



David Miguel Reis Cruz

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Reforço de elementos estruturais de madeira com materiais compósitos de matriz polimérica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia,
Investigador, FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno M. da Costa Guerra

Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro de 2015



David Miguel Reis Cruz

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Reforço de elementos estruturais de madeira com materiais compósitos de matriz polimérica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia,
Investigador, FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno M. da Costa Guerra

Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia

Reforço de elementos estruturais de madeira com materiais compósitos de matriz polimérica

Copyright © David Miguel Reis Cruz, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao meu orientador, o professor Hugo Biscaia por todo o conhecimento transmitido durante a dissertação, e persistência para que o trabalho fosse concluído da melhor maneira. Sem a sua insistência não teria sido possível concluir a dissertação.

Ao meu co-orientador, o professor Carlos Chastre por todo o conhecimento transmitido, especialmente na parte final da dissertação.

Ao Eng.º Noel Franco, por toda a ajuda prestada em laboratório e conhecimento transmitidos durante a dissertação.

Aos amigos e técnicos de laboratório, o Sr. José Gaspar, Dr. Jorge Silvério e o Eng.º Vitor Silva pela assistência nos ensaios experimentais, e toda a ajuda antes e durante os ensaios.

Às empresas e entidades que ajudaram na realização da parte experimental, nomeadamente à Sika, à S&P, à Construtora Vila Franca e à Camara Municipal de Sesimbra.

Aos amigos, e colegas de curso, Pedro, Miguel, Nuno, Ricardo, Gonçalo, Rafael e Tomé, por todo o percurso partilhado durante a dissertação. À Cinderela por toda a alegria e ajuda durante a fase de laboratório. Ao Hugo, pela amizade e conhecimento transmitidos durante toda a dissertação, e pela ajuda na revisão de todo o texto. À Isabel, por todo o apoio na fase final da dissertação, pelo conhecimento e paciência.

Por fim, à minha família, por todo o apoio e compreensão demonstrado durante a realização da dissertação.

Resumo

A necessidade de manutenção e reabilitação de estruturas de madeira antigas é, nos dias de hoje, um aspeto bastante importante a nível mundial. Assim, o estudo da eficácia de alguns sistemas de reforço torna-se fulcral.

A presente dissertação é um estudo experimental sobre reforço de estruturas de madeira com materiais compósitos. Os materiais compósitos utilizados na componente experimental foram polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e estes foram colados ao substrato de madeira com resina epoxídica.

O estudo experimental foi composto por duas fases. Na primeira fase realizaram-se ensaios de corte simples e na segunda fase ensaios de flexão. Os ensaios de corte simples foram realizados de modo a estudar a ligação CFRP-madeira e a analisar a influência do comprimento colado de CFRP ao substrato de madeira. Para tal, utilizaram-se duas técnicas de reforço, a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) em que os laminados de CFRP são colados exteriormente e a técnica NSM (*Near Surface Mounted*) em que os laminados de CFRP são colados numa ranhura feita no provete de madeira. Foram realizados 17 ensaios de corte simples, 10 com a técnica EBR e 7 com a técnica NSM.

Na segunda fase, foram realizados 3 ensaios de flexão sobre pavimentos de madeira reforçados com laminados de CFRP. Para estes ensaios também se utilizaram duas técnicas de reforço, a técnica EBR e uma técnica em que o laminado de FRP é ancorado nas extremidades das vigas.

Numa fase final os resultados foram analisados e comparados de modo a tirar conclusões. Concluiu-se que a técnica de reforço NSM apresenta um desempenho superior à técnica EBR nos ensaios de corte simples. Comparativamente à técnica EBR, os pavimentos de madeira com o laminado de CFRP ancorado nas extremidades das vigas apresentaram um melhor desempenho.

Palavras-chave: Compósitos de CFRP; Pavimentos de madeira; Reforço estrutural; Análise experimental; Aderência.

Abstract

The need for maintenance and rehabilitation of old wooden structures is, today, a very important aspect worldwide. So, the study of the effectiveness of some strengthening systems becomes crucial.

This thesis is an experimental study on strengthening wooden structures with composite materials. The composite materials used in the experimental component were polymers reinforced with carbon fibers (CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer) and these were glued to the wood substrate with epoxy resin.

This experimental study consists in two stages. In the first stage, a simple shear test was developed, and in the second, bending tests. Simple shear tests were performed in order to study the CFRP-timber connection and to the influence of the length of CFRP bonded to the wood substrate. For this purpose, two strengthening techniques were used, the EBR technique (Externally Bonded Reinforcement) where the CFRP laminates are glued externally and NSM technique (Near Surface Mounted) where the CFRP laminates are bonded in a slot made in the specimen wooden. 17 tests simple shear were performed, 10 with the EBR technique and 7 with the NSM technique.

In the second stage, 3 bending tests were performed on wooden floors strengthened with CFRP laminates. For these tests two strengthening techniques were also used, the EBR technique (Externally Bonded Reinforcement) and a technique where the laminate is anchored to the ends of the beam.

In the final phase the results were analyzed and compared in order to draw conclusions.

Keywords: CFRP Composites; Wood floor; Structural Reinforcement; Experimental analysis; Bond.

Índice de texto

Resumo	I
Abstract	III
Índice de texto	V
Índice de figuras	IX
Índice de tabelas	XVII
Simbologia	XIX
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivos da dissertação	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Considerações gerais.....	5
2.2. Materiais	6
2.2.1. <i>Madeira</i>	6
2.2.2. <i>Adesivos Epoxídicos</i>	27
2.2.3. <i>FRP: Fibre Reinforced Polymer</i>	28
2.3. Técnicas de Reforço de Pavimentos de Madeira com Compósitos de FRP.....	32
2.4. Ligação Compósito de FRP - Madeira.....	39
2.4.1. <i>Preparação da superfície da madeira</i>	40
2.4.2. <i>Comprimento colado de FRP</i>	40
2.4.3. <i>Lei Bond – Slip</i>	43
2.4.4. <i>Tipos de Ensaios</i>	44
2.4.5. <i>Modos de Rotura</i>	47
3. Descrição do Programa Experimental e Caracterização dos Materiais.....	49
3.1. Descrição do Programa Experimental.....	49

3.2.	Caracterização dos Materiais	50
3.2.1.	<i>Madeira</i>	50
3.2.2.	<i>Laminado de CFRP</i>	57
3.2.3.	<i>Resina S&P 220</i>	58
3.2.4.	<i>Resina Sikadur – 52 Injection</i>	59
4.	Ensaio de Corte Simples da Ligação FRP - Madeira	61
4.1.	Programa Experimental	61
4.1.1.	<i>Considerações Gerais</i>	61
4.1.2.	<i>Provetes de madeira</i>	62
4.1.3.	<i>Aplicação do reforço</i>	62
4.1.4.	<i>Sistema de ensaio, procedimento e instrumentação</i>	64
4.2.	Apresentação dos Resultados Experimentais	68
4.2.1.	<i>Aspectos Gerais</i>	68
4.2.2.	<i>EBR</i>	68
4.2.3.	<i>NSM</i>	80
4.3.	Análise dos resultados experimentais	83
4.3.1.	<i>Comparação EBR – NSM</i>	83
4.3.2.	<i>Modelo proposto para a lei tensão de aderência vs. deslizamento</i>	85
5.	Ensaio de Flexão dos Pavimentos de Madeira	99
5.1.	Programa Experimental	99
5.1.1.	<i>Considerações Gerais</i>	99
5.1.2.	<i>Descrição dos modelos de ensaio</i>	100
5.1.3.	<i>Preparação dos Pavimentos de Madeira</i>	101
5.1.4.	<i>Aplicação do reforço</i>	101
5.1.5.	<i>Sistema de Ensaio e procedimento</i>	108
5.1.6.	<i>Instrumentação</i>	111
5.2.	Apresentação dos Resultados Experimentais	117

5.2.1.	<i>Aspetos gerais</i>	117
5.2.2.	<i>Força versus deslocamento</i>	117
5.2.3.	<i>Deformadas</i>	119
5.2.4.	<i>Extensões no laminado</i>	123
5.2.5.	<i>Tensão de aderência ao longo da viga</i>	126
5.2.6.	<i>Modos de rotura</i>	128
5.3.	Análise dos Resultados Experimentais	130
5.3.1.	<i>Força versus deslocamento</i>	130
5.3.2.	<i>Deformadas</i>	131
5.3.3.	<i>Extensões no laminado de CFRP</i>	136
5.3.4.	<i>Tensões de aderência</i>	138
5.4.	Modelo analítico	140
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	147
6.1.	Conclusões	147
6.2.	Desenvolvimentos futuros	149
	Referências Bibliográficas	151

Índice de figuras

Figura 1.1 – Zonas com maior probabilidade de descolagem do FRP.	2
Figura 2.1 – a) Metropol Parasol; b) Centre Pompidou; c) Igrejas de Kizhi.....	7
Figura 2.2 – Pavilhão Atlântico, Lisboa.	7
Figura 2.3 – Vigas de madeira maciça.	9
Figura 2.4 – a) Aglomerado de partículas de madeira; b) Contraplacado; c) Viga de madeira lamelada colada.....	10
Figura 2.5 – Direções ou eixos da madeira.	10
Figura 2.6 – Representação esquemática do tronco de uma árvore.....	11
Figura 2.7 – Pormenor de fenda.	13
Figura 2.8 – Nó em viga de madeira serrada.....	14
Figura 2.9 – Dependência das propriedades de resistência relativa em função do ângulo do fio, na direção axial da madeira.....	15
Figura 2.10 – Posição dos lenhos de compressão e tração no tronco da árvore.	15
Figura 2.11 – Podridão Castanha, branca e branda, respetivamente.	16
Figura 2.12 – Inseto caruncho, pormenor de ataque de traça e escaravelho da madeira, respetivamente.	17
Figura 2.13 – Ataque de térmitas em madeira.....	17
Figura 2.14 – Relação da resistência mecânica com a densidade: 1- flexão estática; 2- compressão axial; 3- dureza.	18
Figura 2.15 – Curvas de retração.....	19
Figura 2.16 – Coeficientes de retração em termos relativos segundo as várias direções (valores para pinho bravo).....	20
Figura 2.17 – Relação da variação dimensional com o teor em água.	21
Figura 2.18 – Viga de madeira a segurar perfis metálicos depois de arder.	21
Figura 2.19 – Viga de madeira queimada.....	22
Figura 2.20 – Padrões de rotura por compressão axial.....	24
Figura 2.21 – Esquema do provete de tração paralela.....	25
Figura 2.22 – Esquema de flexão a 3 pontos.....	26
Figura 2.23 – Ensaio à flexão segundo a norma EN 408.	26
Figura 2.24 – FRP pré-fabricado.....	29

Figura 2.25 – Tecido de FRP impregnado “ <i>in situ</i> ”	29
Figura 2.26 – Compósitos de FRP pré-fabricados.....	29
Figura 2.27 – Fibra de vidro.....	30
Figura 2.28 – Exemplo de fibra de aramida.....	30
Figura 2.29 – Filamento de fibra de carbono (6 μm) ao lado de cabelo humano (1 fio a branco).	31
Figura 2.30 – Secção transversal de um filamento de fibra de carbono.....	31
Figura 2.31 – Tipos de reforço à flexão.....	34
Figura 2.32 – Tipos de reforço ao corte.....	34
Figura 2.33 – Tipos de reforço à flexão e corte.....	35
Figura 2.34 – Reforço pela técnica em desenvolvimento no DEC da FCT em viga de betão.....	35
Figura 2.35 – Reforços utilizados por Borri <i>et al.</i>	38
Figura 2.36 – Modelos <i>bond-slip</i> da literatura.....	43
Figura 2.37 – Modelos <i>bond-slip</i> madeira: a) Modelo não linear; b) Modelo tri-linear.....	44
Figura 2.38 – Modelos de ensaio <i>Pull-Off</i>	45
Figura 2.39 – Esquema de ensaio de corte simples.....	46
Figura 2.40 – Ensaio de arrancamento.....	46
Figura 2.41 – Ensaio de aderência em flexão.....	46
Figura 2.42 – Ensaio de flexão de 4 pontos.....	47
Figura 2.43 – Modos de rotura.....	48
Figura 2.44 – Roturas dos ensaios de Benedetti e Colla.....	48
Figura 3.1 – Edifício na Vila de Sesimbra onde foram retiradas as vigas: a) Localização do edifício (Fonte: Google Maps); b) Vista Exterior do edifício; c) Viste interior do edifício.....	50
Figura 3.2 – Ensaio de caracterização: a) ensaio à flexão; b) ensaio à compressão; c) e d) ensaio <i>pull-off</i>	51
Figura 3.3 – Gráfico Tensão vs. Extensão à flexão.....	52
Figura 3.4 - Gráfico Tensão vs. Extensão à compressão.....	54
Figura 3.5 – Provetes após ensaio com modo de rotura 1.....	55
Figura 3.6 – Laminados de CFRP.....	57
Figura 3.7 - Diagrama de tensão – extensão produzido por Carvalho.....	58
Figura 3.8 – Componentes da resina.....	58
Figura 3.9 - Diagrama tensão – extensão produzido por Carvalho.....	59
Figura 4.1 – Provetes preparados na carpintaria.....	62

Figura 4.2 – a) lixa elétrica. b) provete reforçado com técnica EBR.	63
Figura 4.3 – Provete reforçado com técnica NSM.	64
Figura 4.4 – a) Visão frontal do esquema de ensaio; b) Visão superior do esquema de ensaio; c) Visão traseira do esquema de ensaio; d) Pormenor da fixação do provete.	65
Figura 4.5 – Esquema de ensaio NSM.	66
Figura 4.6 – Posicionamento da instrumentação.	67
Figura 4.7 - Posicionamento dos extensómetros.	67
Figura 4.8 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb280_02.	71
Figura 4.9 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb230_01.	71
Figura 4.10 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb280_02.	71
Figura 4.11 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb230_01.	71
Figura 4.12 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb155_01.	72
Figura 4.13 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb125_02.	72
Figura 4.14 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb155_01.	72
Figura 4.15 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb125_02.	73
Figura 4.16 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb105_01.	73
Figura 4.17 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb80_01.	73
Figura 4.18 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb105_01.	74
Figura 4.19 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb80_01.	74
Figura 4.20 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_01.	74
Figura 4.21 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_02.	74
Figura 4.22 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb65_01.	75
Figura 4.23 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb65_02.	75
Figura 4.24 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb280_02.	76
Figura 4.25 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb230_01.	76
Figura 4.26 – Gráfico Extensão vs Deslizamento W_EBR_Lb155_01.	76
Figura 4.27 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb125_02.	76
Figura 4.28 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb105_01.	77
Figura 4.29 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb80_01.	77
Figura 4.30 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_01.	77
Figura 4.31 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_02.	77
Figura 4.32 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb280_02.	78

Figura 4.33 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb230_01.....	78
Figura 4.34 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb155_01.....	78
Figura 4.35 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb125_02.....	78
Figura 4.36 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb105_01.....	79
Figura 4.37 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb80_01.....	79
Figura 4.38 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_01.....	79
Figura 4.39 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_02.....	79
Figura 4.40 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_NSM_Lb280_01.....	81
Figura 4.41 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_NSM_Lb230_01.....	81
Figura 4.42 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_NSM_Lb155_01.....	81
Figura 4.43 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb280_01.....	82
Figura 4.44 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb230_01.....	82
Figura 4.45 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb155_01.....	82
Figura 4.46 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb125_01.....	82
Figura 4.47 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb105_01.....	82
Figura 4.48 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb80_01.....	83
Figura 4.49 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb65_01.....	83
Figura 4.50 – Gráfico Força vs. Comprimento colado para o NSM e EBR.....	85
Figura 4.51 – Curva Bond-Slip teórica [11].....	86
Figura 4.52 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb280_02.....	87
Figura 4.53 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb230_01.....	87
Figura 4.54 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb155_01.....	87
Figura 4.55 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb125_02.....	87
Figura 4.56 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb105_01.....	88
Figura 4.57 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb80_01.....	88
Figura 4.58 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb65_01.....	88
Figura 4.59 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb65_02.....	88
Figura 4.60 – a) Curva Bond – Slip teórica e pontos chave; b) Provete tipo.....	89
Figura 4.61 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 280 mm.....	90
Figura 4.62 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 230 mm.....	91

Figura 4.63 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 155 mm.	93
Figura 4.64 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 125 mm.	94
Figura 4.65 – Curva Bond – Slip teórica e pontos chave.	95
Figura 4.66 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 105 mm.	96
Figura 4.67 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 80 mm.	97
Figura 4.68 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 65 mm.	98
Figura 5.1 – Exemplo de um pavimento de madeira.	100
Figura 5.2 – a) Vigas em obra; b) Preenchimento dos nós; c) e d) Pregagem das tábuas.	101
Figura 5.3 - Esquema de viga reforçada através da técnica EBR.	102
Figura 5.4 – Viga a ser alisada com recurso à lixadeira mecânica e aspeto após alisamento.	102
Figura 5.5 – Alçado do ensaio com a técnica EBR.	103
Figura 5.6 – a) CFRP cortado; b) Colocação da Resina; c) Colocação dos grampos para aderência do CFRP.	104
Figura 5.7 – Aspeto final da viga reforçada através de EBR.	104
Figura 5.8 - Esquema de viga reforçada através da técnica EBRA.	105
Figura 5.9 – Ângulos (em graus) e comprimentos (em metros) zona amarrada.	106
Figura 5.10 – Pormenor ângulo de entrada do CFRP.	106
Figura 5.11 – Perfuração da viga com broca de madeira.	106
Figura 5.12 – Introdução da resina no orifício.	107
Figura 5.13 – Alçado do ensaio de EBRA.	107
Figura 5.14 – Aspeto final da técnica EBRA.	108
Figura 5.15 – Esquema de ensaio.	108
Figura 5.16 – Preparação dos apoios.	109
Figura 5.17 – a) Esquema de Ensaio (Superior); b) Célula de Carga; c) Cilindro Hidráulico; d) Rótula criada; e) Apoios perfis metálicos.	110
Figura 5.18 – a) TML-DP-500E. b) TML-CDP100 e TML-CDP50.	111
Figura 5.19 – Posicionamento e numeração dos LVDT's.	112
Figura 5.20 – Vista dos transdutores D1 a D7.	112

Figura 5.21 – Vista dos transdutores D8 a D14.....	113
Figura 5.22 – Posicionamento do D15.	113
Figura 5.23 – Exemplo geral das placas de acrílico (imagem após ensaio).	114
Figura 5.24 – Numeração extensómetros para o ensaio com a técnica EBR.	114
Figura 5.25 - Numeração extensómetros para o ensaio com a técnica EBRA.	115
Figura 5.26 – Colocação dos extensómetros no ensaio com a técnica EBR.	115
Figura 5.27 – Posicionamento para colocação dos extensómetros.....	115
Figura 5.28 – Posicionamento do extensómetro e respetiva colagem.	116
Figura 5.29 – Pormenor do spray isolante e aspeto final.....	116
Figura 5.30 – Célula de carga.....	117
Figura 5.31 – Gráfico Força vs. Deslocamento da viga V1 do pavimento PM1.	118
Figura 5.32 – Gráfico Força vs. Deslocamento da viga V4 do pavimento PM2.	118
Figura 5.33 – Gráfico Força vs. Deslocamento da viga V6 do pavimento PM3.	119
Figura 5.34 – Deformada da viga V1 (PM1).....	120
Figura 5.35 – Deformada da viga V2 (PM1).....	121
Figura 5.36 – Deformada da viga V3 (PM2).....	121
Figura 5.37 – Deformada da viga V4 (PM2).....	122
Figura 5.38 – Deformada da viga V5 (PM3).....	122
Figura 5.39 – Deformada da viga V6 (PM3).....	123
Figura 5.40 - Extensões na viga V3 (PM2).	124
Figura 5.41– Extensões na viga V5 (PM3).	125
Figura 5.42 – Gráfico Força vs. Extensão a meio vão da viga V3 (PM2).	125
Figura 5.43 – Gráfico Força vs. Extensão a meio vão das vigas V5 e V6 (PM3).	126
Figura 5.44 – Gráfico da Tensão de aderência vs. Desenvolvimento da viga V3 (PM2).	127
Figura 5.45 – Gráfico da Tensão de aderência vs. Desenvolvimento da viga V5 (PM3).	127
Figura 5.46 – Pormenor da rotura da viga V1 (PM1).....	128
Figura 5.47 – Rotura da viga V4 (PM2).....	129
Figura 5.48 a) Rotura da viga V6 (PM3); b) Rotura do Laminado na extremidade.	129
Figura 5.49 – Gráfico Força vs, Deslocamento dos pavimentos a meio-vão.	130
Figura 5.50 – Deformada das vigas V1 e V4.	132
Figura 5.51 – Deformada das vigas V1 e V6.	132
Figura 5.52 – Deformada das vigas V4 e V6.	133

Figura 5.53 – Deformada das vigas V2 e V3.	134
Figura 5.54 – Deformada das vigas V2 e V5.	135
Figura 5.55 – Deformada das vigas V3 e V5.	135
Figura 5.56 – Extensão no laminado para as vigas V3 e V5.	137
Figura 5.57 – Gráfico Força vs. extensão a meio vão das vigas V3, V5 e V6.	138
Figura 5.58 – Tensão de aderência nos pavimentos PM2 e PM3.	139
Figura 5.59 – Distribuição das tensões de aderência no betão [13].	140
Figura 5.60 – Comportamento da madeira adotado.	141
Figura 5.61 – Pavimento tipo.	141
Figura 5.62 – a) Secção original; b) Secção homogeneizada.	143
Figura 5.63 – Extensão máxima teórica de tração e de compressão.	143
Figura 5.64 – Diagrama da extensão à tração e à compressão da madeira.	144

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Características do Pinho Bravo e da Casquinha.	9
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de algumas espécies.	23
Tabela 2.3 – Propriedades dos materiais à tração em relação ao peso específico.	25
Tabela 2.4 – Propriedades das resinas epoxídicas.	28
Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas dos vários FRP.	31
Tabela 2.6 – Dados gerais dos ensaios realizados por Dias <i>et al.</i>	36
Tabela 2.7 – Resultados dos ensaios de Dias <i>et al.</i>	37
Tabela 2.8 – Resultados realizados por Johnsson <i>et al.</i>	37
Tabela 2.9 – Resultados apresentados por Johnsson <i>et al.</i>	38
Tabela 2.10 – Resultados dos ensaios de Borri <i>et al.</i>	38
Tabela 2.11 – Valores de c_1 e c_2 propostos por Juvandes e Barbosa.	41
Tabela 2.12 – Valores dos ensaios de Juvandes e Barbosa.	42
Tabela 2.13 – Resultados dos ensaios <i>Pull-Off</i> de Juvandes e Barbosa.	45
Tabela 3.1 – Valores de tensão dos ensaios <i>pull-off</i>	55
Tabela 3.2 – Valores médios para propriedades da madeira das fichas LNEC M1 a M9.	56
Tabela 3.3 – Ficha M1 do LNEC, relação com a norma EN 338.	56
Tabela 3.4 – Quadro da norma EN 338 para madeiras resinosas.	57
Tabela 4.1 – Designação dos ensaios realizados.	68
Tabela 4.2 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios com a técnica EBR.	70
Tabela 4.3 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios com a técnica NSM.	80
Tabela 4.4 – Valores de força máxima e deslizamento último.	84
Tabela 4.5 – Valores de c_2 propostos por Juvandes e Barbosa.	84
Tabela 5.1 – Características das vigas de cada pavimento de madeira.	100
Tabela 5.2 - Características das vigas de cada conjunto.	117
Tabela 5.3 – Resumo gráficos força vs. deslocamento.	119
Tabela 5.4 – Resumo das flechas a meio vão.	120
Tabela 5.5 – Resumo extensões no laminado até rotura do conjunto.	124
Tabela 5.6 – Valores dos deslocamentos das vigas com rotura.	133
Tabela 5.7 – Valores das deformações das vigas sem rotura.	136

Tabela 5.8 – Extensões a meio vão nos laminados.	138
Tabela 5.9 – Características dos materiais.	141

Simbologia

Notações escalares latinas

b	- Base do provete
D	- Densidade
d	- Deslocamento
d_r	- Deslocamento de rotura
E	- Módulo de elasticidade
E_f	- Módulo de elasticidade do FRP
E_{fm}	- Módulo de elasticidade médio do FRP
E_{ptm}	- Módulo de elasticidade médio da resina
F	- Força
f_{fm}	- Tensão de rotura média do FRP
F_{max}	- Força máxima
f_{ptm}	- Tensão de rotura média da resina
F_r	- Força de rotura
h	- Altura do provete
L	- Comprimento
L_b	- Comprimento colado
L_{eff}	- Comprimento de ligação efetivo
M	- Momento
M_r	- Momento de rotura
P	- Peso
PE	- Peso específico
RT	- Resistência à tração
S_{max}	- Deslizamento máximo
S_{ult}	- Deslizamento último
$S_{ult}(deflet.)$	- Deslizamento último obtido pelos transdutores de deslizamento
S_{ult_ext}	- Deslocamento último do extensómetro
T_g	- Temperatura de transição vitrea
$V_{aparente}$	- Volume da madeira

Notações escalares gregas

ε	-	Extensão
ε_{rup}	-	Extensão de rotura
ε_{ptm}	-	Extensão de rotura média da resina
ε_{fm}	-	Extensão de rotura média do FRP
τ	-	Tensão
τ_{max}	-	Tensão de aderência máxima
δ	-	Deslocamento
ε_{max}	-	Extensão máxima
Δ	-	Porcentagem de aumento
σ_{rup}	-	Tensão de rotura

Abreviaturas

AFRP	-	Aramid Fiber Reinforced Polymer
CFRP	-	Carbon Fiber Reinforced Polymer
DEC	-	Departamento de Engenharia Civil
EBR	-	Externally Bonded Reinforcement
EBRA	-	Externally Bonded Reinforcement Anchorage
FCT	-	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FRP	-	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	-	Glass Fiber Reinforced Polymer
LNEC	-	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	-	Transdutor de deslocamento
MLC	-	Madeira Lamelada Colada
NSM	-	Near Surface Mounted Reinforcement
PSF	-	Ponto de saturação das fibras
UNL	-	Universidade Nova de Lisboa

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações gerais

Características como a trabalhabilidade, leveza e resistência mecânica associadas à beleza que confere às construções contribuíram para que a madeira assumisse um papel importante na construção desde os primórdios da humanidade e ainda hoje evidenciado um pouco por todo o mundo. Contudo, apesar de todas as características positivas também apresenta algumas limitações, sobretudo relacionadas com a dimensão das peças (consoante o tamanho da árvore) e com os defeitos que apresenta em muitos casos, de onde se destacam os nós e as bolsas de resina.

Com a evolução das técnicas construtivas e o surgimento de novos materiais, como o betão e alguns derivados da madeira, de onde se destaca a madeira lamelada colada, foi possível colmatar algumas das limitações da madeira maciça, levando a que esta perdesse alguma da sua preponderância na construção. Ainda assim é possível encontrar um número considerável de estruturas em madeira maciça, tanto em Portugal como em diversos locais no mundo e em muitos casos a evidenciam graves problemas de degradação.

Neste sentido, a reabilitação de estruturas de madeira é uma necessidade inevitável. Existem várias técnicas de reabilitação disponíveis, mas ainda existe a necessidade de aprofundar o estudo nesta área. Uma solução para a reabilitação de estruturas de madeira antigas pode passar pela substituição das vigas por madeira lamelada colada, contudo é uma solução que torna as obras dispendiosas. Outra solução pode passar pela utilização conjunta de madeira e de outros materiais. Para tal, terá de se escolher o material e técnica de reforço consoante as características a melhorar. Contudo, quando as estruturas são antigas e em alguns casos com grande relevo histórico, a componente estética assume uma grande importância, pelo que a substituição dos materiais muitas vezes não é uma opção. Nestes casos a

aplicação de técnicas de reforço inovadoras, bem estudadas e consolidadas assume ainda um carácter mais importante.

A investigação no campo do reforço de estruturas de madeira começou a ganhar maior importância a partir do início do século XX. Inicialmente começou-se por utilizar o aço (em forma de chapas ou varões) por ser um material com um módulo de elasticidade e tensão de cedência bastante mais elevados que a madeira. No entanto o aço quando aplicado à superfície e em contacto com o ar torna-se bastante suscetível à corrosão, para além de não ser usualmente uma solução estética bem aceite.

Mais recentemente, na década de 1980, começaram-se a utilizar-se materiais compósitos no reforço de estruturas. Estes são constituídos por fibras incorporadas numa matriz polimérica e são designados por materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras - FRP (*Fiber Reinforced Polymers*). Estes materiais possuem um importante conjunto de características que contribuem para a sua utilização, de onde se destaca o elevado módulo de elasticidade, elevada tensão de cedência, leveza, flexibilidade, resistência à corrosão e contribuição para a manutenção do aspeto original. Contudo apresentam uma rotura frágil, o que pode ser um inconveniente à sua utilização.

Esta técnica tem sido muito utilizada sobretudo em estruturas de betão, principalmente no reforço de vigas sujeitas a flexão e corte. Contudo, têm-se observado descolamentos prematuros do compósito nas zonas fendilhadas e nas extremidades, como se mostra na Figura 1.1 [16].

No que se refere à madeira a utilização de FRP ainda tem um histórico curto, e apesar de se utilizarem ligações por colagem com recurso a resinas epoxídicas, o conhecimento do comportamento das ligações ainda não está suficientemente aprofundado.

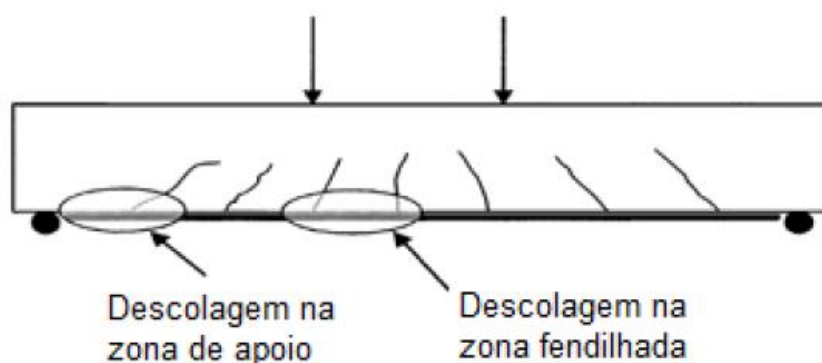


Figura 1.1 – Zonas com maior probabilidade de descolagem do FRP [16].

1.2. Objetivos da dissertação

Estudos científicos recentes provam a eficácia da utilização dos compósitos reforçados com fibras (FRP) em vários tipos de materiais e estruturas. No entanto, nota-se que em várias técnicas de colagem com este material não se consegue atingir a eficácia máxima dos laminados de FRP devido a roturas prematuras.

Neste sentido, no presente trabalho pretende-se aumentar o conhecimento acerca das ligações entre compósitos e madeira maciça e testar a eficiência desta técnica quando aplicada a pavimentos de madeira. Para isso procedeu-se à realização de ensaios de corte simples em provetes de madeira reforçada com compósitos de FRP de modo a estudar a ligação FRP/madeira e a ensaios de flexão à escala real com recurso a pavimentos de madeira provenientes de um edifício do século XIX e posteriormente reforçados.

Nos ensaios de corte simples pretendeu-se estudar duas técnicas de reforço distintas - EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e NSM (*Near Surface Mounted*) (descritas no Capítulo 4). Testaram-se vários comprimentos de colagem entre a fibra e a madeira com o intuito de verificar a sua influência no tipo de rotura.

No sentido de avaliar o desempenho de diversas técnicas de reforço de pavimentos de madeira, realizaram-se ensaios de flexão com duas técnicas de reforço, a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e uma nova técnica de reforço em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia (descrita no Capítulo 5).

De forma mais detalhada, o presente trabalho foi orientado pelos seguintes objetivos:

- a) Fazer uma pesquisa bibliográfica sobre a madeira, o FRP e a ligação entre ambos;
- b) Conceber um programa experimental para os ensaios de corte simples e para os ensaios de flexão;
- c) Caracterizar todos os materiais necessários aos ensaios através de ensaios laboratoriais;
- d) Preparar, instrumentar e realizar os ensaios de corte simples;
- e) Analisar os resultados obtidos nos ensaios de corte simples e retirar as devidas conclusões;
- f) Preparar, instrumentar e realizar os ensaios de flexão;
- g) Analisar os dados obtidos nos ensaios de flexão e retirar as devidas conclusões.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, incluindo o capítulo introdutório e as conclusões.

No Capítulo 1 é feita uma introdução à temática da dissertação e são expostos os objetivos e a estrutura da mesma.

No Capítulo 2 são apresentadas informações sobre os materiais utilizados na componente experimental da presente dissertação. São também apresentadas informações sobre as técnicas de reforço EBR e NSM. Apresenta-se também o comportamento da interface entre os compósitos de FRP e a Madeira.

No Capítulo 3 é apresentado o programa experimental e é feita a devida caracterização dos materiais utilizados nos ensaios experimentais.

O Capítulo 4 diz respeito aos ensaios de corte simples, onde se apresenta a preparação dos provetes, a configuração experimental, o procedimento do ensaio e a instrumentação utilizada. Ainda neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios.

O Capítulo 5 refere-se aos ensaios de flexão, onde se apresenta a preparação dos pavimentos de madeira, a configuração, os procedimentos e a instrumentação dos ensaios. São ainda apresentados e analisados todos os resultados obtidos nestes ensaios.

No Capítulo 6 são expostas as principais conclusões que podem ser retiradas da presente dissertação e são tecidas algumas recomendações.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações gerais

Neste capítulo pretende-se fazer um levantamento geral do estado do conhecimento acerca dos temas em estudo, nomeadamente com a descrição dos materiais utilizados – madeira, compósitos com fibras de carbono (CFRP) e resina de ligação – e o levantamento de técnicas de ligação, a contribuição do tipo de preparação utilizado na superfície da madeira, a influência do comprimento de colagem e os tipos de ensaio correntemente utilizados para estudar a eficácia da ligação e os modos de rotura.

A presença de pavimentos de madeira constituídos por vigas e soalho é bastante comum um pouco por todo o mundo, principalmente em edifícios antigos que por vezes apresentam grande valor patrimonial. Contudo, com o passar dos anos e a ausência da conservação exigida a este tipo de estrutura, os sinais de degradação tornam-se visíveis, o que evidencia a necessidade de ações de manutenção, conservação ou reabilitação. De entre um importante conjunto de anomalias, destacam-se o envelhecimento da estrutura, a exposição a cargas não previstas, ataques de insetos e deficiências que remontam à fase de execução ou ainda anomalias relacionadas com a presença excessiva de humidade ou com a fluência da madeira. Atualmente a intervenção ao nível destes pavimentos pode ser realizada pela substituição total das vigas e do soalho ou pela manutenção da estrutura recorrendo a técnicas de reforço.

De acordo com Appleton [2] até meados do século XX as vigas de madeira eram essencialmente de castanheiro, carvalho, casquinha ou pitespaine. Atualmente o pinho e o eucalipto são as espécies mais utilizadas. De forma geral a escolha do tipo de madeira estava mais relacionada com a proximidade de determinada espécie do que com outro fator, como a resistência mecânica.

Os pavimentos de madeira são geralmente compostos por vigas de madeira paralelas entre si, distanciadas de 30 cm a 60 cm e apoiadas nas paredes e pelo soalho colocado perpendicularmente a

estas vigas. A secção das vigas varia em função do vão e das cargas a suportar. O soalho é constituído por pranchas de madeira com uma espessura de 1 cm a 3 cm, e uma largura entre de 10 cm a 20 cm e um comprimento variável. Para vãos a partir dos 4 metros é comum recorrer a peças de madeira colocadas perpendicularmente às vigas principais de modo a prevenir o empeno das mesmas – tarugos.

2.2. Materiais

2.2.1. Madeira

A madeira é usada como material estrutural desde a antiguidade até aos dias de hoje. Atualmente assume grande importância, principalmente nos países do Norte da Europa, como a Suécia e Finlândia. É um material com aptidão para várias áreas, utilizado para vários tipos de estruturas, desde pontes, habitações, catedrais ou barcos, e com vários tipos de função, como em vigas, colunas (pilares) ou treliças (habitualmente de cobertura).

