas a 20 mm do elemento de argamassa e o batente é colado a 60 mm da cantoneira. São quatro os transdutores instalados no GFRP, sendo que o LVDT 1 e LVDT 4 distam 35 mm da extremidade do conector GFRP e LVDT 2 e 3 são colocados a meio do conector GFRP, de acordo com a Figura 4.7e.

Para medir o escorregamento entre o conector GFRP e a laje de argamassa, recorre-se aos transdutores 5 e 7, 6 e 8. O escorregamento é obtido indiretamente, pois o escorregamento entre o conector de GFRP e o elemento de argamassa resulta de subtrair a deformação medida por 5 e 7, à deformação medida por 6 e 8, respetivamente, obtendo-se as correspondentes medidas dos dois lados do provete (frontal e retaguarda).



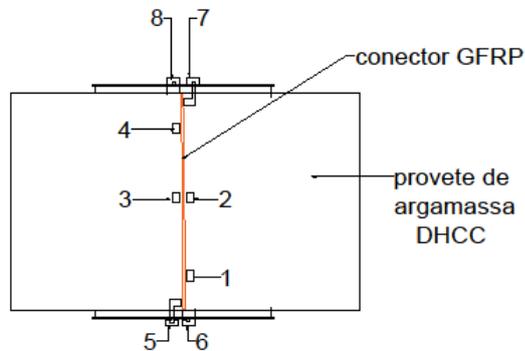
a) Vista Frontal

b) Vista da Retaguarda



c) Vista Lateral direita

d) Vista Lateral esquerda



e) Vista em planta Geral da disposição dos LVDT's

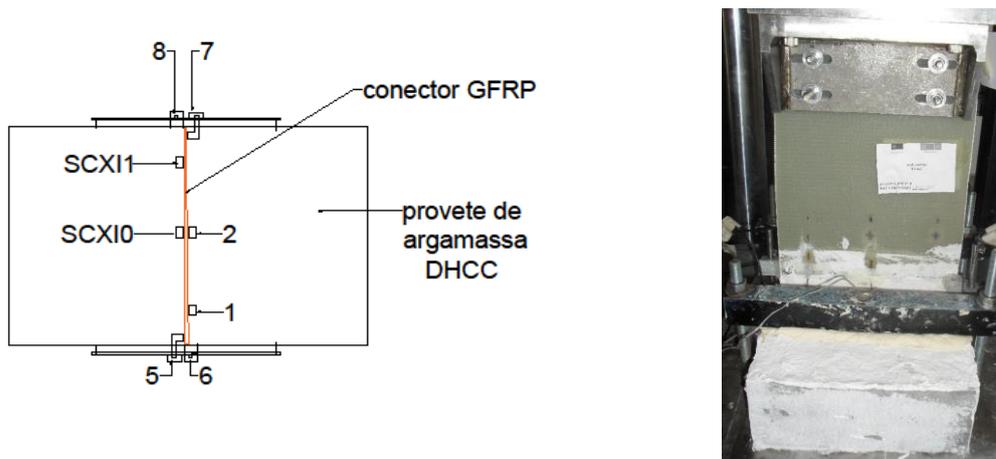
Figura 4.7 Posicionamento da instrumentação e elementos de monitorização do ensaio *Pull-out*

Em alguns dos provetes ensaiados foram realizadas alterações na posição dos LVDT's. Em alguns casos, os transdutores foram substituídos por extensómetros elétricos, como são exemplo os casos apresentados de seguida.

4.3.2 Configuração do Proвете I-E4-2

Para ensaio de *pull-out* do provete I-E4-2, em vez de se usar os transdutores LVDT 3 e LVDT 4 no lado esquerdo do conector GFRP do provete, foram aplicados extensómetros. Deste modo, o LVDT 3 que é colocado a meio do conector de GFRP foi substituído pelo extensómetro SCXI0 e o LVDT 4 que é colocado do lado esquerdo do conector GFRP, a 35 mm da sua extremidade esquerda foi substituído pelo extensómetro SCXI1. Os extensómetros são zerados antes de se iniciar o ensaio. A configuração do esquema de montagem do provete I-E4-2 encontra-se ilustrada na Figura 4.8.

Os outros restantes instrumentos, utilizados na medição do escorregamento e da deformação por flexão no provete são mantidos em acordo com a configuração inicial.



a) Vista em planta provete I-E4-2

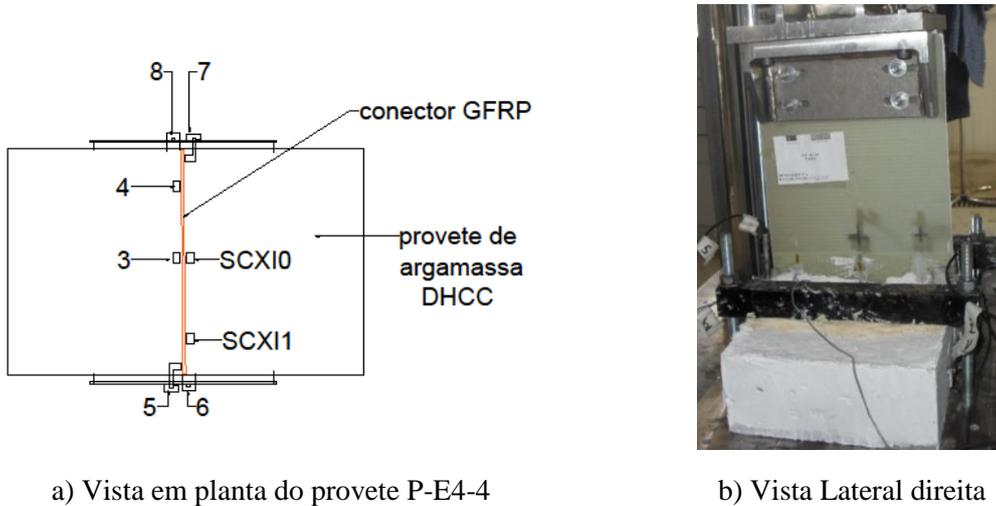
b) Vista Lateral esquerda

Figura 4.8 Configuração do esquema de montagem do provete I-E4-2

4.3.3 Configuração do Proвете P-E4-4

Para o provete P-E4-4, em substituição dos transdutores LVDT 1 E LVDT 2 foram mais uma vez utilizados extensómetros. O LVDT 1 que é colocado do lado direito do conector de GFRP, a 35 mm da sua extremidade esquerda é substituído pelo SCXI1 e o LVDT 2 que é colocado a meio do conector de GFRP é substituído pelo extensómetro SCXI0. Antes de se iniciar o ensaio estes extensómetros são zerados. A configuração da montagem está ilustra na Figura 4.9.

Os restantes instrumentos utilizados na medição do escorregamento e da deformação por flexão do provete são mantidos em acordo com a configuração inicial.



a) Vista em planta do provete P-E4-4

b) Vista Lateral direita

Figura 4.9 Configuração do esquema de montagem do provete P-E4-4

4.3.4 Configuração do Provetes W-E6-4

Neste ensaio, faz-se a troca do LVDT 6 com o LVDT 8. Estes transdutores têm como função determinar o deslocamento por flexão do provete de argamassa. O LVDT 6 passa para a face da retaguarda do provete enquanto o LVDT 8 é colocado na face frontal do provete a ensaiar. Como se pode observar no esquema da planta do provete W-E6-4 ilustrado na Figura 4.10.

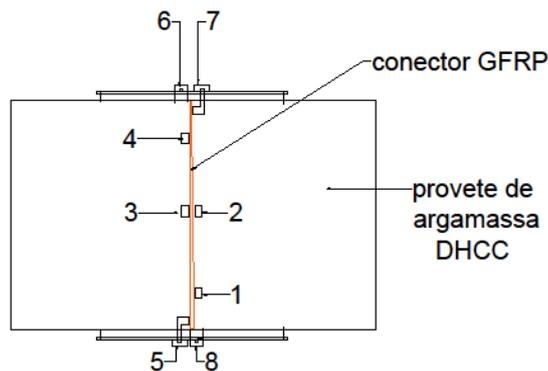


Figura 4.10 Vista em planta do provete W-E6-4

4.3.5 Configuração do Provede P-E4-1

Neste provede, foram colocado 3 extensómetros (SCXI0, SCXI1, SCXI3) e 6 transdutores (LVDT 3, LVDT 4, LVDT 5, LVDT 6, LVDT 7 e LVDT 8).

Os extensómetros SCXI1 e SCXI0 substituem respetivamente o LVDT 1 e o LVDT 2 que por definição estão colocados do lado direito do conector GFRP.

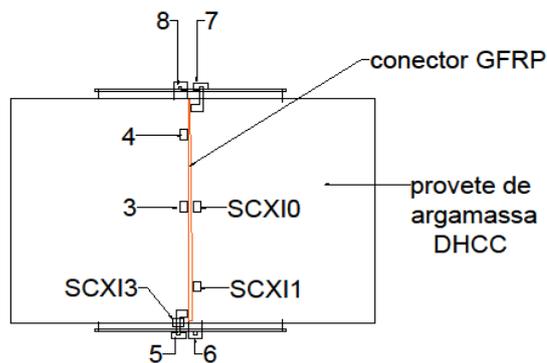
Relativamente ao extensómetro SCXI 3 é colocado diretamente no provede de argamassa junto à ranhura do conector de GFRP, do lado esquerdo da parte frontal do provede. Este extensómetro é responsável pela determinação da extensão devida à deformação por flexão na argamassa junto ao conector GFRP no topo do provede de argamassa. O extensómetro SCXI3 é colocado no alinhamento do transdutor LVDT 5. Os restantes transdutores mantêm as posições definidas na configuração inicial. O esquema ilustrativo do posicionamento da instrumentação referente ao provede P-E4-1 está representado na Figura 4.11.



a) Colocação dos extensómetros



b) Vista Frontal



c) Vista em planta do provede P-E4-1

Figura 4.11 Esquema da instrumentação do provede P-E4-1

4.3.6 Configuração do Provete I-E4-1

Neste provete, foram colocados 3 extensómetros (SCXI0, SCXI1, SCXI3) e 6 transdutores (LVDT 3, LVDT 4, LVDT 5, LVDT 6, LVDT 7 e LVDT 8).

Os extensómetros SCXI1 e SCXI0 substituíram respectivamente, o LVDT 1 e o LVDT 2 que estão colocados do lado direito do conector GFRP. O extensómetro SCXI1 fica colado na extremidade do lado direito do conector GFRP, junto à face frontal do provete e o extensómetro SCXI0 fica colocado a meio do conector.

O extensómetro SCXI3 é também colocado no lado direito do conector de GFRP, mas na extremidade oposta ao extensómetro SCXI1, ficando mais próximo da face da retaguarda do provete de argamassa. Tal como se pode observar na Figura 4.12.

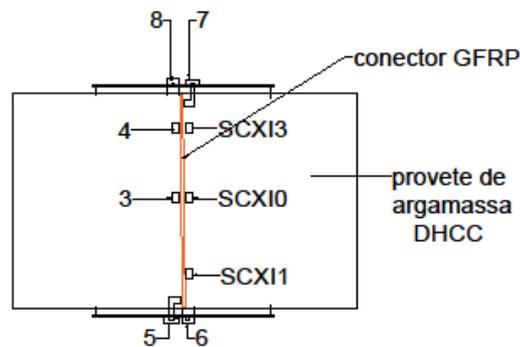


Figura 4.12 Vista em planta da instrumentação do provete I-E4-4

4.4 Modos de rotura

De um modo geral, verificou-se nos provetes testados que não era visível a rotura da ligação entre o provete de argamassa e o conector GFRP, tendo o escorregamento entre os materiais provocado a separação total das peças a ligar.

Nos provetes testados, verificou-se que foi sempre mobilizada aderência por atrito entre o conector de GFRP e a laje de argamassa. O atrito manifesta-se quando há deslocamento relativo entre os materiais, no caso o conector GFRP e a argamassa. Depende da área de contacto entre o conector e a argamassa.

Nos conectores GFRP com diferentes tipologias, constata-se em todos os casos que os conectores não apresentam danos significativos. Estes conectores apenas apresentam algumas

marcas decorrentes do movimento relativo entre a argamassa e o conector, provocadas durante o decorrer dos ensaios *pull-out* efetuados.

Nos provetes de argamassas existem casos em que o provete apresenta fissuras no provete de argamassa junto à interface argamassa-GFRP. Exemplos desses casos são os provetes P-E6-4, W-E4-4, P-E4-3, I-E6-4, W-E4-3, I-E6-1. Existem também casos em que houve destacamento da camada superior de argamassa junto ao conector. Exemplos disso são os provetes I-E4-1, I-E6-2 e P-E6-2.

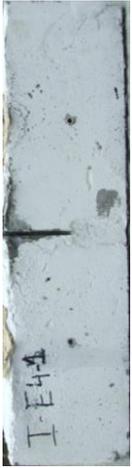
Provetes de DHCC com Conectores Indentados com espessura de 4 mm			
	Topo	Verso	Frente
I-E4-1			
I-E4-2			
I-E4-3			
I-E4-4			

Figura 4.13 Provetes de DHCC com Conectores Indentados com espessura de 4 mm

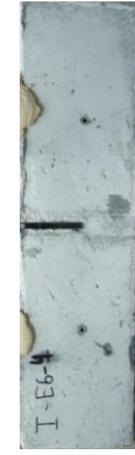
Provetes de DHCC com Conectores Indentados com espessura de 6 mm			
	Topo	Verso	Frente
I-E6-1			
I-E6-2			
I-E6-3			
I-E6-4			

Figura 4.14 Provetes de DHCC com Conectores Indentados com espessura de 6 mm

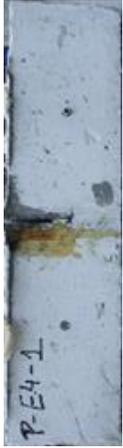
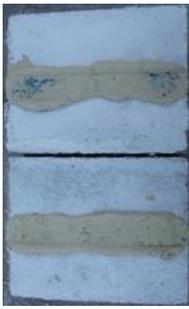
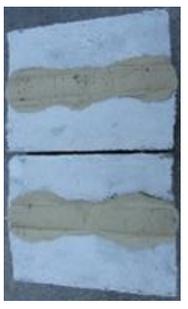
Provetes de DHCC com Conectores Perfurados com espessura de 4 mm			
	Topo	Verso	Frente
P-E4-1			
P-E4-2			
P-E4-3			
P-E4-4			

Figura 4.15 Provetes de DHCC com Conectores Perfurados com espessura de 4 mm

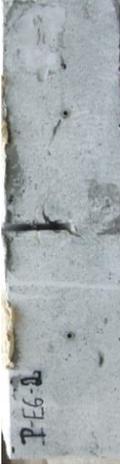
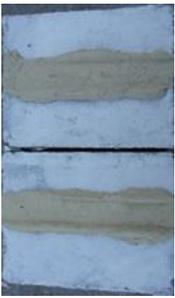
Provetes de DHCC com Conectores Perfurados com espessura de 6 mm			
	Topo	Verso	Frente
P-E6-1			
P-E6-2			
P-E6-3			
P-E6-4			

Figura 4.16 Provetes de DHCC com Conectores Perfurados com espessura de 6 mm

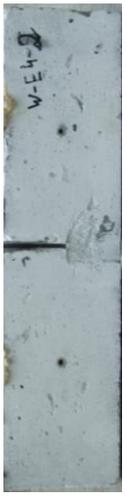
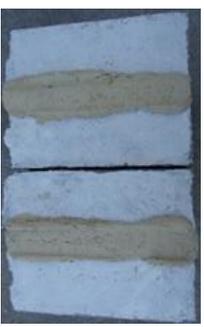
Provetes de DHCC com Conectores Lisos com espessura de 4 mm		Frente	Verso	Topo
W-E6-1				
W-E6-2				
W-E6-3				
W-E6-4				

Figura 4.17 Provetes de DHCC com Conectores Lisos de espessura de 4 mm

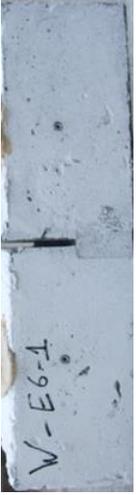
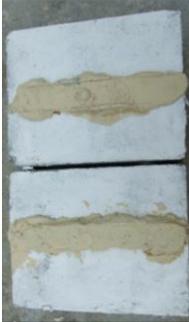
Provetes de DHCC com Conectores Lisos com espessura de 6 mm			
	Topo	Verso	Frente
W-E6-1			
W-E6-2			
W-E6-3			
W-E6-4			

Figura 4.18 Provetes de DHCC com Conectores Lisos com espessura de 6 mm

Conectores GFRP indentados com espessura de 4 mm		Frente		Verso	
		Antes de limpar	Depois de limpar	Antes de limpar	Depois de limpar
I-E4-1					
					
I-E4-3					
					

Figura 4.19 Conectores GFRP Indentados com espessura de 4 mm

		Conectores GFRP indentados com espessura de 6 mm							
		Verso				Frente			
I-E6-1	Antes de limpar								
	Depois de limpar								
I-E6-2	Antes de limpar								
	Depois de limpar								
I-E6-3	Antes de limpar								
	Depois de limpar								
I-E6-4	Antes de limpar								
	Depois de limpar								