É possível encontrar algumas estruturas construídas em madeira ou com recurso a produtos derivados com grande mediatismo, de onde se destaca o Metropol Parasol em Sevilha (Espanha), o Centre Pompidou em Metz (França), as igrejas de Kizhi na Rússia ou o Pavilhão Atlântico (atual Meo Arena) em Portugal.

O Metropol Parasol (Figura 2.1a) é a maior estrutura de madeira do Mundo com cerca de 11 mil metros quadrados, localizado em Sevilha (Espanha) e que abriga um museu arqueológico, um mercado de agricultores, uma praça elevada, bares e restaurantes no subsolo e um terraço panorâmico no topo.

O Centre Pompidou (Figura 2.1b), localizado em Metz (França) utilizou cerca de 16 quilómetros de madeira lamelada colada entrecruzada de modo a formar uma malha hexagonal. A construção serve de sede a um museu, um auditório, um restaurante e uma livraria.

As igrejas de Kizhi (Figura 2.1c), localizadas numa ilha russa que lhes confere o nome, erguem-se a partir de toros de pinheiros colocados na horizontal, cortados e encaixadas, garantindo a sua construção e resistência mecânica necessária sem a utilização de pregos ou parafusos nas ligações.

Em Portugal, o Pavilhão Atlântico construído com o intuito de integrar a exposição mundial de 1998 (Expo 98) em Lisboa aparece como um dos principais ícones do país neste tipo de construção (Figura 2.2).

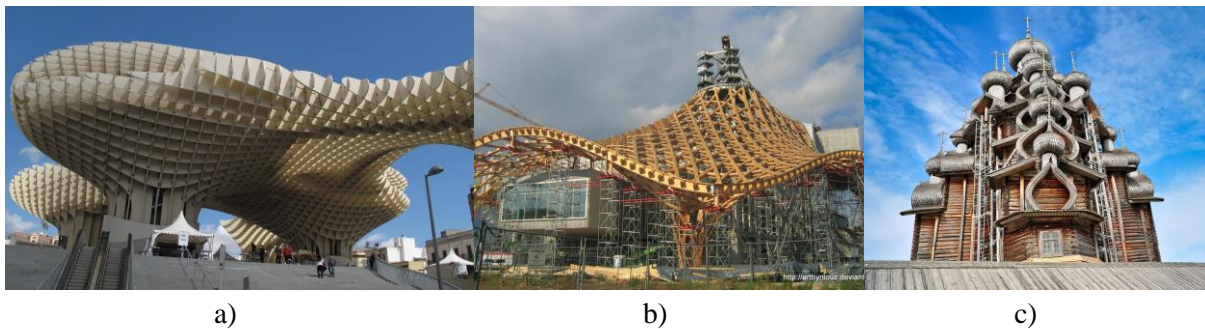


Figura 2.1 – a) Metropol Parasol [39]; b) Centre Pompidou [40]; c) Igrejas de Kizhi [41].



Figura 2.2 – Pavilhão Atlântico, Lisboa [23].

É possível justificar a utilização da madeira desde há vários séculos com a sua capacidade para suportar tensões de compressão e tração de forma eficaz e por apresentar um bom comportamento quando sujeita a esforços de flexão. Para além das vantagens estruturais já enumeradas, destaca-se também o facto de ser um material eco-sustentável, facilmente manobrável, ter uma boa relação resistência/ massa específica, um baixo custo e existir em abundância na natureza.

Apesar das vantagens referidas, a madeira também apresenta algumas desvantagens, destacando-se a sua heterogeneidade, a presença de defeitos (nós e bolsas de resina, por exemplo), a baixa resistência ao fogo, a composição anisotrópica e a sua suscetibilidade a ataques de insetos e fungos.

2.2.1.1 Tipos de Madeira e Derivados

Se inicialmente a madeira era utilizada apenas na sua forma natural, apenas com alguns tratamentos ao nível da secção, atualmente existem inúmeros produtos derivados da madeira no mercado e que visam colmatar algumas das limitações da matéria-prima natural.

É possível dividir a madeira maciça em dois grandes grupos: a madeira dura e a madeira macia. A madeira dura provém das espécies gimnospérmicas, ou madeira de coníferas (usualmente chamadas de

resinosas), como por exemplo o pinho. A madeira macia provém de espécies angiospérmicas, ou dicotiledóneas (usualmente chamadas de folhosas), como por exemplo o carvalho.

Em Portugal destaca-se a utilização do pinho bravo (*Pinus pinaster*), do pinheiro casquinha (*Pinus sylvestris*), do cedro (*Cedrus atlântica*), do carvalho português (*Quercus faginea*), do castanho Bravo (*Castanea sativa*) e do eucalipto comum (*Eucalyptus globulus*) [50].

O Pinho Bravo, da família das resinosas, está presente em todo o País, destacando-se por exemplo a sua utilização na região da Madeira, onde ocupa cerca de 70 % da área plantada. Apresenta como principais desvantagens o elevado número de nós, a elevada massa volúmica e a pequena flexibilidade. Tem como vantagens o facto de ser económica e muito macia [50].

O Pinheiro Casquinha, da família das resinosas, encontra-se principalmente na zona do Gerês, na Serra da Estrela e na Serra da Lousã. É uma árvore de porte mediano e crescimento rápido, caracterizada pela sua elevada elasticidade e durabilidade, qualidades que lhe conferem o estatuto de ser uma das espécies mais utilizadas na construção civil. O Pinheiro Casquinha pode ser Scots pine ou Redwood, em que a Redwood (utilizada nesta dissertação), pode atingir alturas a rondar os 40 metros. Apresenta características físico-mecânicas semelhantes às do Pinho bravo e da Casquinha Scots pine, como se pode ver na Tabela 2.1. Como desvantagem, destaca-se a grande suscetibilidade a ataques fúngicos [38].

O Cedro, da família das resinosas, atinge maior representação na mata do Buçaco. Pode atingir até 20 ou 30 metros de altura, alheando um crescimento rápido a boas propriedades de resistência mecânica e boa trabalhabilidade. Tal como o Pinheiro Casquinha também é bastante usado na construção civil.

O Carvalho Português, da família das folhosas, apresenta maior representatividade na região centro e sul. É uma madeira muito usada na construção naval e carpintaria e, quando usada na construção civil, normalmente assume a função de viga. Apresenta vantagens tais como a sua longevidade (à volta de 300 anos) e boa resistência à imersão. Como principais desvantagens destacam-se o seu crescimento lento e o facto de usualmente não ultrapassar os 20 metros de altura.

O Castanho Bravo ou Castanheiro Bravo, da família das folhosas, está presente principalmente nos distritos de Vila Pouca de Aguiar e Valpaços. Apresenta alguns pontos fracos, de onde se destaca a grande probabilidade de fendilhação interna. No campo das vantagens, destaca-se o facto de ser uma madeira branda e de fácil serragem.

O Eucalipto Comum, da família das folhosas, e encontra-se principalmente nas zonas a Norte do Rio Tejo. Tem a vantagem de ser uma espécie com crescimento rápido, podendo atingir alturas a rondar os 60 metros. A sua fraca trabalhabilidade assume-se como a principal desvantagem.

Tabela 2.1 – Características do Pinho Bravo e da Casquinha [38].

Espécie	Propriedades físicas		Valores médios das propriedades mecânicas a 12% de humidade relativa (N/mm ²)				
	Massa volúmica (kg/m ³)	Coefficiente de retração volumétrica (%)	Módulo de elasticidade por flexão estática. E _{m,12%}	Tensão de rotura por flexão estática f _{m,12%}	Tensão de rotura por compressão axial. f _{c,0,12%}	Tensão de rotura por tração transversal. F _{t,00m12%}	Tensão de rotura por corte. f _{v,12%}
Pinho bravo (<i>Pinus pinaster</i> , Ait.)	530 - 600	0,60	13800	98	54	3,0	10,0
Casquinha (<i>Pinus sylvestris</i> , L.) <i>Redwood</i>	400	0,29	9250	69	42	1,7	1,5
Casquinha (<i>Pinus sylvestris</i> , L.) <i>Scots pine</i>	530	0,53	11760	98	54	2,9	9,8



Figura 2.3 – Vigas de madeira maciça [37].

Tal como foi dito inicialmente, com a evolução das técnicas de fabricação surgiram vários materiais derivados com o objetivo de colmatar os principais defeitos da madeira maciça. Presenciou-se uma grande evolução, sendo possível obter peças sem defeitos e com propriedades conhecidas, para além da evolução das técnicas de tratamento contra inseto e fungos e proteção antifogo. Obtiveram-se também algumas melhorias no que respeita à resposta à humidade e à trabalhabilidade.

Estes produtos distinguem-se por terem processos de fabrico certificados e controlados, algo que não é possível no caso da madeira maciça e permite tornar a construção mais fiável, com a presença de menos incertezas associadas ao material.

Da vasta gama de produtos destacam-se os aglomerados de partículas, as placas de madeira de média densidade (MDF), o contraplacado, e a madeira lamelada colada (Figura 2.4).

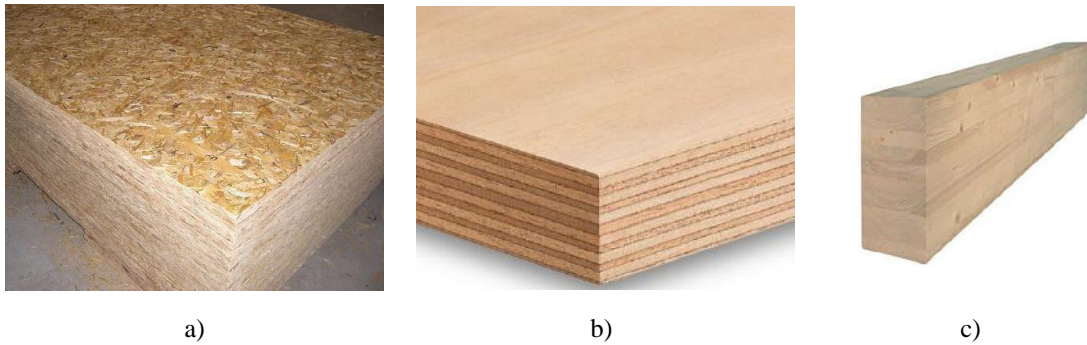


Figura 2.4 – a) Aglomerado de partículas de madeira; b) Contraplacado; c) Viga de madeira lamelada colada [50].

2.2.1.2 Características da madeira

As propriedades físicas, mecânicas e químicas da madeira dependem de variados fatores, tais como a espécie da árvore, o local e clima de onde provém e o tipo de solo onde a árvore cresceu por exemplo [21].

A madeira é caracterizada como um material anisotrópico (diferentes características consoante a direção), muito devido à estrutura diferenciada apresentada pelo tecido lenhoso, como se observa na Figura 2.5. Esta anisotropia pode ser simplificada designando o comportamento como transverso isotrópico, em que se pode dizer que a madeira tem propriedades iguais no plano xy (ou plano paralelo às fibras), mas propriedades diferentes no plano z (ou plano perpendicular às fibras) [21].

A árvore é constituída por raiz, tronco e copa. A raiz caracteriza-se por ter como objetivo fixar a árvore ao solo e dele retirar a seiva bruta (composta por água com sais minerais dissolvidos). O tronco (ou caule) tem várias funções, sendo que se encarrega de sustentar a copa com as ramificações e conduzir a seiva bruta até às folhas da copa e a seiva elaborada das mesmas até ao lenho em crescimento. A copa é constituída pelos ramos, pelas folhas e pelos frutos, cada um com a sua função. Nas folhas a seiva bruta transforma-se em compostos orgânicos, denominados de seiva elaborada [21].

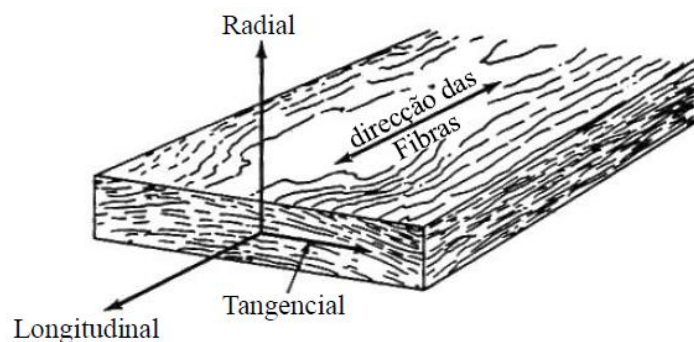


Figura 2.5 – Direções ou eixos da madeira [21].

Do tronco é de onde se retira o material com interesse em aplicações de engenharia civil, sendo por isso importante analisá-lo de forma mais detalhada, como se mostra na Figura 2.6.

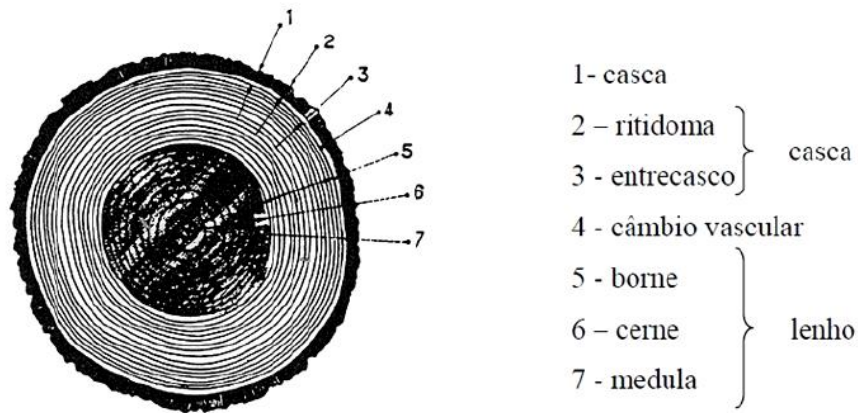


Figura 2.6 – Representação esquemática do tronco de uma árvore [46].

Partindo do interior para o exterior, começa-se por encontrar o lenho. É do lenho que vêm as peças de madeira usadas na engenharia civil, uma vez que é a parte mais resistente da árvore. Este divide-se em medula, cerne e borne, onde a medula é a parte mais interna da árvore e conseqüentemente do lenho, sendo considerado como o núcleo do lenho. Não tem qualquer resistência mecânica nem durabilidade e é considerado como um defeito para peças serradas usadas em engenharia. Segue-se o cerne que comparativamente com o borne tem uma cor mais escura e é formado na sua totalidade por células mortas. Este é um tecido morto que pelas suas características pode-se dizer que é a parte mais resistente do tronco. De seguida vem o borne, que tem uma cor mais clara e é totalmente composto por células vivas e, embora tenha alguma resistência, a sua principal função é a condução da seiva bruta desde a raiz até à copa por capilaridade.

Como se vê na Figura 2.6 entre a casca e o lenho existe o câmbio vascular que é uma fina camada de seres vivos e é também onde se realiza a transformação dos açúcares e amidos em celulose e lenhina, principais constituintes do tecido lenhoso. Essa transformação é de onde resultam os anéis de crescimento. Estes anéis são o indicador da idade da árvore, sendo que no geral a árvore é composta por 2 anéis, um denominado de anel de primavera, que cresce na primavera e no verão, e outro denominado de anel de outono, que cresce no outono e inverno. Por fim vem a casca, que se divide em entrecasco e ritidoma. Ambos têm a função de proteger o lenho e de conduzir a seiva elaborada desde as folhas até ao lenho. Nenhuma destas é usada com função estrutural em engenharia civil.

Existem certos fatores que influenciam as características, nomeadamente:

- Espécie

Como referido, existem variadas espécies botânicas de árvores, cada uma com a constituição química e física diferente. Daí a importância da sua identificação saber o comportamento físico e mecânico típico das peças estruturais.

- Localização da peça

A proveniência da peça (cerne, borne ou copa) influencia alguns fatores, de onde se destacam a resistência mecânica e massa volúmica.

- Massa volúmica

Este também será abordado mais detalhadamente de seguida, sendo que esta apresenta a relação entre a concentração de material existente e resistente do tecido.

- Defeitos

Os defeitos na estrutura lenhosa podem ser nós, fendas, fibras (torcidas ou inclinadas) e a sua presença faz com que a madeira perca resistência, sendo que o tamanho a localização e distribuição influenciam. Será abordado um pouco mais detalhadamente no próximo ponto.

2.2.1.3 Defeitos da madeira

Considera-se defeito da madeira todo o tipo de deficiência que esta possa ter, sendo provocada pela génese da árvore ou agentes externos. Para além de reduzir o valor comercial [46], reduz também a capacidade resistente da estrutura.

Tal como referido por André [1], “A madeira estrutural ideal é a que tem as fibras retas, sem nós, sem fendas de secagem e com uma estrutura anatómica homogénea”.

Existem vários tipos de defeitos ou singularidades, sendo os mais comuns [36]:

- Nós;
- Inclinação do fio;
- Descaio;
- Empenos;
- Fendas;
- Apodrecimento, bolores, ataque biótico;

- Lenho de reação;
- Bolsas de resina;
- Medula e casca inclusa.

- Defeitos de secagem

Os defeitos de secagem podem ser evitados através de vários processos de secagem [49]. Estes aparecem através da retração que é um fenómeno dado pela diminuição do teor em água. Os mais comuns são:

- Fendas;

- Empenamentos.

As fendas ocorrem na presença de elevadas tensões na madeira, devido a uma contração diferencial da madeira entre as zonas periféricas e interiores do lenho, o que induz esforços de tração transversal e provoca aberturas na madeira segundo planos radiais. Estas aberturas (ou fendas) levam a uma diminuição da secção resistente útil e, no caso de esta ligar faces opostas da peça ou se situar numa zona de ligação, pode vir a ser bastante grave [18]. Na Figura 2.7 apresenta-se um exemplo de um pormenor de uma fenda.



Figura 2.7 – Pormenor de fenda [27].

Os empenos são uma distorção em relação ao plano da superfície de uma peça de madeira e podem ser causados por fio torcido, lenho de reação, desigualdade de retrações e até técnicas de serragem e de secagem mal conduzidas [36].

- Descaio

O descaio é o arredondamento de um canto da peça da madeira. Ocorre devido a cortes muito próximos da curvatura do tronco e resultam numa redução da superfície resistente da madeira, não constituindo risco grave para extensões de descaio pequenas.

- Defeitos de crescimento

Estes defeitos ocorrem durante a fase de crescimento da árvore e são impossíveis de evitar com intervenções técnicas. Ocorrem geralmente devido a fenômenos biológicos. Nós, lenho de reação e desvio da inclinação do fio são os mais comuns, casca inclusa e bolsas de resina também são defeitos de crescimento.

- Nós

Dentro dos defeitos mais comuns, os nós apresentam algum destaque e influenciam a resposta da madeira em função do tipo de nó, da localização e dimensão. Um nó é a ligação de um ramo inserido no tronco da árvore. Na Figura 2.8 mostra-se um exemplo de um nó. Segundo Franco [36], “Os nós provocam desvios significativos no tecido lenhoso na zona vizinha onde se encontram, que por exemplo, no caso de um esforço de compressão paralelo às fibras, fará com que a madeira se comporte com instabilidade. Podem também afetar a resistência das peças sujeitas à flexão, além de dificultarem a sua trabalhabilidade”.



Figura 2.8 – Nó em viga de madeira serrada [8].

- Desvio da inclinação do fio

O fio da madeira traduz a disposição relativa das fibras e a sua orientação [46]. O desvio da inclinação do fio resulta de um desenvolvimento natural da árvore ou de um plano de serragem não paralelo ao fio da madeira. Este tem mais influência na resistência à compressão, como se pode ver na Figura 2.9.

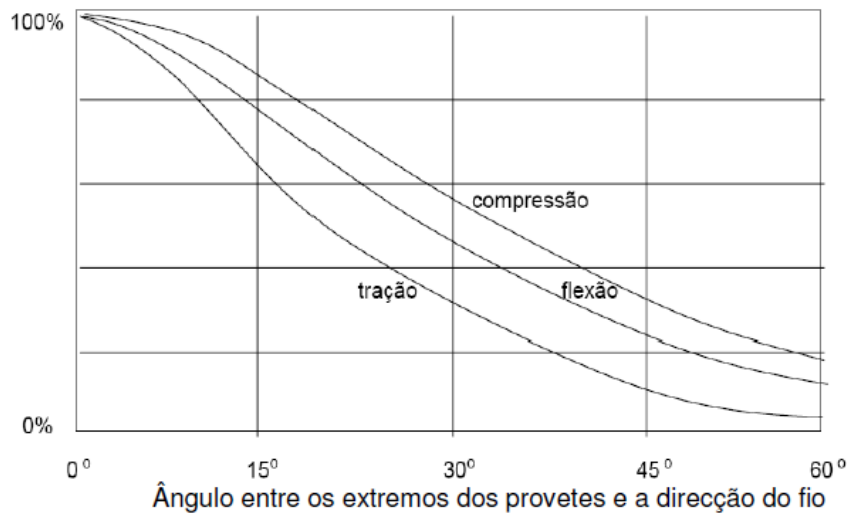


Figura 2.9 – Dependência das propriedades de resistência relativa em função do ângulo do fio, na direção axial da madeira [54].

- Lenho de reação

O lenho de reação ao crescimento da árvore num plano inclinado face ao eixo vertical, onde a própria árvore tem a necessidade de desenvolver os lenhos de forma a compensar o esforço que lhe é submetido. Como se vê na Figura 2.10 existem dois tipos de lenhos, o de compressão que leva à criação de fissuras e o de tração, que torna a trabalhabilidade da madeira mais difícil.

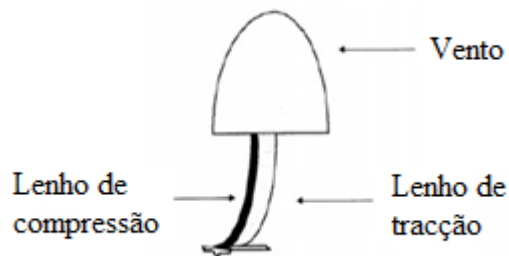


Figura 2.10 – Posição dos lenhos de compressão e tração no tronco da árvore (adaptado de [54]).

- Bolsas de resina e casca inclusa

As bolsas de resina afetam a parte visual e mecânica da madeira, sendo uma característica das árvores resinosas. Nas folhosas este fenómeno tem o nome de bolsa de goma, sendo que em ambos os casos se trata de uma cavidade com resina no estado líquido ou sólido.

A casca inclusa manifesta-se através da presença de casca no lenho e ocorre devido a um crescimento irregular do fuste da árvore, contribuindo para o apodrecimento das peças [36].

- Defeitos de carácter abiótico ou provocado por agentes biológicos

De entre aqueles provocados por agentes biológicos, os mais comuns são os fungos, os insetos do ciclo larvar e os insetos sociais, enquanto nos de natureza abiótico os mais comuns são o fogo e os agentes atmosféricos [18].

- Fungos

Existem dois tipos de fungos, os cromogéneos e os de podridão. Os cromogéneos aparecem em madeiras com teor de água superior a 25 % e, embora ataquem apenas superficialmente, sem alterar significativamente a resistência mecânica, aumentam a permeabilidade e alteram a coloração para azulado [18].

Os fungos de podridão podem aparecer devido aos cromogéneos e bolores. Estes levam a uma diminuição significativa da resistência da madeira e aparecem em madeiras com teor em água superior a 20 %. Afetam a resistência dinâmica, estática e a densidade, tornando a madeira bastante higroscópica. Existem 3 grupos diferentes de podridão, como é possível verificar na Figura 2.11. A podridão castanha é a mais gravosa e normalmente é identificada já numa fase tardia quando a madeira já perdeu entre 10 % a 20 % da sua massa e cerca de 80% da resistência mecânica [8]. Ocorre principalmente em zonas húmidas e mal ventiladas.

A podridão branda, que é a menos gravosa, ocorre em ambientes de elevada humidade. É originada por um fungo com um processo de desenvolvimento lento, mas tal como o anterior só se torna visível num estado avançado, o que o torna perigoso.

Por fim, existe a podridão branca, típica das madeiras folhosas e que também leva a uma grande perda de resistência mecânica.



Figura 2.11 – Podridão Castanha, branca e branda, respetivamente [8].

- Insetos de ciclo larvar

Existem vários tipos de insetos de ciclo larvar, como o caruncho, as traças e o escaravelho da madeira, como se mostra na Figura 2.12. Geralmente atacam a madeira seca, provocando grandes perdas de resistência mecânica e formando galerias no interior do borne. Após a entrada, o inseto passa pela metamorfose, fazendo o ciclo larvar e criando depois um orifício de saída, o que facilita a identificação destes ataques [18].



Figura 2.12 – Inseto caruncho, pormenor de ataque de traça e escaravelho da madeira, respetivamente [18].

- Insetos sociais

Os insetos sociais ou térmitas, atacam principalmente as madeiras húmidas. Tal como os de ciclo larvar, também formam galerias de entrada, mas mais interiores e não detetáveis a “olho nu”, o que o torna bastante perigoso. A Figura 2.13 mostra um exemplo de um ataque de térmicas em madeira.



Figura 2.13 – Ataque de térmitas em madeira [8].

- Agentes atmosféricos

O mais gravoso é a radiação solar (ultravioleta) que quando combinada com a água da chuva provoca uma lavagem da superfície tornando a madeira totalmente exposta ao sol. Outro agente é a alternância de ciclos húmido/seco, que leva a que a madeira sofra variações volumétricas, formando tensões, curvaturas e empenamentos [18].

2.2.1.4 Propriedades Físicas

a) Densidade

A densidade varia de espécie para espécie, de árvore para árvore e até mesmo de peça para peça, pelo que não é possível utilizar um valor absoluto com total confiança. Esta propriedade é obtida pelo quociente entre a massa e o volume da madeira, onde o volume é aparente, não contabilizando o volume de vazios.

$$D = \frac{P}{V_{aparente}} \quad (2.1)$$

Para o cálculo da densidade deve-se utilizar peças com um teor de água de 12% [18].

A densidade pode ser entendida como o índice de compactidade das fibras da madeira, variando em função da maior ou menor quantidade de fibras por unidade de volume [50].

Num contexto geral pode-se dizer que a relação da densidade com a resistência mecânica e durabilidade natural é quase linear, sendo por isso uma propriedade importante, apresentando-se sua relação na Figura 2.14.

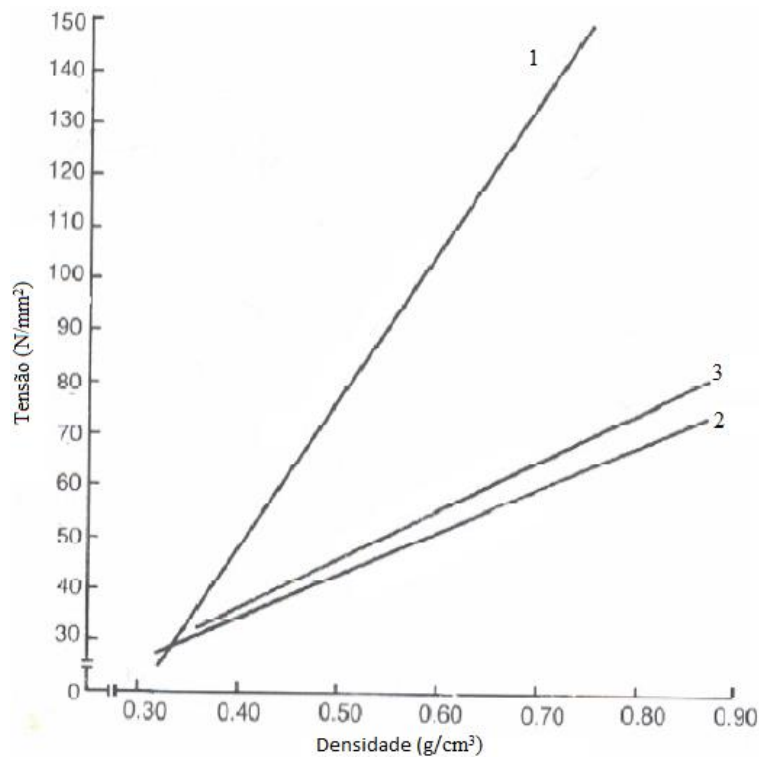


Figura 2.14 – Relação da resistência mecânica com a densidade: 1- flexão estática; 2- compressão axial; 3- dureza (adaptado de [60]).

b) Retratibilidade

Existem dois tipos de retratibilidade na madeira - linear e volumétrica. No geral a retratibilidade ocorre com a alteração do teor em água que desencadeia variações dimensionais, desenvolvendo esforços de compressão quando adsorve vapor de água e expande e esforços de tração quando perde água e retrai.

A retratibilidade volumétrica fornece a variação volumétrica da madeira para um certo teor em água. A retratibilidade linear tem em conta o comportamento da madeira nas 3 direções (visto a madeira ser anisotrópica). Na direção longitudinal a retratibilidade proporciona uma variação dimensional na ordem de 0,5%, enquanto nas outras direções (radial e tangencial), pode apresentar valores de 6% a 10%, o que pode originar fendas ou torção [50]. Na Figura 2.15 podemos ver as curvas de retração consoante a direção.

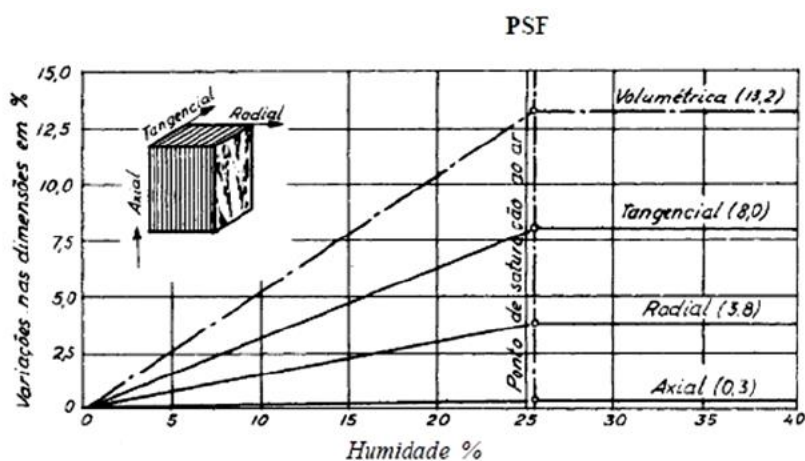


Figura 2.15 – Curvas de retração [21].

c) Durabilidade

A durabilidade da madeira é uma característica que varia de espécie para espécie, e dentro da mesma espécie varia conforme a região do tronco (mais interior - no cerne - ou mais exterior - no borne). É um conceito diretamente ligado aos ataques bióticos, o que faz com que o borne seja mais facilmente atacado.

A Norma Europeia EN 350 [31] aborda esta temática. Encontra-se dividida em duas partes: a primeira apresenta os métodos de determinação de durabilidade da madeira maciça não tratada em relação ao ataque de insetos ou fungos e apresenta uma classificação; a outra expõe a durabilidade das espécies mais importantes existentes na Europa [60].

Existem tratamentos que possibilitam o incremento da durabilidade da madeira, como a aplicação de produtos minerais hidrossolúveis (como sais de cobre ou cromo), ou óleos naturais e creosote.

d) Teor de Água

Aquando do abate de uma árvore, toda a sua seiva passa a existir sob a forma de água e pode dividir-se em três tipos:

- Água de constituição, que não pode ser removida sem que exista uma decomposição química da madeira; se esta for a única água presente na peça de madeira, pode-se considerar seca [31].

- Água de impregnação (ou embebição), que preenche os espaços entre as fibras e as células lenhosas. Quando está presente faz com que a madeira inche [50] e quando sai faz com que retraia, aumentando a rigidez e resistência.

- Água livre, é a que preenche os espaços vazios (vasos capilares), não provocando qualquer alteração física ou mecânica na madeira.

Segundo Helena Cruz [22], após o abate da árvore a madeira perde a sua água livre. Quando esta sai toda, mas a água de impregnação se mantém, atinge-se o ponto de saturação das fibras (PSF), que é dado para um teor de água entre 28% a 30% na maioria das espécies. Quando o teor em água desce do PSF a madeira começa a perder a água de impregnação, começando a sofrer alguma retração. Tem-se o exemplo do pinho na Figura 2.16.

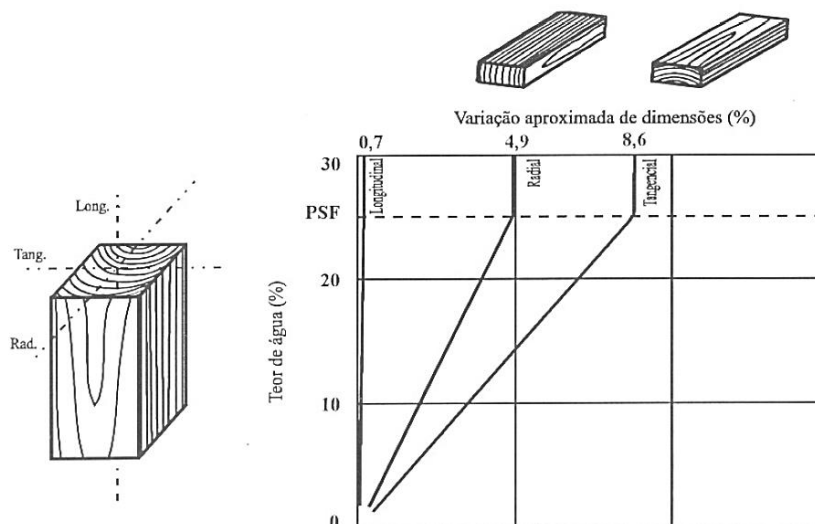


Figura 2.16 – Coeficientes de retração em termos relativos segundo as várias direções (valores para pinho bravo) [22].

Segundo Sardinha [64], a madeira pode ser classificada em função do teor de água, como se pode ver na Figura 2.17.

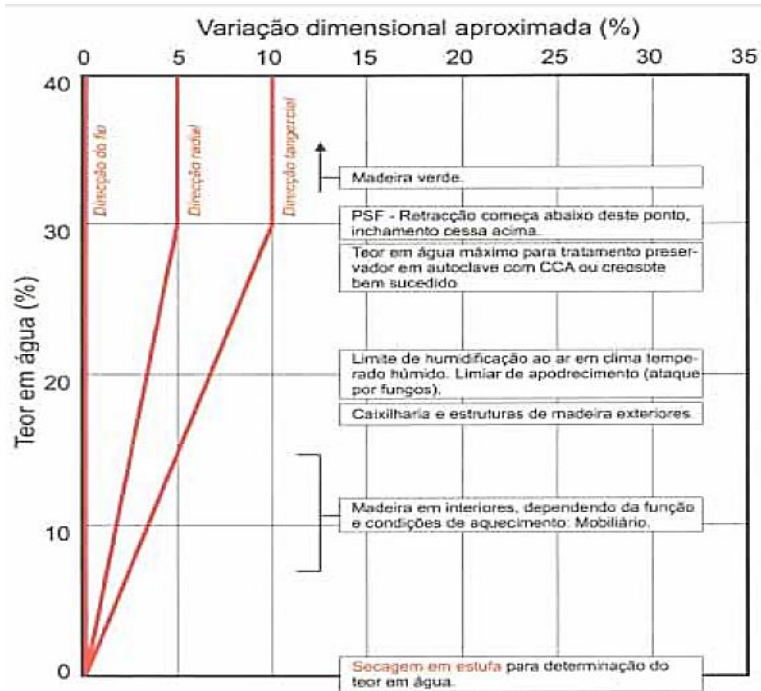


Figura 2.17 – Relação da variação dimensional com o teor em água [60].

Para comparação de resultados de propriedades físicas e mecânicas existe um teor de humidade designado de normal e toma o valor de 12%.

e) Resistência ao Fogo

Apesar de um dos constituintes químicos da madeira ser o carbono, o que a torna um material inflamável, esta tem um bom comportamento ao fogo. Quando a madeira é exposta ao fogo, este faz com que uma camada exterior carbonize e tome um efeito retardador do fogo, isolando termicamente a peça de madeira no interior. O fogo afeta a resistência da madeira ao reduzir a secção útil. Na Figura 2.18 pode-se ver o efeito do fogo em vigas metálicas e de madeira.



Figura 2.18 – Viga de madeira a segurar perfis metálicos depois de arder [50].

Pode-se dizer que a resistência ao fogo da madeira é geralmente superior à de uma estrutura metálica, sendo o aço um material muito utilizado para substituir a madeira em estruturas antigas [55]. Na Figura 2.19 vê-se a secção da madeira depois de arder.

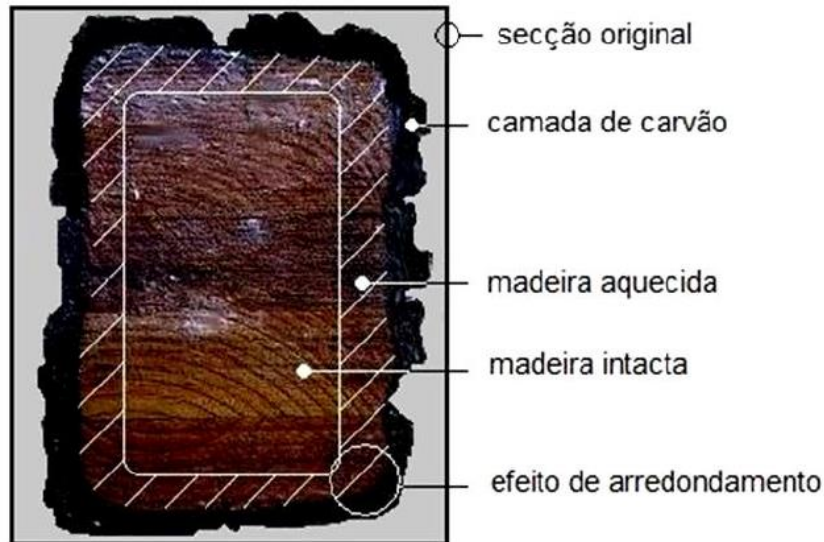


Figura 2.19 – Viga de madeira queimada [50].

f) Outras propriedades

Em termos acústicos, principalmente por ser leve, pode-se dizer que a madeira não é um bom isolante, mas quando utilizada no revestimento de paredes melhora a distribuição das ondas sonoras, sendo um bom material de absorção e correção acústica [60].

Em termos térmicos, pode-se dizer que é um bom isolante térmico, devido à sua estrutura (volumes de ar e celulose).

2.2.1.5 Propriedades Mecânicas

Para prever o comportamento da madeira a ações exteriores, às tensões internas que resultam da deformação ou retração exige-se um estudo profundo das suas propriedades mecânicas. Durante o processo de crescimento, a árvore desenvolve-se de modo a responder às solicitações a que é sujeita, tais como o vento, que induz esforços de flexão e o seu peso próprio, que exige uma resposta à compressão.

Como já referido, a madeira é um material anisotrópico, logo as propriedades mecânicas desenvolvem-se em duas direções - perpendicular e paralela ao fio. Na Tabela 2.2 é possível encontrar as propriedades mecânicas de algumas das madeiras mais utilizadas.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de algumas espécies [50].

Espécies	Tração		Compressão		Flexão estática			Dureza	Resiliência
	// ¹	⊥ ²	//	⊥	MR ³	ME ⁴	Corte		
	N/mm ²							kN	J/cm ²
Pinheiro alvar	78	1,4	33	4,7	67	9,60	5,5	1,7	5,9
Carvalho	108	3,3	42	11,5	116	11,56	12,7	4,6	-
Castanheiro	132	-	49	-	75	8,82	7,8	3,1	5,6
Choupo	84	1,5	35	-	64	10,73	7,6	1,9	-
Espruce europeu	84	1,5	30	4,1	60	9,10	5,3	1,5	4,9
Ábeto branco	78	1,4	33	4,7	67	9,60	5,5	1,7	5,9
Lariço Europeu	105	2,2	54	7,3	97	13,53	8,8	3,4	5,9
Pinheiro negro	102	2,0	39	-	103	11,76	9,8	2,6	3,9
Salgueiro	83	2,4	26	3,4	53	9,80	6,7	1,6	6,9
Nogueira	98	3,5	71	11,8	144	12,25	6,9	5,3	9,3

¹ Direção longitudinal – paralelo ao fio das fibras

² Direção transversal – perpendicular ao fio das fibras

³ Módulo de Rotura

⁴ Módulo de Elasticidade

a) Direção paralela ao fio

Na direção do fio, ou seja, axial das peças de madeira é possível encontrar:

- Compressão paralela do fio:

Designa-se por compressão paralela ao fio quando uma peça está sujeita a esforços na direção paralela aos fios, como é o caso dos pilares, por exemplo. Para efetuar a caracterização à compressão paralela utiliza-se a norma EN 408 [32], que embora não defina a geometria exata dos provetes, diz que a secção destes tem de ser quadrangular e ter um comprimento de 6 vezes o lado da secção. A norma EN 408 [32] define um tempo de 300 ± 120 segundos até à rotura, enquanto a norma ASTM D 143 [3] determina a velocidade de aplicação da carga que depende do comprimento da peça.

Em casos comuns a madeira comporta-se como um material elástico quando sujeita à compressão axial até 75 % da carga máxima de rotura [60]. Pela Tabela 2.2 é possível constatar que a resistência à compressão paralela é muito superior à perpendicular. Na Figura 2.20 é possível observar alguns padrões de rotura por compressão axial. Em Portugal, existe a norma NP 618 [58] para ensaios de compressão uniaxial.







Padrão de rotura por compressão	Descrição
	(a) Quando o enrugamento das fibras ocorre num plano paralelo aos topos e afastado destes – esmagamento.
	(b) Se um ou dois planos forem inclinados e por vezes em direcções preferenciais (tangencial ou radial) - fractura em cunha.
	(c) Num plano em que o ângulo seja superior a 45° a rotura por compressão dá origem ao corte da peça.
	(d) Quando aparece uma fenda de separação entre as fibras da madeira, diz-se que o provete está fendilhado.
	(e) Compressão e corte paralelas ao fio.
	(f) Nos casos em que as fibras se dobram na superfície de contacto, o padrão de rotura que ocorre denomina-se por enrolamento superficial ou em escova.

Figura 2.20 – Padrões de rotura por compressão axial [3].

- Tração:

A madeira responde de forma mais positiva quando sujeita a esforços de tração paralelos às suas fibras, tal como se pode confirmar com a análise da Tabela 2.2, sendo por isso correntemente utilizada à flexão.

Na tração paralela às fibras, as contrações aproximam as fibras, fortalecendo a sua coesão e aderência, o que faz com que a madeira atinja uma resistência à tração paralela ao fio cerca de 3 vezes superior à resistência à compressão paralela ao fio [60].

Para se avaliar a madeira à tração paralela existe a norma ASTM D 143 [3], que define as características do ensaio e do provete, conforme mostrado pela Figura 2.21. Por outro lado, a norma EN 408 [32] não define especificamente os provetes para ensaio, mas diz que os mesmos devem ter a escala real (o que em muitos casos inviabiliza a sua aplicação). Em Portugal, para ensaios de tração paralela às fibras existe a norma NP 619 [59].

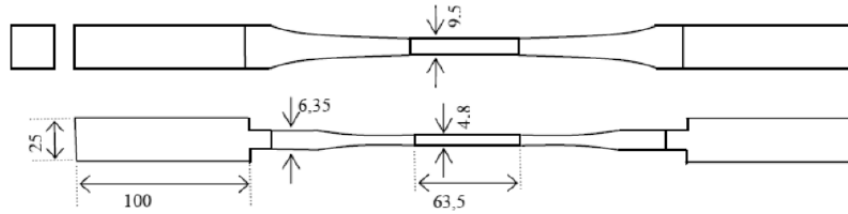


Figura 2.21 – Esquema do provete de tração paralela [3].

Como se pode ver na Tabela 2.3, que relaciona a tração com o peso específico e compara a madeira com outros materiais, a madeira apresenta um comportamento bastante interessante.

Tabela 2.3 – Propriedades dos materiais à tração em relação ao peso específico [50].

Material	Peso específico	Resistência à tração N/mm ²	RT/PE N/mm ²	E kN/mm ²	E/PE kN/mm ²
Madeira					
Espruce	0,44	84	190,90	9,1	20,68
Carvalho	0,87	108	124,10	11,7	13,39
Betão	2,50	4	1,60	13,8	5,52
Vidro	2,50	50	20,00	72,4	28,96
Alumínio	2,80	250	89,29	69	24,64
Aço	7,90	450	56,96	207	26,20
PVC	1,30	60	46,15	5,8	4,46

Onde, PE é o peso específico, RT a resistência à tração e E o módulo de elasticidade.

- Flexão:

A resistência à flexão é seguramente uma das características mais importantes a avaliar e também uma das melhores características da madeira. Muitas são as aplicações da madeira sujeitas a esforços de flexão, como as vigas de cobertura ou de pavimento, ou mesmo as pontes, entre outros.

Tal como referido por Santos [63]: “O paradoxo com que se depara a flexão nas suas mais variadas aplicações, é a relação entre as cargas a suportar e o peso próprio do material estrutural, pois os componentes em serviço têm de se suportar a si próprios mais a cargas aplicadas.”.

Quando se submete uma peça estrutural de madeira a esforços de flexão, esta é na realidade submetida a esforços de tração, de compressão e de corte em diferentes direções. Para a análise estrutural, uma das propriedades mais importantes é o módulo de elasticidade, que é retirado do ensaio à flexão estática a 3 ou a 4 pontos. É comum utilizar a norma ASTM D 143 [3], que define provetes de 50x50x760 mm³ ou 25x25x410 mm³. Esta norma utiliza a flexão a 3 pontos como se vê na Figura 2.22.

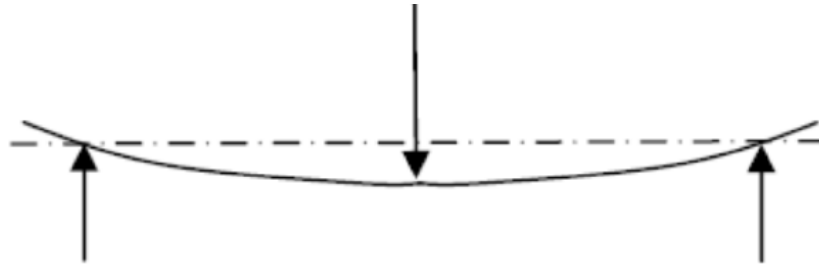


Figura 2.22 – Esquema de flexão a 3 pontos [8].

A norma EN 408 com os mesmos propósitos utiliza o ensaio de 4 pontos com as dimensões indicadas na figura na Figura 2.23.

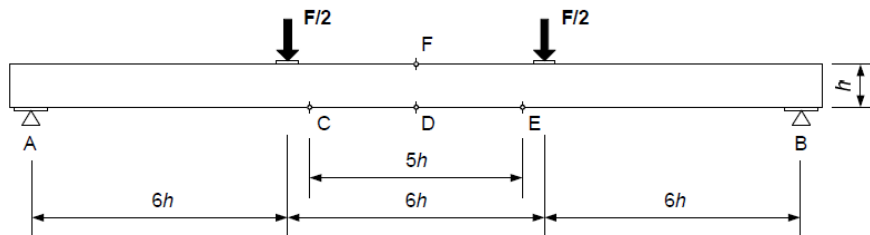


Figura 2.23 – Ensaio à flexão segundo a norma EN 408 [32].

Através deste ensaio determina-se o módulo de elasticidade que é uma medida de rigidez e permite avaliar a capacidade que a madeira tem para se deformar. Define-se como a relação entre tensão e deformação unitária [63].

b) Direção Perpendicular ao fio

Na direção perpendicular ao fio, ou seja, perpendicular às peças de madeira é possível encontrar:

- Compressão perpendicular ao fio:

A resistência à compressão transversal não é uma das características mais favoráveis da madeira, apresentando mesmo valores cerca de 15 vezes inferiores à compressão axial, e valores de cerca de metade da resistência à tração perpendicular. Para este ensaio é comum utilizar a norma Europeia EN 408 [32], que define provetes com dimensões de $45 \times 70 \times 90 \text{ mm}^3$, e tal como na compressão paralela, a velocidade de carga deve ser de modo a que o valor máximo seja atingido a 300 ± 120 segundos.

- Tração Perpendicular ao fio:

Como se pode ver na Tabela 2.2, a tração perpendicular ao fio é onde a madeira atinge uma resposta menos positiva, daí a sua importância na fase do cálculo estrutural.

Em comparação com a tração paralela às fibras, obtém-se uma resposta cerca de 50 vezes inferior, e daí quando se calcula estruturas deve-se encaminhar o mínimo de tração perpendicular às peças estruturais. Para este ensaio é comum utilizar a norma Europeia EN 408 [32], que define provetes com dimensões de $5 \times 5 \times 5,5 \text{ mm}^3$, ou a norma ASTM D 143 [3] que define os provetes com as mesmas dimensões.

c) Corte

O corte pode acontecer paralelamente ou perpendicularmente às fibras da madeira, sendo que para haver corte têm de haver duas forças a atuar em sentidos opostos. A madeira resiste muito melhor ao corte perpendicular às fibras [60].

A norma EN 408 [32] define os provetes e os ensaios para determinar a resistência ao corte.

d) Dureza

A dureza é uma característica da madeira que se pode dizer que é físico-mecânica, e trata-se da capacidade ou resistência que o material tem à penetração e à riscagem. É uma medida que informa acerca da dificuldade em trabalhar a madeira para que fique como pretendemos. A norma utilizada para calcular a dureza de um provete é a NP 617 [39].

2.2.2. Adesivos Epoxídicos

A escolha do adesivo é um ponto fulcral em colagens estruturais, porque embora o substrato e o reforço com laminado de FRP possam ser compatíveis, se a ligação entre ambos não for a melhor, o reforço perde a sua eficácia.

A escolha do adesivo é importante para que as tensões de corte e na direção normal ao material sejam devidamente transferidas para o sistema de reforço [19].

Embora existam diversos adesivos, no reforço de estruturas de madeira os mais comuns são os adesivos epoxídicos. Para se obter os melhores resultados possíveis, deve considerar-se que o adesivo epoxídico deve impregnar a superfície da madeira e ter um comportamento similar aos materiais a unir, de modo a que as deformações iniciais sejam semelhantes entre os 3 materiais. A espessura do adesivo deverá ser inferior a 3 mm [16] e a superfície da madeira deverá ser preparada para a colagem. Para além disso é importante que a resina se adapte às variações volumétricas da madeira. Na Tabela 2.4 apresentam-se as propriedades típicas dos adesivos epoxídicos.

Um aspeto importante nas resinas é que estas perdem grande parte das suas características mecânicas assim que atingem a sua temperatura de transição vítrea (T_g), pelo que terá de se ter em atenção a zona

onde o elemento a reforçar vai permanecer, assim como a técnica de reforço. O adesivo epoxídico apresenta a sua T_g sempre abaixo dos 100° C.

Tabela 2.4 – Propriedades das resinas epoxídicas [35].

Propriedade (a 20°C)	Resina Epoxídica
Densidade (kg/m ³)	1100 - 1700
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,5 - 20
Tensão de Tração (MPa)	9 - 30
Tensão de Corte (MPa)	10 - 30
Tensão de Compressão (MPa)	55 - 110
Extensão de Rotura (%)	0,5 - 5
Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ /°C)	25 - 100
Temperatura de Transição Vítreia (°C)	45 - 80

2.2.3. FRP: Fibre Reinforced Polymer

Os materiais compósitos de reforço existem sob a forma de fibras contínuas ou não contínuas (fibras cortadas ou filamentos) [40]. Embora existam variados sistemas de reforço, os compósitos de alta resistência são dos mais importantes.

Os compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) são constituídos por uma matriz polimérica reforçada através de fibras, podendo as fibras ser de vidro, carbono, aramida ou basalto. A matriz pode ser orgânica, metálica ou cerâmica, e serve para a distribuição das cargas entre as fibras, para unir e proteger as fibras, tendo também uma baixa densidade de maneira ao compósito no geral ter boa relação resistência-peso. As matrizes podem ser agrupadas em dois tipos, termoendurecíveis e termoplásticas. No reforço de estruturas utilizam-se matrizes orgânicas termoendurecíveis, uma vez que estas têm melhor resistência a agentes químicos, reduzida fluência e perda de tensões por relaxação, e ainda é um material sem grandes variações com ações de temperatura [51].

Os compósitos de FRP podem-se dividir em dois tipos consoante a utilização: os pré-fabricados (Figura 2.24) e os impregnados “*in-situ*” (Figura 2.25) [53].



Figura 2.24 – FRP pré-fabricado [53].



Figura 2.25 – Tecido de FRP impregnado “*in situ*” [53].

Os pré-fabricados consistem na sobreposição e impregnação de várias camadas de fibras, em que para controlar a largura e espessura são sujeitos a um processo de pultrusão. Os mais comuns são os laminados, tecidos, barras e varões (Figura 2.26).



Figura 2.26 – Compósitos de FRP pré-fabricados [53].

Os impregnados “*in-situ*” podem ser mantas, fios ou tecidos, e consistem no agrupamento de feixes de fibras contínuas. São aplicados no local com resina, sendo que só se designa de FRP após a impregnação da mesma.

Nesta área existem vários documentos de referência, salientando-se o *Bulletin 14 – Externally Bonded FRP Reinforcement for Structures* [42], o CNR-DT 201/2005 [47] lançado pelo Consiglio Nazionale delle Ricerche em Itália.

2.2.3.1 Tipos de Fibras

Os compósitos de FRP existentes no mercado são diferentes consoante o tipo de fibras. Para além da matriz, as fibras constituem a outra parte dos compósitos de alta performance, tendo como principal função o reforço da matriz através da mobilização de tensões quando o compósito é solicitado [19]. As fibras são filamentos contínuos de pequeno diâmetro (entre 5 a 20 μm) que aparecem em proporções que variam entre os 35 e os 70 % da composição do FRP [53].

Existem vários tipos de compósitos de FRP compostos por diferentes materiais, como as fibras de vidro (GFRP), as fibras de aramida (AFRP) ou as fibras de carbono (CFRP). A Tabela 2.5 apresenta as características destes materiais de forma resumida.

a) Fibras de Vidro

As fibras de vidro resultam da junção de areia, caulino, calcário e colemanite, obtendo 5 designações diferentes em função da quantidade de cada matéria prima (C,E,R,S e T) [5]. Os tipos E e S são os mais utilizados em reforço estrutural. Na Figura 2.27 mostra-se um exemplo de fibra de vidro.

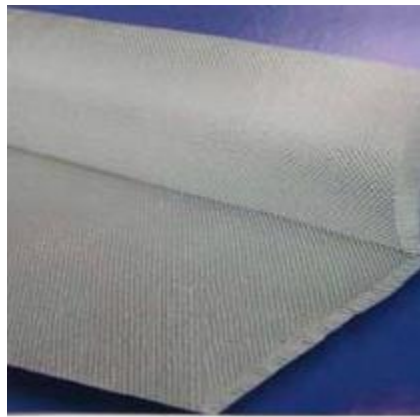


Figura 2.27 – Fibra de vidro [5].

b) Fibras de Aramida

As fibras de aramida ou kevlar têm diâmetro entre 12 a 15 μm e cor brilhante. São produzidos através da mistura de diaminas aromáticas e cloretos diácidos aromáticos [5].

Estas fibras apresentam algumas características similares às do GFRP, como o módulo de elasticidade, resistência ao fogo, ao calor e aos químicos, contudo apresentam uma grande fragilidade aos raios ultravioleta e à rotura por fluência, o que leva a que seja o tipo de fibras menos utilizado no reforço estrutural. A Figura 2.28 mostra um exemplo de uma fibra de aramida.



Figura 2.28 – Exemplo de fibra de aramida [5].

c) Fibras de Carbono

As fibras de carbono apresentam um comportamento isotrópico devido à sua composição molecular, orgânico e semi-cristalina [53]. Têm tamanhos entre os 5 e 10 µm de diâmetro (Figura 2.29), são de cor preta e têm uma estrutura com textura radial no centro e circular na zona exterior (Figura 2.30) [66][45].

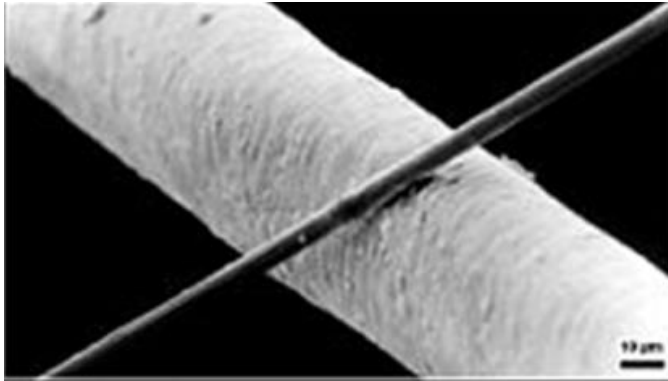


Figura 2.29 – Filamento de fibra de carbono (6 µm) ao lado de cabelo humano (1 fio a branco) [53].

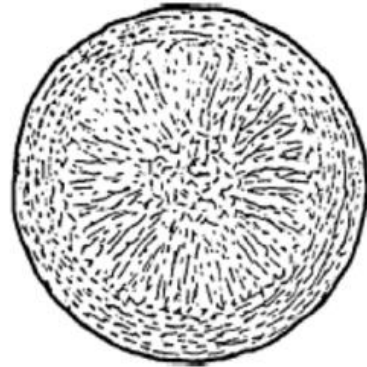


Figura 2.30 – Secção transversal de um filamento de fibra de carbono [53].

As fibras de carbono são obtidas através de processos de oxidação, carbonização e grafitação a altas temperaturas e podem ser obtidas a partir de materiais de alto teor de carbono, como o alcatrão, o poliacrilato (PAN) ou o rayon [51].

Como se observa na Tabela 2.5, as fibras de carbono podem ser de 2 dois tipos: a) tipo I – para módulos de elasticidade elevados: *High Modulus* (HM) ou *Ultra High Modulus* (UHM); e b) tipo II - para elevada resistência: *High Strength* (HS) ou *Ultra High Strength* (UHS) [7].

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas dos vários FRP [19].

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão Tração (MPa)	Extensão de Rotura (%)
Fibra de Carbono			
<i>High Strength</i>	215 - 235	3500 - 4800	1,4 - 2,0
<i>Ultra High Strength</i>	215 - 235	3500 - 6000	1,5 - 2,3
<i>High Modulus</i>	350 - 500	2500 - 3100	0,5 - 0,9
<i>Ultra High Modulus</i>	500 - 700	2100 - 2400	0,2 - 0,4
Fibra de Vidro			
<i>E</i>	70	1900 - 3000	3,0 - 4,5
<i>S</i>	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5
Fibra de Aramida			
<i>Low Modulus</i>	70 - 80	3500 - 4100	4,3 - 5,0
<i>High Modulus</i>	115 - 130	3500 - 4000	2,5 - 3,5

Na Tabela 2.5 observa-se que o módulo de elasticidade varia entre 200 a 700 GPa, com valores de extensão de 0,2 a 2,3 %.

Este tipo de fibras possui algumas vantagens, de onde se destacam as seguintes:

- Reduzida sensibilidade à fadiga e fluência;
- Bom comportamento ao carregamento cíclico;
- Elevada durabilidade;
- Elevada resistência à corrosão/ácidos;
- Indiferença a ações de temperatura;
- Peso próprio baixo;
- Elevado módulo de elasticidade;
- Elevado valor de tensão resistente.

Contudo, também apresentam algumas desvantagens, como o facto de terem um custo elevado, de apresentarem uma rotura frágil, uma baixa capacidade de resistência ao impacto e por serem condutores térmicos e eléctricos, pelo que se deve prevenir o seu contacto com metais [7,14].

Durante muito tempo foram utilizadas apenas na engenharia aeroespacial devido ao seu preço elevado, mas com o evoluir do tempo e a redução dos custos de produção, a sua utilização foi expandida para outras áreas, apresentando hoje uma difusão considerável na engenharia civil.

2.3. Técnicas de Reforço de Pavimentos de Madeira com Compósitos de FRP

A técnica de reforço a utilizar é definida de acordo com as condições da estrutura, dependendo de vários factores, tais como a idade da estrutura (nova ou já existente), a técnica ser executada (no interior ou exterior do edifício) e o tipo de função que se pretende que o reforço desempenhe. Geralmente a técnica a utilizar é definida na fase de projeto e tem em conta todas as condicionantes.

As técnicas correntes de reforço de estruturas de madeira com materiais compósitos podem resumir-se nas seguintes [6]:

- a) Técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), que consiste na colagem do reforço na face exterior da madeira;
- b) Técnica NSM (*Near Surface Mounted*), que consiste na colagem do reforço num rasgo previamente executado na superfície de madeira. Esta técnica é mais trabalhosa que a anterior, mas permite proteger o reforço principalmente ao impacto;

- c) Técnica de colagem durante a fase de produção da madeira. Esta técnica apenas é utilizada para madeira lamelada colada, uma vez que o compósito é colado numa face intercalada entre as lamelas da madeira.

Atualmente encontra-se em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia uma técnica que é uma evolução da técnica EBR. Nesta técnica as extremidades do compósito de FRP são ancoradas num furo previamente feito na madeira.

Através destas técnicas é possível reforçar as vigas de madeira à flexão e ao corte, podendo recorrer-se, conforme os casos, a tecidos, laminados, barras de FRP, entre outros.

- Reforço à flexão

As vigas de madeira quando submetidas a esforços de flexão tendem a atingir a rotura no lado tracionado, daí que na maioria desses casos as vigas são reforçadas no lado tracionado, de modo a aumentar a sua resistência. Este reforço pode levar a que em certos casos a rotura passe a ser atingida por compressão e na face oposta [5]. A rotura por compressão é dúctil, o que é um aspeto favorável face à rotura frágil que ocorre por tração.

Na Figura 2.31 podem-se ver as variadas técnicas de reforço à flexão. Para todos os casos, a viga é reforçada na zona inferior – zona tracionada. Em a) e c) é utilizada a técnica EBR, sendo possível utilizar tecidos ou laminados; em d) e g) também se utiliza a técnica EBR, mas nestes dois casos apenas é possível recorrer à utilização de tecidos de FRP.

Já em e) e f) utiliza-se a técnica NSM, onde o FRP fica mais resguardado ao impacto e pode ser executado com laminados ou barras. Em b) utiliza-se a colagem interlamelas, que só é possível no caso da madeira lamelada colada.

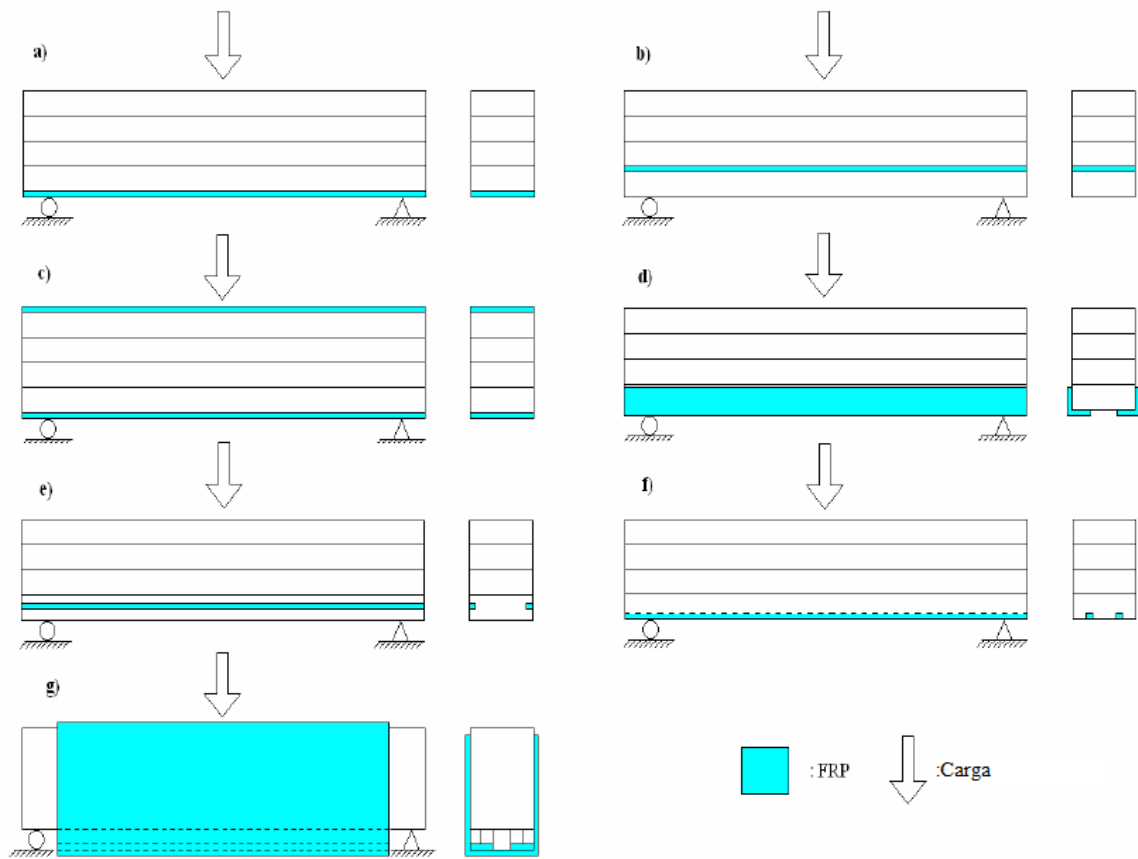


Figura 2.31 – Tipos de reforço à flexão (adaptado de [1]).

- Reforço ao corte

Outro dos problemas da madeira é a baixa resistência ao corte, daí a importância da utilização de soluções de reforço tendo em vista este tipo de rotura.

Na Figura 2.32 é possível observar vários tipos de reforço de vigas ao corte. Em a) pode-se observar o reforço pelo exterior - técnica EBR, enquanto na b) é mostrado o reforço feito na fase de produção.

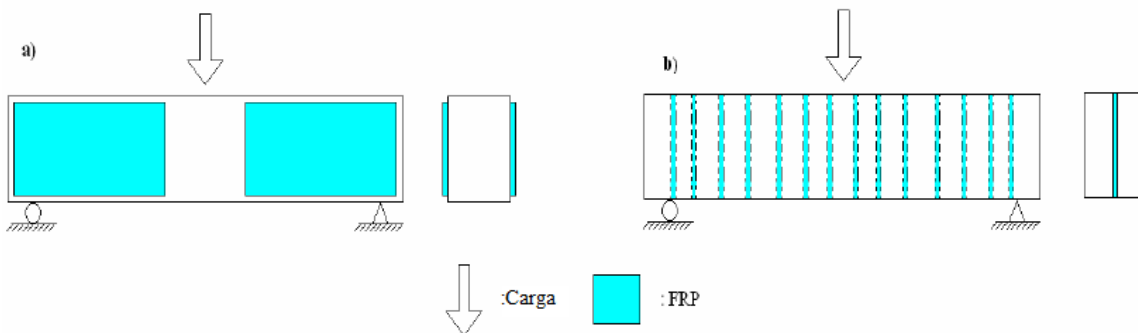


Figura 2.32 – Tipos de reforço ao corte (adaptado de [1]).

- Flexão e corte

Na Figura 2.33 observam-se soluções de reforço para esforços de flexão e corte juntos. Na Figura 2.33 a) e e) o reforço é feito na fase de produção da madeira junto com NSM, enquanto nas restantes situações o reforço é realizado utilizando a técnica EBR. Na Figura 2.33 f) uma parte da viga é reforçada pela técnica EBR e outra pela técnica NSM.

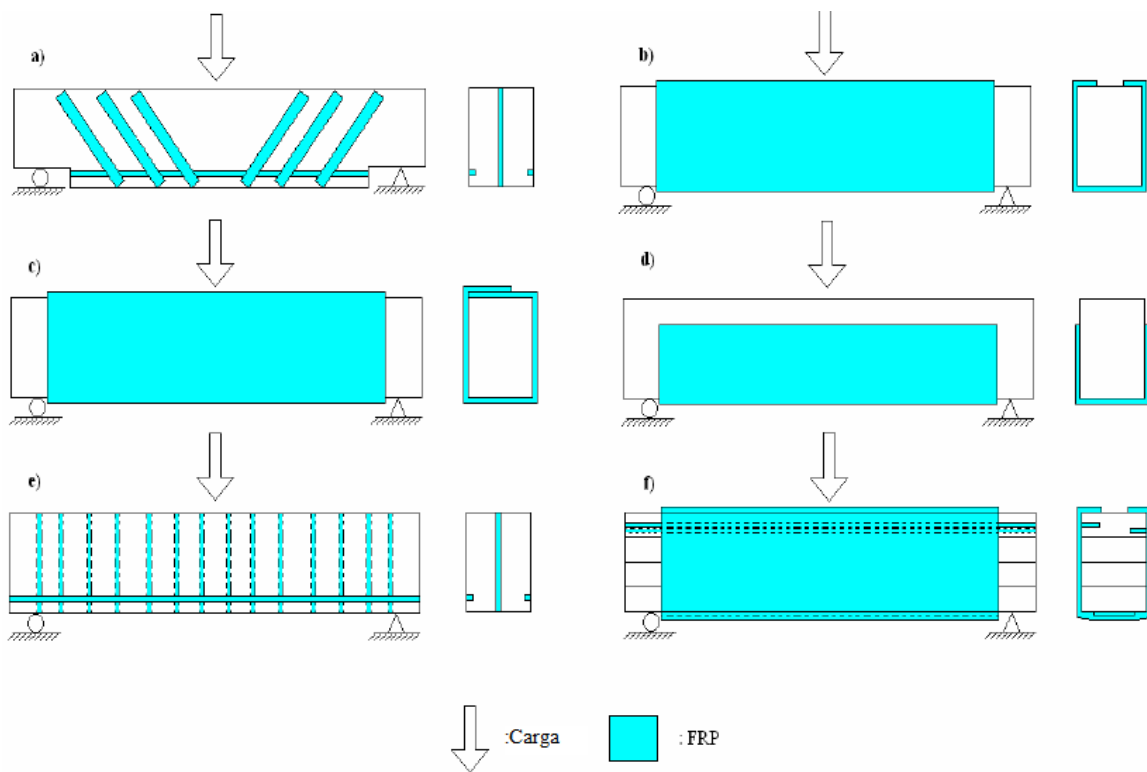


Figura 2.33 – Tipos de reforço à flexão e corte (adaptado de [1]).

A técnica em desenvolvimento no DEC FCT UNL também permite o reforço à flexão e ao corte, como se pode ver pela Figura 2.34.

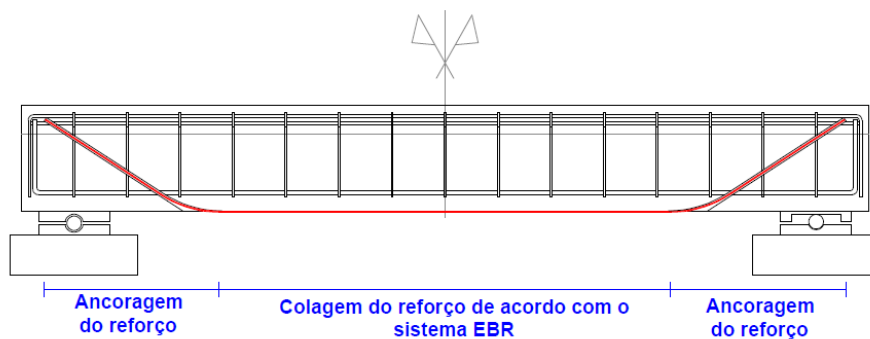


Figura 2.34 – Reforço pela técnica em desenvolvimento no DEC da FCT em viga de betão [53].

- Investigação sobre reforço de vigas de madeira com compósitos de FRP

Dias *et al.* [27] reforçou vigas de MLC à flexão através de mantas (tecidos) e laminados, conforme se resume na Tabela 2.6. Os resultados dos ensaios realizados por Dias *et al.* [27] são apresentados na Tabela 2.7. Dias *et al.*[27] realizou ensaios em vigas de madeira lamelada-colada da espécie Abeto com secção de 9,0x22,0 cm² e comprimento de 364 cm.