Figura 4.20 Conectores GFRP Indentados com espessura de 6 mm

Conectores GFRP Perfurados com espessura de 4 mm		Frente		Verso	
		Antes de limpar	Depois de limpar	Antes de limpar	Depois de limpar
P-E4-1					
					
P-E4-2					
					
P-E4-3					
P-E4-4					

Figura 4.21 Conectores GFRP Perfurados com espessura de 4 mm

Conectores GFRP Perfurados com espessura de 6 mm		Frente	
		Verso	Frente
P-E6-1	Antes de limpar		
	Depois de limpar		
P-E6-2	Antes de limpar		
	Depois de limpar		
P-E6-3	Antes de limpar		
	Depois de limpar		
P-E6-4	Antes de limpar		
	Depois de limpar		

Figura 4.22 Conectores GFRP Perfurados com espessura de 6 mm

Conectores GFRP Lisos com espessura de 4 mm		Frente	
		Verso	Frente
W-E4-1	Antes de limpar		
	Depois de limpar		
W-E4-2	Antes de limpar		
	Depois de limpar		
W-E4-3	Antes de limpar		
	Depois de limpar		
W-E4-4	Antes de limpar		
	Depois de limpar		

Figura 4.23 Conectores GFRP Lisos com espessura de 4 mm

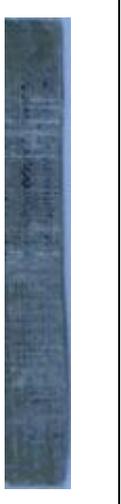
		Conectores GFRP Lisos com espessura de 6 mm							
		Verso				Frente			
W-E6-1	Antes de limpar			W-E6-2			W-E6-3		
	Depois de limpar								
W-E6-4	Antes de limpar			Depois de limpar					

Figura 4.24 Conectores GFRP Lisos com espessura de 6 mm

4.5 Resultados Obtidos

Ao efetuar análise dos resultados obtidos observou-se que a curva que relaciona a força aplicada e os escorregamentos medidos na face frontal e na retaguarda dos provetes em estudo não apresentavam muitas discrepâncias entre si. Sendo assim, foi adotada para a análise, a média dos escorregamentos obtidos em cada provete testado. Existem, no entanto, algumas exceções: nos provetes P-E4-2 , P-E6-3 e W-E6-3 devido a falta de informação fornecida pelos transdutores colocados para medir o escorregamento da face frontal, considerou-se que a informação existente referente ao escorregamento medido na face da retaguarda do provete era suficiente. No provete I-E6-1 a instrumentação colocada na face da retaguarda conseguiu medir o escorregamento até aproximadamente 10 mm. Já na parte frontal a medição do escorregamento foi até 17,5 mm. Sobrepondo as duas curvas, verifica-se que coincidem, o que para uma melhor análise e compreensão do desenvolvimento da resposta da curva que relaciona força e escorregamento, optou-se por estudar o comportamento do provete com a informação registada na face frontal do provete. Estes erros estão associados ao “encravar” de transdutores que são responsáveis por medir a flexão e o escorregamento no provete de argamassa, problemas que foi impossível de controlar e corrigir atempadamente. O ensaio de tipo *pull-out* requer muito cuidado na sua montagem, sendo necessário muita sensibilidade, experiência e atenção que se vai adquirindo no decorrer dos mesmos.

Além da avaliação da relação entre força e escorregamento registados pelos provetes testados, também se analisará a capacidade de carga atingida pelos provetes, a ductilidade e a rigidez inicial.

4.5.1 Avaliação da capacidade de carga

No desenvolvimento do estudo do comportamento dos resultados obtidos no decurso dos ensaios experimentais de tipo *pull-out* efetuados é importante analisar os níveis de carga máxima atingidos nos diferentes provetes testados. Para tal são apresentados na Tabela 4.1 o registo das datas de betonagem e das datas dos ensaios dos provetes, os dias de cura, a identificação das amassaduras de proveniência e os valores de carga máxima atingidos para cada provete em estudo. Na Tabela 4.2 é apresentado a média da carga , o desvio padrão e a correspondente variação percentual da carga máxima atingida para cada tipologia de conectores testada.

Na Tabela 4.1 visualizam-se alguns dos provetes destacados de cinzento. Estes provetes identificam os piores resultados obtidos em termos do valor de carga máxima atingida. Com exceção do provete P-E6-3 que corresponde à 3ª amassadura, constata-se que os piores resultados obtidos nos ensaios têm em comum o facto de serem da 1ª amassadura, o que indica que terá ocorrido algum problema na produção da 1ª amassadura. Aparentemente, o único aspeto que diferencia a 1ª amassadura das restantes é o volume produzido. Na 1ª amassadura foram produzidos 48 L de argamassa, enquanto para as restantes amassaduras efetuadas se realizou um ajuste no volume de argamassa a ser produzido, tendo este diminuído. Passaram-se então a produzir 41 L de argamassa em cada amassadura. Como a 1ª amassadura apresenta maior volume que as restantes deduz-se que terá existido uma maior dificuldade no processo de ligação entre os diferentes materiais que compõem a argamassa DHCC ao longo do processo de amassadura, sendo este um dos factos que poderá ter conduzido aos registos das cargas máximas mais baixas registadas.

Todos estes provetes apresentam fissuras incluindo o provete P-E6-3 localizadas no provete de argamassa junto à ranhura do GFRP. Este é o fator que melhor justifica a perda da capacidade de carga nos provetes assinalados visto que nos restantes não é detetável qualquer fissura a “olho nu”. Também é possível que tenha existido algum erro na montagem dos ensaios experimentais, devido à aplicação de um valor de pré-carga excessivo, mesmo antes do início do ensaio, o que conduz a uma carga máxima mais baixa do que as restantes em análise. Devido a todos estes condicionalismos indicados, que poderão estar associados a erros que levaram a diminuição da capacidade de carga bastante significativa em comparação com os restantes provetes em estudo optou-se por excluir no âmbito da análise da capacidade de carga dos provetes testados relativamente a carga média, desvio-padrão e coeficiente de variação percentual calculados na Tabela 4.2, os provetes I-E6-1, P-E4-3, P-E6-3 e W-E6-3.

Tabela 4.1 Resultados das cargas máxima especificado as datas de betonagem, ensaio, dias de cura e amassadura dos provetes testados

	Provetes	Data de Betonagem	Data do Ensaio	Dias de Cura	Amassadura	Carga máxima (kN)
Conectores Indentados	I-E4-1	23-04-2015	05-06-2015	43	6 ^a	22,99
	I-E4-2	20-04-2015	03-06-2015	43	4 ^a	24,74
	I-E4-3	20-04-2015	02-06-2015	42	4 ^a	23,46
	I-E4-4	20-04-2015	03-06-2015	43	4 ^a	27,59
	I-E6-1	15-04-2015	28-05-2015	42	1 ^a	15,19
	I-E6-2	15-04-2015	29-05-2015	43	1 ^a	22,74
	I-E6-3	23-04-2015	04-06-2015	42	5 ^a	23,85
	I-E6-4	20-04-2015	01-06-2015	41	3 ^a	24,47
Conectores Perfurados	P-E4-1	23-04-2015	05-06-2015	43	6 ^a	25,51
	P-E4-2	15-04-2015	29-04-2015	43	2 ^a	24,87
	P-E4-3	15-04-2015	28-05-2015	42	1 ^a	15,85
	P-E4-4	20-04-2015	03-06-2015	43	4 ^a	21,29
	P-E6-1	20-04-2015	02-06-2015	42	3 ^a	27,90
	P-E6-2	20-04-2015	01-06-2015	41	3 ^a	24,02
	P-E6-3	20-04-2015	03-06-2015	43	3 ^a	18,85
	P-E6-4	23-04-2015	04-06-2015	42	5 ^a	29,04
Conectores Lisos	W-E4-1	23-04-2015	05-06-2015	43	6 ^a	20,69
	W-E4-2	15-04-2015	01-06-2015	46	2 ^a	25,47
	W-E4-3	15-04-2015	01-06-2015	46	2 ^a	22,05
	W-E4-4	23-04-2015	05-06-2015	43	6 ^a	19,84
	W-E6-1	23-04-2015	04-06-2015	42	5 ^a	22,64
	W-E6-2	15-04-2015	29-05-2015	43	1 ^a	18,94
	W-E6-3	15-04-2015	28-05-2015	42	1 ^a	12,07
	W-E6-4	23-04-2015	04-06-2015	42	5 ^a	26,67

Influência da tipologia e espessura

Na Tabela 4.2 é perceptível que os provetes que têm maior carga máxima média são os provetes com conectores perfurados de espessura de 6 mm que apresentam um aumento de carga máxima média face aos conectores perfurados de espessura de 4 mm, aos conectores indentados de espessura de 4 mm, aos conectores indentados de espessura de 6 mm, aos conectores lisos de espessura de 4 mm e aos conectores lisos de espessura de 6 mm, respetivamente, 11.5%, 8.5%, 12.2%, 18.5%, 15.7%. É verificado na Tabela 4.2 que os conectores lisos, tanto os de espessura

de 4 mm como os de 6 mm apresentam os piores resultados de carga máxima média, mas também são os que apresentam desvio-padrão e coeficiente de variação mais elevado, o que implica uma maior incerteza relativamente aos resultados apresentados com maior relevância nos provetes com conectores lisos de espessura de 6 mm pois são os que apresentam desvio padrão e coeficiente de variação significativamente maiores do que os restantes conectores em análise. As discrepâncias existentes na força máxima atingida pelos provetes pode ser justificada pelos condicionalismos que resultam da configuração de ensaio, isto é, a montagem do provete e a aplicação da força podem levar à acumulação de erros que são prejudiciais à correta evolução do ensaio.

Em termo globais, o maior valor médio de carga máxima atingida pelos conectores em estudo está associado aos conectores perfurados. Comparativamente com os conectores indentados, existe um aumento de carga de 4.6% e face aos conectores lisos existe um aumento de carga de 12.2%. Os conectores lisos correspondem aos piores resultados de capacidade de carga mas também são os que apresentam maiores valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 4.2 Resultados da carga máxima média, desvio-padrão, coeficiente de variação

	Espessura	Provete	Carga máxima (kN)	Carga máxima média (kN)	Desvio Padrão (kN)	Coef. de variação (%)	Carga máxima média global (kN)	Desvio Padrão global (kN)	Coef. de variação global (%)
Conectores Indentados	4 mm	I-E4-1	22,99	24,70	1,79	7,25	24,26	1,52	6,26
		I-E4-2	24,74						
		I-E4-3	23,46						
		I-E4-4	27,59						
	6 mm	I-E6-1	-----						
		I-E6-2	22,74						
		I-E6-3	23,85						
		I-E6-4	24,47						
Conectores Perfurados	4 mm	P-E4-1	25,51	23,89	1,86	7,78			
		P-E4-2	24,87						
		P-E4-3	-----						
		P-E4-4	21,29						
	6 mm	P-E6-1	27,90	26,99	2,15	7,96			
		P-E6-2	24,02						
		P-E6-3	-----						
		P-E6-4	29,04						
Conectores Lisos	4 mm	W-E4-1	20,69	22,01	2,15	9,76			
		W-E4-2	25,47						
		W-E4-3	22,05						
		W-E4-4	19,84						
	6 mm	W-E6-1	22,64	22,75	3,16	13,88			
		W-E6-2	18,94						
		W-E6-3	-----						
		W-E6-4	26,67						

A Figura 4.25 representativo os valores das cargas máximas obtidas por cada conector em estudo e dispõe-nas por ordem crescente. É evidente que os conectores representados a vermelho representam os conectores que para o estudo da capacidade de carga obtiveram os piores resultados face aos restantes conectores em estudo

Também se constata pela análise do Figura 4.25 que o conector P-E6-4 é o melhor registo em termos de carga máxima atingida, contrariamente, o pior resultado de capacidade de carga é do conector W-E6-2, atendendo que para análise da capacidade de carga se despreza os resultados

apresentados nos conectores W-E6-3, I-E6-1, P-E4-3 e P-E6-3 que estão assinalados de cor vermelha.

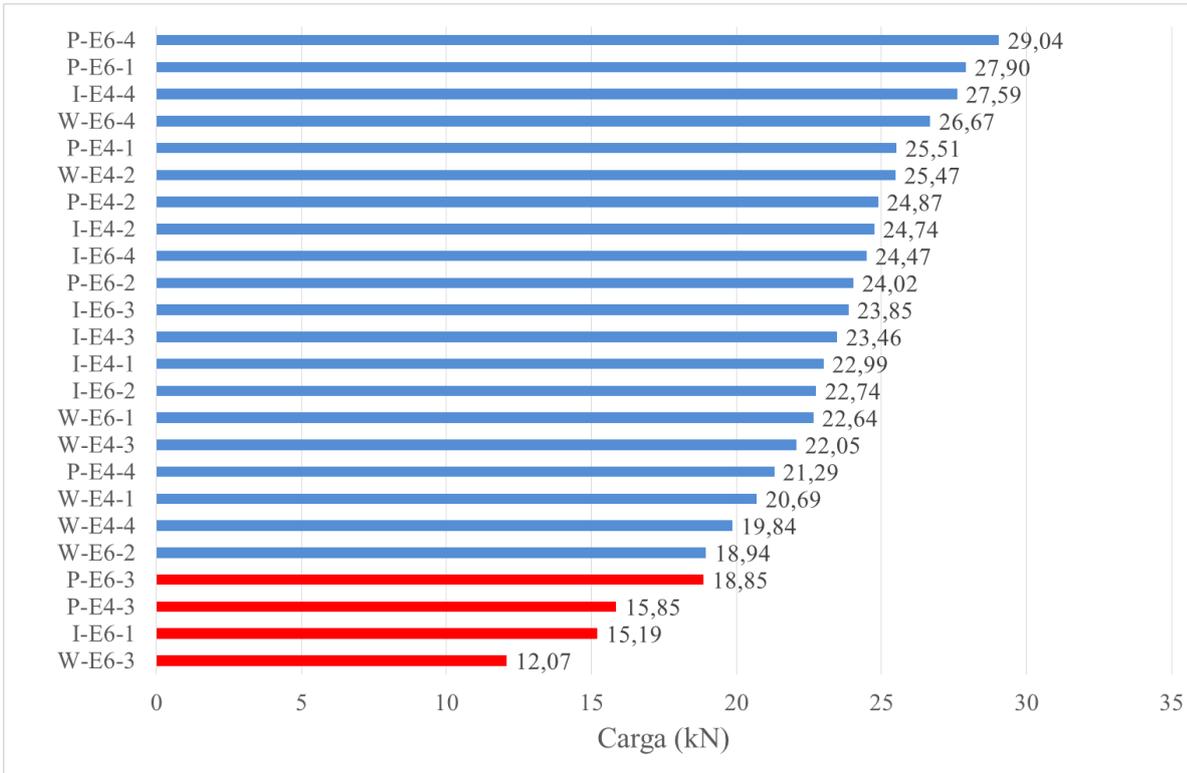


Figura 4.25 Cargas máximas atingidas nos provetes testados, organizadas por ordem crescente

Carga máxima obtida nos conectores lisos

Na análise da Figura 4.26 são visíveis três cores. O provete marcado de vermelho representa o provete excluído da análise da carga máxima atingida visto que comparativamente com os restantes provetes apresenta um registo muito baixo. Os provetes marcados de cinzento representam os provetes com conectores lisos de espessura de 6 mm. Enquanto os provetes marcados de preto representam os provetes com conectores lisos de espessura de 4 mm. É de constatar que existe mais variação dos resultados de carga máxima atingida por parte dos provetes com conectores lisos de espessura de 6 mm, não existindo valores relativamente próximos, enquanto que nos conectores lisos de espessura de 4 mm existem valores de carga de carga máxima atingida que são muito próximos entre si, como são exemplo, os resultados apresentados pelos provetes W-E4-1, W-E4-3, W-E4-4. O provete W-E4-2 é o que apresenta maior carga máxima registada entre os conectores lisos de 4 mm e o que apresenta maior variação do valor atingido comparativamente com os restantes resultados obtidos em provetes com conectores de espessura de 4 mm.

É difícil de constatar qual a espessura dos conectores que tem mais influência nos resultados de carga máxima. Isto deve-se à grande variabilidade associada que aos resultados registados nos conectores com espessura de 6 mm. Globalmente, os resultados obtidos pelos conectores lisos de 6 mm aproximam-se dos resultados registados pelos conectores lisos de espessura de 4 mm. Ambos os grupos apresentam um provete que obteve significativamente maior registo de carga máxima do que os restantes provetes testados. Disso mesmo são exemplo os provetes W-E6-4 e W-E4-2. Todos estes provetes foram tidos em consideração para obtenção da carga máxima média, à exceção do provete W-E6-3, devido ao facto de ser visível uma fissura no provete de argamassa junto à ranhura do conector GFRP que teve influência na perda significativa da capacidade de carga face aos resultados apresentados pelos restantes provetes em estudo, como se pode verificar na análise da Figura 4.26 , Tabela 4.2.