Tabela 2.6 – Dados gerais dos ensaios realizados por Dias *et al.* [27].

Vigas		Descrição
Referência	VR	Viga de madeira lamelada-colada de referência (sem reforço)
Reforço externo	VEM1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas externamente com duas camadas de manta de CFRP do tipo MBrace Manta C1-30 com 0.167 mm de espessura e 70 mm de largura.
	VEM2	
	VEM3	
Manta Reforço interno sem cavidade	VIM1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente (colagem na face inferior da penúltima lamela) com duas camadas de manta de CFRP do tipo MBrace Manta C1-30 com 0.167 mm de espessura e 70 mm de largura.
	VIM2	
	VIM3	
Reforço interno com cavidade	VICM1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente numa cavidade, previamente executada na face inferior da penúltima lamela, com duas camadas de manta de CFRP do tipo MBrace Manta C1-30 com 0.167 mm de espessura e 70 mm de largura.
	VICM2	
	VICM3	
Reforço externo	VEL1	Duas vigas de madeira lamelada-colada reforçadas externamente com uma tira de laminado de CFRP do tipo MBrace Laminado HM com 1.4 mm de espessura e 20 mm de largura.
	VEL2	
Laminado Reforço interno sem cavidade	VIL1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente (colagem na face inferior da penúltima lamela) com uma tira de laminado de CFRP do tipo MBrace Laminado HM com 1.4 mm de espessura e 20 mm de largura.
	VIL2	
	VIL3	
Reforço interno com cavidade	VICL1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente numa cavidade, previamente executada na face inferior da penúltima lamela, com uma tira de laminado de CFRP do tipo MBrace Laminado HM com 1.4 mm de espessura e 20 mm de largura.
	VICL2	
	VICL3	



Com os resultados obtidos da Tabela 2.7, Dias *et al.* [27] concluiu que que o reforço com mantas de CFRP proporcionou aumentos de módulo de elasticidade entre 16 a 25 %, enquanto com laminados foram aumentos entre 7 e 23 % em relação à viga de referência. Em termos de carga máxima, observou que o reforço externo no geral proporcionou aumentos semelhantes e superiores a 50 % em relação à viga de referência e o reforço interno proporcionou aumentos entre os 30 e os 40 %.

Tabela 2.7 – Resultados dos ensaios de Dias *et al.* [27].

Vigas		$E_{0,mean}$ (GPa)	$E_{0,mean}/E_{0,mean, VR}$	F_{max} (kN)	$F_{max}/F_{max, VR}$	d_{max} (mm)	$d_{max}/d_{max, VR}$		
Manta	Referência	VR	11,9	1,00	47,8	1,00	36,0	1,00	
	Reforço externo	VEM1	14,9	1,25	60,1	1,52	42,2	1,57	
		VEM2	14,9		81,7		68,6		
		VEM3	14,7		76,7		58,5		
	Reforço interno sem cavidade	VIM1	14,9	1,16	68,0	1,30	47,9	1,33	
		VIM2	12,6		67,5		58,6		
		VIM3	13,8		50,3		37,6		
	Reforço interno com cavidade	VICM1	15,0	1,20	65,7	1,41	46,5	1,80	
		VICM2	16,3		61,3		82,3		
		VICM3	11,7		74,5		66,1		
	Laminado	Reforço externo	VEL1	12,9	1,07	77,6	1,54	83,7	1,99
			VEL2	12,6		69,3		59,6	
Reforço interno sem cavidade		VIL1	16,9	1,23	54,8	1,17	41,3	1,29	
		VIL2	13,4		54,8		54,9		
		VIL3	13,7		57,9		43,1		
Reforço interno com cavidade		VICL1	15,9	1,21	66,4	1,35	49,5	1,53	
		VICL2	13,2		53,0		43,0		
		VICL3	14,2		74,7		72,6		

Johnsson *et al.* [42] também estudou vigas de madeira lamelada colada à flexão, mas com sistemas NSM. Os ensaios realizados encontram-se descritos na Tabela 2.8 e os resultados na Tabela 2.9.

Tabela 2.8 – Resultados realizados por Johnsson *et al.* (adaptado de [42]).

Série	Nome	Reforço	Sessão Transversal
Série 1	Referência 1	Nenhum	
	Referência 2		
	Referência 3		
Série 2	Viga 1:1	1 NSMR	
	Viga 2:1		
	Viga 3:1		
Série 3	Viga 1:2	2 NSMR	
	Viga 2:2		
	Viga 3:2		
Série 4	NSMR Reduzido	1 NSMR Reduzido	

Johnsson *et al.* [42] obteve valores de carga máxima superiores às vigas de referência de entre os 33 e os 63 %, sendo superiores para a série 4 onde obteve valores de 63 % superiores aos de referência.

Tabela 2.9 – Resultados apresentados por Johnsson *et al.* (adaptado de [42]).

Nome	Reforço	Carga última, P_u [kN]
Referência 1	Nenhum	60,23
Referência 2	Nenhum	54,55
Referência 3	Nenhum	46,85
Viga 1:1	1 barra CFRP NSMR	86,03
Viga 2:1	1 barra CFRP NSMR	87,60
Viga 3:1	1 barra CFRP NSMR	66,79
NSMR Reduzido	1 barra CFRP NSMR	71,77
Viga 1:2	2 barras CFRP NSMR	81,31
Viga 2:2	2 barras CFRP NSMR	99,66
Viga 3:2	2 barras CFRP NSMR	82,50

Borri *et al.* [17] reforçou vigas de madeira maciça através de várias técnicas, como se pode ver na Figura 2.35, tendo realizado ensaios em vigas não reforçadas e reforçadas com laminados e com barras. Para os laminados utilizou 2 laminados centrados de 3400 x 100 mm², no que aparece na Tabela 2.10 como reforço Tipo 1, 3 laminados centrados com as mesmas dimensões no Tipo 2 e dois pares de 2 laminados na zona lateral com as mesmas dimensões no Tipo 3. Na Tabela 2.10 apresentam-se os resultados obtidos.

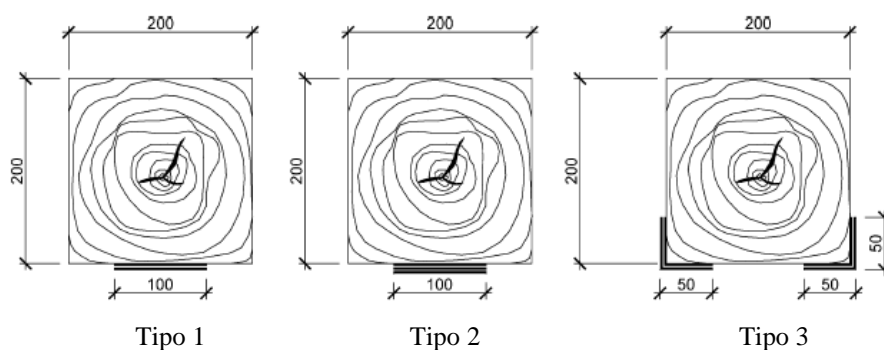


Figura 2.35 – Reforços utilizados por Borri *et al.* (adaptado de [17]).

Nos resultados obtidos por Borri *et al.* [17], este obteve valores superiores à viga de referência entre os 42 e os 55 %, e incrementos de rigidez superiores à viga de referência entre os 22,5 e os 30,3 %.

Tabela 2.10 – Resultados dos ensaios de Borri *et al.* (adaptado de [17]).

Tipo de reforço	nº de vigas	Carga máxima (kN)	Incremento na carga máxima (%)	incremento rigidez (%)
Tipo 1	3	102,96	42,3	22,5
Tipo 2	2	115,96	60,3	29,2
Tipo 3	2	112,16	55,0	30,3

2.4. Ligação Compósito de FRP - Madeira

O uso de compósitos de FRP no reforço de peças estruturais de madeira trás grandes vantagens pela compatibilidade e complementaridade entre ambos os materiais.

Como exemplo note-se que um dos principais defeitos da madeira maciça é não ser homogênea devido à presença de vários defeitos, o que pode em parte ser suprimido com recurso a uma ação simultânea com o compósito de FRP. Uma das grandes vantagens entre ambos os materiais é o baixo peso, pelo que o uso dos compósitos de FRP não afeta esta característica da madeira [48].

Os compósitos de FRP para reforço de elementos de madeira apresentam outras vantagens [9,25,67]:

- Reabilitam danificações e deteriorações estruturais;
- Aumentam a durabilidade da estrutura;
- Aumentam a resistência à flexão;
- Aumentam a rigidez;
- Permitem o uso de peças estruturais menores (em novas estruturas).

O uso de compósitos de FRP para reforço de elementos estruturais de madeira é aconselhado para vigas sujeitas a flexão (vigas de pórticos, suporte de soalho ou em treliças) ou elementos sujeitos a ações no plano, como o soalho, contribuindo para a transmissão de cargas às vigas, ou mesmo em juntas entre elementos, como nas treliças.

No entanto, este reforço é desaconselhado em elementos sujeitos a esforços de compressão, como é o caso dos pilares muito devido ao facto de o pilar ter de ser confinado na sua totalidade o que se torna contraproducente devido à expansão e contração da madeira (quando sujeita a variação de temperatura)[6].

Dependendo de a estrutura ser nova ou não, existem várias etapas, desde o projeto até à elaboração do reforço, sendo uma das principais a fase onde se escolhe o tipo e a geometria do reforço, assim como o tipo de ligação.

Para que a ligação tenha um bom desempenho é importante compatibilizar os 3 materiais utilizados, assim como efetivar [6]:

- A limitação das tensões em condições de serviço. Durante a fase de projeto é importante que se faça uma correta avaliação de todas as condições;
- A escolha do material de reforço. Existem variadas fibras e variadas resinas, pelo que a escolha tem de ser cuidadosa;

- O correto projeto de ligação entre os materiais. É o ponto mais importante de todo o reforço, uma vez que uma ligação errada faz com que os materiais não atuem em conjunto;
- A proteção do sistema de reforço. Existem variadas técnicas de reforço e sistemas de maneira a que o reforço não sofra choques;
- A execução correta do reforço, recorrendo a técnicos adequados para o efeito;
- O planeamento a longo prazo. O reforço não poderá ser sujeito a temperaturas elevadas.

Entre os materiais tem de se ter em conta:

- A espécie de madeira, os defeitos e as cargas a que o elemento estrutural fica sujeito;
- A direção das fibras de reforço;
- O bom comportamento do adesivo face às variações dimensionais da madeira, uma vez que é utilizado a longo prazo.

2.4.1. Preparação da superfície da madeira

A preparação da superfície é um aspeto bastante importante no reforço com laminados de CFRP, uma vez que se não houver uma aderência eficiente entre o substrato a reforçar e a resina epoxídica, a ligação madeira-CFRP pode não ser totalmente eficaz.

Ao contrário de outros materiais (como o betão) que precisam de uma preparação complexa de superfície, a madeira precisa apenas de uma preparação da superfície bastante simples. É importante que a superfície da madeira esteja livre de pó ou qualquer outra sujidade, podendo-se optar pela utilização de uma lixa elétrica (ou manual) de modo a criar alguma rugosidade para melhorar a aderência.

Para ensaios de aderência de provetes de madeira com FRP e de vigas à flexão à escala real também reforçadas com FRP, Balseiro [5] optou por não fazer nenhum tratamento especial, passando apenas um pano para limpeza da sujidade e poeiras.

Para o mesmo tipo de ensaios, Johnsson *et al.* optou por lixar a superfície da madeira para criar alguma rugosidade e posteriormente passar com uma pistola de ar comprimido para remover as poeiras [42]. Outros autores, como Dias *et al.* [27] e Cruz *et al.* [24] optaram por passar uma escova de aço de forma a tornar a superfície rugosa.

2.4.2. Comprimento colado de FRP

Quando se aumenta o comprimento colado do reforço até um certo valor, a força de rotura para o descolamento também aumenta. A partir de um certo valor do comprimento de colagem, a força de rotura fica constante. A esse valor chama-se de comprimento efetivo de ligação.

No betão existe um modelo teórico proposto para o cálculo deste comprimento, sugerido no *Bulletin 14* da *Fib* [35]. No caso das estruturas de madeira, Juvandes e Barbosa [43] criaram um modelo adaptado a este material mas, baseado no modelo do betão. De acordo com este modelo a força máxima de ancoragem de ligação (F_{tmax}^R) é dada pela seguinte expressão:

$$F_{max} = c_1 k_c k_b b_f \sqrt{E_f t_f f_{wtm,p}} K_{\mu} \quad (2.2)$$

A expressão (2.2) permite obter a força máxima de ancoragem da ligação para comprimentos de colagem superiores ao comprimento efetivo em que b_f , t_f e E_f representam a largura, espessura e módulo de elasticidade do FRP, respetivamente; $f_{wtm,p}$ é a resistência de aderência ao arrancamento da madeira retirado do ensaio *Pull-Off*; c_1 é obtido através de ensaios experimentais, sendo possível encontrar alguns valores típicos na Tabela 2.11; k_c é um fator que representa o efeito da preparação da superfície e varia de 0,67 a 1,00, sendo que 1,00 é atribuído a superfícies melhores e mais compactas e k_b é um fator que representa a geometria da zona de ancoragem dado pela expressão (2.3):

$$k_b = 1.06 \sqrt{\frac{2 - (b_f/b)}{1 + (b_f/400)}} \geq 1.0 \quad (2.3)$$

Onde b é a largura transversal da madeira na zona da colagem (medida na secção transversal).

Tabela 2.11 – Valores de c_1 e c_2 propostos por Juvandes e Barbosa [43].

Variável	Técnica	Intervalo admissível	Valor recomendado
c_1	EBR	0,6 – 0,8	0,7
	HNSM	0,95 – 1,15	1,05
	VNSM	0,8 – 1,1	0,9
c_2	EBR	6 - 12	10
	HNSM	5 - 10	7
	VNSM	7 - 11	10

Para o cálculo do comprimento efetivo de ligação ($L_{t,ef}$) Juvandes e Barbosa [43] propuseram a seguinte expressão:

$$L_{t,ef} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{wtm,p}}} \quad (2.4)$$

Onde c_2 é um fator obtido por resultados experimentais e apresentado na Tabela 2.11.

Quando o comprimento colado é inferior ao efetivo, calcula-se a força máxima obtida (F_t^R) pela expressão (2.5):

$$F_t^R = F_{tmax}^R \frac{L_t}{L_{t,ef}} \left(2 - \frac{L_t}{L_{t,ef}} \right) \quad (2.5)$$

Onde L_t é o comprimento de colagem.

Juvandes e Barbosa [43] estudaram a ligação entre a madeira lamelada-colada e o CFRP, analisando as técnicas EBR e NSM (vertical e horizontal) e comparando os resultados entre elas. A influência do comprimento colado também foi motivo de estudo. Foram realizados ensaios de flexão de 4 pontos em 36 amostras, com comprimentos colados de 20, 40 e 60 mm.

Na Tabela 2.12 podem-se observar os valores teóricos e experimentais da força de rotura e comprimento efetivo de ligação. A extensão máxima atingida no laminado foi de 0,87 %, 0,93 % e 0,98 % para EBR, HNSM e VNSM, respetivamente, o que parece indicar que a técnica VNSM tem o melhor desempenho. O comprimento efetivo de ligação variou entre 35 mm (EBR) e 60 mm (HNSM), o que não é consistente com as conclusões obtidas por Biscaia *et al.* [15] que chegaram à conclusão que a técnica NSM tem um menor comprimento efetivo de ligação.

Tabela 2.12 – Valores dos ensaios de Juvandes e Barbosa [43].

Método	Grandeza	EBR	HNSM	VNSM
Teórico	$F_{t,max}^R$ [N]	13800	18296	15659
	$l_{t,ef}$ [mm]	35	59	49
Experimental	$F_{t,max}^R$ [N]	14990	18390	17160
	$l_{t,ef}$ [mm]	40	40 a 60	40 a 60

Johnsson *et al.* [42] desenvolveu ensaios em testes de flexão de 4 pontos de modo a analisar o efeito do comprimento de colagem. Foram realizados ensaios em 10 vigas de *Picea abies* (abeto-falso) com secção transversal de 90x225 mm² e comprimento de 3500 mm. O comprimento de colagem variou entre 100 e 250 mm (com laminados de 10x10 mm² e extensão de rotura máxima de 1,5 %). Johnsson *et al.* [42] concluiu que o comportamento em flexão das vigas de madeira pode ser modelado utilizando uma analogia com o modelo utilizado para vigas de betão armado. O comprimento de ancoragem foi baseado no pressuposto de que a carga transmitida para o CFRP e o comprimento ligado são proporcionais, tendo obtido um comprimento efectivo de ligação de 350 mm.

Estas duas abordagens obtiveram resultados consideravelmente diferentes, com Johnsson *et al.* a obter um valor de 350 mm [42] e Juvandes e Barbosa um valor compreendido entre 35 e 60 mm para o comprimento efetivo de colagem [43].

2.4.3. Lei Bond – Slip

O reforço de estruturas com compósitos de FRP tem sido amplamente utilizado nas últimas décadas, mas apesar das várias vantagens que o uso externo destes materiais têm, também têm desvantagens importantes. Uma delas é o descolamento precoce. Para este tipo de reforço funcionar, o desempenho da ligação entre o FRP e o substrato é crucial, o que mostra a importância do estudo da transferência de tensões entre eles.

Para simular o comportamento real da interface entre o compósito e o substrato a reforçar podem utilizar-se leis de *bond-slip*, que representam o comportamento da ligação em termos de tensões de aderência vs. deslizamento entre o FRP e o substrato [16].

Na literatura para betão armado existem diversas leis de *bond-slip*, uma vez que com o betão este tipo de problema é bastante estudado no reforço de estruturas de betão armado. Na madeira ainda se está numa fase inicial. Como se pode ver na Figura 2.36 são vários os modelos estudados no betão: modelos lineares (a;b;c), modelos bi-lineares (d), modelos não lineares (e) e modelos lineares e não lineares juntos (f). Para a madeira, na literatura foi encontrado um modelo não linear (Figura 2.37.a) e um modelo tri-linear (Figura 2.37.b).

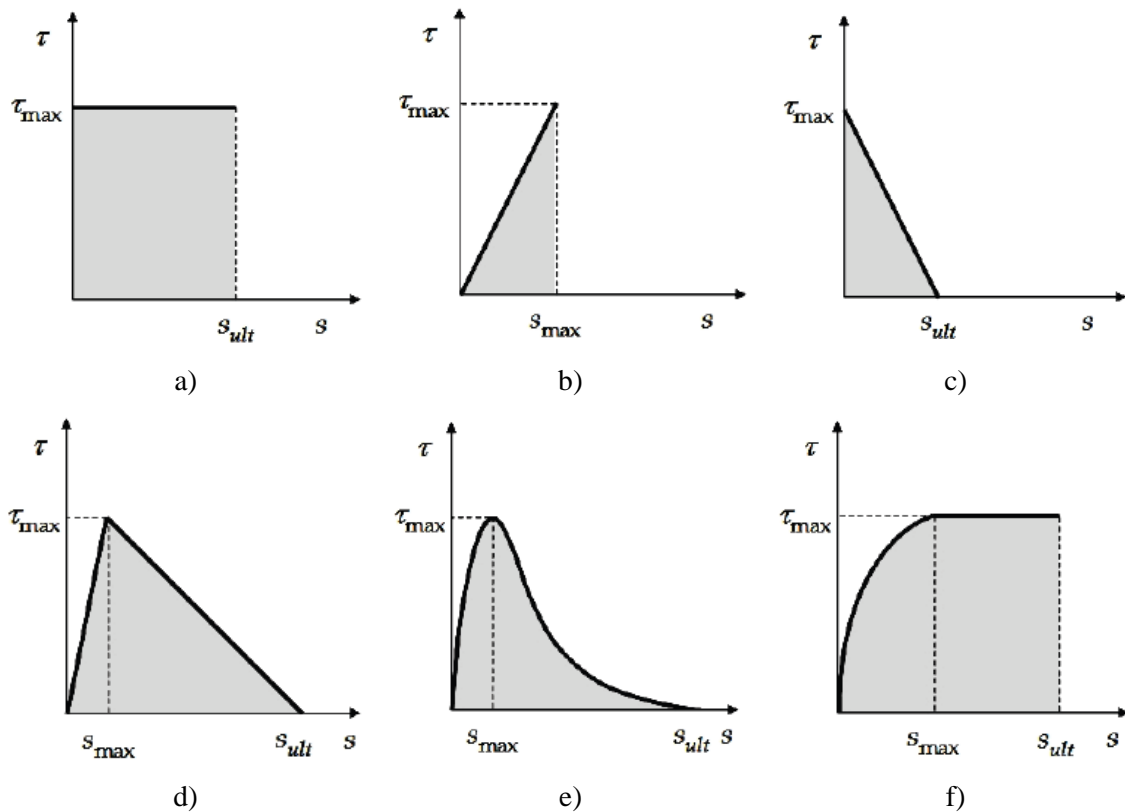


Figura 2.36 – Modelos *bond-slip* da literatura [12].

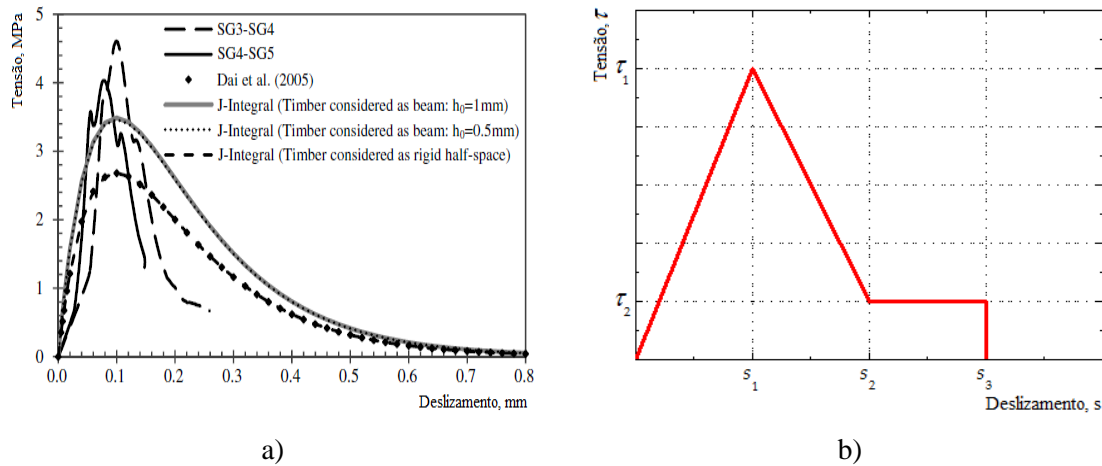


Figura 2.37 – Modelos *bond-slip* madeira: a) Modelo não linear [68]; b) Modelo tri-linear [11].

2.4.4. Tipos de Ensaios

Para o estudo da ligação entre a madeira e o FRP tal como para o estudo da resistência à flexão, têm sido realizados variados ensaios. Os ensaios são fundamentais, uma vez que permitem obter vários parâmetros para definir o desempenho do reforço.

2.4.4.1 Ensaios de arrancamento

Os ensaios mais comuns são os ensaios *Pull-Off*, ensaios de corte simples ou duplo e ensaios de arrancamento. São facilmente executados, uns em laboratório, outros em obra.

Alguns dos parâmetros medidos são a força e extensão imposta ao sistema, assim como o deslizamento do compósito relativamente à superfície colada, entre outros.

- Ensaios *Pull-Off*

Este tipo de ensaio permite estudar a ligação da interface entre o compósito e a madeira através do modo I de fratura.

Na Figura 2.38 estão esquematizados os vários tipos de ensaio *Pull-Off*, que de forma geral consistem na colagem de uma pastilha metálica ao FRP (que está colado à madeira), procedendo-se posteriormente ao seu arrancamento com um aparelho específico que aplica uma força na direção perpendicular à superfície colada. Esta máquina fornece a força de arrancamento (F), podendo-se calcular a tensão (σ) através da expressão (2.6).

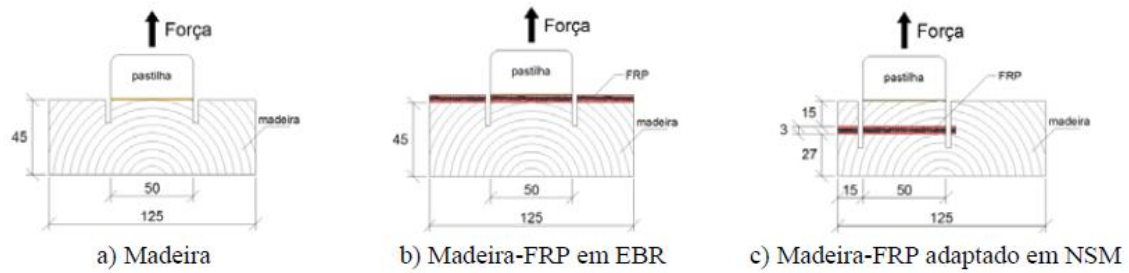


Figura 2.38 – Modelos de ensaio *Pull-Off* [43].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Onde A é a secção da pastilha metálica.

Juvandes e Barbosa [43] executaram este tipo de ensaios para vários tipos de ligação estudada (Figura 2.38) obtendo os resultados presentes na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Resultados dos ensaios *Pull-Off* de Juvandes e Barbosa [43].

Técnica	Ligação	$f_{wtm,p}$ (MPa)	
		Intervalo	Média
Sem reforço	Madeira	2,31 - 4,08	3,07
EBR	Madeira - FRP	1,05 - 3,50	2,41
	Betão - FRP	1,55 - 3,80	2,94
NSM	Madeira - FRP	1,00 - 1,66	1,27

As conclusões retiradas foram que os níveis de resistência da ligação madeira-FRP por EBR são próximos dos de betão-FRP por EBR. Para a técnica NSM concluiu-se que não é o tipo de ensaio correto devido às imperfeições na execução dos provetes. Quanto aos ensaios *Pull-Off* na madeira os autores concluíram que este é um material com características de coesão superficial bastante boas.

- Ensaios de corte simples ou duplo

Os ensaios de corte simples permitem conhecer o comprimento efetivo colado, solicitando o provete apenas a tensões de corte.

Como se observa na Figura 2.39, neste ensaio é imposta uma força de tração longitudinal ao compósito. É um ensaio fácil de executar, e bastante utilizado devido à fiabilidade de resultados.

O compósito pode também ser colado em duas faces, denominando-se de ensaio de corte duplo.

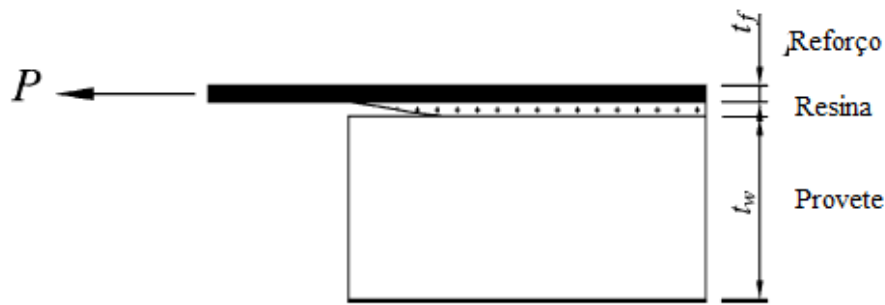


Figura 2.39 – Esquema de ensaio de corte simples (adaptado de [42]).

Wan e Smith [60] realizaram ensaios de corte simples em 52 amostras de madeira maciça reforçadas com compósitos de diferentes tipos e com vários comprimentos colados. Chegaram à conclusão que o comprimento efetivo é de 90 mm para o pinho e que a direção das fibras é importante.

- Ensaios de arrancamento

O ensaio de arrancamento diferencia-se do de corte simples na forma como a força é aplicada, que neste caso é na direção perpendicular ao plano de colagem. A Figura 2.40 mostra a configuração do ensaio.

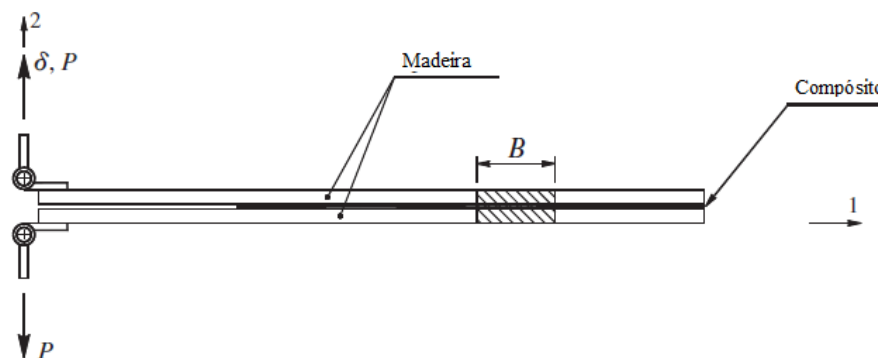


Figura 2.40 – Ensaio de arrancamento (adaptado de [28]).

Embora seja um ensaio de flexão, o propósito do ensaio é conhecer as capacidades da ligação madeira-FRP através de arrancamento. Na Figura 2.41 apresenta-se um ensaio de flexão de 4 pontos realizado por Juvandes e Barbosa [43].

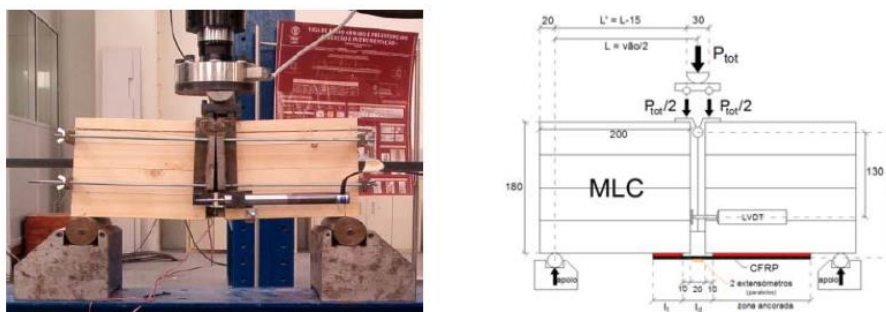


Figura 2.41 – Ensaio de aderência em flexão [43].

2.4.4.2 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão de 4 pontos, esquematizado na Figura 2.42, é o mais comum para caracterizar o comportamento da ligação madeira-FRP.

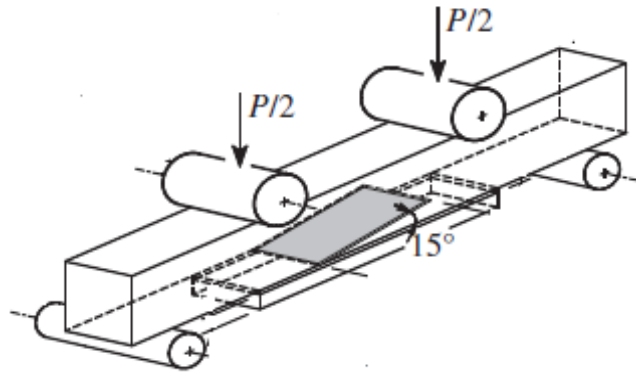


Figura 2.42 – Ensaio de flexão de 4 pontos (adaptado de [28]).

2.4.5. Modos de Rotura

Nas vigas de madeira reforçadas com compósitos de FRP existem essencialmente 5 modos de rotura[5]:

- Rotura pelo FRP (Figura 2.43a);
- Rotura por compressão da madeira (Figura 2.43b);
- Rotura por corte na madeira na zona de ancoragem do FRP (Figura 2.43c);
- Descolamento da fibra originado por fendas inclinadas na madeira, resultantes do esforço transversal (Figura 2.43d);
- Descolamento na interface madeira-FRP devido a fendas de flexão (Figura 2.43e) ou devido a colagem mal efetuada (Figura 2.43f).

A rotura do tipo (a) é a mais rara de acontecer, visto o FRP ter muito mais resistência que a madeira. As roturas (d) e (f) são roturas devido às características da madeira, enquanto as (b) e (c) são as mais comuns, sendo que a (c) pode ser evitada com a utilização da técnica em desenvolvimento no DEC da FCT já referida.

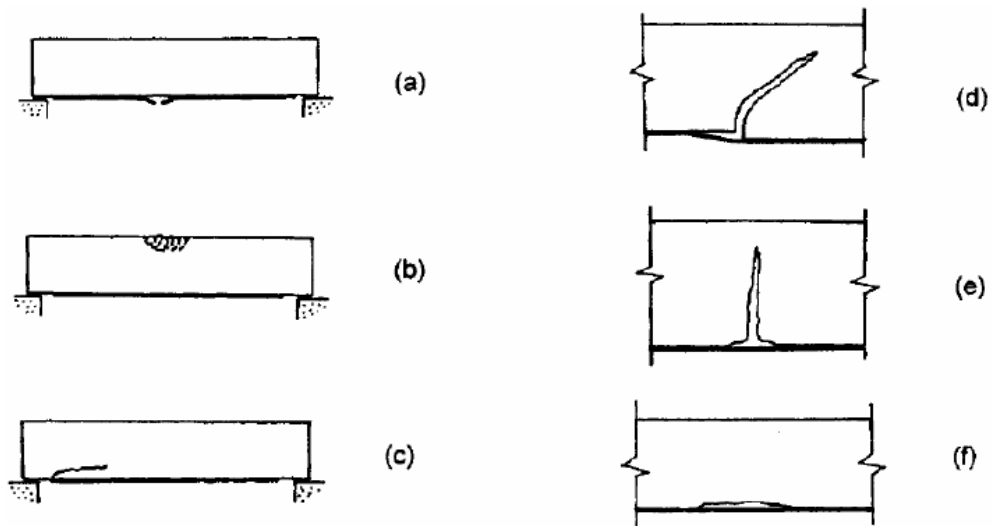


Figura 2.43 – Modos de rotura [5].

Para ensaios de arrancamento do tipo corte simples em madeira maciça antiga reforçada com CFRP, através de vários tipos de reforço, Benedetti e Colla [10] observaram 3 tipos de roturas:

- Rotura coesiva na madeira (Figura 2.44a);
- Rotura no adesivo (Figura 2.44b);
- Rotura mista entre a madeira e o adesivo (Figura 2.44c).



Figura 2.44 – Roturas dos ensaios de Benedetti e Colla [10].

Capítulo 3

Descrição do Programa Experimental e Caracterização dos Materiais

3.1. Descrição do Programa Experimental

Para a realização da presente dissertação foram realizados ensaios de corte simples em provetes de madeira reforçados com as técnicas EBR e NSM e ensaios de flexão a quatro pontos em pavimentos de madeira reforçados através das técnicas EBR e uma técnica em desenvolvimento no DEC da FCT.

Os ensaios de corte simples tiveram como objetivo estudar a aderência entre a madeira e os laminados de CFRP, fazendo-se variar o comprimento colado para se perceber a influência deste no comportamento da interface entre o laminado de CFRP e a madeira e para se encontrar o comprimento efetivo da ligação.

Foram realizados 17 ensaios de corte simples - 10 reforçados pela técnica EBR e 7 pela técnica NSM. Durante os ensaios foram feitas medições através de transdutores de deslocamento (LVDT) e extensómetros.

Um dos objetivos dos ensaios de flexão foi quantificar a melhoria de comportamento à flexão e ao corte proporcionada pelo reforço da madeira com compósitos de CFRP, utilizando-se as técnicas EBR e EBRA. Para tal utilizaram-se 3 conjuntos compostos por duas vigas unidas por soalho de madeira. Um dos conjuntos foi utilizado como referência, enquanto nos outros se utilizaram as técnicas de reforço EBR e uma técnica de reforço em desenvolvimento no DEC FCT, como o intuito de avaliar a eficácia associada a cada técnica. Os ensaios foram monitorizados com LVDT's e extensómetros.

Dentro dos capítulos específicos para cada ensaio será apresentado um programa experimental mais detalhado referente ao próprio capítulo.

3.2. Caracterização dos Materiais

Em seguida, apresenta-se e caracteriza-se os materiais utilizados na presente dissertação (a madeira, os laminados de CFRP e 2 tipos de resinas utilizados quer nos ensaios de corte simples, quer nos ensaios de flexão).

3.2.1. Madeira

A madeira utilizada no presente trabalho proveio de um edifício do século XIX localizado na vila de Sesimbra (Figura 3.1). O edifício em causa situa-se na rua Dr. Aníbal Esmeriz e serviu durante muitos anos como sede das finanças de Sesimbra no R/C, e habitação nos 2 pisos superiores, tendo sido reabilitado para funcionamento da Sede dos Museus Municipais de Sesimbra. O edifício esteve desabitado durante cerca de 20 anos, tendo sido reabilitado em 2013, período em que se substituíram as madeiras existentes, as quais permitiram a realização dos ensaios que estão na base da presente dissertação.

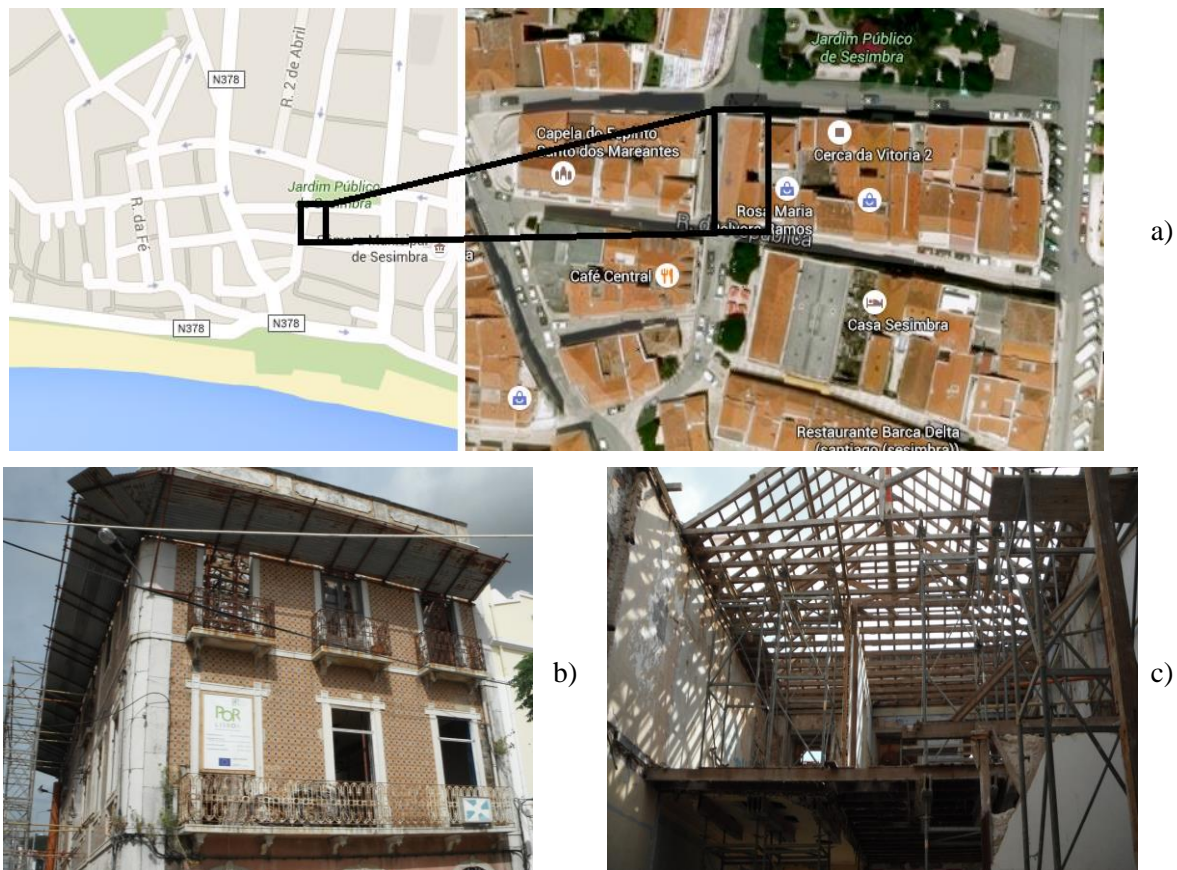


Figura 3.1 – Edifício na Vila de Sesimbra onde foram retiradas as vigas: a) Localização do edifício (Fonte: Google Maps); b) Vista Exterior do edifício; c) Viste interior do edifício.

Efetuaram-se três tipos de ensaios num total de 46 provetes de modo a caracterizar a madeira utilizada. Dividiram-se os provetes em dois conjuntos; o primeiro composto por 18 provetes e o segundo por 16. O primeiro conjunto de 18 provetes (dimensões: 20x20x340 mm) foi submetido a ensaios de flexão a 3

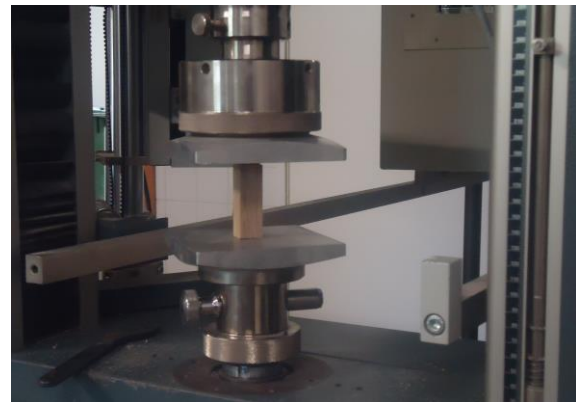
pontos, de acordo com a Norma NP 619 [59], o segundo conjunto de 16 provetes (dimensões: 20x20x60 mm) foi submetido a ensaios de compressão uniaxial de acordo com a Norma NP 618 [58] e o terceiro conjunto, composto por 12 provetes, foi submetido a ensaios *Pull-off*.

Tanto para os ensaios de flexão, como para os de corte teve-se o cuidado de cortar os provetes de modo a que as fibras da madeira estivessem paralelas à maior direção dos provetes. Nos ensaios de flexão aplicou-se a força perpendicularmente ao veio da madeira (Figura 3.2a), enquanto nos ensaios de compressão os provetes foram testados com a carga aplicada paralelamente ao veio da madeira (Figura 3.2b).

Para os ensaios de *Pull-off* (Figura 3.2c e d) utilizaram-se 6 provetes cortados na direção paralela às fibras da madeira e 6 na direção perpendicular, tal como definido na Norma Europeia EN 1542 [29].



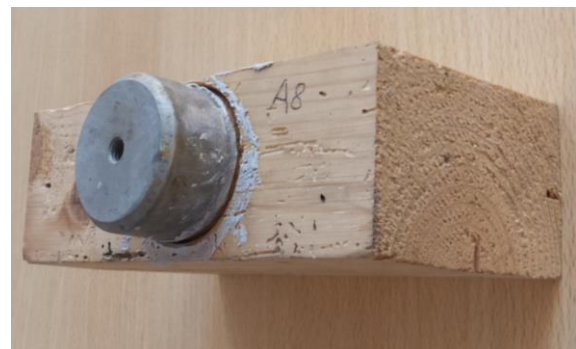
a)



b)



c)



d)

Figura 3.2 – Ensaios de caracterização: a) ensaio à flexão; b) ensaio à compressão; c) e d) ensaio *pull-off*.

Para os ensaios de flexão e compressão utilizou-se uma máquina universal Zwick com 50 kN de capacidade, enquanto para os ensaios de *Pull-off* se utilizou equipamento da Figura 3.2c.

3.2.1.1 Flexão Estática

Tal como referido anteriormente, os ensaios de flexão estática seguiram a norma NP 619 [59], que define algumas exigências, tais como a necessidade de ausência de nós nos provetes a ensaiar. Exige-se ainda que o provete fique centrado e que o cutelo desça exatamente ao centro da peça a uma velocidade constante, de modo a que a rotura seja atingida ao fim de cerca de 3 minutos.

Com os valores de carga (N) e deslocamento (mm) a meio vão foi possível calcular as tensões (MPa) e extensões (%) existentes através das expressões:

$$\sigma [MPa] = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon [\%] = \frac{6 \times \delta \times h}{L^2} \times 100 \quad (3.2)$$

Em que σ representa a tensão em MPa, ε a extensão em %, F é a força aplicada em N , L é o comprimento do provete entre apoios em milímetros, b e h são a base e a altura do provete em milímetros e δ é o deslocamento a meio vão em milímetros. De seguida obteve-se o gráfico de tensão-extensão presente na Figura 3.3, onde a linha a preto representa uma curva média de todos os ensaios realizados, e as linhas a cinzento representam os máximos e mínimos valores obtidos.

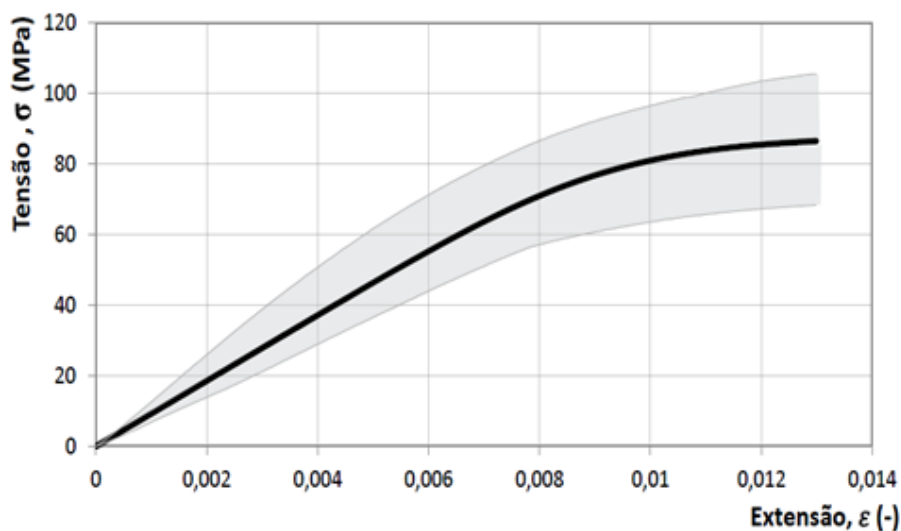


Figura 3.3 – Gráfico Tensão vs. Extensão à flexão.

A partir da fase elástica do gráfico da Figura 3.3 é possível definir o módulo de elasticidade (E) com recurso à expressão:

$$E [MPa] = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.3)$$

Através das expressões 3.1 a 3.3 obteve-se a tensão de rotura média (σ_{rup}) de 88,35 MPa, a extensão de rotura média (ε_{rup}) de 0,95 %. Para o módulo de elasticidade (E), obteve-se um valor médio de 9300 MPa.

3.2.1.2 Compressão Axial

Os ensaios de compressão axial seguiram a norma NP 618 [58]. Foi definida uma velocidade de ensaio constante de modo a obter a rotura perto dos 3 minutos.

O procedimento de ensaio foi semelhante ao descrito para a flexão estática, contudo as expressões de análise foram diferentes:

$$\sigma [MPa] = \frac{F}{b \times h} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon [\%] = \frac{\delta}{L} \times 100 \quad (3.5)$$

Os resultados encontram-se na Figura 3.4, com o valor médio definido pela linha a preto e o máximo e mínimo definidos pelas linhas a cinzento. Obtiveram-se valores médios de tensão de rotura (σ_{rup}) e extensão de rotura (ε_{rup}) de 39,43 MPa e 1,43 %, respetivamente. Para o módulo de elasticidade (E) obteve-se um valor médio de 2760 MPa.

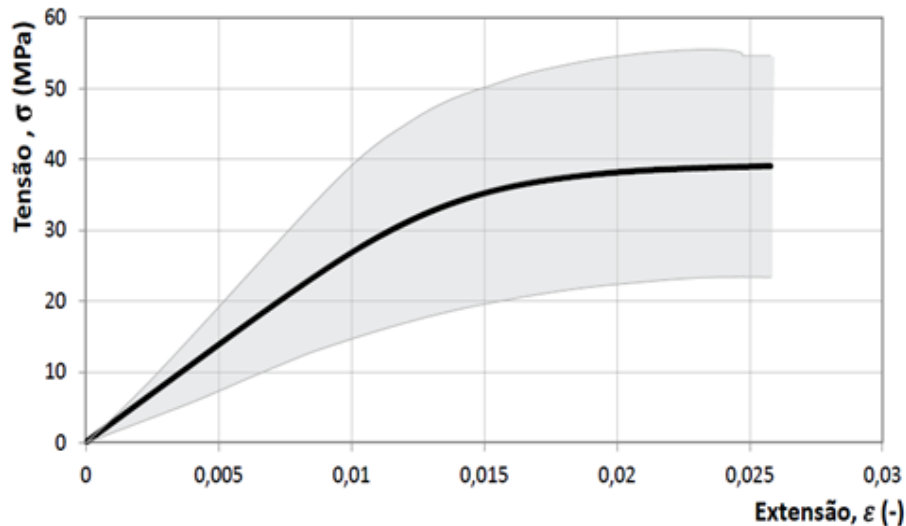


Figura 3.4 - Gráfico Tensão vs. Extensão à compressão.

3.2.1.3 Pull-Off

Nos ensaios de *pull-off* seguiu-se o procedimento descrito na Norma Europeia EN 1542 [29], efetuando-se um rasgo com o diâmetro da pastilha metálica (Figura 3.2d) com profundidade entre 1,5 a 2,0 cm (optou-se por fazer de 2,0 cm em todos os rasgos), colar uma pastilha metálica com a resina (com a espessura igual à de todos os ensaios realizados na dissertação) e após a cura arrancar com um aparelho específico para o efeito (Figura 3.2c). A força deve ser aplicada gradualmente e com os apoios da máquina todos assentes no bloco.

Este ensaio permite tirar conclusões acerca das características da ligação entre as interfaces adesivas (neste caso a madeira com a resina S&P 220).

Podem existir 4 tipos de rotura neste tipo de ensaio, sendo elas [13]:

- 1- Ruptura coesiva pela madeira;
- 2- Ruptura pela interface entre o adesivo e a madeira;
- 3- Ruptura pela interface entre o adesivo e o compósito;
- 4- Ruptura coesiva pelo compósito.

Obteve-se o mesmo modo de rotura para todos os provetes analisados, verificando-se sempre uma rotura coesiva pela madeira (modo 1), como se pode observar na Figura 3.3. Na Tabela 3.1 apresentam-se as tensões de rotura obtidas. Tendo-se obtido um valor médio e o coeficiente de variação de 2,65 MPa e 0,14, respetivamente, para a *pull-off* feito paralelamente às fibras, e 3,51 MPa e 0,05 para a *pull-off* feito perpendicularmente às fibras.

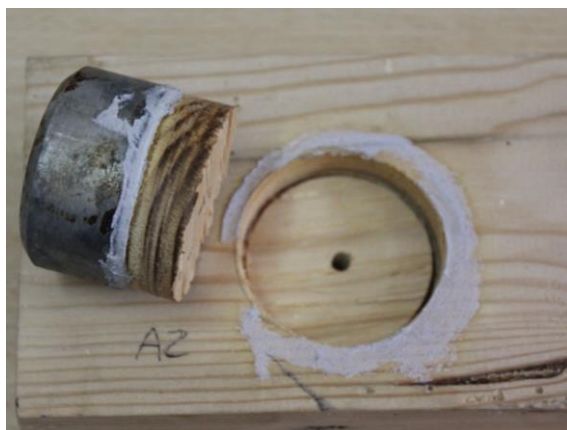


Figura 3.5 – Provete após ensaio com modo de rotura 1.

Tabela 3.1 – Valores de tensão dos ensaios *pull-off*.

Numeração	σ_t (MPa)	Numeração	$\sigma_{//}$ (MPa)
A1	3,32	A7	3,05
A2	3,84	A8	2,10
A3	3,41	A9	2,73
A4	3,41	A10	2,67
A5	3,48	A11	2,34
A6	3,59	A12	3,00

3.2.1.4 Análise dos dados/Definição do tipo de madeira

Através dos dados obtidos, foi possível determinar o tipo da madeira utilizada. Através da análise das fichas M1 [47] e M4 [48] do laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), atribuiu-se a classificação de Casquinha Redwood à madeira utilizada. Chegou-se a este tipo de madeira comparando os valores obtidos nos ensaios de flexão estática (σ_{rup} de 88,35 MPa e E de 9300 MPa) e os obtidos nos ensaios de compressão (σ_{rup} de 39,43 MPa), com os da Tabela 3.2. Para obter a classificação internacional da Casquinha Redwood, o LNEC criou a Tabela 3.3, onde observamos que a Casquinha Redwood será da classe de resistência C24 ou C16, onde a sigla SS (*special constructing sort*) corresponde a madeira especial para construção e GS (*general constructing sort*) a madeira comum para construção. Daí se conclui que neste caso a madeira é GS e logo da classe de resistência C16.

Na Tabela 3.4, apresenta-se o quadro da norma EN 338 [30], onde se descrevem as propriedades da madeira à escala real, com defeitos, conforme a classe de resistência.

Tabela 3.2 – Valores médios para propriedades da madeira das fichas LNEC M1 a M9.

Valores médios (para H=12%) provetes pequenos e sem defeitos		Pinho bravo	Câmbala Milícia régia	Câmbala Milícia excelsa	Casquinha Redwood	Casquinha Scotspine	Criptoméria	Eucalipto comum	Tola branca	Undianuno
		R	F	F	R	R	R	F	F	F
Propriedades Físicas										
Massa volúmica (Kg/m ³)		530-600	580	620	400	530	280	750-850	480	520-720
Coeficientes de retração unitária (%/%)	tangencial	0,36	0,26	0,24	0,19	0,33	0,21	0,36	0,25	0,23
	radial	0,21	0,15	0,17	0,11	0,17	0,04	0,21	0,11	0,13
	volúmica	0,60	0,41	0,41	0,29	0,53	0,26	0,60	0,35	0,36
Propriedades Mecânicas										
Flexão estática	T. rotura (MPa)		98,5	111	69	98	42	127,5	94	85
	M. Elasticidade (GPa)		-	11,27	9,25	11,76	3,7	17,5	8,11	9,8
Tração longitudinal: T. rotura (MPa)			-	78	-	102	-	-	-	60
Tração transversal: T. rotura (MPa)			2,1	2,5	1,7	2,9	1,4	3,4	1,7	2,0
Compressão longitudinal: T. rotura (MPa)			47,3	68	42	54	21	49,1	39	45
Corte: T. rotura (MPa)			9,02	10,8	1,5	9,8	4,6	13,7	7,9	7,8
Fendimento: F. unitária rotura (Kgf/cm)			15	-	-	-	20	15	9	-
Dureza (kN)			1,79	3,2	-	-	-	-	-	3,7

Tabela 3.3 – Ficha M1 [47] do LNEC, relação com a norma EN 338 [30].

Madeira	Classe de Qualidade (norma)	Classe de Resistência
Pinho bravo (<i>Pinus pinaster</i> Ait.)	E (NP 4305)	C18*
Casquinha (<i>Pinus silvestris</i> L.)	SS (BS 4978)	C24
	GS (BS 4978)	C16
	S13 (DIN 4074)	C30
Espruce (<i>Picea abies</i> Karst.)	S10 (DIN 4074)	C24
	S7 (DIN 4074)	C16
	HS (BS 5756)	D40
Câmbala (<i>Milicia excelsa</i> A. Chev. Ou <i>M. regia</i> A. Chev.)	HS (BS 5756)	D40

* Para a classe E do Pinho bravo, recomenda-se a adoção dos valores indicados na Ficha LNEC M2: "Pinho bravo para estruturas".

Tabela 3.4 – Quadro da norma EN 338 [30] para madeiras resinosas.

Classe:		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
Resistência característica (MPa)										
- flexão		14	16	18	22	24	27	30	35	40
- tração	//	8	10	11	13	14	16	18	21	24
	⊥	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- compressão	//	16	17	18	20	21	22	23	25	26
	⊥	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3
- corte		1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
E ₀ (GPa)	médio	7	8	9	10	11	12	12	13	14
	característico	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4
Massa volúmica	médio	350	370	380	410	420	450	460	480	500
	característico	290	310	320	340	350	370	380	400	420

3.2.2. Laminado de CFRP

Para os ensaios de corte simples e de flexão utilizou-se o laminado de fibras de carbono S&P 150/2000 [61] da empresa S&P (Figura 3.6), com 10 mm de largura e 1,4 mm de espessura. Uma das principais características deste material é o facto de só resistir a esforços unidireccionais.

Este tipo de laminados tem uma utilização predominante no reforço à flexão e apresenta as seguintes características:

- Elevado módulo de elasticidade;
- Alta resistência;
- Bom comportamento à fadiga;
- Não corrosível.

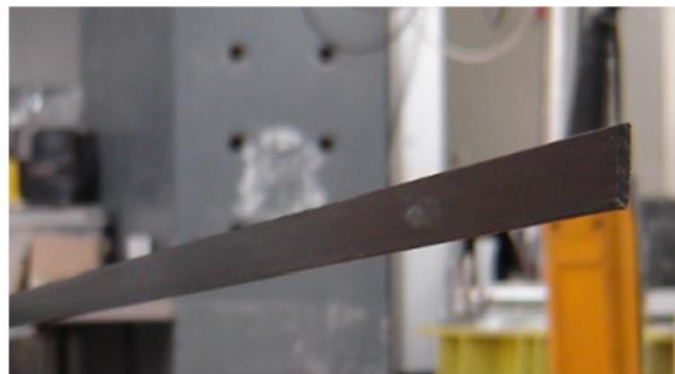


Figura 3.6 – Laminados de CFRP [53].

Para caracterizar o material, Carvalho [19] procedeu a ensaios de tração descritos nas normas ASTM D3039/D3039M [4], tendo obtido os diagramas apresentados na Figura 3.7.

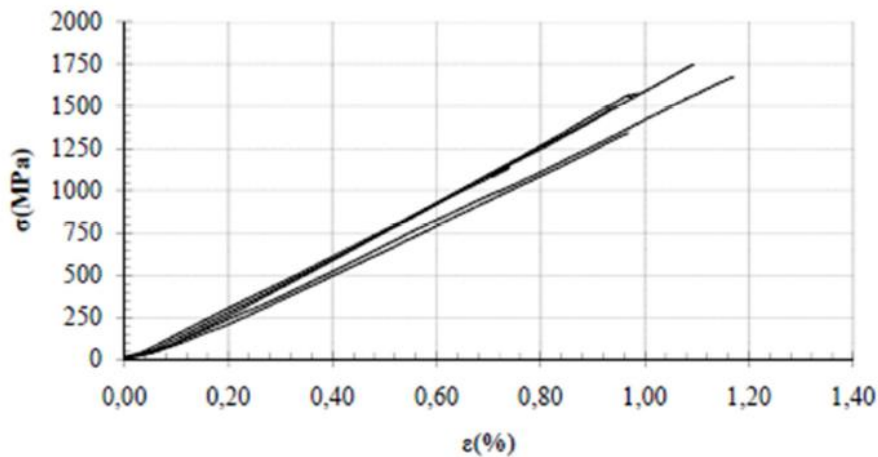


Figura 3.7 - Diagrama de tensão – extensão produzido por Carvalho [19].

Carvalho [19] obteve um módulo de elasticidade médio (E_{fm}) de 159 GPa, uma extensão de rotura média (ϵ_{fm}) de 1,03 % e uma tensão de rotura média (f_{fm}) de 1565 MPa, enquanto o fabricante [61] define um módulo de elasticidade de 168 GPa e uma tensão de rotura média de 1850 MPa. De salientar que o material tem um comportamento linear e uma rotura frágil.

Na presente dissertação, para um dos ensaios de flexão utilizou-se um laminado com 20 mm de largura, sobre o qual não se têm dados obtidos em ensaios. Uma vez que o fabricante [61] afirma que as características dos laminados de 10 e 20 mm são semelhantes, optou-se por utilizar os valores obtidos por Carvalho [19] para as duas larguras.

3.2.3. Resina S&P 220

Como aconselhado pelo fabricante, para a colagem do CFRP à madeira, quer nos ensaios de corte simples, quer nos de flexão utilizou-se a resina S&P 220 [62]. Esta resina é um adesivo epoxídico de cor cinzenta, que resulta na junção de adesivo epoxídico (componente A) com o respetivo endurecedor (componente B) na proporção de 4:1 e atinge a cura completa ao fim de 7 dias. Os componentes A e B são mostrados na Figura 3.8. Esta resina apresenta boa resistência mecânica e elevada resistência de aderência.

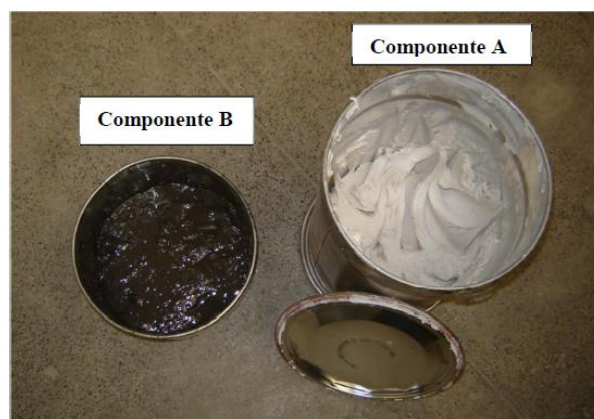


Figura 3.8 – Componentes da resina [53].

Tal como para o CFRP, Carvalho [19] ensaiou a resina - 3 provetes com 16x4x4 cm (comprimento x altura x largura). O procedimento consistiu num ensaio de flexão a 3 pontos.

Através das expressões (3.1) e (3.2), obteve-se o diagrama da Figura 3.9.

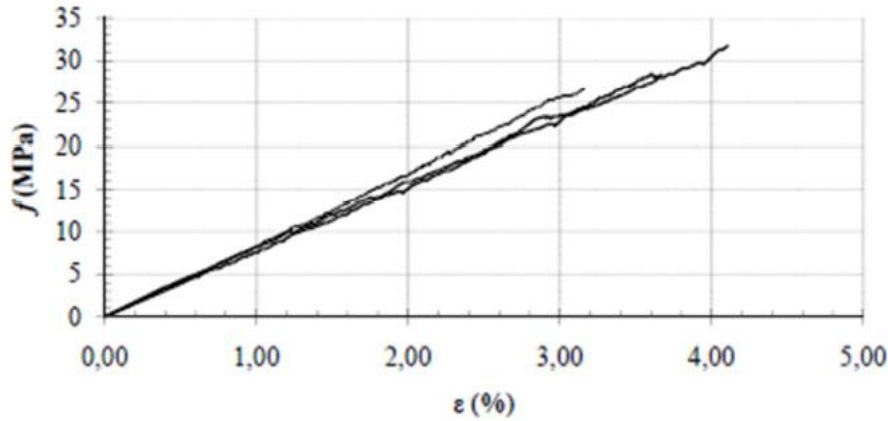


Figura 3.9 - Diagrama tensão – extensão produzido por Carvalho [19].

Carvalho [19] obteve-se um valor médio para o módulo de elasticidade (E_{ptm}) de 0,79 GPa, uma extensão média de 3,65 % (ϵ_{ptm}) e uma média de tensão de rotura à tração por flexão (f_{ptm}) de 29 MPa.

3.2.4. Resina Sikadur – 52 Injection

Para preencher alguns defeitos da madeira foi utilizada a resina de baixa viscosidade Sikadur – 52 Injection [65], fornecida pela empresa Sika.

A resina é composta por um componente A e um componente B, misturados na proporção de 2:1 e atinge a cura ao fim de 7 dias.

As principais características são a alta resistência mecânica e elevada aderência.

Apresentam-se os valores definidos pelo fabricante:

- Resistência à compressão: 52 MPa;
- Resistência à tração: 37 MPa;
- Resistência à flexão: 61 MPa;
- Módulo de Elasticidade: 1800 MPa.

Capítulo 4

Ensaio de Corte Simples da Ligação FRP - Madeira

4.1. Programa Experimental

4.1.1. Considerações Gerais

Tal como já foi referido anteriormente, um dos objetivos deste trabalho consistiu em estudar a aderência entre substratos de madeira e laminados de CFRP. Este estudo foi realizado com recurso a ensaios de corte simples.

Para a realização destes ensaios, os provetes de madeira foram reforçados numa das faces com laminados de CFRP através de duas técnicas de colagem: EBR e NSM. O comportamento da ligação CFRP/madeira foi estudado com o auxílio das medições obtidas através de transdutores de deslocamento (LVDT) e extensómetros. Todos os ensaios do presente capítulo foram realizados no laboratório de estruturas da FCT-UNL.

Foram ensaiados 17 provetes de madeira reforçados com CFRP de 10 mm de largura: 10 com a técnica EBR e 7 com a técnica NSM. Fez-se variar o comprimento colado de laminado de CFRP ao substrato de madeira com o intuito de se perceber qual a influência do comprimento de colagem na aderência entre os dois materiais. Através da variação do comprimento colado de laminado de CFRP, foi possível definir o valor experimental do comprimento efetivo da ligação. Recordar-se que, tal como referido na secção 2.4.2, o comprimento efetivo da ligação diz respeito ao valor do comprimento a partir do qual a resistência da ligação não aumenta. Para tal, assumiram-se os seguintes comprimentos colados: 65, 80, 105, 125, 155, 230 e 280 mm. Em todos os provetes deixou-se um comprimento não colado de 25 mm

junto da extremidade carregada, de forma a prevenir valores elevados de tensões de tração junto desta extremidade, como foi provado por Mazzotti *et al.* [52].

O presente capítulo apresenta a descrição do reforço das amostras de madeira, do modelo do sistema de ensaio e da instrumentação utilizada. Também apresenta os resultados obtidos e a respetiva análise.

4.1.2. Provetes de madeira

Os provetes de madeira utilizados para o reforço com laminados de CFRP (Figura 4.1) provêm da madeira apresentada no ponto 3.2.1 - Madeira. Os provetes apresentam uma secção transversal de 95x60 mm² (largura x altura) e um comprimento variável, de acordo com o valor do comprimento de laminado de CFRP que se pretende colar. A preparação dos provetes foi realizada na carpintaria da Câmara Municipal de Sesimbra.



Figura 4.1 – Provetes preparados na carpintaria

4.1.3. Aplicação do reforço

4.1.3.1 EBR

Antes da colagem do laminado de CFRP, apresentado no ponto 3.2.2, ao substrato de madeira pela técnica EBR, foi essencial preparar a superfície da madeira por forma a melhorar a rugosidade da superfície uma vez que com o aumento da rugosidade da superfície da madeira espera-se que a aderência entre os materiais aumente. A preparação da superfície da madeira foi realizada com recurso a uma lixa elétrica (Figura 4.2a) e, aquando da realização deste procedimento, teve-se em conta o nivelamento e uniformização das superfícies.

Em seguida, foi necessário limpar toda a superfície da madeira, com recurso a um compressor de ar, de forma a tornar a superfície da madeira livre de poeira. Depois da superfície de madeira estar preparada e limpa é possível colar o laminado de CFRP.

Começou-se por cortar o laminado com o comprimento pretendido com recurso a uma rebarbadora e limpou-se o laminado com acetona. De seguida preparou-se devidamente a resina S&P 220, conforme especificado pelo fabricante [62] e aplicou-se ao longo de todo o comprimento que se pretendia colar, controlando-se a espessura da camada de adesivo, que foi de aproximadamente 1,4 mm. A espessura de adesivo foi controlada colocando 2 tiras de laminado sobrepostas em cada lado do laminado colado e pressionando tudo com um peso. O laminado de CFRP foi então colocado sobre a resina de forma a que este ficasse devidamente centrado e alinhado (Figura 4.2b). Depois de 7 dias de polimerização da resina à temperatura ambiente, foi possível realizar os ensaios de corte simples.

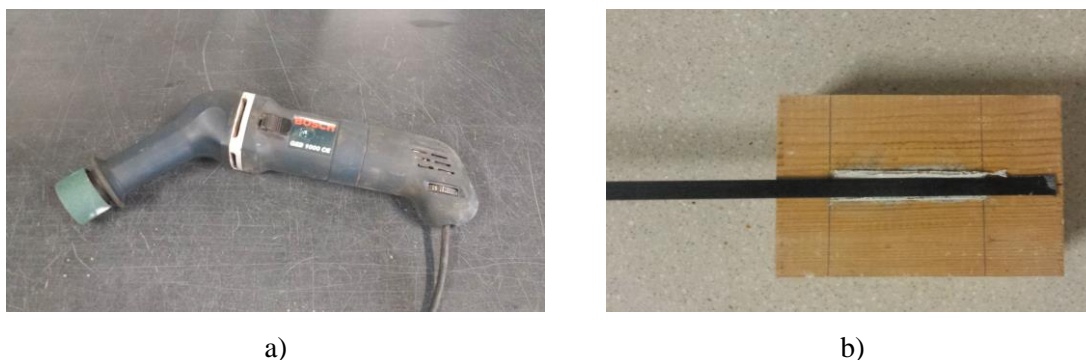


Figura 4.2 – a) lixa elétrica. b) provete reforçado com técnica EBR.

4.1.3.2 NSM

Para efetuar a colagem do laminado de CFRP ao substrato de madeira pela técnica NSM, foi necessário fazer uma ranhura na face da madeira que se pretendia reforçar. A abertura das ranhuras as dimensões desejadas foi feita com o auxílio de uma rebarbadora. Neste caso, tentou-se que a profundidade da ranhura fosse de 13 mm e a espessura de 2,5 mm. Aquando da realização deste procedimento, teve-se em conta o alinhamento e uniformização da ranhura. Em seguida, foi necessário limpar toda a superfície da madeira, recorrendo-se a um compressor de ar, de forma a tornar a superfície e a ranhura da madeira livres de poeira. Em seguida, tal como na técnica EBR, cortou-se o laminado com o comprimento pretendido, com recurso a uma rebarbadora e, para retirar toda a poeira, este foi limpo com acetona. A resina S&P 220 foi preparada de forma análoga à técnica EBR. De seguida espalhou-se resina na ranhura ao longo de todo o comprimento que se pretendia colar, sempre com a preocupação de preencher a ranhura por completo. O laminado de CFRP foi então colocado dentro da ranhura, tentando-se que este ficasse devidamente centrado e alinhado, retirando-se o excesso de resina (Figura 4.3). Depois de 7 dias de polimerização da resina à temperatura ambiente, foi possível realizar os ensaios de corte simples.

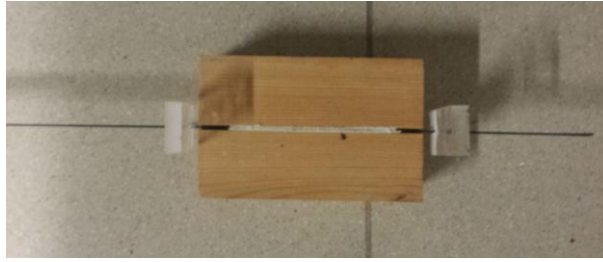


Figura 4.3 – Provete reforçado com técnica NSM.

4.1.4. Sistema de ensaio, procedimento e instrumentação

O sistema de ensaio utilizado para a realização dos ensaios de corte simples foi idealizado para o presente trabalho, tendo em conta as condicionantes técnicas e logísticas existentes. Com o sistema de ensaio utilizado foi possível aplicar uma força de tração longitudinal monotónica ao laminado de CFRP até se alcançar o seu arrancamento.

4.1.4.1 Sistema de ensaio

a) EBR

A configuração do sistema de ensaio para a técnica EBR é apresentada na Figura 4.4. Com este sistema de ensaio foi possível realizar um arrancamento controlado, conseguindo-se assim medir as cargas, deslocamentos e extensões no laminado de CFRP ao longo do ensaio.

Neste ensaio a força foi diretamente aplicada ao laminado de CFRP através de um cilindro hidráulico ENERPAC RCH206. Para garantir o posicionamento adequado do cilindro hidráulico recorreu-se a uma gaiola de aço, à qual foram soldados quatro tubos metálicos de modo a garantir que o cilindro hidráulico ficava à altura desejada, como mostra a Figura 4.4b). Foi também necessário colocar um perfil metálico no interior da gaiola para servir de apoio ao cilindro hidráulico. Com o intuito de se medir a força aplicada ao sistema, foi necessário colocar um transdutor de força de 200 kN da TML. Para se garantir que a força é aplicada ao laminado de CFRP, foi também necessário colocar na extremidade do laminado de CFRP uma cunha, como se mostra na Figura 4.4c). Entre o transdutor de carga e o cilindro hidráulico e entre o cilindro hidráulico e a cunha foram colocadas chapas metálicas com 10 mm de espessura que serviram de reação entre estes elementos. Foi também necessário colocar um perfil metálico na parte traseira da gaiola de forma a impossibilitar que esta levantasse, como se pode ver na Figura 4.4a). Este perfil é fixado à laje de chão do laboratório.