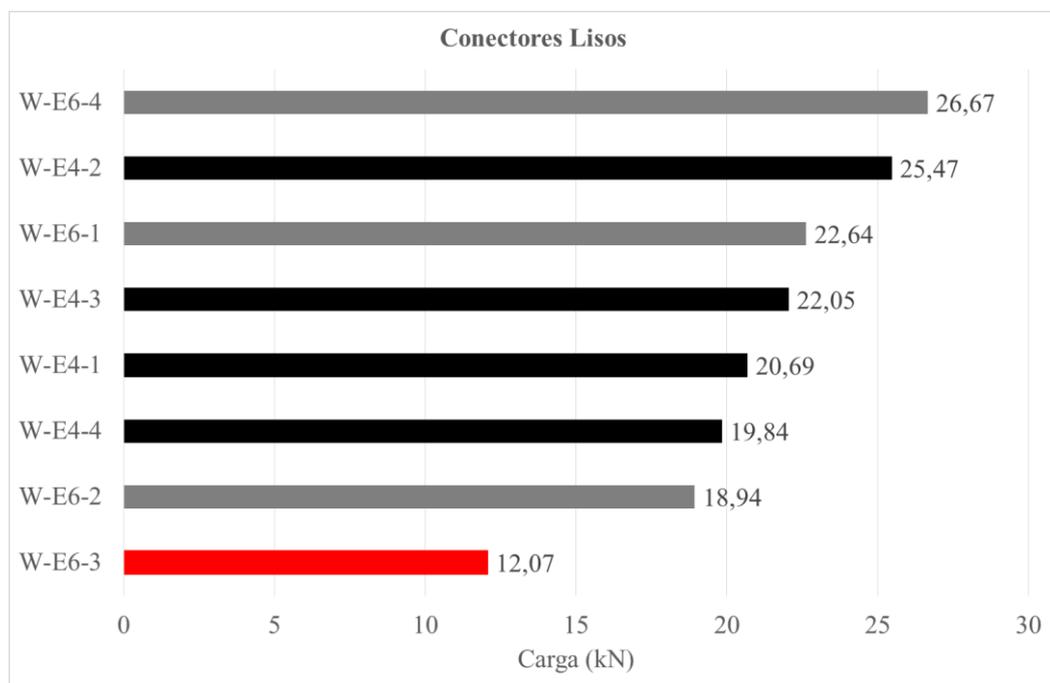


Figura 4.26 Cargas máximas atingidas pelos conectores lisos - valores em ordem crescente

Carga máxima obtida nos conectores perfurados

Na Figura 4.27 é perceptível que os conectores perfurados de espessura de 6 mm apresentam valores significativamente mais elevados comparativamente com os provetes com conectores perfurados de espessura de 4 mm. A Figura 4.27 apresenta 3 cores distintas. A cor vermelha representa os provetes excluídos da análise da carga máxima. Como se pode constatar são os resultados mais baixos, pois ambos os provetes apresentam fissuração na argamassa junto à ranhura do GFRP que provocou a perda de capacidade de carga comparativamente com os

restantes provetes em estudo, em que foram desprezados os resultados obtidos pelos provetes P-E6-3 e P-E4-3.

É visível que a variação dos valores de carga máxima atingida para cada tipologia é semelhante. Como se pode comprovar pela análise visual da Figura 4.27 e pela análise da Tabela 4.2. É perceptível que os conectores perfurados de 6 mm obtiveram os maiores valores de carga máxima atingida, sendo por isso, de constatar que para os conectores perfurados, a espessura influencia significativamente os resultados obtidos. Maior espessura conduz a maiores valores de carga máxima

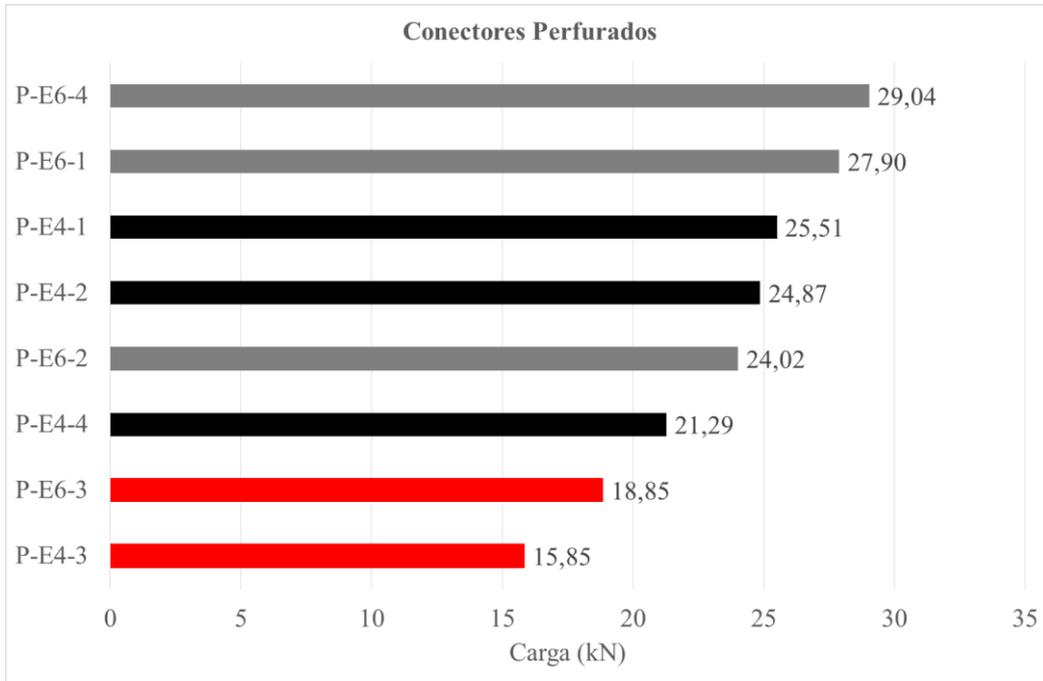


Figura 4.27 Resultados das cargas máximas atingidas em conectores perfurados - valores em ordem crescente

Carga máxima obtida nos conectores indentados

Na Figura 4.28 identificam-se três cores distintas, sendo que a cor vermelha representa o provete que foi excluído para cálculos efetuados para avaliação da capacidade de carga dos provetes testados. Deste modo, despreza-se o valor do provete I-E6-1, pois este apresenta valor de carga máxima substancialmente inferior aos restantes provetes com conectores indentados. Já anteriormente foram referidos alguns dos condicionalismos que podem estar na origem da perda da capacidade de carga.

Pela análise da Figura 4.28 e da Tabela 4.2 identifica-se que os conectores indentados de espessura de 6 mm são os que apresentam valores de carga máxima mais próximos entre si, o

que é validado pelo facto de apresentar o valor mais baixo do coeficiente variação das cargas máximas registadas comparativamente com os restantes provetes testados.

Verifica-se que os conectores indentados de espessura de 4 mm apresentam valores de carga máxima mais elevados mas também é visível uma maior variabilidade nos resultados obtidos nestes conectores. O coeficiente de variação é significativamente superior ao registado pelos conectores indentados de espessura de 6 mm. É visível que o provete I-E4-4 apresenta o maior valor de carga máxima registado. Este valor é significativamente superior aos restantes valores obtidos nos provetes indentados.

A exceção do valor de carga máxima mais elevado atingido pelo conector I-E4-4, observa-se que os restantes provetes registaram valores próximos de cargas máximas. O conector indentado de espessura 4 mm apresenta um valor de carga máxima média ligeiramente superior ao correspondente valor registado pelo conector indentado de espessura de 6 mm. No entanto, também apresenta maior coeficiente de variação, o que indica maior variabilidade nos resultados obtidos.

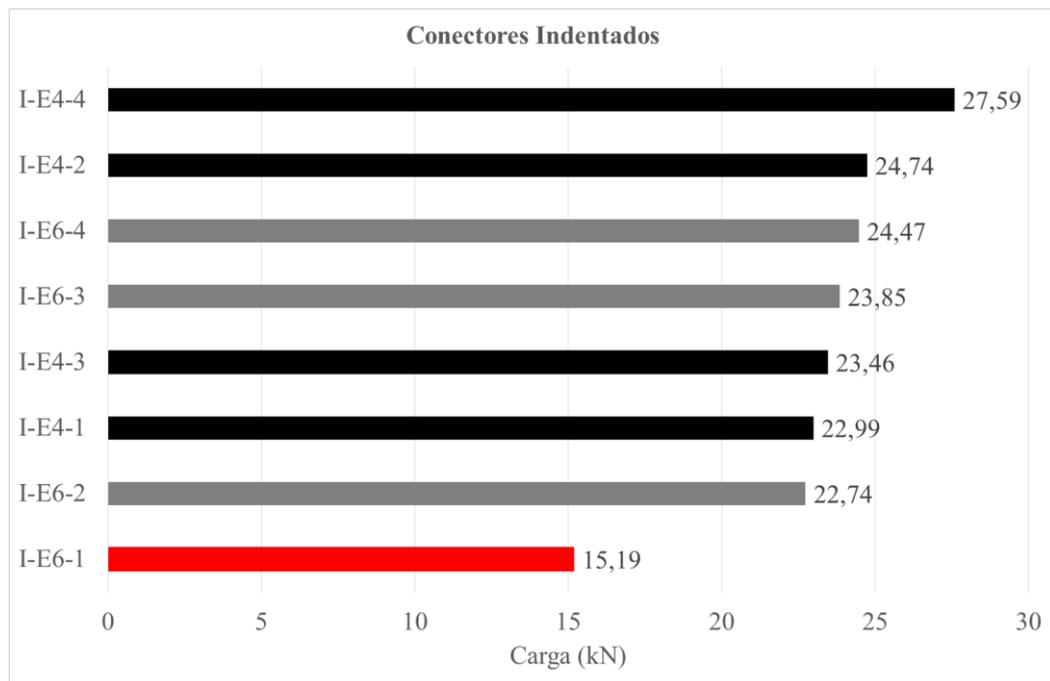


Figura 4.28 Resultados das cargas máximas atingidas pelos conectores indentados - valores em ordem crescente

4.5.2 Escorregamento associado à obtenção da carga máxima

Os provetes destacados com cor cinzenta foram excluídos para análise do escorregamento associado à obtenção da carga máxima mais elevada registada na análise da Tabela 4.3.

O provete P-E4-2 foi excluído devido a uma falha na instrumentação, que provocou uma alteração significativa no escorregamento associado à carga máxima. No provete W-E6-3 também ocorreu um erro com a instrumentação e outros condicionalismos que já se referiram na avaliação da capacidade de carga, que inviabilizam o resultado registado. No provete P-E6-3 ocorreu uma fissura na laje de argamassa, junto à ranhura do GFRP, que alterou significativamente o escorregamento registado em comparação com os restantes ensaios realizados.

O parâmetro $s_{P_{máx}}$ representa o escorregamento obtido nos provetes testados quando atingem a carga máxima. Atendendo às tipologias de conexão em análise, constata-se que os conectores indentados de espessura de 4 mm apresentam o maior escorregamento médio registado. O pior registo está associado aos conectores perfurados com espessura de 6 mm.

Todos os registos de escorregamento apresentam elevados valores de coeficiente de variação. O mais elevado está associados aos conectores perfurados com espessura de 4 mm. Isto deve-se ao facto de ter ocorrido algum erro com a instrumentação utilizada, já que a variação é significativamente mais elevada que os restantes provetes em estudo.

Na análise dos conectores indentados verifica-se que os conectores com espessura de 4 mm apresentam um aumento do escorregamento para P_{max} de 29.9% face aos conectores com espessura de 6 mm. O coeficiente de variação também é significativamente maior nos conectores com espessura de 4 mm.

Nos conectores perfurados são os conectores com espessura de 4 mm que apresentam o maior aumento de escorregamento associado à carga máxima atingida, com um aumento de escorregamento da ordem dos 11.36% face aos conectores perfurados com espessura de 6 mm.

Nos conectores indentados, os conectores que apresentam o maior escorregamento são os de espessura de 4 mm que apresentam um aumento de escorregamento de 12% face aos de espessura de 6 mm.

Globalmente, encontra-se um aspeto comum no estudo do escorregamento obtido para a carga máxima pelas diferentes tipologias de conexão em análise: os conectores de menor espessura

apresentam valores médios de escorregamento superiores aos valores registados nos conectores de maior espessura.

A exceção do melhor e do pior resultado obtidos, os restantes valores de escorregamento associados à obtenção da carga máxima são bastantes próximos. Constata-se pela análise da Tabela 4.3 que as maiores cargas máximas registadas correspondem aos menores valores de escorregamento.

Tabela 4.3 Escorregamento associado à obtenção da carga máxima médio, desvio-padrão e coeficiente de variação

	Provetes	Carga máxima (kN)	SP _{máx} (mm)	SP _{máx} médio	Desvio Padrão	Coef. Variação
				(mm)	(mm)	(%)
Conectores Indentados	I-E4-1	22,99	0,59	0,67	0,172	25,56
	I-E4-2	24,74	0,59			
	I-E4-3	23,46	0,97			
	I-E4-4	27,59	0,54			
	I-E6-1	15,19	0,54	0,47	0,072	15,35
	I-E6-2	22,74	0,42			
	I-E6-3	23,85	0,38			
	I-E6-4	24,47	0,55			
Conectores Perfurados	P-E4-1	25,51	0,65	0,44	0,187	42,16
	P-E4-2	24,87	1,42			
	P-E4-3	15,85	0,49			
	P-E4-4	21,29	0,20			
	P-E6-1	27,90	0,35	0,39	0,044	11,31
	P-E6-2	24,02	0,45			
	P-E6-3	18,85	1,42			
	P-E6-4	29,04	0,37			
Conectores Lisos	W-E4-1	20,69	0,57	0,50	0,103	20,74
	W-E4-2	25,47	0,46			
	W-E4-3	22,05	0,61			
	W-E4-4	19,84	0,34			
	W-E6-1	22,64	0,35	0,44	0,088	19,81
	W-E6-2	18,94	0,56			
	W-E6-3	12,07	0,10			
	W-E6-4	26,67	0,43			

4.5.3 Ductilidade dos provetes testados

A ductilidade é a capacidade de um material se deformar até à rotura. A ductilidade da conexão analisada é quantificada com base na curva que relaciona força e escorregamento dos conectores (Figura 4.29).

Para a análise da ductilidade será traçado uma reta correspondente aos 90% da carga máxima para todas as curvas representativas da evolução da curva que relaciona força e escorregamento. Esta reta intersecta a referida curva em dois pontos . O primeiro ponto de interseção é considerado como o $s_{90\%,elastic}$, e o segundo ponto de interseção é denominado $s_{90\%,plastic}$.

Para analisar a ductilidade dos provetes testados será adotada a razão entre escorregamento atingido para carga de 90% da carga máxima no ramo plástico $s_{90\%,plastic}$ pelo escorregamento atingido para a carga de 90% da carga máxima no ramo elástico $s_{90\%,elastic}$, designado de Índice de Ductilidade 1. Este Índice de Ductilidade 1 é calculado com base na equação (4.1).

$$\mu_1 = \frac{s_{90\%,plastic}}{s_{90\%,elastic}} \quad (4.1)$$

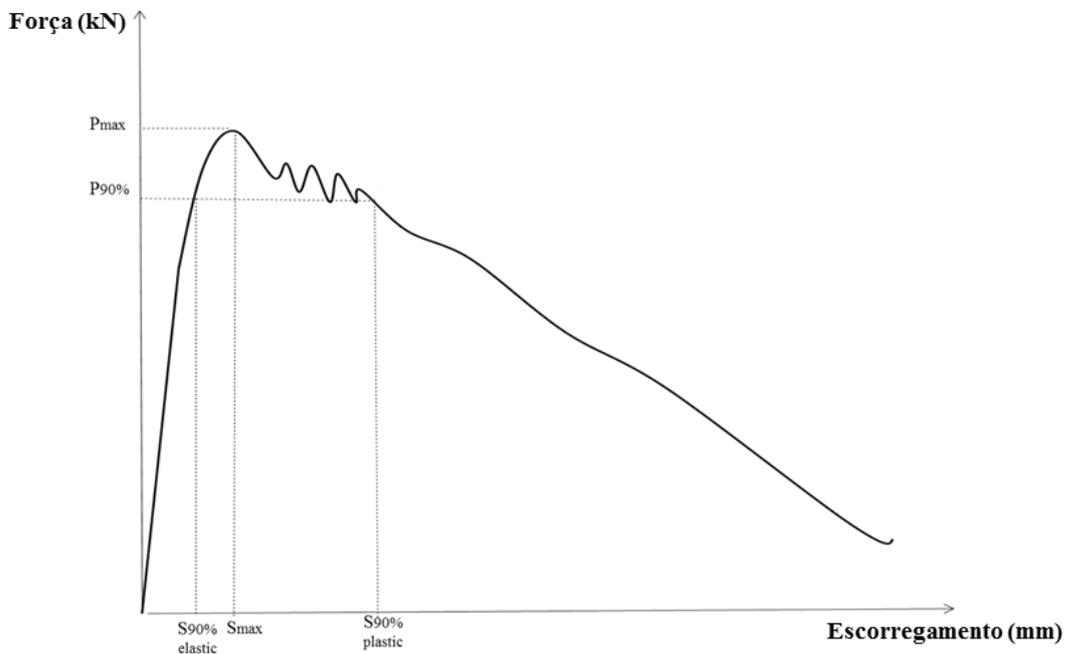


Figura 4.29 Parâmetros definidos para a ductilidade

Como se pode observar na Tabela 4.4, todos os provetes testados apresentam elevado índice ductilidade, como se pode observar pela coluna referente à obtenção Índice ductilidade 1 e a média dos índices registados. Mais se pode constatar pela análise da Tabela 4.4 é visível que

todos os provetes testados apresentarem grande coeficiente de variação associado à obtenção do Índice de ductilidade 1.

A ductilidade é avaliada em função do índice de ductilidade médio, desvio-padrão e coeficiente de variação percentual do índice de ductilidade calculados.

Para avaliação da ductilidade será excluído o provete W-E6-3, que se apresenta destacado de cinzento na Tabela 4.4, pelo facto este provete evidenciar problemas associados à instrumentação utilizada e conter uma fissura que condicionou os resultados obtidos na curva força versus escorregamento, não só na obtenção da carga máxima mas também na ductilidade. Este provete comparativamente com os restantes conectores lisos de espessura de 6 mm apresenta elevada ductilidade sendo desprezado para efeitos de análise da ductilidade.

Sendo que os provetes perfurados de 4 mm apresentam de entre todos os provetes em análise o coeficiente de variação mais elevado, pois que o provete P-E4-4 apresentam significativamente maior ductilidade do que os restantes provetes perfurados com 4 mm de espessura, este aumento de ductilidade é justificado pelo elevado efeito de pino que se evidencia neste provete, como é visível pela observação da argamassa existem nos furos deste conector, que induz à existência de um pino sujeito tanto ao corte como à intensa compressão local. Mas também pelo efeito do atrito existente entre a argamassa e o conector, como comprovado pela marcas apresentadas no conector P-E4-4 (Figura 4.30).

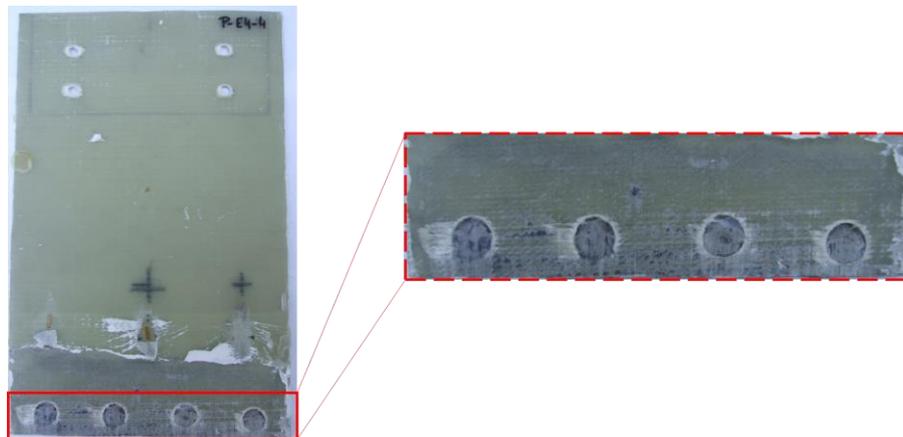


Figura 4.30 Atrito e efeito de pino existente no provete P-E4-4

Os provetes com conectores perfurados GFRP de espessura de 6 mm apresentam o maior índice de ductilidade médio de entre todas as tipologias em análise sendo que comparativamente com os conectores perfurados de 4 mm apresentam um aumento de 26.34% mas também existe um

maior coeficiente de variação associado aos conectores perfurados de 4 mm de espessura, esse aumento é de 35.98%.

Globalmente pode ser constatado que nos conectores perfurados de 6 mm se evidenciou elevado efeito de pino e o atrito que levaram à obtenção da maior ductilidade comparativamente com os restantes provetes em estudo.

Os conectores indentados de espessura de 6 mm obtiveram um índice de ductilidade médio muito similar aos conectores perfurados de 6 mm. Existe um aumento de 2.34% de ductilidade dos conectores perfurados de 6 mm comparativamente com os indentados de 6 mm de espessura. Face aos conectores indentados a ductilidade entre eles é muito semelhante existindo um aumento de 2.05% dos conectores indentados de 6 mm face aos conectores indentados de 4 mm, sendo que em termo de coeficiente de variação existe uma maior diferenciação entre eles existindo um aumento de coeficiente de variação da ordem dos 55.45% conectores indentados espessura de 6 mm face aos indentados espessura de 4 mm.

Os conectores lisos são os que obtiveram o pior índice de ductilidade de entre todos os provetes testados, sendo que o melhor resultado dos conectores lisos são os conectores lisos com espessura de 6 mm obtendo um aumento de 11.03% do índice de ductilidade médio face aos conectores lisos de espessura de 4 mm. Sendo que os conectores lisos de espessura de 6 mm apresentam um aumento do coeficiente de variação na ordem dos 17.23% face aos conectores lisos de espessura de 4 mm.

Todas as tipologias apresentam melhor ductilidade associada a maior espessura existente, como se pode constatar pela análise da Tabela 4.4. Sendo que os melhores resultados de índice de ductilidade estão associados aos provetes perfurados e indentados. Justificado pelo elevado efeito de pino e o maior atrito existente nestes provetes.

Tabela 4.4 Índice de Ductilidade 1

	Provete	Carga máxima (kN)	P _{90%} (kN)	S _{90%,plastic} (mm)	S _{90%,elastic} (mm)	Índice Ductilidade 1	Média	DP	Coef. Variação (%)
Conectores Indentados	I-E4-1	22,99	20,69	3,19	0,33	9,63	13,89	2,73	19,65
	I-E4-2	24,74	22,27	4,61	0,28	16,42			
	I-E4-3	23,46	21,12	4,81	0,36	13,38			
	I-E4-4	27,59	24,83	4,84	0,30	16,12			
	I-E6-1	15,19	13,67	3,17	0,34	9,22	14,18	6,25	44,11
	I-E6-2	22,74	20,46	5,13	0,25	20,23			
	I-E6-3	23,85	21,46	3,95	0,19	20,51			
	I-E6-4	24,47	22,03	2,03	0,30	6,75			
Conectores Perfurados	P-E4-1	25,51	22,96	3,23	0,40	8,06	10,68	7,04	65,95
	P-E4-2	24,87	22,39	2,89	0,66	4,39			
	P-E4-3	15,85	14,26	2,18	0,28	7,64			
	P-E4-4	21,29	19,16	1,93	0,09	22,63			
	P-E6-1	27,90	25,11	1,41	0,21	6,68	14,52	6,13	42,22
	P-E6-2	24,02	21,62	2,41	0,23	10,38			
	P-E6-3	18,85	16,97	5,13	0,25	20,21			
	P-E6-4	29,04	26,14	3,80	0,18	20,79			
Conectores Lisos	W-E4-1	20,69	18,62	1,68	0,35	4,81	7,50	2,01	26,85
	W-E4-2	25,47	22,92	1,93	0,30	6,37			
	W-E4-3	22,05	19,85	1,92	0,19	9,86			
	W-E4-4	19,84	17,85	1,65	0,18	8,97			
	W-E6-1	22,64	20,37	1,88	0,19	9,92	8,43	2,74	32,44
	W-E6-2	18,94	17,04	2,16	0,20	10,78			
	W-E6-3	12,07	10,86	1,39	0,05	27,56			
	W-E6-4	26,67	24,00	1,06	0,23	4,60			

Análise do ramo elástico

A rigidez elástica k , é obtida a partir do declive medido na fase elástica da curva que relaciona força e escorregamento. Para tal, considera-se que para 60% da carga máxima, o provete ainda se encontra em regime elástico. Na Tabela 4.5 encontram-se os resultados da rigidez elástica obtidos através do uso da equação (4.2),

$$k = \frac{P_{60\%}}{S_{60\%}} \quad (4.2)$$

em que,

- $P_{60\%}$ representa 60% da carga máxima obtida no ramo elástico da curva força-escorregamento, expressa em kN;
- $S_{60\%}$ representa o escorregamento associado à obtenção de 60% da carga máxima no ramo elástico da curva força-escorregamento, expressa em mm.

Tal como apresentado na equação (4.2), a rigidez elástica calculada é a razão entre 60% da carga máxima no regime elástico da curva força-escorregamento pelo escorregamento associado à obtenção de 60% da carga máxima. Na Figura 4.31 representam-se todos os parâmetros associados à obtenção da rigidez elástica, k .

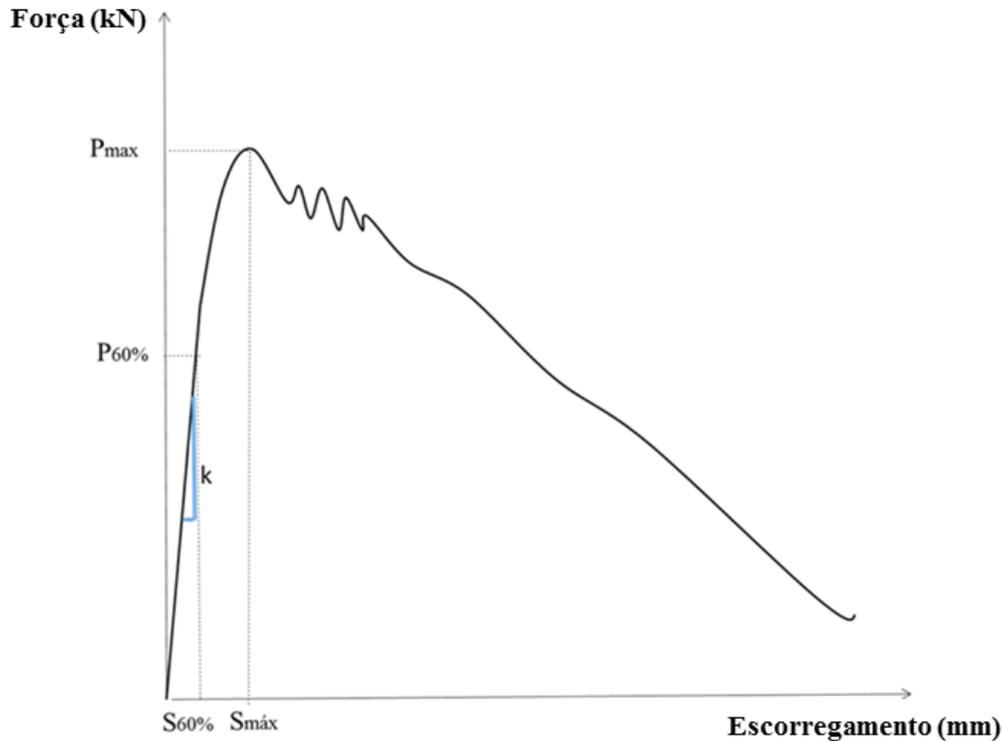


Figura 4.31 Parâmetros associados à rigidez elástica

Pela análise da Tabela 4.5 verifica-se valores destacados a cinzento que foram excluídos para análise do ramo elástico da curva força versus escorregamento. Todos estes valores também foram excluídos para análise da capacidade de carga, sendo que os condicionalismos que estão na origem destas diferenças já anteriormente foram mencionadas quando se efetuou avaliação da capacidade de carga.

Para esta análise também foram excluídos os provetes marcados a azul. O provete P-E4-2 foi excluído pois existe uma falha nos transdutores que medem o escorregamento sendo visível no gráfico representativo da evolução da curva força *versus* escorregamento uma ligeira alteração no ramo linear no instante dos 11 kN até aos 13 kN que influencia a rigidez registada pois existe uma perda de rigidez devido a uma falha na instrumentação. Existe também um ligeiro desfasamento perceptível pela observação da curva força-escorregamento do provete P-E4-2 que altera significativamente o escorregamento associado.

O provete P-E4-4 foi excluído pelo facto de quando comparado com os restantes valores atingidos nenhum atingiu uma rigidez tão elevada como este provete. Não só ao nível dos conectores perfurados de espessura de 4 mm mas quando comparado com os restantes conectores e tipologias em estudo. Sendo considerado o valor da rigidez do provete P-E4-4 aumentava significativamente a média da rigidez associada ao conector perfurado de 4 mm de

espessura mas também aumentava substancialmente o coeficiente de variação, o que inviabiliza os resultados obtidos.

Esta maior rigidez inicial está associada ao elevado efeito de pino que este conector apresenta, como é perceptível pela observação do conector GFRP P-E4-4, onde é visível argamassa em todos os furos. São ainda visíveis marcas significativas devidas ao atrito.

É visível que todos os conectores apresentam elevada rigidez inicial. Além disso apresentam elevados valores associado ao coeficiente de variação associado aos resultados obtidos para a rigidez elástica para cada tipologia de conexão em estudo.

Para os conectores perfurados, o melhor registo é dos conectores perfurados de 6 mm que apresentam um aumento de rigidez de 56.9% face aos conectores perfurados de 4 mm de espessura. Os conectores perfurados de 6 mm apresentam o melhor registo de rigidez elástica média de todas as tipologias de conexão em estudo e por sua vez os conectores perfurados de 4 mm de espessura globalmente contêm o pior registo de rigidez elástica média.

Relativamente aos conectores indentados, os que apresentam maior rigidez inicial são os conectores indentados de espessura de 6 mm apresentando um aumento de 29.3% face aos conectores indentados de espessuras de 4 mm, sendo estes últimos conectores, os que apresentam maior coeficiente de variação dos valores registados de rigidez elástica, dos dois conectores em análise. Atendendo aos registos individuais da rigidez elástica, os conectores indentados de 6 mm de espessura em estudo apresentam valores substancialmente mais elevados do que os resultados apresentados pelos conectores indentados de espessura de 4 mm. Conclui-se que a espessura do conector afeta significativamente a rigidez inicial dos provetes com conectores indentados. A maior espessura de conector conduz à obtenção do valor de rigidez inicial mais elevado.

Na análise dos conectores lisos, os conectores com espessura de 6 mm apresentam maiores registos de rigidez elástica contendo um aumento de 12.9% da rigidez inicial face aos conectores com espessura de 4 mm. Os conectores lisos de 6 mm de espessura apresentam o coeficiente de variação de rigidez mais elevado face aos conectores lisos de espessura de 4 mm. Este aumento de variação é da ordem dos 51.3%.

Pela análise da Tabela 4.5 constata-se que os conectores de espessura de 6 mm apresentam valores mais elevados de rigidez elástica face aos conectores de 4 mm de espessura. Sendo este um aspeto preponderante na obtenção de maior rigidez inicial. Isto deve-se ao facto da maior espessura estar associada ao aumento da área de contacto da argamassa e o conector GFRP, que

conduz a um aumento da aderência dos materiais que influencia significativamente no aumento da rigidez elástica registada.

Concluir-se pela análise da Tabela 4.5 que quanto maior é a carga registada, menor é o escorregamento associado e maior a rigidez elástica apresentada pelos provetes testados.