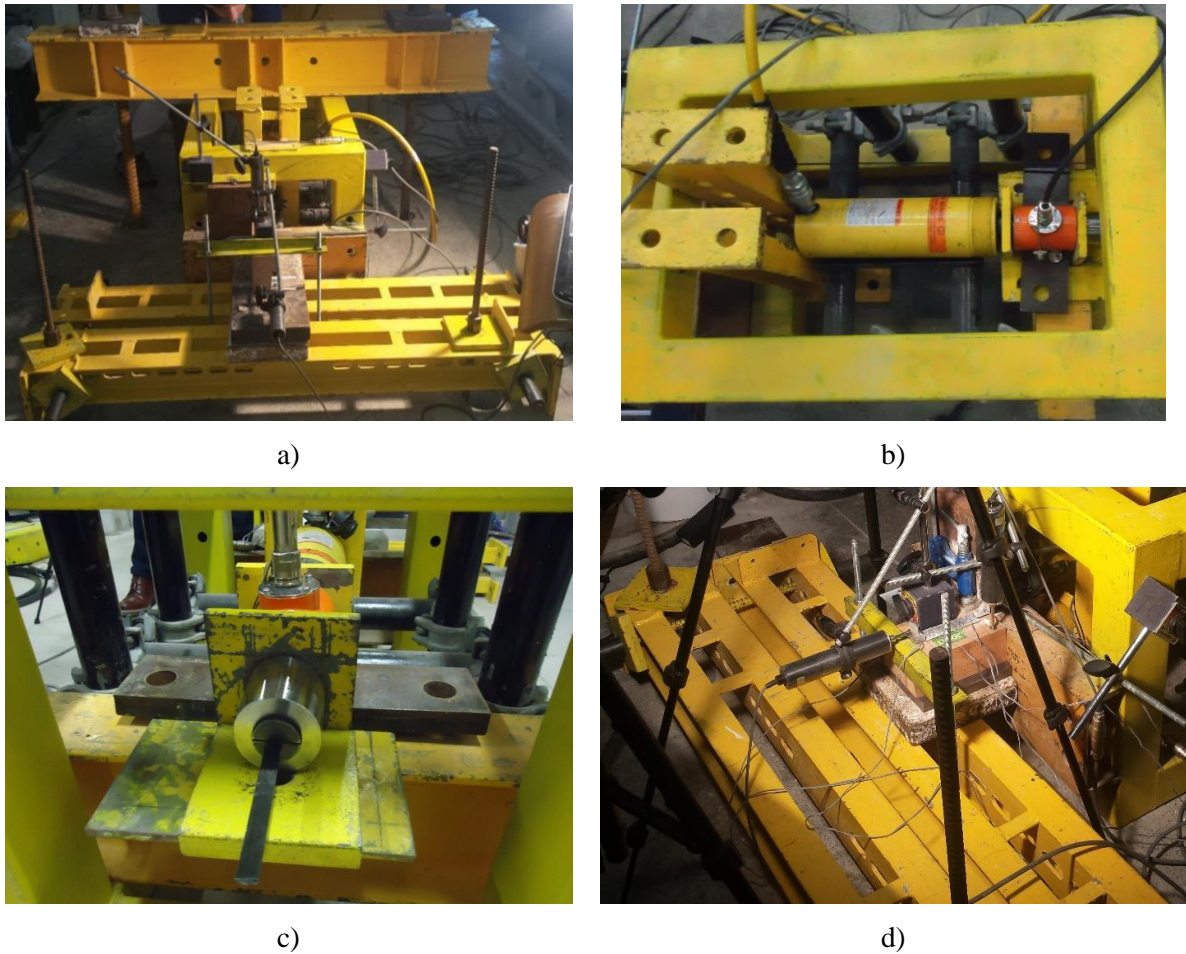


Figura 4.4 – a) Visão frontal do esquema de ensaio; b) Visão superior do esquema de ensaio; c) Visão traseira do esquema de ensaio; d) Pormenor da fixação do provete.

Soldou-se ainda outro perfil metálico à gaiola de modo a servir de apoio ao provete de madeira reforçado com laminado CFRP. Devido às pequenas dimensões do provete de madeira, foi necessário elevá-lo, recorrendo-se a dois perfis metálicos e chapas metálicas, como se mostra na Figura 4.4d). De forma a evitar deslocamentos inconvenientes, o provete de madeira foi fixado aos perfis metálicos e os perfis metálicos foram fixados à laje do laboratório.

b) NSM

A configuração do sistema de ensaio utilizada para ensaiar as amostras reforçadas pela técnica NSM é idêntica à configuração utilizada na técnica EBR, como se pode observar na Figura 4.5. A única diferença na configuração dos ensaios da técnica NSM é o posicionamento dos provetes de madeira, onde a face do provete reforçada em vez de estar voltada para cima, como no caso da técnica EBR, está voltada de lado, como se mostra na Figura 4.5. Este posicionamento do provete de madeira possibilitou que a amarração do laminado de CFRP fosse realizada da mesma forma que no caso da técnica EBR, uma vez que nos casos em que a amarração do laminado de CFRP não foi realizada da mesma forma que no caso da técnica EBR as roturas ocorreram de forma indesejada na zona da cunha de amarração.



Figura 4.5 – Esquema de ensaio NSM.

4.1.4.2 Procedimento de ensaio e instrumentação

Conforme referido anteriormente, aplicou-se uma força de tração longitudinal monotónica ao laminado de CFRP até se conseguir descolar o laminado de CFRP da madeira. Esta força de tração é imposta ao laminado através de uma bomba hidráulica que faz o êmbolo do cilindro hidráulico sair, empurrando assim todo o sistema e levando ao deslocamento do laminado de CFRP.

Todas as amostras ensaiadas foram instrumentadas com transdutores de deslocamento, extensómetros e células de carga, com o intuito de se obter valores de força, deslocamentos e extensões no laminado de CFRP durante o decorrer do ensaio. Daqui em diante os transdutores de deslocamento serão referidos como defletómetros ou LVDT.

Durante a montagem dos ensaios colocaram-se dois defletómetros nas extremidades do comprimento colado de laminado de CFRP com o propósito de monitorizar os deslocamentos horizontais do laminado. O defletómetro posicionado junto da extremidade carregada é do tipo TML-CDP25 com um curso total de 25 mm e o posicionado junto da extremidade livre é do tipo TLM – CDP50 com um curso total de 50 mm. Estes transdutores foram alinhados na direção horizontal, paralelamente ao laminado de CFRP, como se mostra na Figura 4.6.

Com o intuito de se obter valores de extensão ao longo do comprimento colado de laminado de CFRP nas amostras reforçadas com a técnica EBR, foram colocados extensómetros ao longo do comprimento colado, com espaçamentos variáveis. Por conseguinte, o número de extensómetros colocados em cada amostra dependeu do valor do comprimento colado. A Figura 4.7 mostra um exemplo do posicionamento dos extensómetros assumido para um provete reforçado pela técnica EBR para um comprimento colado de 65 mm.

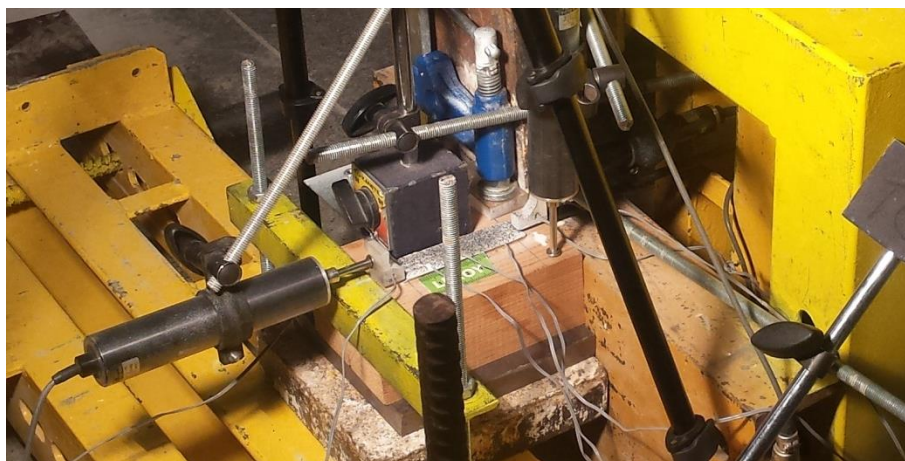


Figura 4.6 – Posicionamento da instrumentação.



Figura 4.7 - Posicionamento dos extensómetros.

No caso da técnica NSM, não foi possível colocar extensómetros, uma vez que as várias faces do laminado de CFRP estavam em contacto com resina, ou seja, os extensómetros teriam que ser colados entre o laminado de CFRP e a resina, diminuindo a aderência entre a madeira e o laminado.

Durante a realização dos ensaios de corte simples, a leitura das cargas aplicadas ao laminado de CFRP foi realizada com uma célula de carga do tipo CLC-200 KNA.

A aquisição de dados de toda a instrumentação e de todos os ensaios foi feita através de um Datalogger Centipede 100 (UPM100) da HBM, ligado a um computador com o software Catman 6.0 da HBM, fornecendo os dados em Excel para posterior tratamento e análise.

A Tabela 4.1 apresenta a designação das amostras ensaiadas, a técnica de colagem do laminado de CFRP utilizada, o comprimento de laminado colado e a instrumentação utilizada.

Tabela 4.1 – Designação dos ensaios realizados.

Designação dos provetes	Técnica de colagem	Comprimento colado (Lb) (mm)	Instrumentação	
			Nº de LVDT	Nº de Extensómetros
W_EBR_Lb65_01	EBR	65	2	3
W_EBR_Lb65_02		65	2	3
W_EBR_Lb80_01		80	2	3
W_EBR_Lb105_01		105	2	4
W_EBR_Lb125_01		125	2	4
W_EBR_Lb125_02		125	2	4
W_EBR_Lb155_01		155	2	4
W_EBR_Lb230_01		230	2	6
W_EBR_Lb280_01		280	2	7
W_EBR_Lb280_02		280	2	7
W_NSM_Lb65_01	NSM	65	2	-
W_NSM_Lb80_01		80	2	-
W_NSM_Lb105_01		105	2	-
W_NSM_Lb125_01		125	2	-
W_NSM_Lb155_01		155	2	-
W_NSM_Lb230_01		230	2	-
W_NSM_Lb280_01		280	2	-

4.2. Apresentação dos Resultados Experimentais

4.2.1. Aspetos Gerais

No presente subcapítulo são expostos todos os resultados experimentais obtidos através dos ensaios de corte simples para as duas técnicas de colagem - EBR e NSM.

4.2.2. EBR

A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos em todos os ensaios de forma resumida. Nesta tabela são expostos valores de força máxima (F_{max}), extensão máxima (ϵ_{max}), tensão de aderência máxima (τ_{max}), deslizamento último determinado através dos valores de extensão obtidos pelos extensómetros (s_{ult_ext}),

deslizamento último obtido diretamente pelo defletómetro (s_{ult_def}) e deslizamento correspondente ao valor da tensão de aderência máxima (s_{max}), também obtido a partir dos defletómetros.

Na técnica EBR, os valores das extensões são obtidos diretamente através dos extensómetros. O deslocamento entre o laminado de CFRP e o substrato de madeira foi obtido através da resolução do integral:

$$\varepsilon = \frac{ds}{dx} \Leftrightarrow s = \int \varepsilon dx \quad (4.1)$$

A tensão de aderência também pode ser obtida a partir das extensões, de acordo com [15,34,51]:

$$\tau = E_f \cdot t_f \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta x} \quad (4.2)$$

onde E_f e t_f são, respetivamente, o módulo de elasticidade e a espessura do laminado de CFRP; e $\Delta\varepsilon$ e Δx são, respetivamente, a diferença de extensões entre dois extensómetros consecutivos e a distância entre os extensómetros.

Através da observação da Tabela 4.2 repara-se que existem comprimentos colados para os quais foram realizados mais do que um ensaio, o que se justifica pelo facto de o primeiro ensaio não ter corrido de acordo com o inicialmente esperado, ou seja, os valores das forças de arrancamento obtidas foram demasiado baixas. Por conseguinte, decidindo-se repetir o ensaio de modo a confirmar o comportamento. Deste modo, existem dois ensaios cujos resultados não foram analisados - os ensaios W_EBR_Lb280_01 e W_EBR_Lb125_01. Pode-se observar, por exemplo, que nestes dois ensaios as forças máximas foram bastante inferiores aos dos segundos ensaios realizados para o mesmo comprimento colado, o que confirmou as suspeitas de presença de anomalias nos primeiros ensaios.

Tabela 4.2 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios com a técnica EBR.

Designação das amostras	Comprimento colado (Lb) (mm)	F _{max} (kN)	ε _{max} (%)	τ _{max} (MPa)	S _{ult_ext} (mm)	S _{ult_def} (mm)	S _{max} (mm)
W_EBR_Lb65_01	65	3,60	0,16	8,35	0,083	0,510	0,034
W_EBR_Lb65_02	65	4,72	0,21	12,32	0,288	0,952	0,189
W_EBR_Lb80_01	80	9,05	0,35	11,68	0,126	-	0,122
W_EBR_Lb105_01	105	9,05	0,40	12,24	0,214	-	0,197
W_EBR_Lb125_01	125	4,82	0,20	6,55	0,125	0,146	0,085
W_EBR_Lb125_02	125	9,84	0,44	11,96	0,450	0,350	0,164
W_EBR_Lb155_01	155	11,39	0,48	13,78	0,250	0,383	0,210
W_EBR_Lb230_01	230	11,28	0,52	14,99	0,720	-	0,175
W_EBR_Lb280_01	280	4,29	0,37	1,36	0,213	-	0,318
W_EBR_Lb280_02	280	9,53	0,45	11,92	0,600	0,600	0,153

4.2.2.1 Força versus deslizamento

As Figuras 4.8 a 4.21 apresentam os gráficos força vs. deslizamento para todos os ensaios realizados em provetes reforçados pela técnica EBR. Nestes gráficos são apresentadas curvas referentes aos valores obtidos pelos defletómetros e as curvas referentes aos valores obtidos pelos extensómetros. Refira-se que os valores de deslizamento apresentados nestes gráficos dizem respeito aos deslizamentos medidos junto da extremidade carregada.

Através da análise da Figura 4.8 é possível observar que os deslizamentos obtidos pelo extensómetro e pelo defletómetro para a amostra W_EBR_Lb280_02 apresentam valores próximos e que os deslizamentos últimos obtidos pelos dois métodos de instrumentação são iguais ($s_{ult}=0,600$ mm). Neste ensaio, a força máxima obtido teve um valor de 9,53 kN.

Quanto ao ensaio W_EBR_Lb230_01, apresentado na Figura 4.9, verificou-se que os valores obtidos através do defletómetro são bastante diferentes do esperado e dos obtidos a partir dos extensómetros. Pensa-se que isto ocorreu devido a ajustamentos do provete ao ensaio, uma vez que nestes ensaios são medidos deslocamentos muito pequenos, qualquer perturbação no ensaio tem grande impacto nos deslocamentos medidos pelos defletómetros. Relativamente aos valores obtidos pelo extensómetro, observa-se que o deslizamento último foi superior ao obtido no ensaio W_EBR_Lb280_02, atingindo-se um valor de 0,720 mm. Em termos de força máxima, também se observa que para o ensaio

W_EBR_Lb230_01 a força máxima ($F_{\max}=11,28$ kN) foi superior à obtida no ensaio W_EBR_Lb280_02.

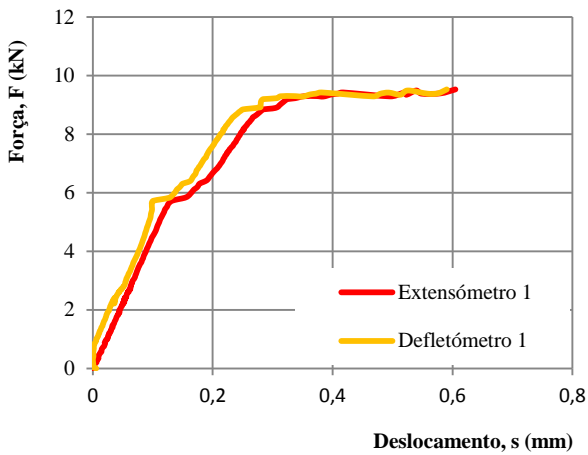


Figura 4.8 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb280_02.

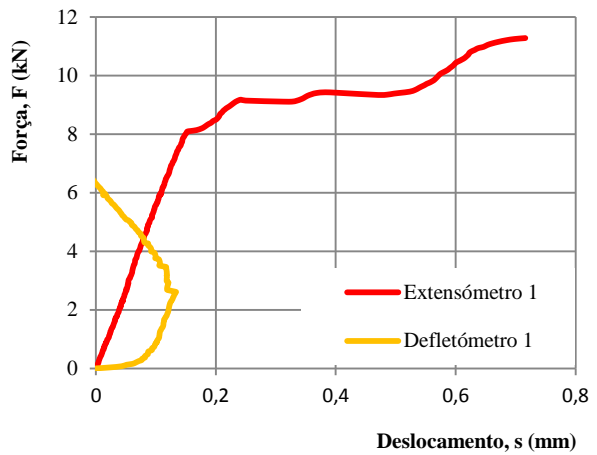


Figura 4.9 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb230_01.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os modos de rotura dos ensaios W_EBR_Lb280_02 e W_EBR_Lb230_01, respetivamente. Observa-se que estas duas roturas foram semelhantes e ocorreram maioritariamente pela interface entre o laminado de CFRP e a resina. Para os dois ensaios, a rotura na extremidade carregada ocorreu na interface entre a madeira e a resina.



Figura 4.10 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb280_02.



Figura 4.11 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb230_01.

A Figura 4.12 apresenta o gráfico força vs. deslizamento para o ensaio W_EBR_Lb155_01. Através deste gráfico é possível observar que as curvas obtidas pelo extensómetro e pelo defletómetro são

bastante diferentes. Na curva obtida pelo defletómetro é possível observar uma acomodação do material até um deslizamento de 0,248 mm e que o deslizamento último ($s_{ult}=0,383$ mm) é bastante superior ao obtido pelo extensómetro ($s_{ult}=0,250$ mm). Este facto evidencia que os deslizamentos obtidos a partir das extensões medidas pelos extensómetros são bem mais fiáveis, tendo-se optado por apresentar apenas as curvas referentes aos deslizamentos obtidos por essa via no desenrolar do presente trabalho. Em termos de força máxima, observou-se que o valor obtido neste ensaio foi de 11,39 kN, valor da mesma ordem de grandeza do obtido para o ensaio W_EBR_Lb230_01. Em termos de deslizamento último, observou-se que o valor obtido pelo extensómetro é bastante inferior ao do ensaio W_EBR_Lb230_01.

No ensaio W_EBR_Lb125_02 (Figura 4.13) observou-se que o deslizamento último do extensómetro foi de $s_{ult}=0,450$ mm, valor superior ao obtido no ensaio W_EBR_Lb155_01. Neste ensaio a força máxima foi de 9,84 kN, valor um pouco inferior ao do ensaio W_EBR_Lb155_01.

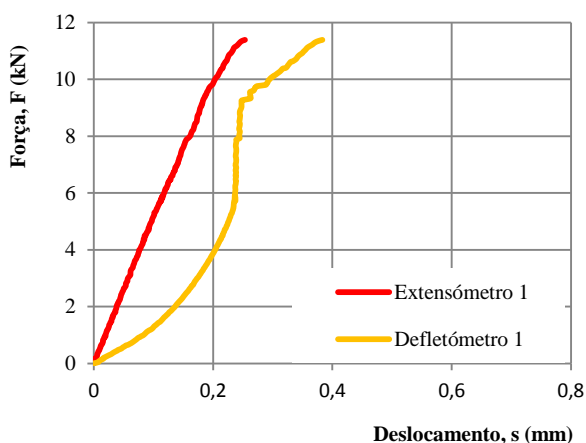


Figura 4.12 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb155_01.

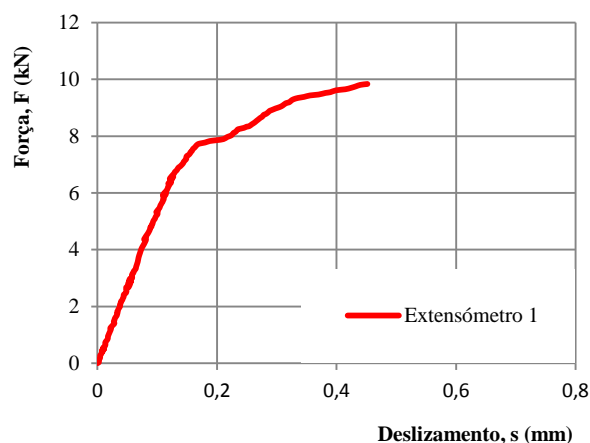


Figura 4.13 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb125_02.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os modos de rotura dos ensaios W_EBR_Lb155_01 e W_EBR_Lb125_02. Observa-se que no ensaio W_EBR_Lb155_01 a rotura ocorreu na interface entre o laminado de CFRP e a resina. No ensaio W_EBR_Lb125_02 a rotura pode ser considerada mista, uma vez que em parte do comprimento colado ocorreu na interface entre o laminado de CFRP e a resina e, em outra parte, ocorreu por destacamento da madeira.



Figura 4.14 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb155_01.



Figura 4.15 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb125_02.

A Figura 4.16 apresenta o gráfico força vs. deslizamento para o ensaio W_EBR_Lb105_01. Através deste gráfico, observa-se que o deslizamento último obtido pelo extensómetro ($s_{ult}=0,214$ mm) é inferior aos dos ensaios W_EBR_Lb155_01 e W_EBR_Lb105_02. Em termos de força máxima, observa-se que o valor obtido neste ensaio é de 9,05 kN, valor relativamente inferior ao do ensaio W_EBR_Lb125_02.

O deslizamento último obtido no ensaio W_EBR_Lb80_01 (Figura 4.17) foi de 0,126 mm, inferior ao do ensaio W_EBR_Lb105_01. Neste ensaio a força máxima foi de 9,05 kN, valor igual ao obtido no ensaio W_EBR_Lb105_01.

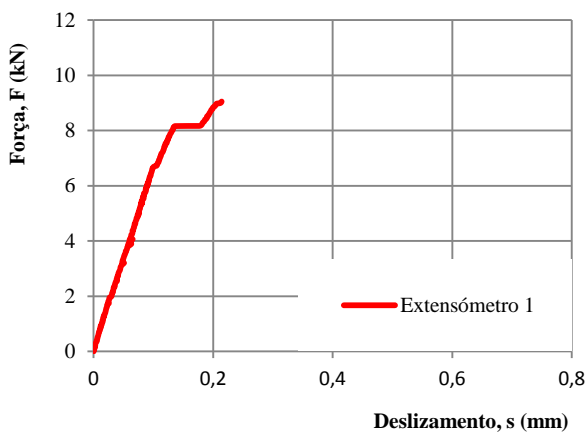


Figura 4.16 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb105_01.

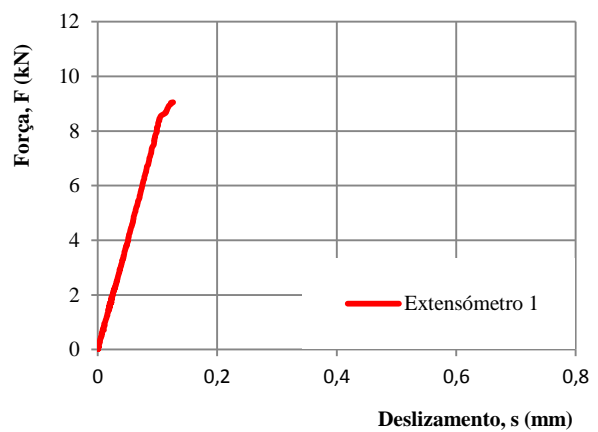


Figura 4.17 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb80_01.

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os modos de rotura dos ensaios W_EBR_Lb105_01 e W_EBR_Lb80_01. Observa-se que no ensaio W_EBR_Lb105_01 a rotura ocorreu na interface entre o laminado de CFRP e a resina. No entanto, junto das duas extremidades a rotura ocorreu na interface entre a resina e a madeira. No ensaio W_EBR_Lb125_02 a rotura ocorreu na interface entre a resina e o substrato de madeira.



Figura 4.18 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb105_01.



Figura 4.19 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb80_01.

As Figura 4.20 e Figura 4.21 apresentam os gráficos força vs. deslizamento para os dois ensaios realizados para um comprimento de 65 mm, ensaios W_EBR_Lb65_01 e W_EBR_Lb65_02. Através dos dois gráficos é possível observar que o deslizamento último obtido no ensaio W_EBR_Lb65_01 é de 0,083 mm, valor inferior ao do ensaio W_EBR_Lb65_02, que obteve um valor de 0,288 mm. Em termos de força máxima, observa-se que o valor obtido no ensaio W_EBR_Lb65_01 é de 3,60 kN, valor inferior ao do ensaio W_EBR_Lb65_02.

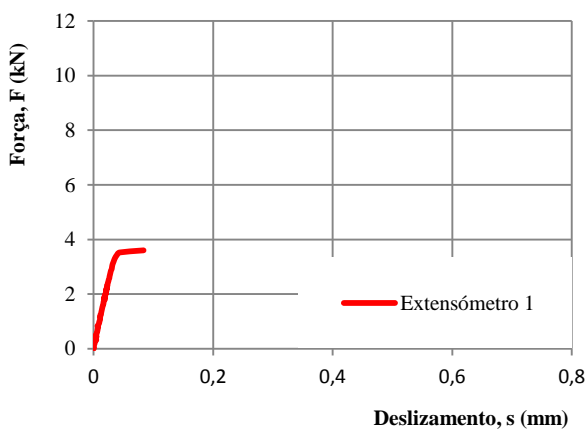


Figura 4.20 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_01.

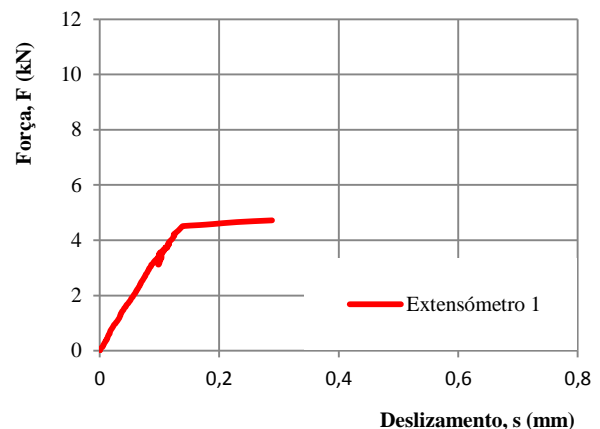


Figura 4.21 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_02.

As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam os modos de rotura dos ensaios W_EBR_Lb65_01 e W_EBR_Lb65_02. Observa-se que as roturas foram idênticas nos dois ensaios, tendo ocorrido na interface entre o laminado de CFRP e a resina.



Figura 4.22 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb65_01.



Figura 4.23 – Rotura do ensaio W_EBR_Lb65_02.

4.2.2.2 Extensão versus deslizamento

Os gráficos apresentados neste subcapítulo mostram as curvas extensão vs. deslizamento junto da extremidade carregada.

Através da Figura 4.24, observa-se que no ensaio da amostra W_EBR_Lb280_02 o valor máximo da extensão foi de 0,45 %. Observa-se também que o andamento da curva extensão vs. deslizamento pode ser dividido em dois ramos - um ramo inicial praticamente linear e um segundo ramo praticamente constante.

Quanto ao ensaio W_EBR_Lb230_01, apresentado na Figura 4.25, repara-se que o valor de extensão máximo é superior ao alcançado no ensaio W_EBR_Lb280_02, com um valor de 0,52 %. Neste ensaio, para além dos dois ramos que também se observaram no ensaio W_EBR_Lb280_02, observa-se ainda um terceiro ramo, praticamente linear ascende.

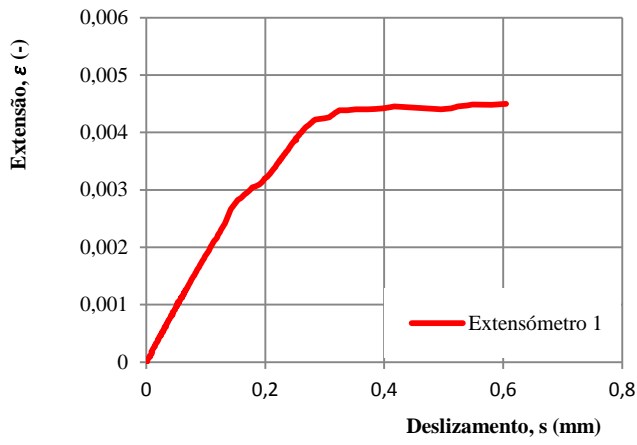


Figura 4.24 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb280_02.

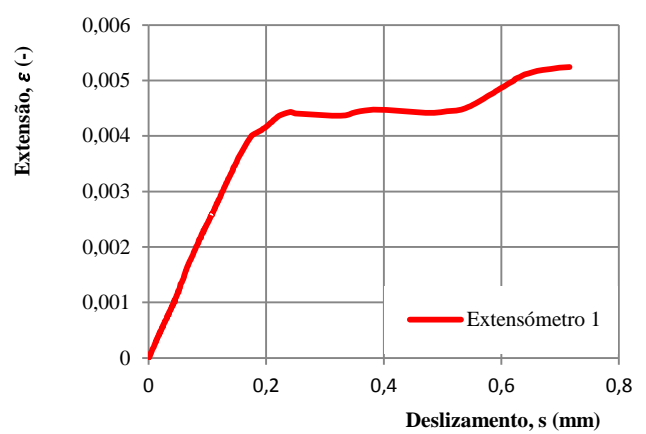


Figura 4.25 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb230_01.

A Figura 4.26 apresenta o gráfico extensão vs. deslizamento para o ensaio W_EBR_Lb155_01. Através deste gráfico, observa-se que o valor de extensão máxima obtido foi de 0,48 %, valor inferior ao do ensaio W_EBR_Lb230_01. O andamento da curva deste ensaio apresenta apenas um ramo praticamente linear ascendente.

No ensaio W_EBR_Lb125_02 (Figura 4.27) observa-se que a extensão máxima foi de 0,44 %, valor inferior ao do ensaio W_EBR_Lb155_01. Em termos de andamento, observa-se que neste ensaio existe apenas um ramo não linear.

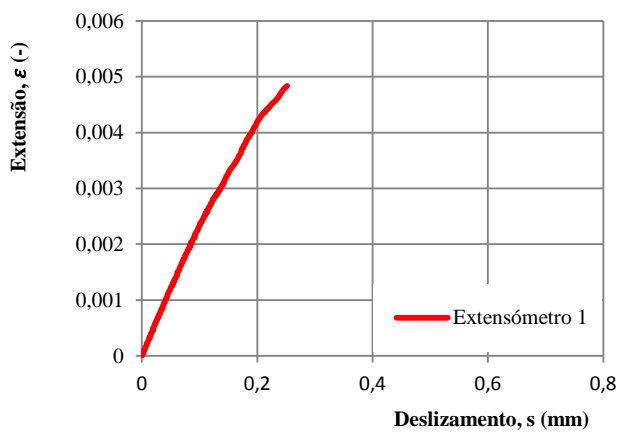


Figura 4.26 – Gráfico Extensão vs Deslizamento W_EBR_Lb155_01.

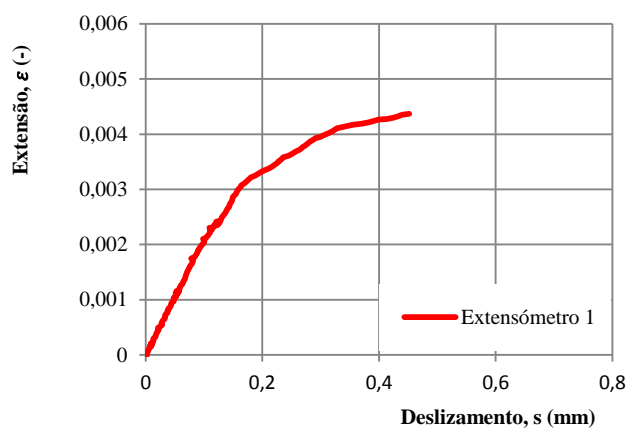


Figura 4.27 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb125_02.

As Figura 4.28 e Figura 4.29 apresentam os gráficos extensão vs. deslizamento para os ensaios W_EBR_Lb105_01 e W_EBR_Lb80_01. Através da análise destes gráficos, observa-se que a extensão máxima do ensaio W_EBR_Lb105_01 foi de 0,40 %, enquanto no ensaio W_EBR_Lb80_01 foi 0,35 %. Estes dois gráficos apresentam um único ramo praticamente linear, tal como no ensaio W_EBR_Lb155_01.

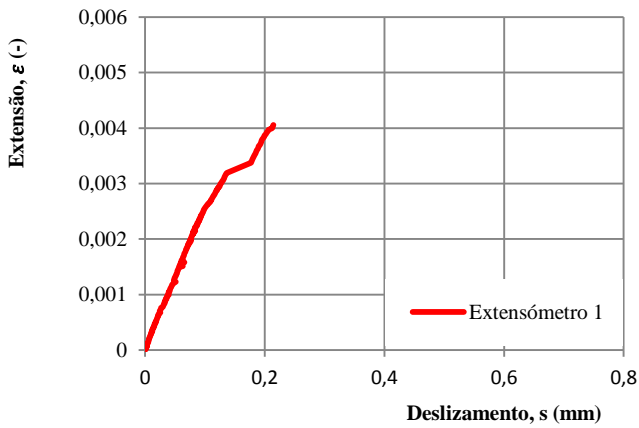


Figura 4.28 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb105_01.

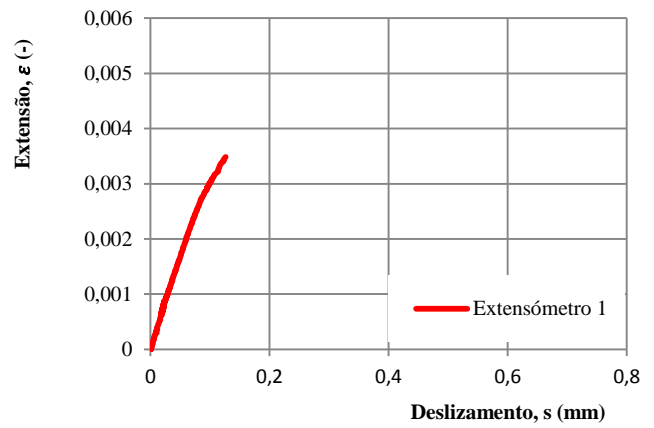


Figura 4.29 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb80_01.

As Figura 4.30 e Figura 4.31 apresentam os gráficos extensão vs. deslizamento para os dois ensaios realizados para um comprimento de 65 mm, W_EBR_Lb65_01 e W_EBR_Lb65_02. Através dos dois gráficos observa-se que a extensão máxima obtida no ensaio W_EBR_Lb65_01 foi de 0,16 %, enquanto no ensaio W_EBR_Lb65_02 foi de 0,21 %. As extensões máximas obtidas nestes dois ensaios foram inferiores à do ensaio W_EBR_Lb80_01. Dos dois gráficos extensão-deslizamento destes ensaios, observa-se que em ambos os ensaios podem observar-se dois troços distintos: um inicial praticamente linear ascendente e outro praticamente constante.