Tabela 4.5 Rigidez elástica dos provetes testados

	Provete	Carga máxima (kN)	P _{60%} (kN)	s _{60%} (mm)	Rigidez elástica, k (kN/mm)	Rigidez elástica média (kN/mm)	Desvio Padrão (kN/mm)	Coef. Variação (%)
Conectores Indentados	I-E4-1	22,99	13,79	0,121	114,31	126,48	26,403	20,88
	I-E4-2	24,74	14,84	0,092	161,10			
	I-E4-3	23,46	14,08	0,155	90,86			
	I-E4-4	27,59	16,56	0,119	139,65			
	I-E6-1	15,19	9,12	0,160	71,60	178,82	21,914	12,25
	I-E6-2	22,74	13,64	0,086	158,46			
	I-E6-3	23,85	14,31	0,068	209,24			
	I-E6-4	24,47	14,68	0,087	168,77			
Conectores Perfurados	P-E4-1	25,51	15,31	0,151	99,79	91,96	9,366	10,18
	P-E4-2	24,87	11,19	0,491	30,41			
	P-E4-3	15,85	9,51	0,115	82,60			
	P-E4-4	21,29	12,77	0,026	498,13			
	P-E6-1	27,90	16,74	0,091	183,70	213,31	47,022	22,04
	P-E6-2	24,02	14,41	0,082	176,55			
	P-E6-3	18,85	11,31	0,122	92,61			
	P-E6-4	29,04	17,43	0,062	279,68			
Conectores Lisos	W-E4-1	20,69	12,41	0,138	90,14	136,10	46,235	33,97
	W-E4-2	25,47	15,28	0,170	90,11			
	W-E4-3	22,05	13,23	0,076	175,04			
	W-E4-4	19,84	11,90	0,063	189,08			
	W-E6-1	22,64	13,58	0,074	183,34	156,26	25,864	16,55
	W-E6-2	18,94	11,36	0,069	164,01			
	W-E6-3	12,07	7,24	-0,006	-----			
	W-E6-4	26,67	16,00	0,132	121,42			

4.5.4 Avaliação das extensões no GFRP

No ensaio experimental foram colados transdutores e extensômetros de Gauge (strain gauge) que permitiram medir valores de extensão ao longo do carregamento. Os valores máximos registrados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Extensões obtidas no conector GFRP dos provetes testados

Provete	Extensão máxima							média
	LVDT_1	LVDT_2	LVDT_3	LVDT_4	SCXI0	SCXI1	SCXI3	
I-E4-1	-----	-----	0,0021	0,0012	0,0018*	0,0015*	0,00010*	0,001515
I-E4-2	0,0005	0,0015	-----	-----	0,0020**	0,0017**	-----	0,001425
I-E4-3	0,0011	0,0013	0,0018	0,0023	-----	-----	-----	0,001625
I-E4-4	0,0015	0,0023	0,0015	0,0020	-----	-----	-----	0,001825
I-E6-1	0,0003	0,0008	0,0006	0,0005	-----	-----	-----	0,000555
I-E6-2	0,0009	0,0014	0,0007	0,0004	-----	-----	-----	0,000850
I-E6-3	0,0003	0,0008	0,0015	0,0012	-----	-----	-----	0,000950
I-E6-4	0,0009	0,0013	0,0015	0,0014	-----	-----	-----	0,001275
P-E4-1	-----	-----	0,0017	0,0013	0,0018*	0,0016*	-----	0,001600
P-E4-2	0,0008	0,0002	0,0026	0,0018	-----	-----	-----	0,001350
P-E4-3	0,0004	0,0008	0,0016	0,0012	-----	-----	-----	0,001000
P-E4-4	-----	-----	0,0014	0,0010	0,0015*	0,0013*	-----	0,001300
P-E6-1	0,0025	0,0012	0,0012	0,0008	-----	-----	-----	0,001425
P-E6-2	0,0004	0,0010	0,0013	0,0010	-----	-----	-----	0,000925
P-E6-3	0,0007	0,00002	0,00075	0,00083	-----	-----	-----	0,000575
P-E6-4	0,0004	0,0010	0,0018	0,0016	-----	-----	-----	0,001200
W-E4-1	0,0008	0,0011	0,0018	0,0012	-----	-----	-----	0,001225
W-E4-2	0,0009	0,0021	0,0016	0,0011	-----	-----	-----	0,001425
W-E4-3	0,0014	0,0017	0,0015	0,0014	-----	-----	-----	0,001500
W-E4-4	0,0007	0,0015	0,0015	0,0008	-----	-----	-----	0,001125
W-E6-1	0,0005	0,000002	0,0011	0,0007	-----	-----	-----	0,000576
W-E6-2	0,0001	0,0003	0,0018	0,0017	-----	-----	-----	0,000975
W-E6-3	0,0001	0,0001	0,0012	0,0010	-----	-----	-----	0,000600
W-E6-4	0,0009	0,0019	0,0009	0,0007	-----	-----	-----	0,001100

*SCXI1=LVDT_1; SCXI0=LVDT_2; SCXI3-representa o extensômetro colado na extremidade do conector do lado da face da retaguarda do provete, todos estes extensômetros e/ ou transdutores são colados do lado direito do conector de GFRP

**SCXI0=LVDT_3; SCXI1=LVDT_4 são colocados do lado esquerdo do conector de GFRP

Pelos dados apresentados na Tabela 4.6 constata-se que em nenhum dos conectores ensaiados é atingida uma extensão próxima da extensão máxima obtida nos provetes de caracterização. O que indica que não existiu rotura no conector GFRP.

Por vezes é observado que existe mais extensão associada a uma das extremidades do conector, o que indica que o atuador transmitiu mais carga ao lado em que se observa as maiores extensões. Os fatores que poderão estar na origem dessas alterações são o desalinhamento do atuador com o provete. O desalinhamento das amarras com o atuador ou com o conector GFRP que levam a que a carga se faça sentir mais de um dos lados do conector GFRP. Um exemplo óbvio é o conector P-E6-1 que apresenta maior extensão associada ao LVDT_1 comparativamente com o LVDT_4, sendo que o LVDT_1 é colado do lado direito do conector GFRP junto à face frontal do provete enquanto o LVDT_4 é colado do lado esquerdo do conector GFRP junto à face retaguarda do provete. São colocados em extremidades opostas, sendo que junto à face frontal se registam as maiores extensões, o que indicia que o atuador transmitiu mais carga do lado onde se encontra este transdutor, os fatores que levaram a esse aumento de carga já foram mencionados. Como este conector outros apresentam a mesma situação como se pode visualizar pela análise da Tabela 4.6. Todos eles estão destacados de cinzento como se pode observar na Tabela 4.6.

Em síntese do que já foi mencionado anteriormente é constatado que pela análise da Tabela 4.6 ocorreram provavelmente ligeiras imprecisões no ajuste das amarras, com o alinhamento do conector GFRP com o atuador, o alinhamento das amarras com o atuador e com o conector GFRP. Erros esses associados à incorreta montagem do ensaio experimental devido à dificuldade de controlar devidamente a posição dos vários acessórios e componentes utilizados no ensaio *pull-out*. É um ensaio que requer alguma experiência de montagem que se vai adquirindo como o decorrer da realização dos diversos ensaios *pull-out* a estudar.

Os provetes destacados de azul, P-E6-3 e W-E6-1 relativamente ao LVDT_2 é evidente que ocorreu algum erro na instrumentação utilizada. Visto que os valores registados pelo transdutor LVDT2 são significativamente inferiores aos restantes transdutores colocados nos conectores GFRP destes provetes. Nos restantes transdutores são registados valores de extensões semelhantes. Os erros estão associados a um possível encravamento que terá ocorrido no LVDT_2. Relativamente ao provete I-E4-1 nomeadamente no extensómetro SCXI3 também destacado de azul na Tabela 4.6 é visível pela comparação das restantes extensões obtidas que ocorreu um erro com a colocação do extensómetro pois registou as extensões significativamente mais baixas. Sendo que as restantes extensões são relativamente próximas.

4.5.5 Avaliação da relação entre força e escorregamento

Conectores indentados de espessura de 4 mm

Na análise da Figura 4.34 verifica-se que os provetes apresentam no trecho inicial comportamentos semelhantes com elevados valores de rigidez elástica, apresentando um desenvolvimento praticamente linear até atingir a carga máxima.

Imediatamente após atingir a carga máxima, os provetes I-E4-2 e I-E4-4 apresentam desenvolvimentos semelhantes. O mesmo acontece entre com os provetes I-E4-1 e I-E4-3 apresentam comportamento semelhante, nomeadamente, no intervalo de escorregamento 0.59 mm até 2.5 mm.

Sendo que no provete I-E4-3, antes de atingir a carga máxima, há uma rápida e significativa perda de carga, que conduz a uma diminuição da rigidez da conexão, ao qual se segue uma ligeira recuperação de carga. Atingindo assim a carga máxima registada no provete I-E4-3. Através da análise visual a “olho nu” do provete não foi detetado qualquer dano, nem fissura. O que leva a pensar, que o atuador deveria estar com problemas no ajuste da carga à aplicar no conector ao longo do escorregamento, após atingir a carga máxima. Pois no intervalo de escorregamento obtido dos 0.59 mm até aproximadamente os 6 mm, verifica-se picos de perda de carga alternados com recuperação de carga. Uma outra hipótese a ter em consideração é o facto de ter ocorrido alguma microfissura no provete de argamassa que estivesse na origem das oscilações de perda e recuperação de carga que não fosse detetável a “olho nu”. O que justificaria a rápida e significativa perda de carga, ao qual se segue uma ligeira recuperação de carga.

Já no provete I-E4-1 após atingir a carga máxima, a curva força-escorregamento apresenta picos de perda de carga com ligeira recuperação, que estão associados ao aparecimento do destacamento da camada superior de argamassa do provete, como é visível na Figura 4.32. Após atingir 4 mm até aos 20 mm de escorregamento medido verifica-se no desenvolvimento da curva força-escorregamento uma diminuição da perda de carga gradualmente ao logo do escorregamento medido.

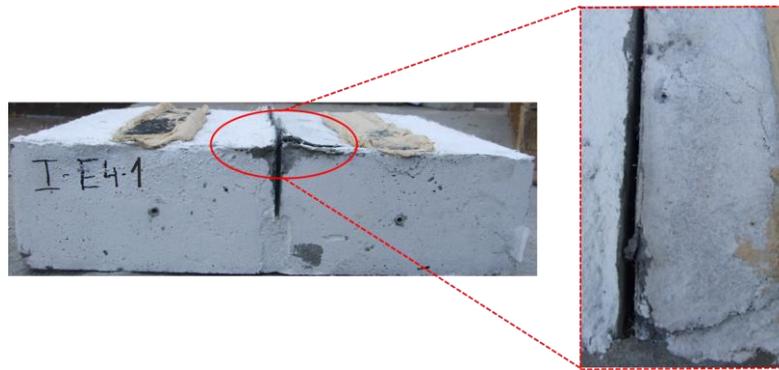


Figura 4.32 Destacamento da camada de argamassa superior junto à ranhura do conector GFRP

O provete I-E4-4 após atingir a carga máxima apresenta uma diminuição da perda de carga gradualmente ao longo do escorregamento medido. A partir dos 4 mm até aos 20 mm apresenta um desenvolvimento da curva força-escorregamento muito semelhante ao verificado no provete I-E4-1, com diminuição de carga gradual ao longo do escorregamento medido.

Os provetes I-E4-2 e I-E4-3 apresentam um desenvolvimento da curva força-escorregamento semelhante, nomeadamente, quando atingem 8 mm de escorregamento até aos 20 mm de escorregamento medido. Visualiza-se que neste intervalo de escorregamento medido, as curvas de ambos os provetes praticamente coincidem. Constata-se pela análise visual da Figura 4.34 que estes provetes face aos provetes I-E4-1 e I-E4-2 apresentam uma diminuição mais rápida e acentuada da perda de carga ao longo do escorregamento medido.

Relativamente a carga máxima registada é visível que o provete I-E4-4 apresenta a maior carga máxima registada sendo substancialmente superior aos restantes provetes em estudo com conectores GFRP indentados de espessura 4 mm. Este aumento de carga face aos restantes deve-se ao facto do provete I-E4-4 ter evidenciado maior atrito entre o conector I-E4-4 com o provete de argamassa, como é visível pelas marcas existentes no conector I-E4-4 (Figura 4.33).

Pela observação da Figura 4.34 é perceptível que o provete I-E4-1 apresentam o pior comportamento dúctil face aos restantes provetes em análise que apresentam comportamentos muito semelhantes. Apresentam bom comportamento dúctil comparativamente com o obtido no provete I-E4-1.

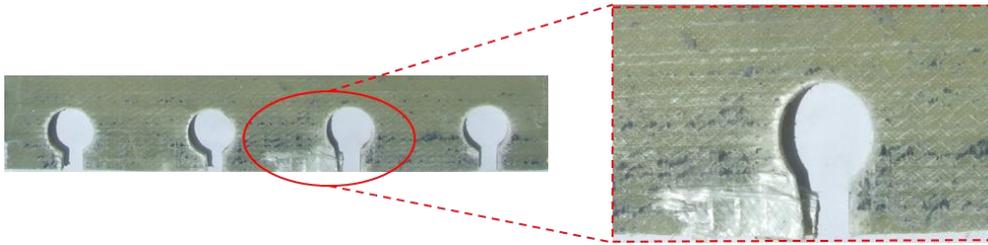


Figura 4.33 Marcas derivadas do atrito existente entre conector GFRP e provete de argamassa I-E4-4

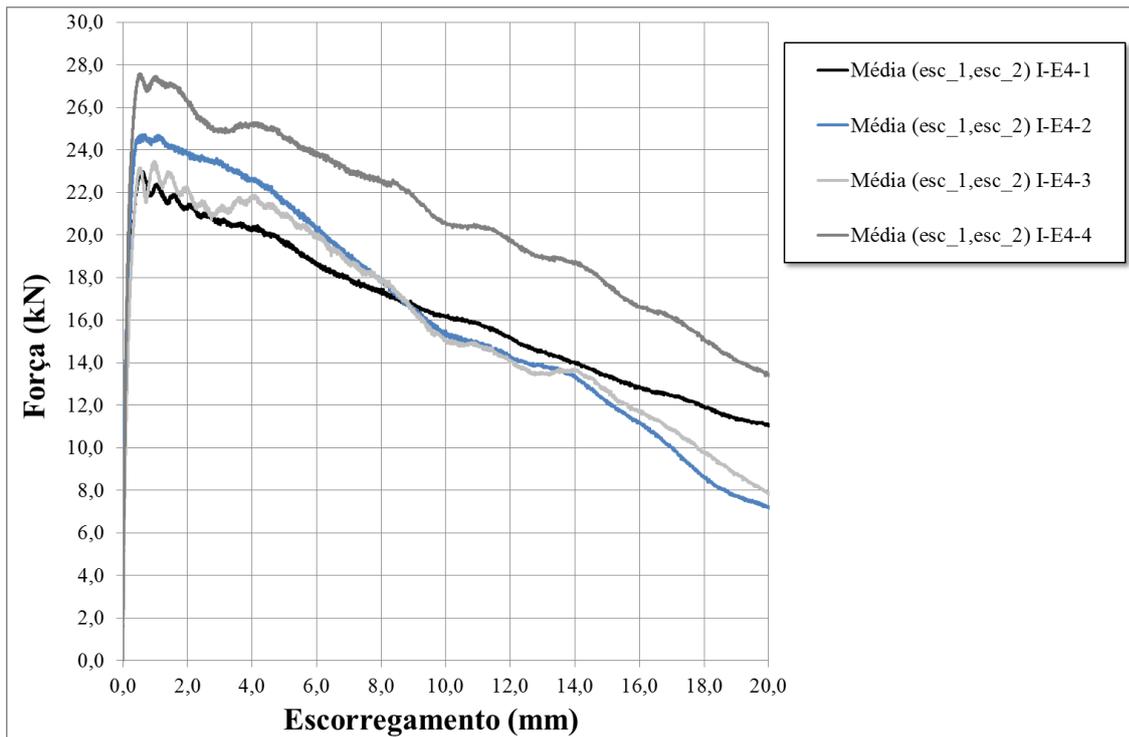


Figura 4.34 Curvas de Força-Escorregamento obtidos para os conectores indentados 4 mm espessura

Conectores indentados de espessura de 6 mm

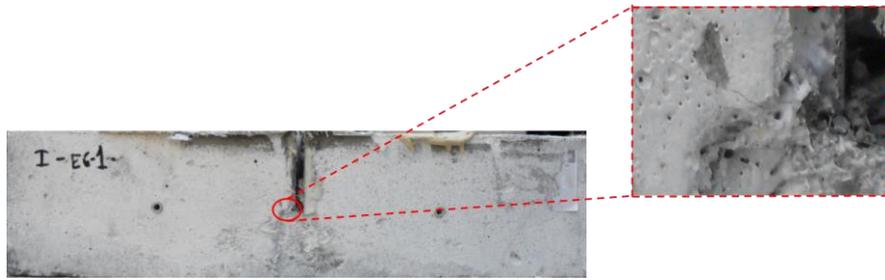
Na Figura 4.36 relativo aos conectores indentados com espessura de 6 mm é visível que o provete I-E6-1 apresenta no trecho inicial rigidez mais baixa que os restantes conectores. Nos restantes conectores no trecho inicial a rigidez é semelhante e elevada. O desenvolvimento do provete I-E6-1 é semelhante aos restantes, apesar de apresentar carga máxima substancialmente inferior aos restantes, ao que leva a pensar, que deve ter ocorrido algum erro durante a produção da argamassa ou mesmo durante montagem do esquema ensaio adotado para a realização do ensaio experimental, devido ao manuseamento do provete, poderá ter conduzido à acumulação excessiva de força no conector que tenha danificado a capacidade de carga do provete. Estes erros já foram relatados anteriormente quando se efetuou a análise da capacidade de carga atingida nos provetes testados.

A carga máxima atingida nos provetes I-E6-2, I-E6-3 e I-E6-4 é semelhante. O que indica que existiu mesmo um erro com o provete I-E6-1 que conduziu à diminuição significativa da capacidade de carga comparativamente com os restantes provetes em análise pela análise do provete I-E6-1 identificou-se um fissura na argamassa junto à ranhura do limite inferior do GFRP (Figura 4.35 a) sendo este o principal facto que levou a perda de capacidade por parte do provete I-E6-1 comparativamente com os restantes provetes em estudo.

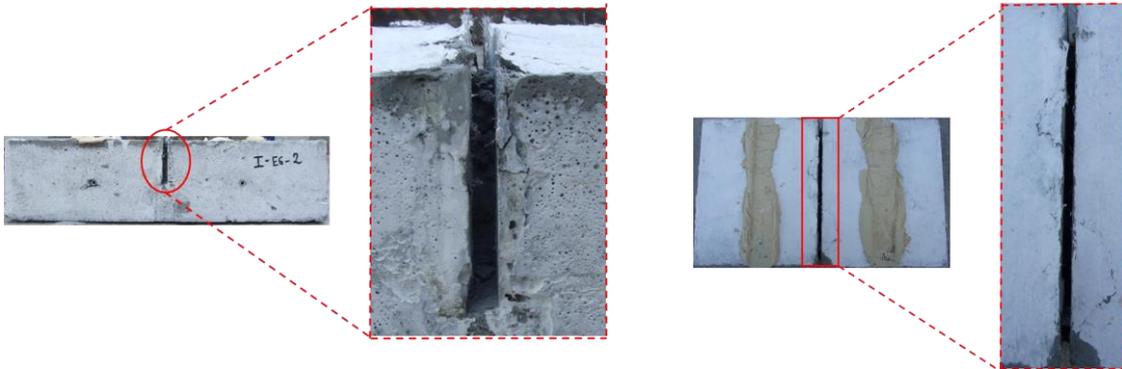
O provete I-E6-4 atingiu a carga máxima mais elevada de entre os quatro provetes em estudo. Após atingir a carga máxima há uma rápida e significativa perda de carga, não existe recuperação de carga. Depois a curva força-escorregamento desenvolve-se até 20 mm de escorregamento apresentando uma diminuição de carga gradual ao longo do escorregamento medido. Este conector é o que apresenta o pior comportamento dúctil, sendo justificado pelo facto dos furos e rasgos não apresentarem existem de argamassa face aos restantes provetes que é visível pela observação dos conectores GFRP que continham argamassa. O conector GFRP I-E6-4, dentro dos quatro provetes em estudo, é o conector com marcas mais significativas devido ao atrito existente entre a argamassa e o conector GFRP. Face ao facto de não existir argamassa nos furos e rasgos do conector, conduz a efeitos de atrito mais significativos. O atrito é o fator que mais contribuiu para a maior carga máxima registada no provete I-E6-4 face aos restantes. Sendo que este provete apresenta a formação de uma cunha (Figura 4.35 c) ocorrido no final do ensaio do escorregamento que nada influenciou nos resultados de escorregamento medidos até aos 20 mm.

No provete I-E6-3 após atingir a carga máxima visualiza-se uma diminuição da capacidade de carga lentamente existindo alternância de perda com recuperação da carga até atingir 3.5 mm de escorregamento. Depois de atingir este escorregamento a perda de carga é ligeiramente superior aos restantes provetes. Apresentando um bom comportamento dúctil muito semelhante ao verificado no provete I-E6-2. Devido ao facto de ambos terem dois dos furos com argamassa.

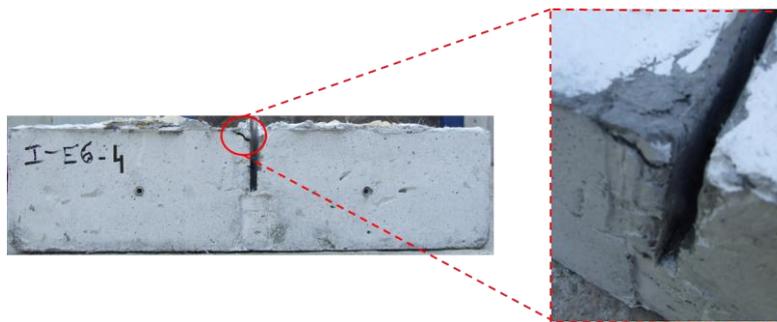
No provete I-E6-2 após atingir a carga máxima observa-se uma rápida e significativa perda de carga, à qual se segue uma pequena recuperação de carga. Permitindo verificar-se um patamar de carga, que define o comportamento dúctil do provete, como é perceptível pela análise visual do Figura 4.36 , este conector é o que apresenta melhor comportamento dúctil face aos quatro conectores em estudo justificado pelo aparecimento de destacamento de argamassa na camada superior junto à ranhura do conector GFRP (Figura 4.35 b). Depois de atingir os 6 mm de escorregamento, a curva força-escorregamento apresenta uma diminuição gradual da capacidade de carga. Sendo que todas as curvas apresentam desenvolvimentos semelhantes.



a) Fissuração no provete I-E6-1



b) Destacamento da camada de argamassa superior no provete I-E6-2



c) Desenvolvimento de uma cunha na parte final do ensaio *pull-out* do provete I-E6-4

Figura 4.35 Danos ocorridos em alguns provetes com conectores indentados de espessura de 4 mm

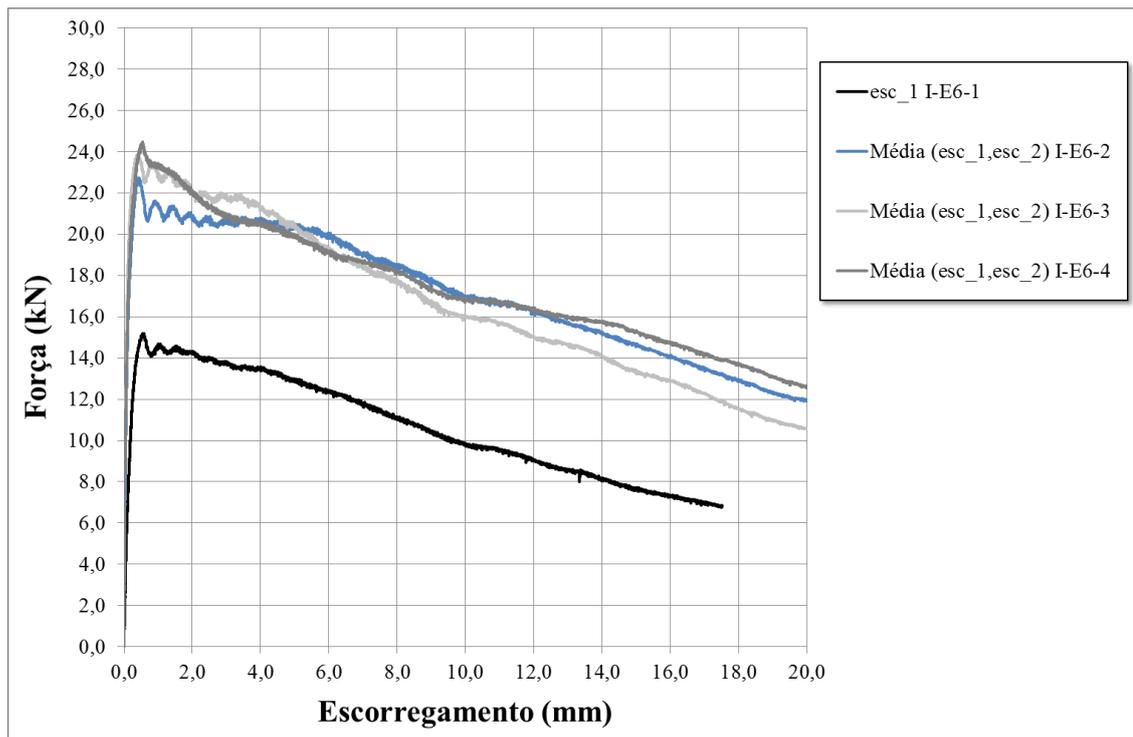


Figura 4.36 Curvas de Força-Escorregamento obtidos para os conectores indentados 6 mm espessura

Conectores perfurados de espessura de 4 mm

Na Figura 4.38 referente aos provetes com conectores perfurados de 4 mm de espessura é de constatar que existe muita diferenciação dos valores obtidos de carga máxima. Sendo que existem dois que obtiveram valores de carga máxima muito próximo e os mais elevados, o provete P-E4-1 e o P-E4-2.

É visível que o conector com mais rigidez no trecho inicial é o conector P-E4-4 obtendo uma carga máxima intermédia as registadas pelos restantes provetes. Este provete é o que apresenta no trecho inicial a rigidez mais elevada. Após atingir a carga máxima constata-se uma brusca perda de carga, o que indica que a rotura por corte nos pinos que ocorreu nas duas direções apresenta comportamento frágil. Não existindo recuperação de carga. Após a brusca perda de carga o provete continua a diminuir a capacidade de carga mas de uma forma gradual ao longo do escorregamento medido. Este conector é o que apresenta maiores marcas devidas ao atrito existente entre a argamassa e o GFRP e também apresenta argamassa nos quatros furos, este provete é o que apresenta o maior comportamento dúctil é justificado pelo maior efeito de pino de argamassa no provete P-E4-4, indica a ocorrência de corte nas duas direções.

No provete P-E4-2 ocorreu uma falha durante o ensaio, nomeadamente, nos tramo inicial quando se atinge o intervalo de carga dos 11 kN até 13 kN verifica-se uma alteração no ramo

linear com aumento escorregamento e constata-se uma diminuição da inclinação do tramo, o leva a uma diminuição da rigidez, mas isso deve-se algum problema que ocorreu com a instrumentação utilizada para medir o escorregamento. Visto que após o deslocamento existente, o desenvolvimento da curva força-deslocamento é muito semelhante aos restantes. Este provete apresenta rotura frágil, visto que após atingir a carga máxima, há uma brusca perda de carga, sem recuperação de carga. Após atingir 8 mm de escorregamento, a curva força-escorregamento apresenta uma diminuição gradual da capacidade de carga. O conector GFRP apresentava apenas um furo com argamassa.

No provete P-E4-1 identifica-se que no trecho inicial apresenta elevada rigidez, este provete registou a carga máxima mais elevada nos conectores perfurados de 4 mm de espessura. Após a carga máxima, o conector apresenta alternâncias de perdas e recuperações de carga. Recuperação está não muito significativa pois a curva força-escorregamento apresenta uma evolução gradual da diminuição de capacidade de carga ao longo do escorregamento do conector. Este conector apresenta no final do ensaio quatro furos com argamassa, o que evidência o elevada efeito pino existente, que deu origem ao corte em duas direções, que levou a que este conector obtivesse a maior carga máxima registada para os conector perfurados de 4 mm.

O provete P-E4-3 apresenta a carga máxima mais baixa registada pelos quatros conectores em estudo. Na análise da capacidade de carga já foi referido alguns fatores que estão associados a está perda significativa de carga máxima, o mais plausível é que a betoneira devido ao facto desta argamassa conter mais volume amassar, não tenha sido efetuado devidamente a ligação entre os diferentes materiais que originam a argamassa DHCC durante a amassadura, o que justificaria o aparecimento da fenda no provete pois nos restantes provetes não é visível pelo menos a “olho nu” o aparecimento de fendas. Quanto a curva força-escorregamento apresenta um desenvolvimento semelhante aos restantes. Após atingir a carga máxima, este conector apresenta alternância de perda com recuperação de carga devida a formação de fenda no provete de argamassa junto ao limite inferior da ranhura onde estava inserido o conector (Figura 4.37). Depois verifica-se apenas a diminuição de carga gradualmente ao logo do desenvolvimento da curva força-escorregamento.

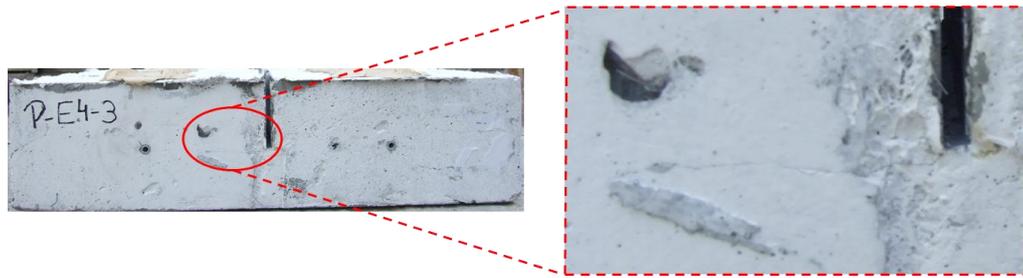


Figura 4.37 Fissura ocorrida no provete P-E4-3

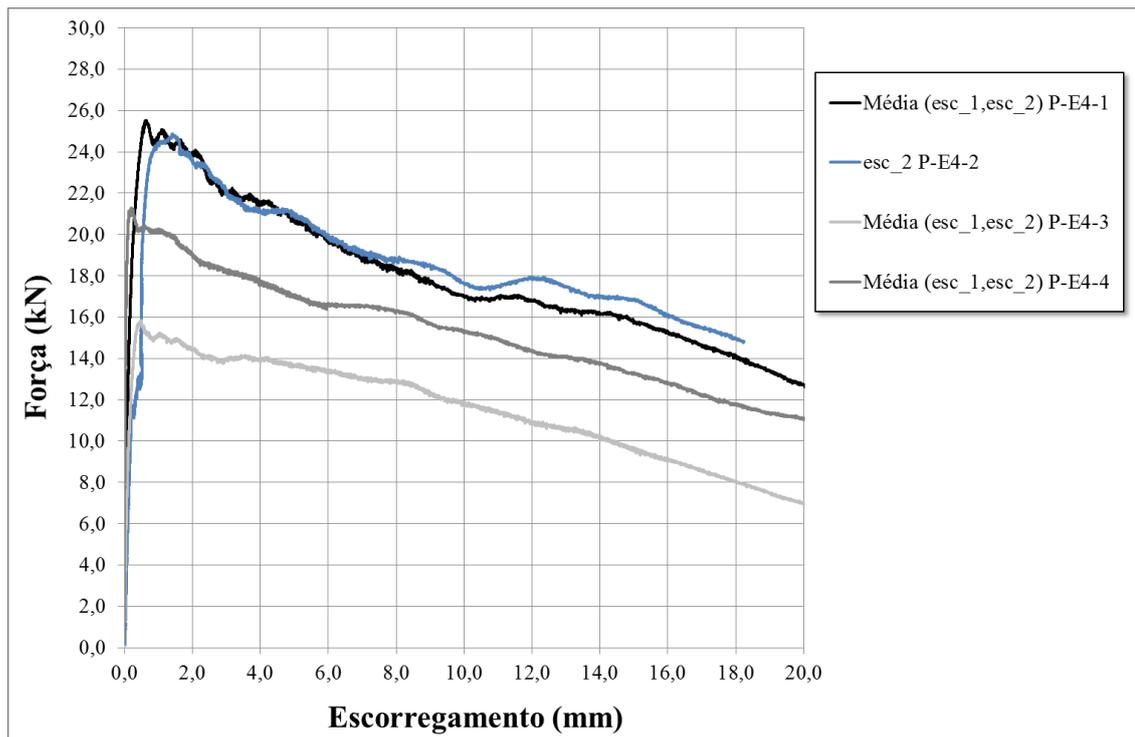


Figura 4.38 Curvas de Força-Escorregamento obtidos para os conectores perfurados 4 mm espessura

Conectores perfurados de espessura de 6 mm

No Figura 4.40 representativo da evolução da curva força-escorregamento dos provetes perfurados de espessura de 6 mm verifica-se que todos eles apresentam no trecho inicial elevada rigidez e desenvolvimentos semelhantes. Sendo que a carga máxima é diferente em todos. Existe dois provetes com carga máxima atingidas semelhantes que são o provete P-E6-4 e P-E6-1. Sendo que o comportamento que exibem após a carga máxima é diferente em ambos. O P-E6-4 após atingir a carga máxima há perda de carga, sem recuperação. A capacidade de carga vai diminuindo gradualmente com o desenvolvimento da curva força-escorregamento. Apresenta o melhor comportamento dúctil verificado nesta tipologia de conexão em estudo. É visível a formação de uma fissura no provete de argamassa junto à ranhura do limite inferior do

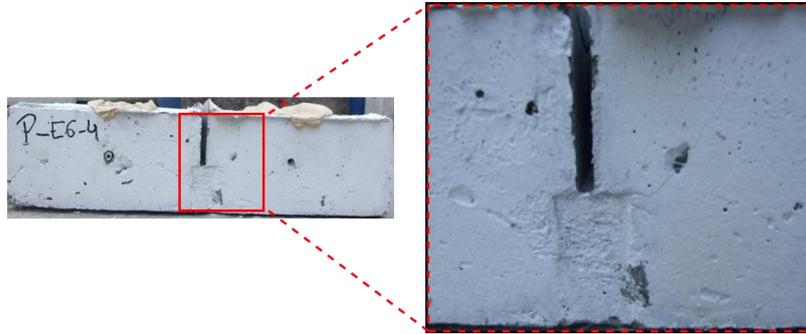
conector GFRP (Figura 4.39 a) ocorreu depois de se atingir a carga máxima. Está fissura não condicionou a capacidade de carga atingida pelo conector em análise. A fissura justifica a maior ductilidade apresentada por este conector.

O provete P-E6-1 após atingir a carga máxima apresenta perda de carga rápida e significativa, à qual se segue uma ligeira recuperação. Este é o conector com pior comportamento dúctil comparativamente com os restantes aqui em análise. Verifica-se que a curva força *versus* escorregamento, a partir dos 2 mm de escorregamento desenvolve-se com uma diminuição gradual da capacidade de carga ao longo do escorregamento medido.