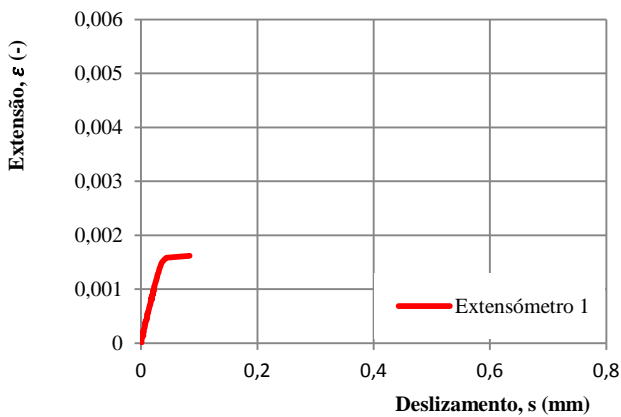


Figura 4.30 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_01.

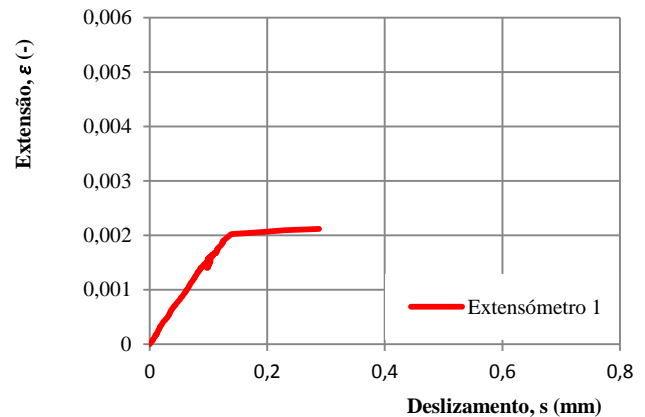


Figura 4.31 – Gráfico Extensão vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_02.

4.2.2.3 Tensão de aderência versus deslizamento

Os gráficos apresentados neste subcapítulo mostram as curvas tensão de aderência vs. deslizamento para vários pontos ao longo do comprimento colado. Estes pontos dizem respeito à posição entre dois extensómetros consecutivos, conforme a expressão (4.2). Normalmente as curvas tensão de aderência vs. deslizamento têm um troço praticamente linear ascendente até ser alcançado o valor máximo. O

deslizamento correspondente à tensão de aderência máxima tem o nome de deslizamento máximo, s_{max} . Depois de atingido este valor, a tensão de aderência tende a diminuir.

Através das Figuras 4.32 e 4.33, observa-se que no ensaio da amostra W_EBR_Lb280_02 o valor de tensão de aderência máximo foi de 11,92 MPa, enquanto no ensaio W_EBR_Lb230_01 foi de 14,99 MPa. Observa-se que o andamento das curvas dos dois ensaios é semelhante para os vários pontos localizados ao longo do comprimento colado.

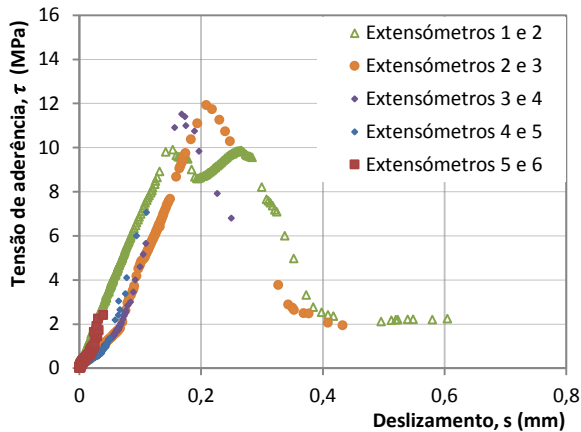


Figura 4.32 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb280_02.

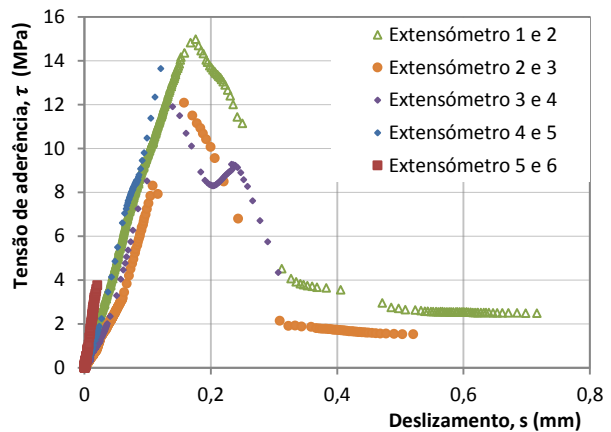


Figura 4.33 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb230_01.

Através das Figuras 4.34 e 4.35 pode-se observar que no ensaio da amostra W_EBR_Lb155_01 o valor de tensão de aderência máximo foi de 13,78 MPa, enquanto no ensaio W_EBR_Lb125_02 foi de 11,96 MPa. Observou-se também que as curvas tensão de aderência vs. deslizamento dos dois ensaios são parecidas para os vários pontos localizados ao longo do comprimento colado.

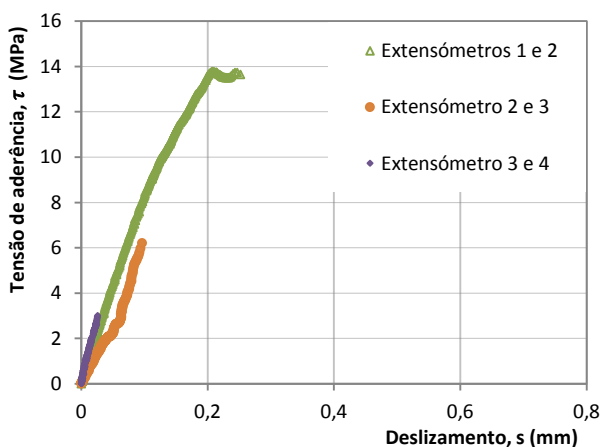


Figura 4.34 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb155_01.

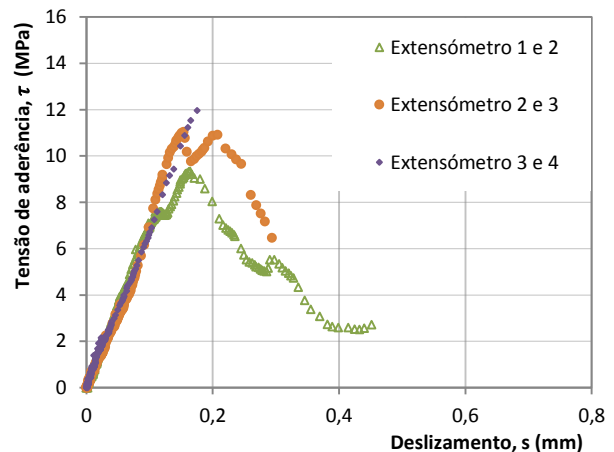


Figura 4.35 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb125_02.

Através das Figuras 4.36 e 4.37, pode-se observar que no ensaio da amostra W_EBR_Lb105_01 o valor de tensão de aderência máximo foi de 12,24 MPa, enquanto no ensaio W_EBR_Lb80_01 foi de 78

ligeiramente inferior, tendo-se obtido o valor de 11,68 MPa. Observou-se ainda que as curvas tensão de aderência vs. deslizamento dos dois ensaios são parecidas para os vários pontos instrumentados ao longo do comprimento colado.

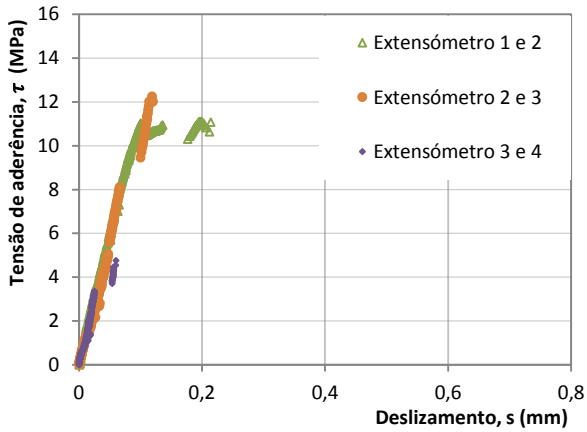


Figura 4.36 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb105_01.

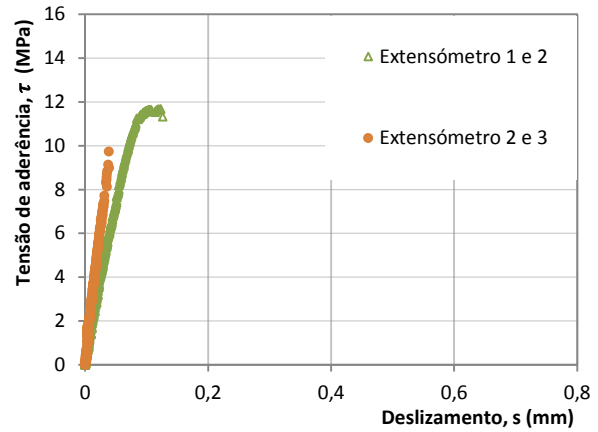


Figura 4.37 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb80_01.

As Figuras 4.38 e 4.39 apresentam os gráficos tensão de aderência vs. deslizamento para os dois ensaios realizados para um comprimento de 65 mm: ensaios W_EBR_Lb65_01 e W_EBR_Lb65_02. Através da análise dois gráficos é possível observar que a tensão de aderência máxima obtida no ensaio W_EBR_Lb65_01 é de 8,35 MPa, enquanto para ensaio W_EBR_Lb65_02 se obteve um valor de 12,32 MPa. No ensaio W_EBR_Lb65_01 observa-se que o andamento das curvas é idêntico para os vários pontos localizados ao longo do comprimento colado. No entanto, no ensaio W_EBR_Lb65_02 observa-se que as curvas são distintas para os dois pontos ao longo do comprimento.

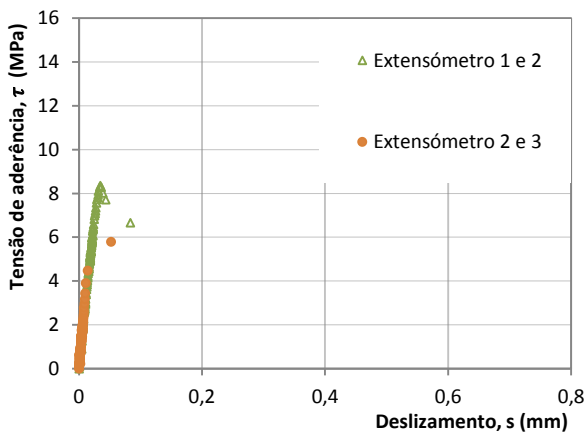


Figura 4.38 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_01.

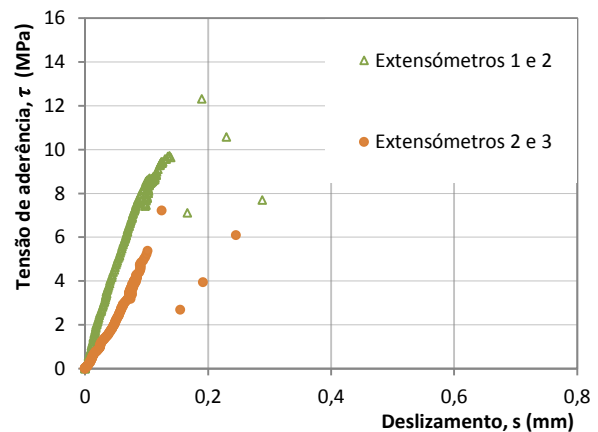


Figura 4.39 – Gráfico Tensão de aderência vs. Deslizamento W_EBR_Lb65_02.

4.2.3. NSM

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos em todos os ensaios de forma resumida. Nesta tabela são expostos os valores de força máxima (F_{max}) e deslizamento último obtido pelo defletómetro (s_{ult_def}). Relembre-se que nos ensaios com a técnica NSM não foram utilizados extensómetros pelo que os únicos valores obtidos são os dos defletómetros e célula de carga.

Tabela 4.3 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios com a técnica NSM.

Designação das amostras	Comprimento colado (Lb) (mm)	F_{max} (kN)	s_{ult_def} (mm)
W_NSM_Lb65_01	65	7,79	-
W_NSM_Lb80_01	80	9,03	-
W_NSM_Lb105_01	105	10,49	-
W_NSM_Lb125_01	125	12,97	-
W_NSM_Lb155_01	155	15,19	0,690
W_NSM_Lb230_01	230	15,07	0,404
W_NSM_Lb280_01	280	10,21	0,314

4.2.3.1 Força versus deslizamento

As Figuras 4.40 a 4.42 apresentam os andamentos dos gráficos força vs. deslizamento para todos os ensaios realizados em provetes reforçados pela técnica NSM. Nestes gráficos são apresentadas as curvas referentes aos valores obtidos pelos defletómetros. Os valores de deslizamento apresentados nestes gráficos foram medidos junto da extremidade carregada.

Através da Figura 4.40 observa-se que no ensaio da amostra W_NSM_Lb280_01, o valor de deslocamento último obtido pelo defletómetro foi de 0,314 mm e a força máxima foi de 10,21 kN. Estes valores são relativamente mais baixos que os da amostra W_NSM_Lb230_01 e W_NSM_Lb155_01 que tiveram valores de deslocamento último de 0,404 mm e 0,690 mm, respetivamente, e de força máxima de 15,07 kN e 15,19 kN, respetivamente. Para a amostra com comprimento colado de 280 mm, os valores foram mais baixos devido a um mau posicionamento da cunha na parte traseira do ensaio, o que levou a que o ensaio não fosse executado na perfeição e a rotura fosse atingida no laminado junto à cunha. Quanto aos ensaios com comprimentos colados de 155 mm e 230 mm, os valores são relativamente próximos, o que indica que o comprimento efetivo de ligação já terá sido atingido antes desse intervalo de comprimentos colados.

Nos restantes ensaios com comprimentos colados de 65 mm, 80 mm, 105 mm e 125 mm, tal como aconteceu em alguns ensaios realizados aos provetes reforçados com a técnica EBR, não se obtiveram leituras aceitáveis através dos defletómetros, pelo que se optou por apenas apresentar a força máxima, como se mostrou na Tabela 4.3. Tal como já foi referido anteriormente, pensa-se que as leituras obtidas através dos defletómetros muitas vezes não são aceitáveis porque nestes ensaios são medidos deslocamentos muito pequenos e, por isso, qualquer perturbação no ensaio tem grande impacto nos deslocamentos medidos pelos defletómetros.

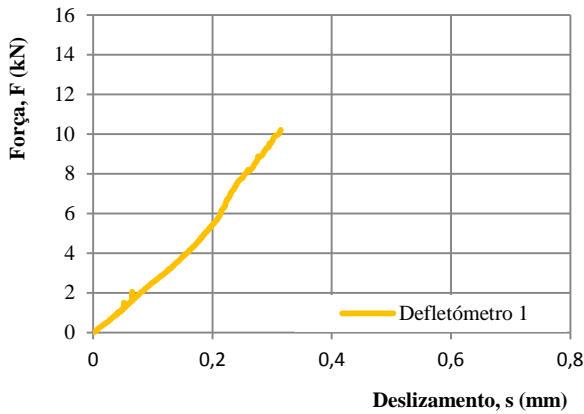


Figura 4.40 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_NSM_Lb280_01.

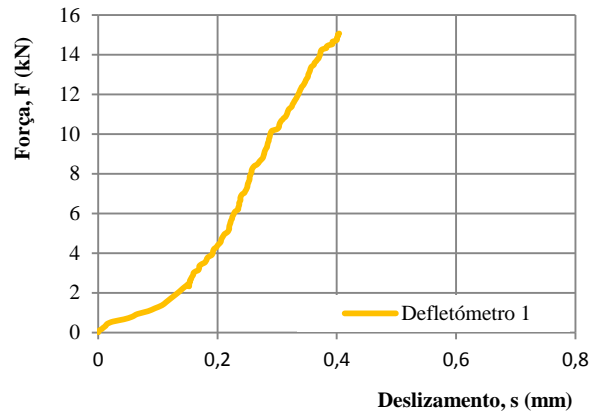


Figura 4.41 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_NSM_Lb230_01.

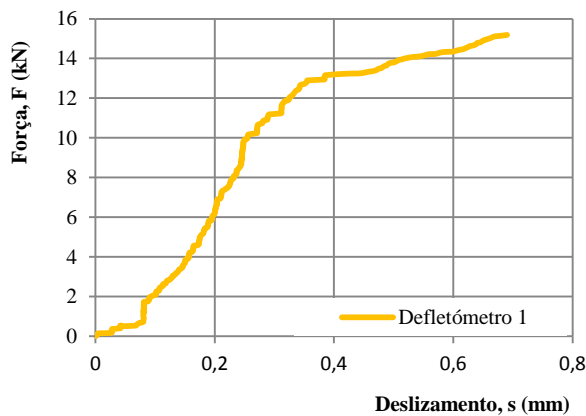


Figura 4.42 – Gráfico Força vs. Deslizamento W_NSM_Lb155_01.

As Figuras 4.43 a 4.49 apresentam os modos de rotura de todos os ensaios realizados pela técnica NSM. Observa-se que para o comprimento colado de 280 mm a rotura ocorreu pelo laminado de FRP, ficando o sistema de ensaio intacto. Tal como referido anteriormente, esta rotura ocorreu devido a uma má colocação da cunha que, conforme se pode ver pela Figura 4.43, a cunha estava colocada na vertical. Nos restantes ensaios observou-se uma rotura por destacamento da madeira.



Figura 4.43 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb280_01.



Figura 4.44 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb230_01.



Figura 4.45 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb155_01.



Figura 4.46 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb125_01.



Figura 4.47 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb105_01.



Figura 4.48 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb80_01.



Figura 4.49 – Rotura do ensaio W_NSM_Lb65_01.

4.3. Análise dos resultados experimentais

4.3.1. Comparação EBR – NSM

4.3.1.1 Valores máximos

A Tabela 4.4 apresenta os valores de força máxima e deslocamento último obtidos nos ensaios realizados pela técnica EBR e NSM. As forças máximas obtidas nos provetes de maior comprimento e em que a técnica de reforço NSM foi aplicada foram 30 % superiores às obtidas nos provetes de maior comprimento e reforçados com a técnica EBR. A diferença entre as forças máximas das duas técnicas é mais notável para comprimentos colados maiores.

No que respeita ao deslizamento último, apenas se apresentam os resultados para comprimentos colados de 155 mm e 230 mm, uma vez que o ensaio do provete reforçado com a técnica NSM com comprimento colado de 280 mm não foi executado corretamente devido a uma má colocação da cunha e conseqüente rotura do laminado. Com os resultados disponíveis não é possível verificar qual das técnicas apresenta um deslizamento último mais elevado uma vez que para o comprimento colado de 155 mm, a técnica de reforço NSM apresenta valores superiores à técnica de reforço EBR, ao contrário do comprimento colado de 230 mm.

Tabela 4.4 – Valores de força máxima e deslizamento último.

Comprimento colado (Lb) (mm)	F_{max} (kN)			s_{ult} (mm)		
	EBR	NSM	Δ [%]	EBR	NSM	Δ [%]
65	4,72	7,79	65,04	0,288	-	-
80	9,05	9,03	-0,22	0,126	-	-
105	9,05	10,49	15,91	0,214	-	-
125	9,84	12,97	31,81	0,450	-	-
155	11,39	15,19	33,36	0,250	0,690	176,00
230	11,28	15,07	33,60	0,720	0,404	-43,89
280	9,53	10,21	7,14	0,600	0,314	-47,67

4.3.1.2 Comprimento efetivo de ligação

De modo a obter a gama de valores para o comprimento efetivo de ligação, recorreu-se ao método proposto por Juvandes e Barbosa [43] e já descrito no capítulo 2. Relembre-se que Juvandes e Barbosa [43] propuseram adaptações às expressões existentes no *Fib-Bulletin* 14 [35] específicas para a madeira, tendo proposto que para a determinação do comprimento efetivo da ligação CFRP/madeira seja obtido a partir da expressão:

$$L_{t,ef} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{wtm,p}}} \quad (4.3)$$

em que c_2 é um fator obtido por calibração de resultados de ensaios e encontra-se na Tabela 4.5, $f_{wtm,p}$ é o valor da resistência de aderência de arrancamento da madeira pelo ensaio *Pull-Off*, E_f e t_f são o módulo de elasticidade e a espessura do compósito colado, respetivamente.

 Tabela 4.5 – Valores de c_2 propostos por Juvandes e Barbosa [43].

Variável	Técnica	Intervalo admissível	Valor recomendado
c_2	EBR	6 - 12	10
	HNSM	5 - 10	7
	VNSM	7 - 11	10

Assim, para o EBR e NSM no caso em estudo, considerou-se: $E_f = 159000 \text{ MPa}$ e $t_f = 1,4 \text{ mm}$ e $f_{wtm,p} = 2,5 \text{ MPa}$, valor obtido através dos ensaios *Pull-Off* descritos no ponto 3.2.1.3.

Fazendo variar o valor c_2 entre 6 a 12, verifica-se que o método proposto por Juvandes e Barbosa [43] proporciona comprimentos efetivos para o EBR que variam entre os 84 mm e os 118 mm e entre 87 mm e 110 mm no caso do NSM.

Também é possível obter um valor aproximado do comprimento efetivo de ligação pela observação do gráfico força máxima vs. comprimento colado. O comprimento efetivo equivale ao valor de comprimento colado para o qual o valor de força máxima deixa de aumentar com o comprimento colado. Através da observação da Figura 4.50, a qual mostra o gráfico da força vs. comprimento colado para uma curva média de entre os vários ensaios realizados, pode-se afirmar que os comprimentos colados para as duas técnicas é aproximadamente igual a 155 mm. Uma vez que não foram feitos ensaios dentro desta gama de valores não é possível afirmar o valor preciso do comprimento efetivo de ligação. Pela observação dos resultados, as forças máximas atingidas na técnica EBR foram de 9,84 kN, 11,39 kN e 11,28 kN para os comprimentos 125 mm, 155 mm e 230 mm, respetivamente. Isto mostra que entre os comprimentos colados de 155 mm e 230 mm a força não aumentou pelo que, o comprimento efetivo de ligação estará à volta de 155 mm colados.

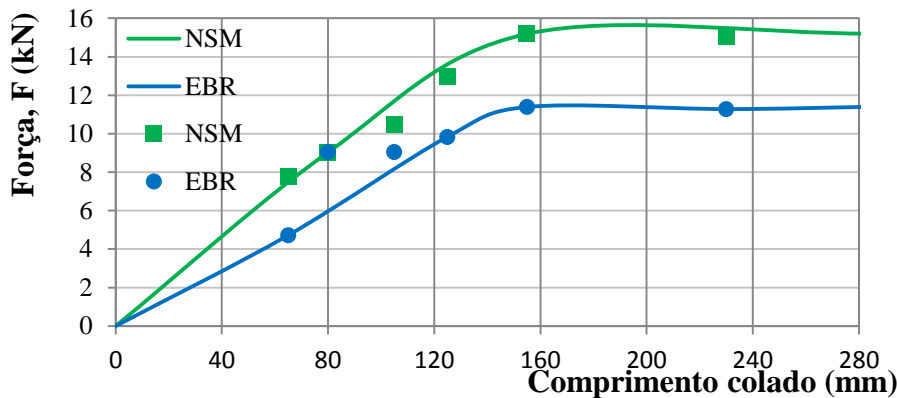


Figura 4.50 – Gráfico Força vs. Comprimento colado para o NSM e EBR.

4.3.2. Modelo proposto para a lei tensão de aderência vs. deslizamento

A curva tensão de aderência vs. deslizamento identifica o comportamento local da interface entre o compósito e o substrato. Esta curva pode ser determinada através de ensaios experimentais conforme já se fez referência anteriormente. Com base nos resultados experimentais (sub secção 4.2.2.3) propõe-se um modelo que representa o comportamento local da ligação CFRP/madeira.

Assim, com base nos resultados experimentais dos ensaios de corte simples realizados, uma lei tensão de aderência vs. deslizamento do tipo tri-linear é proposta. De acordo com este modelo a tensão de aderência aumenta linearmente até se atingir a tensão de aderência máxima ($\tau_{\text{máx}}$). Para esse ponto de tensão de aderência máxima o deslizamento correspondente é s_1 . Depois disso, a tensão de aderência diminui com o aumento do deslizamento e cuja denominação internacional é reconhecida como *softening*, em que a tensão de aderência decresce linearmente até um deslizamento s_2 e tensão de aderência τ_2 . Por fim, entre o deslizamento s_2 e s_3 a tensão de aderência mantém-se constante. A partir do deslizamento s_3 a ligação CFRP/madeira rompe e deixa de haver qualquer transferência de tensões

entre a madeira e o CFRP. Este modelo, entretanto proposto em [11], é descrito matematicamente de acordo com a expressão:

$$\tau(s) = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} \cdot s & se \quad 0 \leq s \leq s_1 \\ \frac{\tau_2 - \tau_1}{s_2 - s_1} \cdot s + \frac{\tau_1 \cdot s_2 - \tau_2 \cdot s_1}{s_2 - s_1} & se \quad s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_2 & se \quad s_2 \leq s \leq s_3 \\ 0 & se \quad s > s_3 \end{cases} \quad (4.4)$$

Apresenta-se na Figura 4.51 o modelo teórico obtido através dos resultados dos 3 comprimentos colados superiores (280, 230 e 155 mm), e tem as seguintes características de tensão, deslizamento e energia de fratura:

- $\tau_1 = \tau_{\text{máx}} = 12,68 \text{ MPa}$; $s_1 = s_{\text{max}} = 0,162 \text{ mm}$;
- $\tau_2 = 2,10 \text{ MPa}$; $s_2 = 0,35 \text{ mm}$;
- $\tau_3 = 2,10 \text{ MPa}$; $s_3 = s_{\text{ult}} = 0,66 \text{ mm}$;
- $G_f = 3,07 \text{ N/mm}$

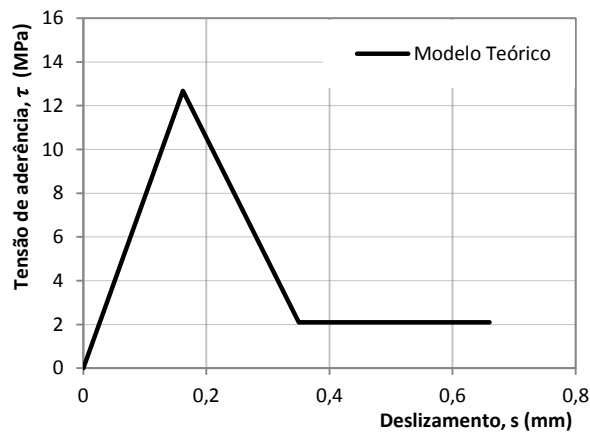


Figura 4.51 – Curva Bond-Slip teórica [11].

Nas Figuras 4.52 a 4.59 faz-se a sobreposição do modelo tensão de aderência vs. deslizamento teórico com os dados obtidos em todos os ensaios realizados para a técnica EBR. Tal como esperado, uma vez que a curva teórica foi obtida a partir destes ensaios, para os W_EBR_Lb280_02 e W_EBR_Lb230_01, a curva aproxima-se bastante das obtidas pelos extensómetros, sendo que no de 230 mm o valor máximo da tensão de aderência é um pouco superior ao teórico. Calculou-se o erro médio quadrático entre a curva teórica e os resultados obtidos para o ponto entre Extensómetros 1 e 2, sendo que se obteve $1,67 \text{ MPa}^2$ e $2,53 \text{ MPa}^2$ para o comprimento colado de 280 mm e 230 mm, respetivamente. Este valor é muito pequeno, pelo que a curva teórica se aproxima bastante à experimental.

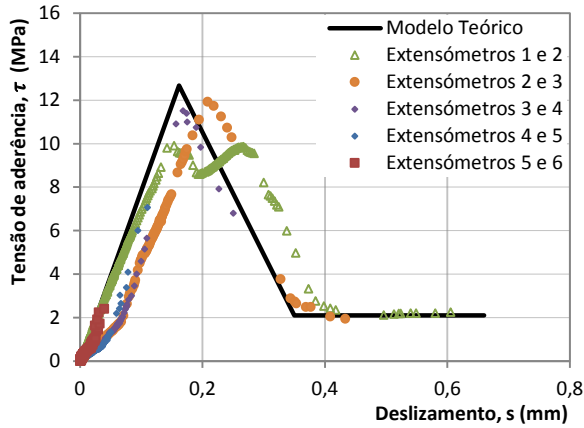


Figura 4.52 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb280_02.

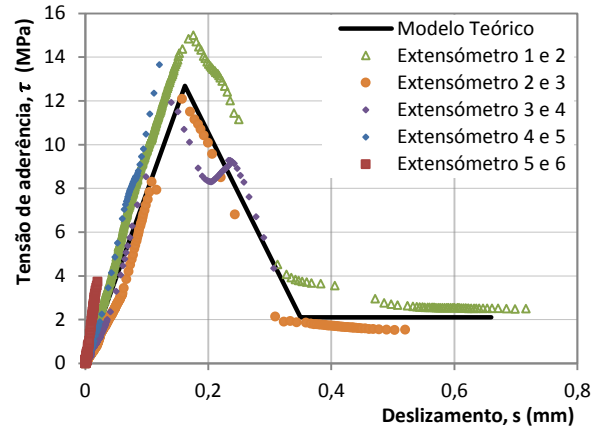


Figura 4.53 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb230_01.

Para o ensaio W_EBR_Lb155_01 a curva aproxima-se até ao valor máximo da tensão de aderência, com o provete a atingir a rotura perto deste valor. Para o ensaio W_EBR_Lb125_02 os valores teóricos e experimentais são bastante próximos, com a tensão de aderência máxima atingida a apresentar valores ligeiramente inferiores aos teóricos. O erro obtido foi de 2,46 MPa² e 1,59 MPa² para o comprimento colado de 155 mm e 125 mm, respetivamente. Este valor é muito pequeno, pelo que a curva teórica se aproxima bastante à experimental.

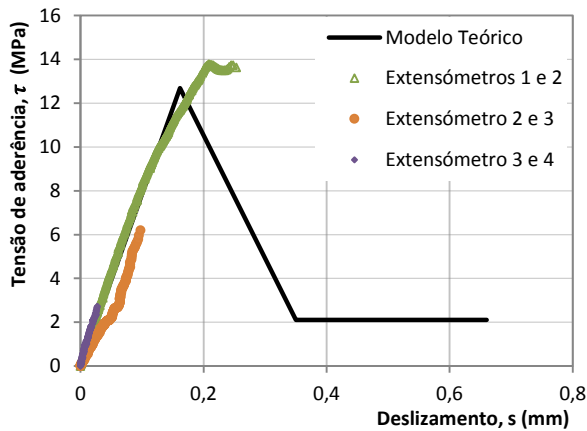


Figura 4.54 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb155_01.

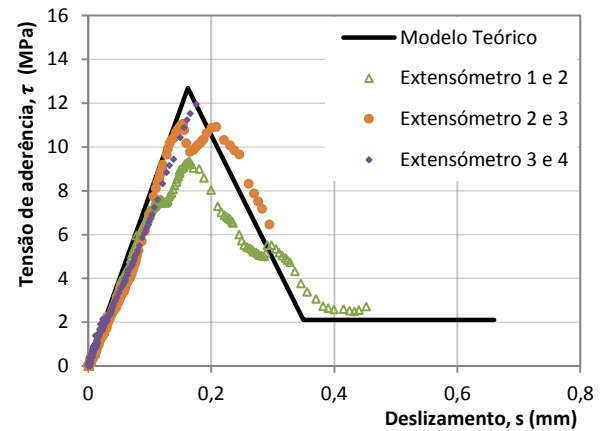


Figura 4.55 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb125_02.

Para os ensaios W_EBR_Lb105_01, W_EBR_Lb80_01 e W_EBR_Lb65_02 obtiveram-se valores teóricos próximos dos experimentais ao contrário do ensaio W_EBR_Lb65_01 em que a curva já não se aproxima da experimental, sendo que todos estes ensaios já apresentam o comprimento colado abaixo do comprimento efetivo de colagem. O erro obtido foi de 4,36 MPa² e 3,38 MPa² e 0,52 MPa² para os comprimentos colados de 105 mm, 80 mm e 65 mm (W_EBR_Lb65_02), respetivamente. Este valor é muito pequeno, pelo que a curva teórica se aproxima bastante à experimental. Para a amostra W_EBR_Lb65_01 o erro obtido foi de 12,50 MPa² pelo que se demonstra longe da curva teórica.

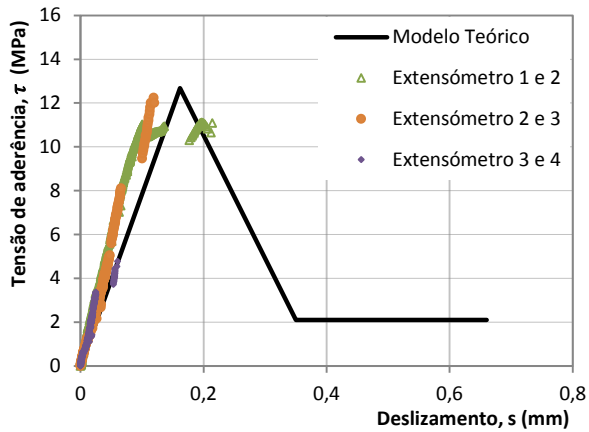


Figura 4.56 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb105_01.

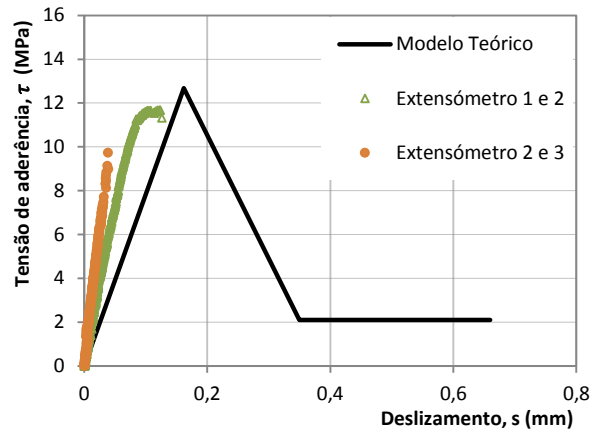


Figura 4.57 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb80_01.

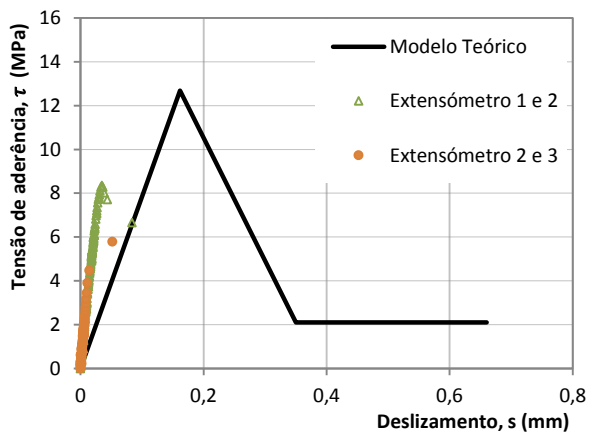


Figura 4.58 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb65_01.

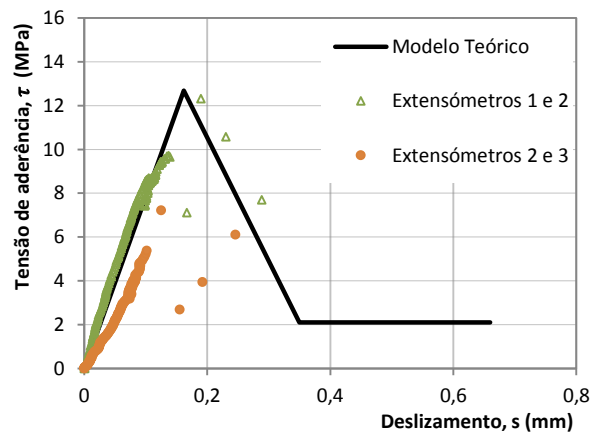


Figura 4.59 – Curva Bond - Slip teórica e prática W_EBR_Lb65_02.

Conclui-se que a curva teórica obtida através dos 3 ensaios com comprimentos maiores (acima do comprimento efetivo de ligação), aproxima-se dos valores experimentais para todos os comprimentos em geral.