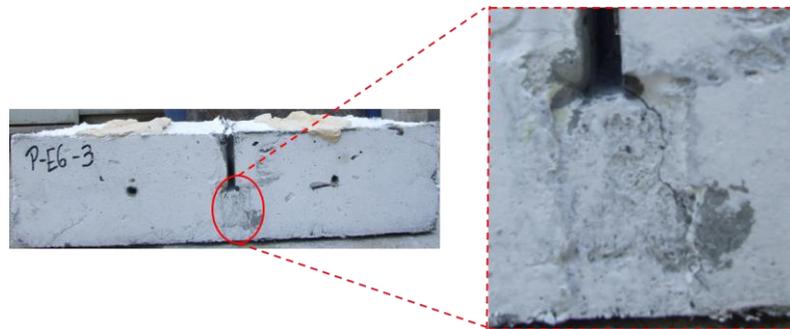
O provete P-E6-2 apresenta carga máxima intermédia as registadas pelos restantes provetes. Após atingir a carga máxima o provete perde carga, sem recuperação de carga significativa. Ao longo do desenvolvimento da curva força-escorregamento apresenta diminuição gradual da capacidade de carga. Este conector apresenta comportamento dúctil de nível intermédio aos verificados no provete P-E6-4 e no provete P-E6-1.

No provete P-E6-3 verificou-se que a carga máxima registada foi substancialmente inferior aos restantes conectores em análise. Na Figura 4.40 enquanto nos restantes provetes se estudou a média dos registos dos escorregamentos obtidos na face frontal e retaguarda, neste provete só se tem o registo da face frontal do provete devido a um problema de encravamento da instrumentação utilizada para medir o escorregamento na face retaguarda do provete. Sendo este o provete com maior diferenciação, ao nível do desenvolvimento da curva força-escorregamento comparativamente com o desenvolvimento obtido nos restantes provetes em análise. Imediatamente antes de se atingir a carga máxima do provete verifica-se que existe uma diminuição da inclinação da curva, o que significa que ocorreu uma diminuição da rigidez. Após atingir a carga máxima existe uma perda de carga não muito significativa, seguindo-se uma estabilização da carga próximo dos entre o intervalo 2 mm a 4 mm de escorregamento medido. Verifica-se que depois da estabilização da carga, a curva força-escorregamento exhibe uma diminuição gradual da capacidade de carga no decorrer do escorregamento medido. Este conector apresentou um bom comportamento dúctil muito similar ao apresentado pelo provete P-E6-4. O fator que está na origem da diminuição da rigidez antes de se atingir a carga máxima e a maior ductilidade registada por este conector é justificada pelo aparecimento da fissuração no provete de argamassa que desenvolveu junto à ranhura do limite inferior do GFRP (Figura 4.39 b), esta fissura desenvolveu-se bem antes de se atingir a carga máxima do conector condicionando significativamente a carga máxima atingida comparativamente com os restantes resultados obtidos pelos conectores perfurados com espessura de 6 mm, assim como aumentou

significativamente a ductilidade deste provete face à ductilidade registada pelos provetes P-E6-1 e P-E6-2.



a) Fissura do provete de argamassa junto ao limite inferior da ranhura no provete P-E6-4



b) Fissura no provete de argamassa desde o limite inferior da ranhura GFRP até à base do provete de argamassa P-E6-3

Figura 4.39 Danos provocados nos provetes com conectores perfurados de espessura de 6 mm

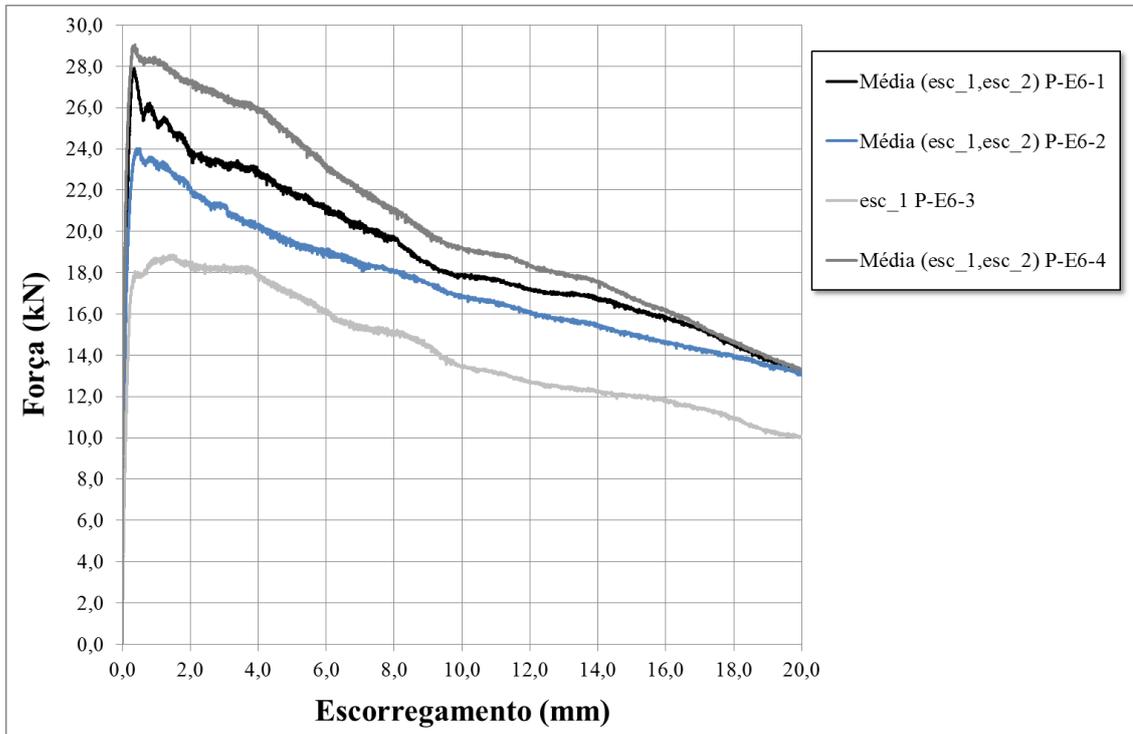


Figura 4.40 Curvas de Força - Escorregamento obtidos para os conectores perfurados 6 mm espessura

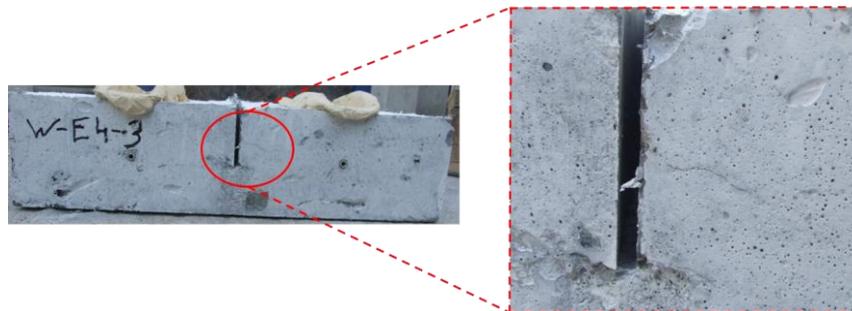
Conectores lisos de espessura de 4 mm

A Figura 4.42 apresenta o desenvolvimento das curvas força *versus* escorregamento obtidos os provetes com conectores lisos de espessura de 4 mm apresentam um trecho inicial semelhante, onde é identificado uma elevada rigidez do provete até atingir a carga máxima. Após atingir a carga máxima, a curva força-escorregamento apresenta uma perda de carga brusca. Todos os provetes apresentam um desenvolvimento da curva força-escorregamento semelhante. No entanto a carga máxima é diferente em todos os provetes, existindo dois provetes que apresentam carga máxima muito próxima (W-E4-4 e W-E4-1). Mas ambos apresenta comportamento ligeiramente diferente após atingir a carga máxima, o provete W-E4-4 apresenta perda de carga brusca de carga no qual não se verificação recuperação após atingir a carga máxima. Após está diminuição brusca de perda de carga provocada pelo aparecimento da fenda na argamassa (Figura 4.41 b) a curva força-escorregamento apresenta uma diminuição de capacidade de carga gradual no decorrer do escorregamento medido. Já o provete W-E4-1 apresenta uma carga máxima ligeiramente superior ao provete W-E4-4, a diferenciação mais significativa entre estes dois e os restantes provetes analisados é o comportamento que o provete W-E4-1 exhibe após atingir a carga máxima. Apresenta alternância de perda e recuperações de carga, como é visível pelos picos de carga que apresenta, isto deve-se ao facto do atuador não conseguir ajustar a carga após atingir a carga máxima. Sendo que o provete após atingir um escorregamento de 8 mm apresenta uma diminuição da capacidade de carga gradual no desenvolvimento da curva força-escorregamento do provete W-E4-1 muito semelhante aos restantes provetes.

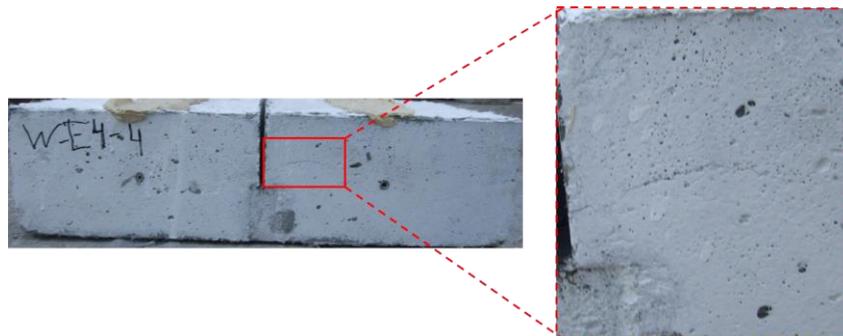
O provete W-E4-2 é o que atingiu carga máxima mais elevada comparativamente com os restantes provetes com conectores lisos de espessura de 4 mm. Este provete apresenta perda de carga rápida e significativa e observa-se uma ligeira recuperação após atingir a carga máxima. Até aproximadamente 2 mm de escorregamento verifica-se essa alternância de perda e recuperação carga. Após atingir os 2 mm de escorregamento, a curva força-desenvolvimento apresenta um comportamento muito semelhante aos restantes, a carga aplicada diminui gradualmente com escorregamento.

O W-E4-3 é o provete que atingiu o nível intermédio de carga máxima registada. Antes de atingir a carga máxima verifica-se uma diminuição brusca na inclinação da curva, o que significa a existência de uma diminuição de rigidez do provete. Perda de rigidez justificada pelo aparecimento de uma fenda na interface argamassa-GFRP (Figura 4.41 a). Após atingir a carga máxima, o provete perde carga sem que haja recuperação. O desenvolvimento da curva

força-escorregamento apresenta uma diminuição gradual da capacidade de carga ao longo do escorregamento apresenta comportamento muito semelhante aos restantes provetes analisados. Em termo de comportamento dúctil comparativamente com as outras tipologias já analisadas, estes provetes apresentam pior comportamento dúctil. Mas todos os conectores lisos de espessura de 4 mm apresentam comportamento de ductilidade muito semelhante. Sendo que os conectores W-E4-3 e W-E4-4 apresentam de entre estes conectores em análise, os que obtiveram ductilidade mais elevada justificada pela fissuração que ocorreu nos provetes de argamassa.



a) Fissura na interface do provete de argamassa-ranhura GFRP do provete W-E4-3



b) Desenvolvimento de uma fissura na interface argamassa-ranhura GFRP do provete W-E4-4

Figura 4.41 Danos provocados nos provetes com conectores lisos de espessura de 4 mm

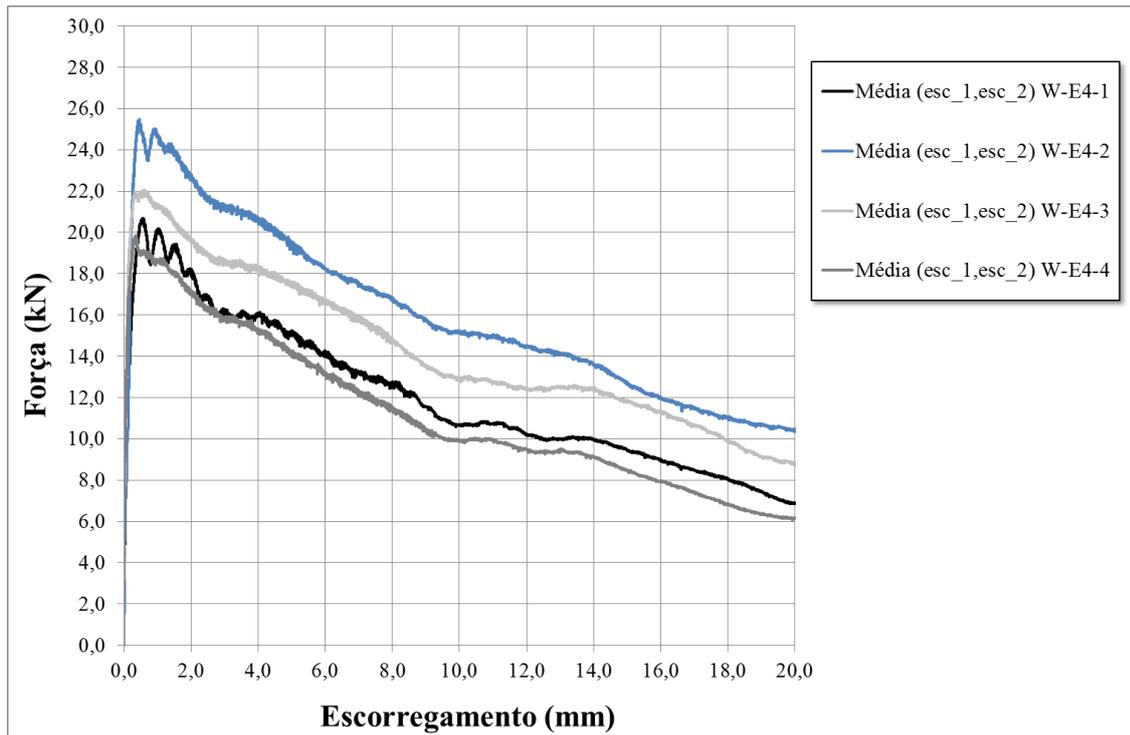


Figura 4.42 Curvas de Força-Escorregamento obtidos para os conectores lisos de espessura de 4 mm

Conectores lisos de espessura de 6 mm

Na Figura 4.43 apresenta-se a curva que relaciona força e escorregamento obtido nos provetes com conectores lisos de espessura de 6 mm. Apresenta diferentes valores de carga máxima. Todos os provetes no trecho inicial apresentam elevada rigidez.

O provete W-E6-3 apresenta valor de carga máxima significativamente mais baixo comparativamente com os restantes provetes em análise. Este conector devido ao ajuste inicial da instrumentação registou compressões no ramo elástico, o que impossibilitou o cálculo da rigidez elástica associada a este provete. Neste provete também só foi possível utilizar a informação registada pela instrumentação colocada na face da retaguarda do provete devido ao encravamento da instrumentação colocada na face frontal do provete. Pela observação do gráfico é perceptível que este conector apresenta tal como nos restantes conectores lisos com espessura de 6 mm elevada rigidez inicial. Após atingir a carga máxima verifica-se que existe elevada perda de carga de carga com pequenas recuperações. A curva força-escorregamento continua a desenvolver-se com diminuição gradual da carga ao longo do escorregamento medido.

Na Figura 4.43 relativamente à curva força-escorregamento do provete W-E6-2 constata-se que antes de se atingir a carga máxima, existe uma perda de carga significativa, com recuperação

da mesma, existindo uma diminuição da inclinação, o que significa que a rigidez do provete diminui antes de se atingir a carga máxima. Após atingir a carga máxima, ela mantém-se ligeiramente existindo de seguida uma perda brusca da carga sem recuperação da mesma. Após essa fase a curva força-escorregamento desenvolve-se com a diminuição da carga gradualmente ao logo do escorregamento.

Relativamente ao provete W-E6-1 é visível um comportamento inicial semelhante aos restantes provetes apresentando elevada rigidez inicial. Após atingir a carga máxima existe uma perda brusca da carga com ligeiras recuperações. Verificando alternâncias de perdas e recuperação de carga até aproximadamente 8 mm de escorregamento medidos justificado pelo facto do atuador após atingir a carga máxima ter tido dificuldade em ajustar a carga imediatamente após atingir a carga máxima. Este é o provete que em termos de desenvolvimento da curva força-escorregamento se diferenciou dos restantes devido ao facto do atuador ter evidenciado dificuldades no ajuste da carga ao longo do escorregamento, como é perceptível pelo desenvolvimento da curva força-escorregamento medido até aos 20 mm face ao comportamento apresentado pelos restantes provetes testados.

O provete W-E6-4 é o que apresenta carga máxima mais elevada de entre os quatro conectores em estudo apresentando uma elevada rigidez de conexão. Após atingir a carga máxima verifica-se a existência de uma descida brusca da carga, constata-se uma diminuição significativa da rigidez do provete, sem existir nenhuma recuperação da carga, indica que a conexão evidencia um comportamento frágil. Após esta descida brusca, o desenvolvimento da curva força-escorregamento desenvolve-se com a diminuição da carga gradualmente ao logo do escorregamento. É perceptível que este é o provete com pior comportamento dúctil.

A exceção do provete W-E6-1 todos os restantes provetes apresentam desenvolvimentos da curva força-escorregamento muito semelhantes após obtenção da carga máxima.

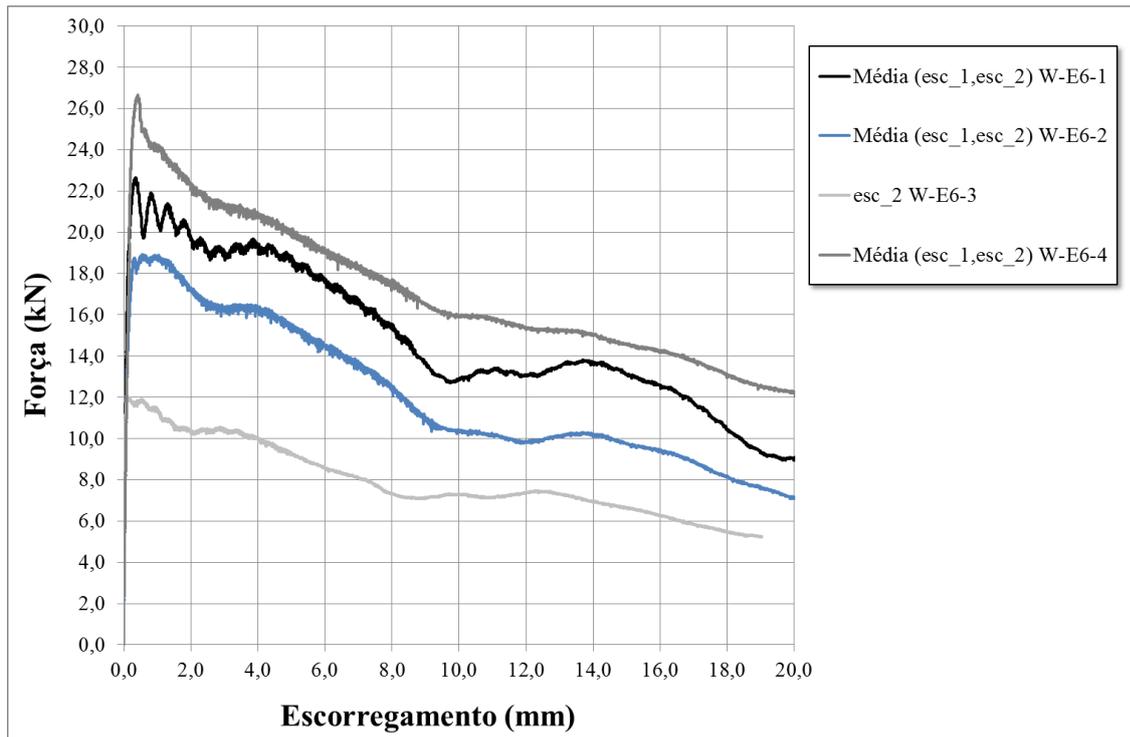


Figura 4.43 Curvas de Força-Escorregamento obtidos para os conectores lisos de espessura de 6 mm

CAPÍTULO 5

Conclusões

5.1 Conclusões gerais

Na presente dissertação foi apresentado um estudo que pretendeu avaliar o comportamento de diferentes tipologias de conexão entre elementos de GFRP e elementos de argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC). As soluções estudadas procuram dar resposta às ligações utilizadas num novo sistema estrutural de laje *sandwich*, desenvolvida na Universidade do Minho, especialmente vocacionada para a reabilitação estrutural, e nomeadamente, para remodelar os pavimentos. Para melhor compreensão da ligação entre o conector de GFRP e a camada de argamassa foi desenvolvida uma campanha experimental, onde foram realizados ensaios de tipo *pull-out*. Também foram efetuados ensaios de caracterização tanto das amostras de GFRP como da argamassa utilizada na produção dos provetes de tipo *pull-out*.

A análise experimental realizada nesta dissertação focou-se no estudo das ligações entre conectores em GFRP embebidos em provetes prismáticos retangulares de argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC). A campanha experimental englobou a caracterização de provetes submetidos à tração (*pull-out*). Estes ensaios permitiram avaliar o comportamento de conectores lisos, de conectores perfurados e de conectores indentados em GFRP, sendo estas as geometrias de conexão estudadas nesta dissertação.

Os provetes apresentam rigidez iniciais semelhantes entre si e elevadas, nas várias tipologias de provetes testadas. Após ser atingida a carga máxima segue-se uma fase de comportamento dúctil, onde se desenvolve deformação com perda de carga reduzida. Os conectores lisos apresentaram os piores resultados em termos de ductilidade. Os conectores perfurados em GFRP, com espessura de 6 mm, obtiveram o melhor registo de carga máxima e também apresentam os valores de índice de ductilidade mais elevados. Pelo contrário, os conectores lisos em GFRP, com espessura de 4 mm, foram os que registaram os menores valores de carga máxima e de índice de ductilidade. Verificou-se que existe elevada variabilidade nos valores registados relativos aos vários parâmetros estudados.

As curvas que relacionam a força ao provete e o correspondente escorregamento medido mostram, nos vários provetes testados, uma evolução muito semelhante entre si. Nas diferentes tipologias de provetes testados, as principais diferenças estão sobretudo associadas ao valorda

carga máxima registada. Nos provetes testados, os valores de rigidez inicial e de ductilidade são muito idênticos entre si.

De um modo geral, verificou-se nos provetes testados que não era visível a rotura da ligação entre o provete de argamassa e o conector GFRP, tendo o escorregamento entre os materiais provocado a separação total das peças a ligar. Nenhum conector de GFRP atingiu uma rotura associada ao próprio material e estes apenas apresentam marcas decorrentes do movimento relativo entre a argamassa e o conector, provocadas no decorrer dos ensaios de tipo *pull-out* efetuados.

Apesar disso, existem exceções como são exemplo, os provetes W-E4-3, W-E4-4, P-E6-3, P-E6-4, P-E4-3, I-E6-4, , I-E6-1 onde é visível fissuração na argamassa e os provetes I-E4-1, I-E6-2 e P-E6-2 em que ocorreu destacamento da camada superior de argamassa junto ao conector GFRP. Este é um dos fatores que poderá estar na origem da perda de rigidez obtida antes de ser atingida a carga máxima e da diminuição da capacidade de carga.

5.2 Desenvolvimentos futuros

No seguimento do trabalho iniciado na presente dissertação, enumeram-se alguns aspetos a desenvolver futuramente, com o objetivo de complementar os resultados já obtidos.

No que se refere aos conectores GFRP surge-se que se realizem novos ensaios de tipo *pull-out*, visto que os danos provocados no GFRP não foram muito significativos. Neste caso, poderia reutilizar-se as placas de GFRP. Em alternativa, propõe-se cortar as placas que serviram de conector GFRP e submete-las a ensaios de tração direta, para poder compreender melhor as alterações que o ensaio *pull-out* provocou no conector. Deste modo, seria possível realizar uma comparação entre a caracterização das amostras de GFRP efetuadas nesta dissertação e as amostras de GFRP que sofreram danos no decorrer do ensaio *pull-out* efetuado.

No que se refere aos ensaios *pull-out*, as principais observações para trabalhos futuros passam por:

- Repetir os ensaios de tipo *pull-out* em provetes com conectores lisos e com conectores perfurados de 4 mm de espessura, visto que os resultados obtidos nestas duas tipologias apresentam elevada variabilidade;

No que se refere aos ensaios de caracterização da argamassa as propostas são:

- Efetuar um estudo mais alargado da argamassa de ultra elevada ductilidade (DHCC), com recurso a mais ensaios de caracterização mecânica, principalmente, com recurso a mais ensaios de caracterização da resistência à compressão e da resistência à tração, visto que os ensaios efetuados foram em número insuficiente;

- Com os provetes de argamassa que “sobraram” dos ensaios de tipo *pull-out*, efetuar ensaios de compressão, para melhor compreender o comportamento da argamassa DHCC.

Propõe-se ainda dar desenvolvimento a modelos numéricos e a modelos analíticos para previsão da capacidade de carga dos conectores analisados. Para tal, é necessário partir de uma base de dados alargado de resultados experimentais, nomeadamente, com mais ensaios de caracterização mecânica da argamassa e mais ensaios de tipo *pull-out*, nomeadamente, nos provetes que registaram maior variabilidade nos parâmetros estudados.

Seria interessante desenvolver análise numérica com elementos finitos, calibrados com os resultados experimentais, tornando possível fazer um estudo paramétrico que permitisse compreender melhor o funcionamento dos provetes. Essa análise numérica foi iniciada no âmbito da presente dissertação mas os resultados obtidos em tempo útil não foram suficientemente conclusivos para poderem ser apresentados.

Seria importante alterar o tipo de argamassa utilizada para melhor perceber as alterações existentes em termos de obtenção de carga máxima, ductilidade e rigidez do provete, em vez de uma argamassa poderia se optar por um betão leve ou betão de ultra resistência, para melhor se compreender a influência da argamassa para o estudo da aderência entre a argamassa e o conector GFRP. Para além da modificação da argamassa utilizada no fabrico dos provetes *pull-out* era importante alterar a configuração do provete de ensaio, para melhor perceber a influência da geometria na obtenção da capacidade de carga dos conectores analisados.

Bibliografia

- Bank, L. C. (2006). Composites for construction . *John Wiley & Sons Inc., New Jersey, Usa.*
- Cabral-Fonseca, S. (2005). *Materiais compósitos de matriz polimerica reforçada com fibras usados ne Engenharia Civil- Características e aplicações.* Lisboa: Informação Científica e Técnica, LNEC.
- Canning, L., Hollaway, L. C. and Thorne, A. M. (1999). Manufacture, testing and numerical analysis of an innovative polymer composite/concrete structural unit. *Proc Instn Eng Struct Bidgs*, 134:231-41.
- Charles, J. A., Crane, F. A. A. and Furness J. A. G. (1997). *Selection and Use of Engineering Materials.* Butterworth-Heinemann.
- Correia, J. P. (2004). *Perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP): Aplicação de vigas mistas GFRP-Betão na construção.* Instituto Superior Técnico: Dissertação de Mestrado.
- Correia, J. R. (Março, 2004). *Perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP). Aplicação de vigas mistas GFRP-Betão na construção.* Universidade Técnica de Lisboa: Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Construção, Instituto Superior Técnico.
- Correia, J. R., Branco, F. A e Ferreira, J. G. (2008). Perfis pultrudidos de fibra de vidro: um material para a reabilitação estrutural. *Construção Magazine, edição Inovação e Reabilitação* , No. 28, 21-26.
- Dawood M., Taylor. E. and Rizkalla (2010). Two-way bending behavior of 3-D GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions. *Composite Structures*, vol. 92, no. 4, pp. 950-963.
- Deskovic, N., Triantafillou, T and Meier, U. (1995). Innovative design of FRP combined with concrete: Short-term behaviour. *Jornal of Structural Engineering: ASCE*, 121(7): 1069-1078.
- Engin M. Reis, S. H. (2008). Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels. *Journal of Construction and Building Material*, Vol. 22, pp. 1009-1018.
- Fam, A. S. (2003). Rectangular FRP Tubes Filled with Concrete for Beam and Column Applications. *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*,

Proceedings of the 6th Internacional Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (F), páginas 685-694.

- Fam, A. Z., . (2002). Flexural Behavior of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Circular Tubes. *Journal of Composites for Construction*, 6(2): 123-132.
- Ferreira, J. G. (Janeiro de 2007). Structural application of GRC in telecommunication towers. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No.1, pp.19-28.
- Fleck, C. A. (2004). Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I. Analytical models and minimum weight design. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, no. 4, pp. 561-583.
- Fleck, C. A. (2004). Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, no. 4, pp. 561-583.
- Fiberline Composites. (1995). *Fiberline Design Manual*.
- Hiller G. R., F. J. (2006). *Influência das Condições de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) no Comportamento Mecânico dos Compósitos Poliméricos*. Brasil: LAPOL/Ecola de Engenharia-UFRGS.
- Hullat, J. , H. (2000). Characteristics of composite concrete beams. M. J. Ryall, G.A.R. Pake e J.E. Harding. Bridge management-4, inspection, maintenance, assessment and repair. *Thomas Telford*.
- Hullat, J., H. (2001). Developing the use of advanced composite materials in the construction industry. *Cambridge, UK: Proceedings of the Internacional Conference FRPRC-5*.
- Jones, R. M. (1999). *Mechanics of composites materials*. Taylor & Francis. 2ª.
- Karbhari, V. e. (2000). Use of Composites for 21st Century Civil Infraestructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, nº 185: 433-454.
- Keller, T. (2003). Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. *Structural engineering documents, N°7, IABSE, Zurich*, 131.
- Keller, T., S. (2004). Flexural Behaviour of a Hybrid FRP and Lightweight Concrete Sandwich Bridge Deck. *Composites Technology, Fevereiro*, 20-25.
- Kleinberg M., H. L. (s.d.). *Advanced Liquid Resin Infusion: A New Perspective for Space Structures*. DLR German Aerospace Center: INVERT GmbH.

- Mastali M., Valente. I. B., Barros, J. A. & Gonçalves, D. M. (2015). Development of innovative hybrid sandwich panel slabs: Experimental results. *Composite Structures*, 133, 476-498.
- Mastali, M. ,Valente, I. B. & Barros, J. A. (2013). New composite slab system for the structural rehabilitation of traditional buildings. *In FRPRCS11-11TH INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON FIBER REINFORCED POLYMERS FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. FRPRCS11.*
- Moura, Marcelo. e Moaris, Alfredo (2005). *Materiais Compósitos- Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Piblíndústria.
- Naaman, A. E. (2005). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Proceedings 3rd international Conference on Construction materials: Performance, Innovations and Structural Implications (ConMat'05) and Mindess Symposium* (p. p. 458). University of British Columbia, Vancouver, Canada: N. Banthia, A. B., T. Uomoto & Shah, S.
- Nordin, H., T. (2004). Testing of hybrid FRP composite beams in bedding. *Composites Part B: Engineering*, 35: 27-33.
- Norton, T. M. (2004). *3D Orthogonal Woven Glass Fiber Reinforced Polymeric Bridge Deck: Fabrication and Experimental Investigation*. North Carolina State University, USA: Master thesis.
- Pakravan H.R, J. M. (2012). Investigation on polymeric fibers as reinforcement in cementitious composites: Flexural performance. *Journal of industrial textiles*, Vol. 42, pp: 3-18.
- Pakravan H.R., J. M. (2012). Adhesion polypropylene fiber to cement matrix. *Journal of adhesion science and technology*, Vol. 26, pp: 1383-1393.
- Pakravan H.R., J. M.-T. (2012). Evaluation of adhesion of polymeric fiber reinforced cementitious composites. *Journal of adhesion and adhesive*, Vol. 32, pp: 53-60.
- Pereira, E. ., (2012). Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC). *Cement and concrete Research*, 42, 834-846.
- Potter, K. (1997). Resin Transfer Moulding. *Springer*.
- Reis, E. M. (2005). *Characteristics of innovative 3-D FRP sandwich panels [Ph.D. thesis]*. USA: North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Reis, Engin M., Rizkalla Sami H.. (2008). Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels. *Journal of Construction and Building Material*, Vol. 22, pp. 1009-1018

- Rizkalla, E. M. (2008). Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels. *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 6, pp.1009-1018.
- Russo, B. and Zuccarello, A. (2007). Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels. *Composite Structures*, vol. 81, no. 4, pp. 575-586.
- Seible, F., K. . (2004). Kings Stormwater Channel and I-5/Gilman Bridges, USA. *Structural Engineering Internacional*, 9(4): 250-253.
- Soares, C. M. (2006). *Reforço de estruturas de betão com CFR*. Universidade Fernando Pessoa: Monografia.
- Sobrinho, J. P. (2002). Towards Advanced Composite Materials Footbridges. *Structural Engineering Internacional, IABSE*, Vol. 12, No. 2, 84-87.
- Song, X. (2003). *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification*. Virginia: Blacksburg.
- Sopal, G. . (CICE 2012). *Performance of new 3D GFRP sandwich panels with corrugated GFRP sheets*. Rome, Italy: Conference on FRP Composites in Civil Engineering.
- T. Sharaf, A. F. (2010). Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations. *Journal of Composite Structures*, Vol. 92, pp. 2927-2935.
- T. Sharaf, W. (2010). Structural performance of sandwich wall panels with different foam core densities in one-way bending. *Journal of Composite Materials*, vol. 44, no. 19, pp. 478-487.
- Wang L., L. w. (2014). Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels in four-point bending: experimental investigation and analytical modeling. *Composites Part B: Engineering*, vol. 67, pp. 270-279.
- Wang Lu, H. R. (2015). Experimental Study on Sandwich Bridge Decks with GFRP Face Sheets and a Foam-Web Core Loaded under Two-Way Bending. *Materials Science and Engineering*.
- Zi, G. B. (2008). The static behavior of a modular foam-filled GFRP bridge deck with a strong web-flange joint. *Composite Structures*, vol. 85, no. 2, pp. 155-163.
- Zi, G. B. (2008). An experimental study on static behavior of a GFRP bridge deck filled with a polyurethane foam. *Composite Structure* , vol. 82, no. 2, pp. 257-268.
- Zollo, R. (1997). Fibre-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cem Concr Compos*, 19: 107-122.