Para uma melhor percepção do comportamento entre o compósito e o substrato foram identificados vários pontos chave na curva bond slip teórica ao longo do comprimento colado, nomeadamente:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=0$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação;
- (iv) Ponto D: fase em que a tensão de aderência estabiliza num patamar.

A Figura 4.60 mostra a curva teórica com os pontos chave marcados para os ensaios W_EBR_Lb280_02, W_EBR_Lb230_01, W_EBR_Lb155_01 e W_EBR_Lb125_02.

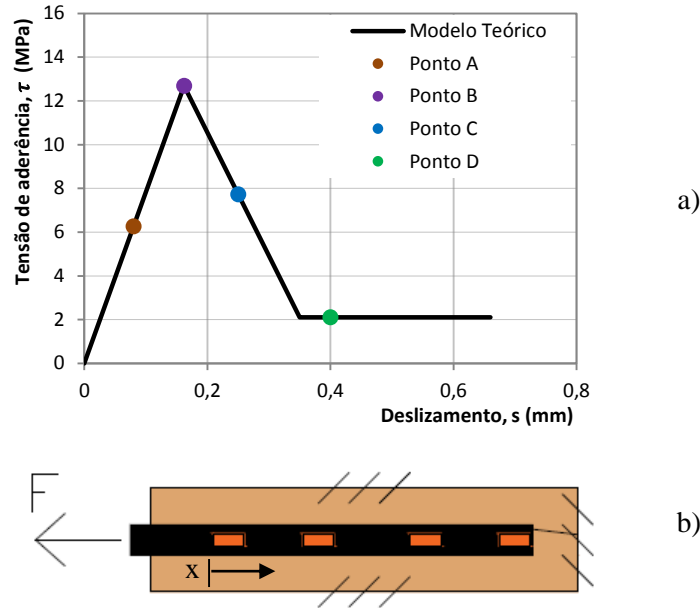


Figura 4.60 – a) Curva Bond – Slip teórica e pontos chave; b) Provete tipo.

Na Figura 4.61 apresentam-se os gráficos da distribuição de extensões e deslizamento ao longo do comprimento colado e as tensões de aderência na interface entre o FRP e o substrato ao longo do comprimento colado para o ensaio W_EBR_Lb280_02. Através destas figuras verifica-se que junto da extremidade livre ($x= 280$ mm) os valores de extensão e de deslizamento são nulos. Observa-se que o valor das extensões e dos deslizamentos da interface CFRP/madeira vão aumentando, sendo os pontos A e D os pontos cujos valores são mínimos e máximos, respetivamente. Na Figura 4.61c) observa-se que a tensão de aderência para os pontos A, B e C é superior entre o extensómetro 1 e 2 junto da extremidade carregada ($x= 0$), enquanto no ponto D a tensão de aderência máxima encontra-se no intervalo entre os extensómetros 2 e 3, o que quer dizer que a tensão de aderência está a ser transferida para a extremidade livre do laminado de CFRP.

A Figura 4.62 apresenta os gráficos da distribuição de extensões e deslizamento ao longo do comprimento colado e as tensões de aderência na interface entre o CFRP e o substrato ao longo do comprimento colado para o ensaio W_EBR_Lb230_01. Tal como no ensaio anterior, verifica-se que junto da extremidade livre ($x= 230$ mm) os valores de extensão e deslizamento são nulos. Por outro lado, na extremidade carregada ($x=0$) observa-se que o valor das extensões e dos deslizamentos vão aumentando, sendo que os pontos A e D representam os valores mínimos e máximos, respetivamente. Na Figura 4.62c) observa-se que a tensão de aderência para os pontos A e B é superior entre o extensómetro 1 e 2, junto da extremidade carregada ($x= 0$), enquanto no ponto C já se começa a notar que a tensão de aderência está a ser transferida para a extremidade livre do laminado de CFRP, confirmado no ponto D.

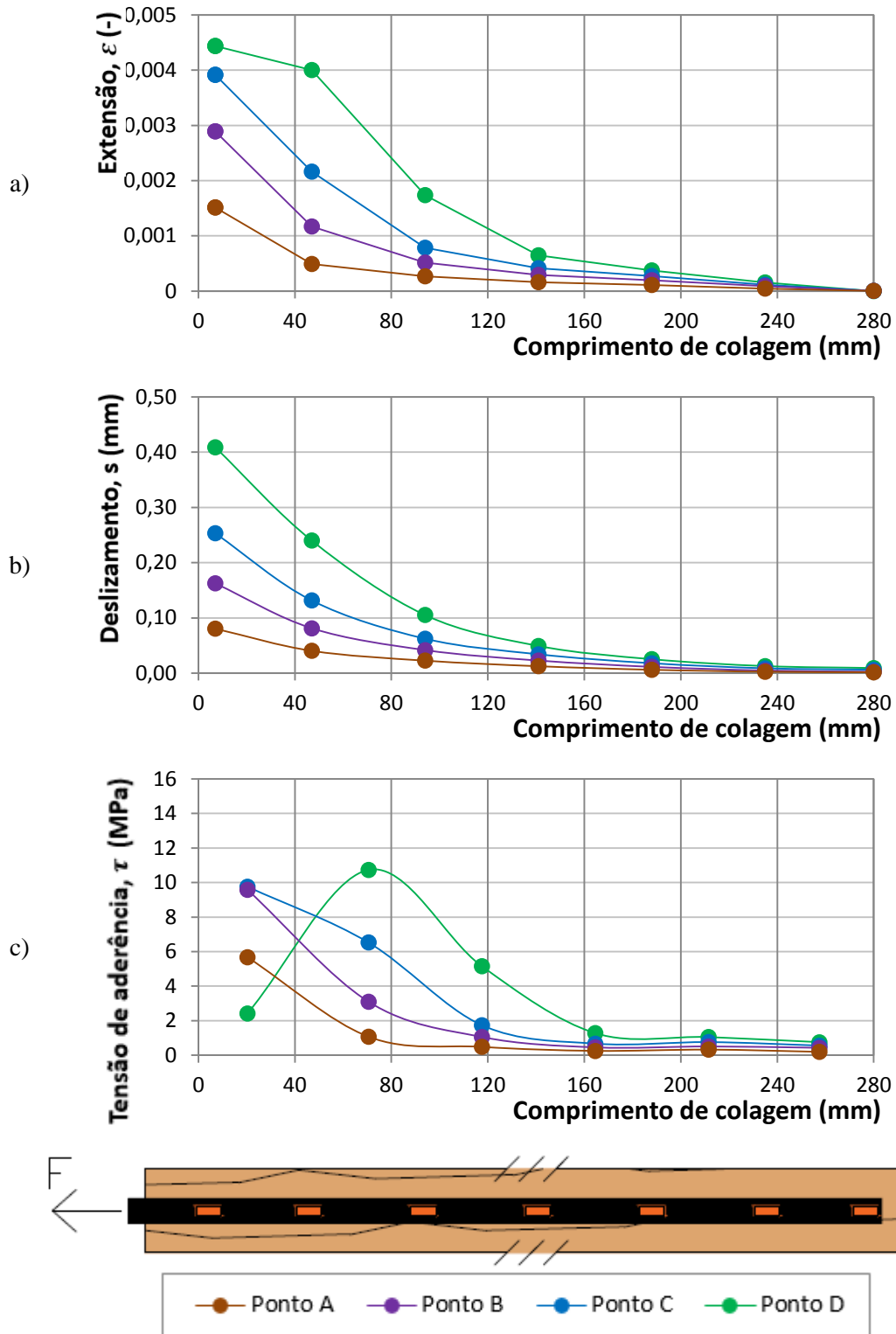


Figura 4.61 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 280 mm.

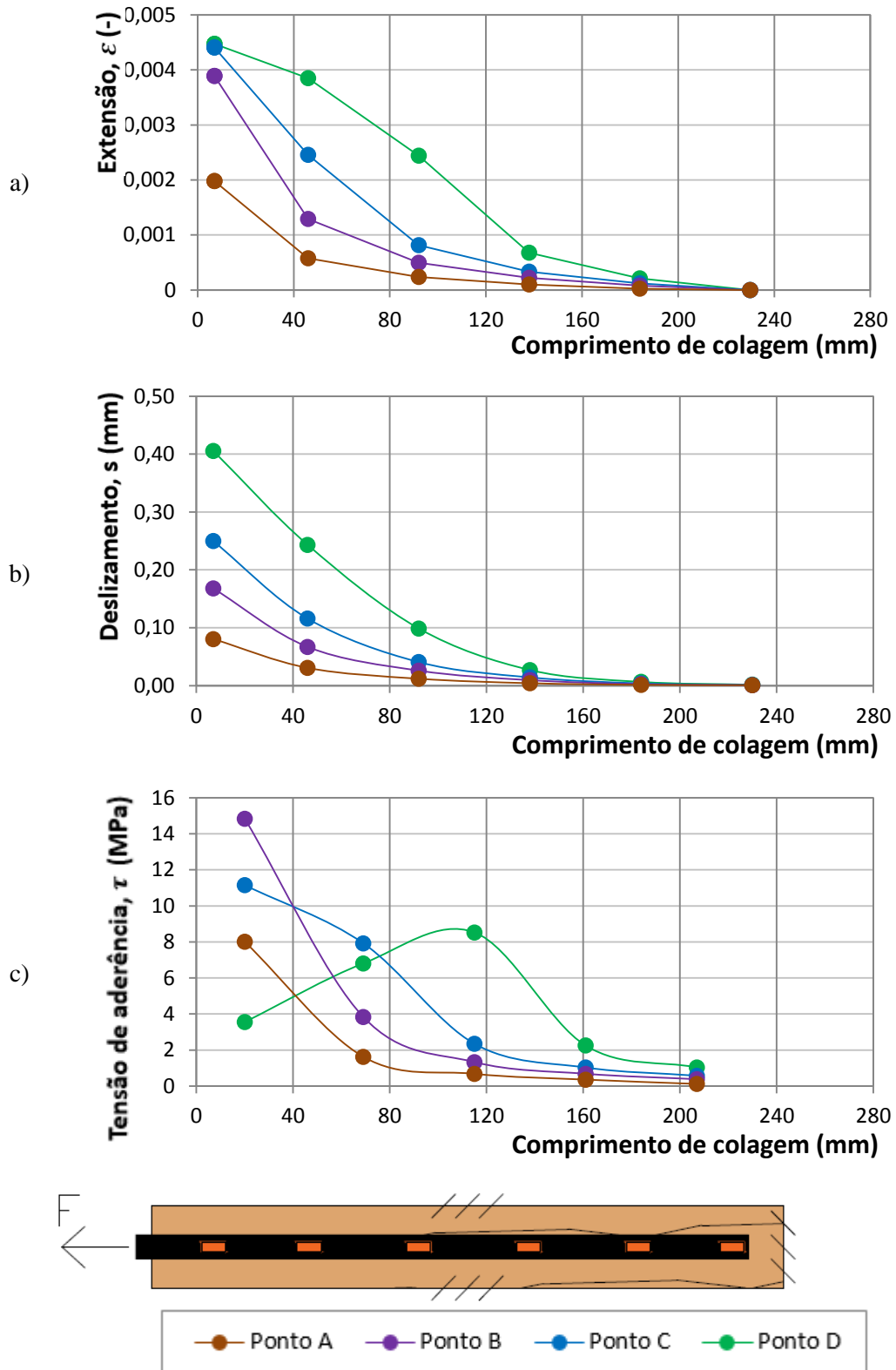


Figura 4.62 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 230 mm.

A Figura 4.63 apresenta os gráficos da distribuição de extensões e deslizamento ao longo do comprimento colado e as tensões de aderência na interface entre o FRP e o substrato ao longo do comprimento colado para o ensaio W_EBR_Lb155_01. Tal como nos ensaios anteriores, verifica-se que junto da extremidade livre ($x= 155$ mm) os valores de extensão são nulos. Observa-se que o valor das extensões e dos deslizamentos junto da extremidade carregada ($x= 0$) vão aumentando, sendo que os pontos A e C têm os valores mínimos e máximos, respetivamente.

É de salientar que este ensaio não chegou a atingir o deslocamento do ponto D, observando-se na Figura 4.63c) que a tensão de aderência é sempre superior na extremidade carregada, ao contrário do que se verificou nos outros ensaios.

A Figura 4.64 apresenta os gráficos da distribuição de extensões e deslizamento ao longo do comprimento colado e as tensões de aderência na interface entre o FRP e o substrato ao longo do comprimento colado para o ensaio W_EBR_Lb125_02. Ao contrário dos ensaios anteriores, verifica-se que junto da extremidade livre ($x= 125$ mm) os valores de extensão e de deslizamento não são nulos, o que indica que durante o ensaio, todo o provete sofreu deslizamento entre o FRP e o substrato, concluindo-se que este comprimento está abaixo do comprimento efetivo de ligação.

Observa-se que os valores das extensões e dos deslizamentos na extremidade carregada ($x= 0$) vão aumentando, sendo que os pontos A e D correspondem aos valores mínimos e máximos, respetivamente.

A Figura 4.64c) mostra que a tensão de aderência nos pontos A e B, entre os extensómetros 1 e 2, é mais elevada junto da extremidade carregada ($x= 0$), enquanto no ponto C já se começa a notar que a tensão de aderência está a ser transferida para a extremidade livre do laminado de CFRP, o que se confirma no ponto D.

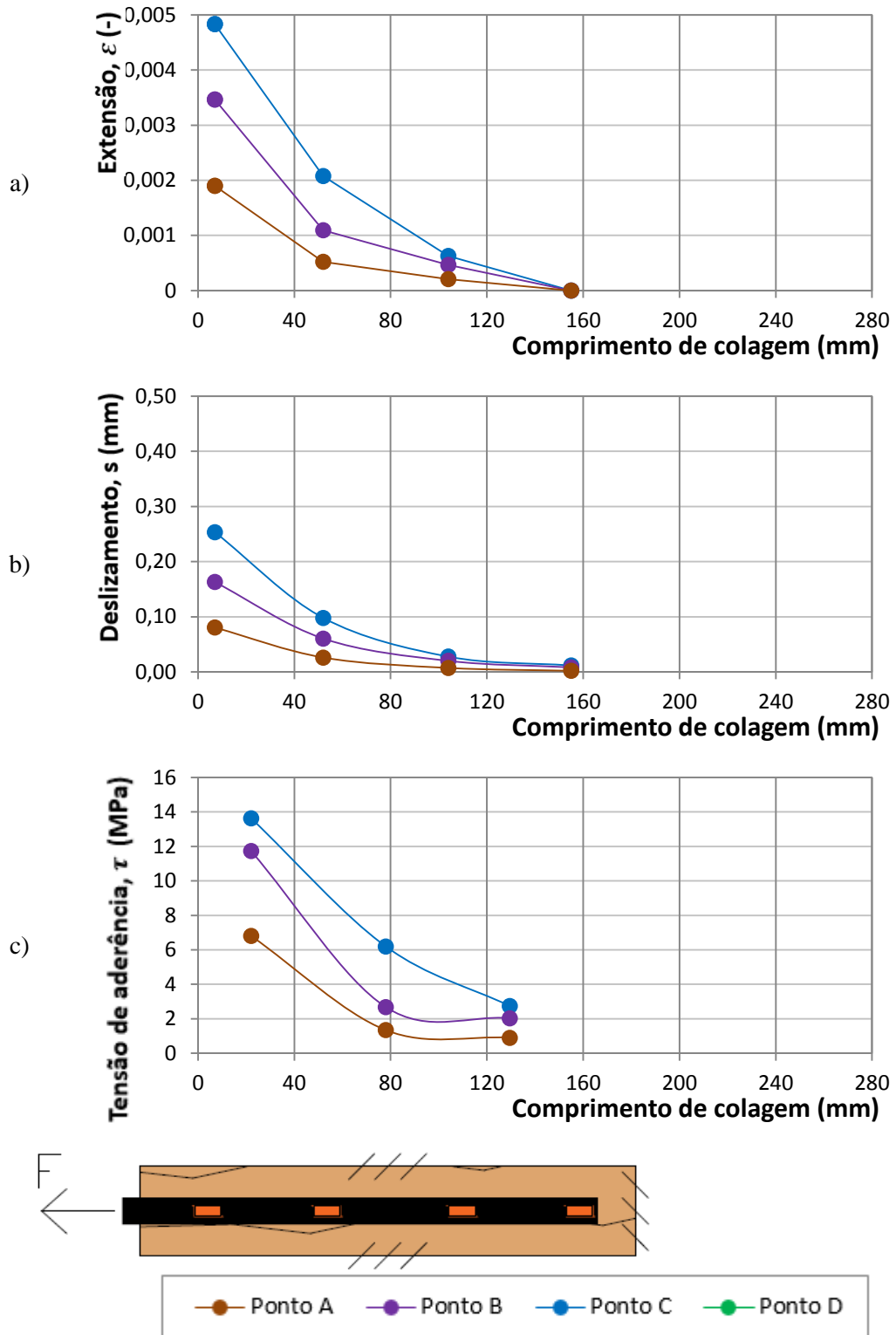


Figura 4.63 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 155 mm.

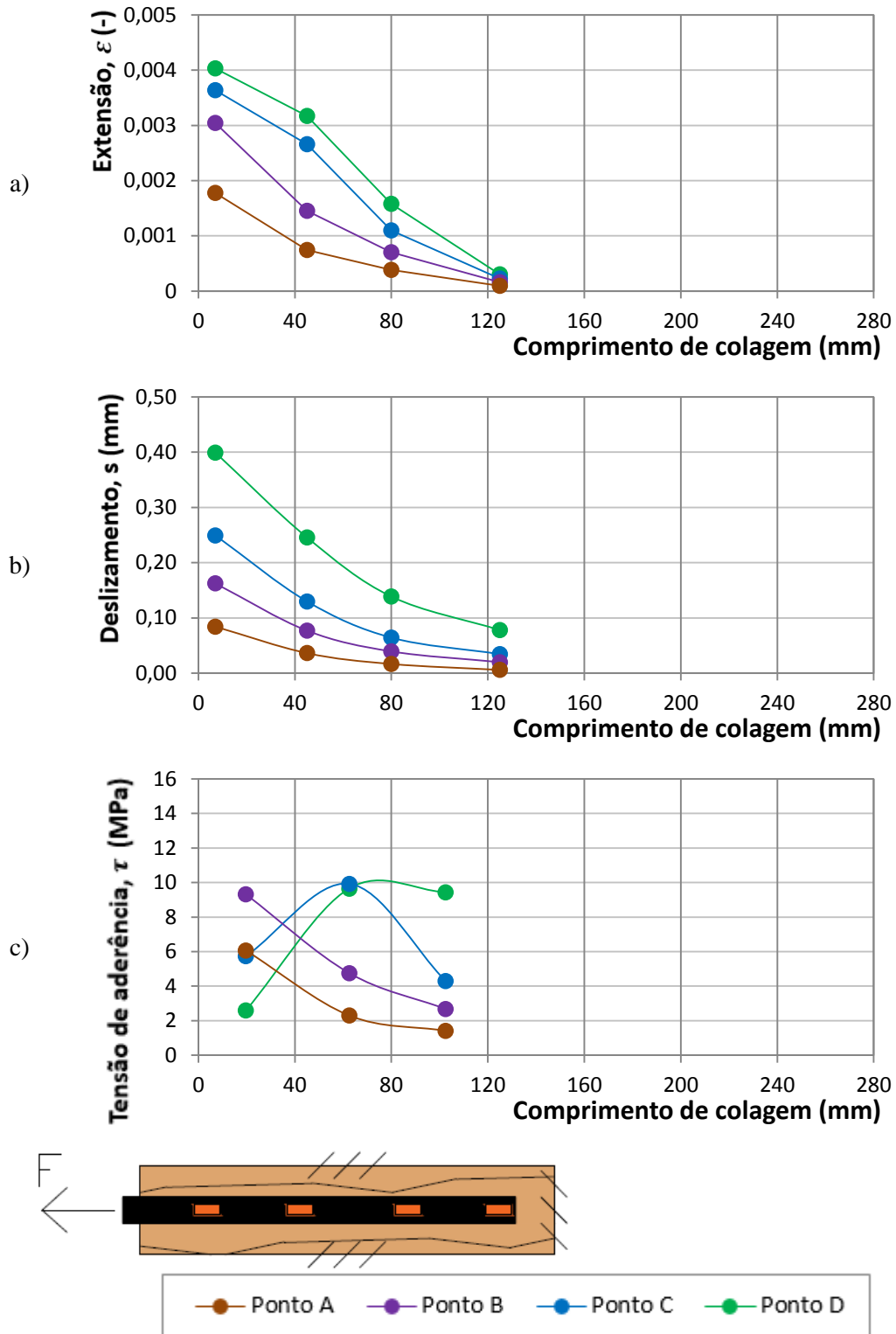


Figura 4.64 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 125 mm.

Para os ensaios W_EBR_Lb105_01, W_EBR_Lb80_01 e W_EBR_Lb65_02 verificou-se a necessidade de rever os pontos chave, uma vez que nestes ensaios os valores de deslizamento último são inferiores aos dos comprimentos superiores. Por conseguinte, escolheram-se dois pontos antes de se atingir a

tensão de aderência máxima e dois na fase em que parte da ligação perde aderência, como mostra a Figura 4.65.

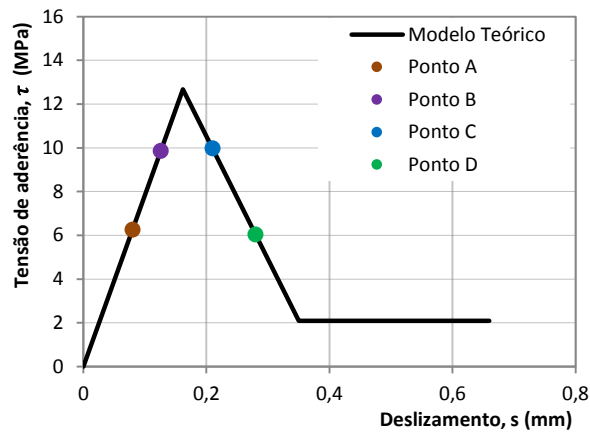


Figura 4.65 – Curva Bond – Slip teórica e pontos chave.

A Figura 4.66 apresenta os gráficos da distribuição de extensões e deslizamento ao longo do comprimento colado e as tensões de aderência na interface entre o CFRP e o substrato ao longo do comprimento colado para o ensaio W_EBR_Lb105_01. Tal como no ensaio anterior, verifica-se que junto da extremidade livre ($x= 125$ mm) os valores de deslizamento não são nulos, o que indica que durante o ensaio, todo o provete sofreu deslizamento entre o FRP e o substrato. O valor da extensão foi nulo. Observa-se que os valores das extensões e dos deslizamentos na extremidade carregada ($x= 0$) vão aumentando, com os pontos A e C a representarem os valores mínimos e máximos, respetivamente.

A Figura 4.66c) mostra que a tensão de aderência para os pontos A e B é superior entre os extensómetros 1 e 2, junto da extremidade carregada ($x= 0$), enquanto no ponto C já se começa a notar que a tensão de aderência está a ser transferida para a extremidade livre do laminado de CFRP.

As Figuras 4.68 e 4.69 apresentam os gráficos da distribuição de extensões e deslizamento ao longo do comprimento colado e as tensões de aderência na interface entre o FRP e o substrato ao longo do comprimento colado para os ensaios W_EBR_Lb80_01 e W_EBR_Lb65_02. Estes gráficos apresentam o mesmo comportamento que o ensaio W_EBR_Lb105_01, exceto na Figura 4.68c) onde as tensões de aderência estão desordenadas, talvez por algum erro durante o ensaio.

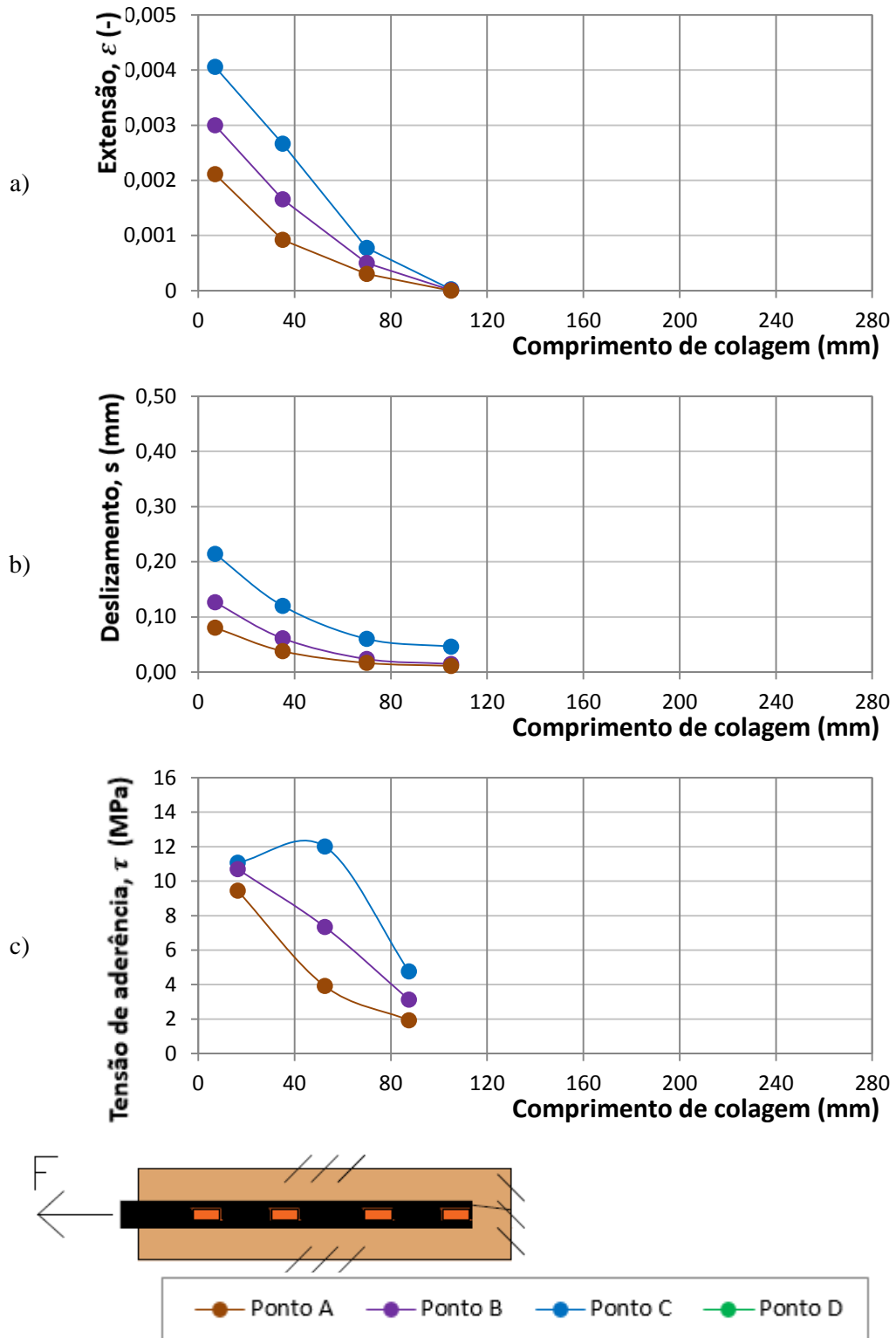


Figura 4.66 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 105 mm.

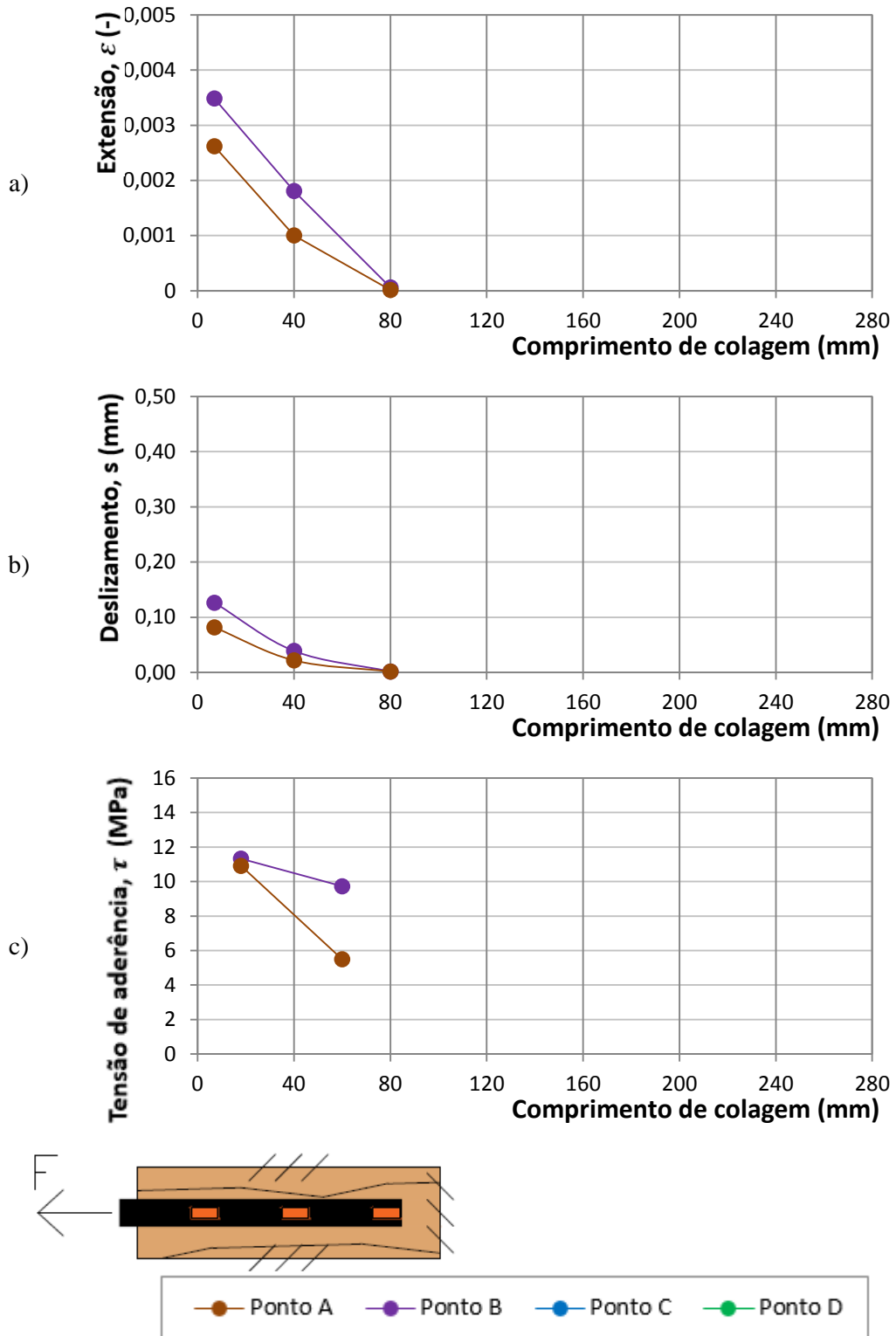


Figura 4.67 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 80 mm.

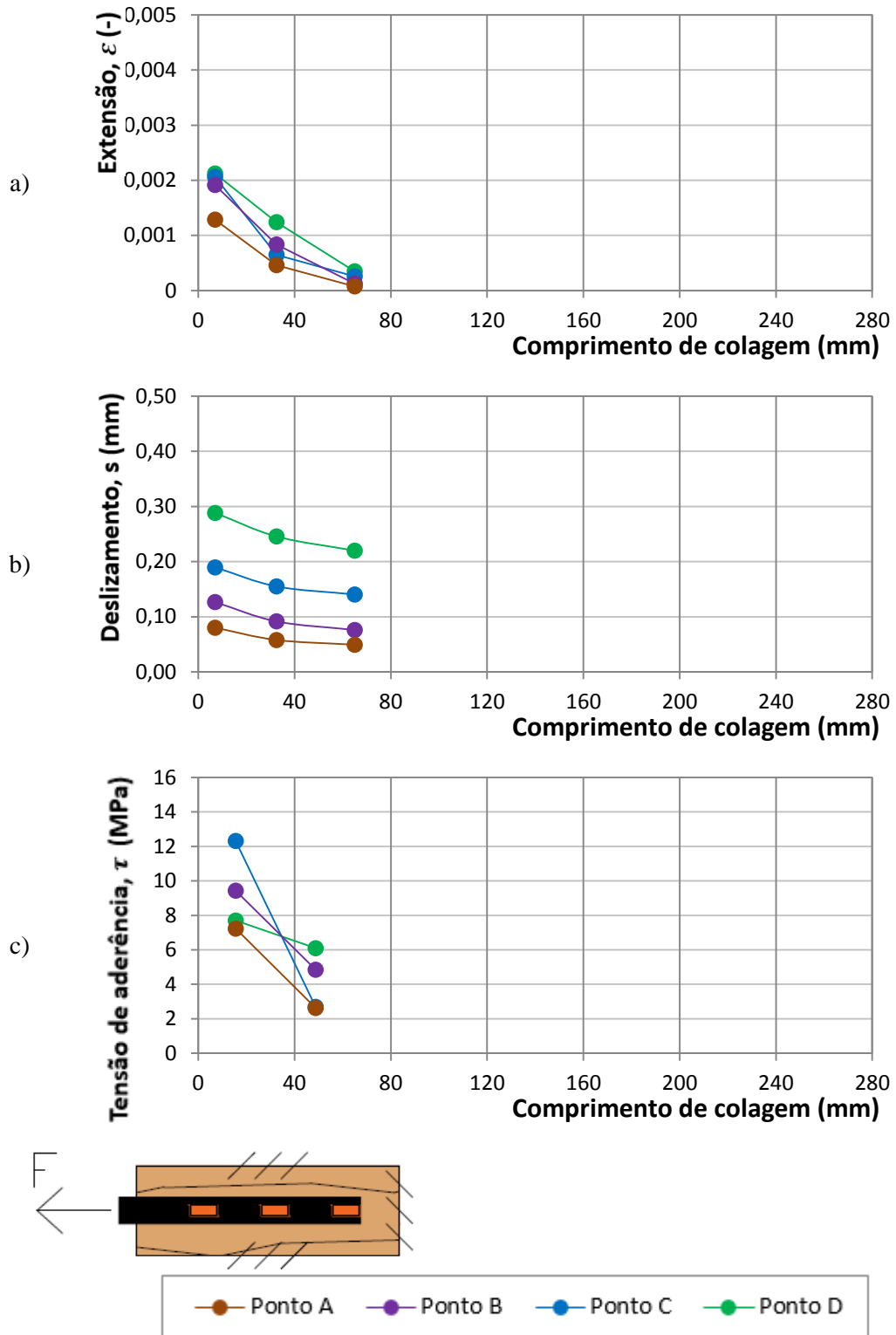


Figura 4.68 – a) Extensões, b) Deslizamento no FRP e c) Tensões de Aderência na interface ao longo do comprimento colado de 65 mm.

Capítulo 5

Ensaio de Flexão dos Pavimentos de Madeira

5.1. Programa Experimental

5.1.1. Considerações Gerais

A madeira quando é reforçada com materiais compósitos, tais como o de CFRP, obtém uma melhoria das suas características mecânicas, como a rigidez e a resistência. Um dos objetivos deste trabalho consistiu em quantificar o incremento de resistência à flexão e ao corte proporcionado pelo uso de compósitos de CFRP, testando-se duas técnicas diferentes de reforço.

Para tal, foram ensaiados três sistemas diferentes, compostos por conjuntos de duas vigas com pavimento – um dos sistemas foi utilizado como referência, sem aplicação de reforço; o segundo foi reforçado com a técnica EBR usual e o terceiro com uma nova técnica em desenvolvimento no DEC da FCT, em que o compósito de CFRP é ancorado nas extremidades. Daqui para a frente denominar-se-á esta técnica de EBRA (*Externally Bonded Reinforcement Anchorage*). Os ensaios foram monotónicos e levados até à rotura de uma das vigas de cada sistema, estudando-se o seu comportamento através de valores medidos por transdutores de deslocamento (LVDT) e extensómetros.

O presente capítulo contém a descrição dos modelos de ensaio e sua instrumentação, do tipo de reforço utilizado e todos os respetivos procedimentos. Apresenta-se também a análise dos resultados experimentais.

5.1.2. Descrição dos modelos de ensaio

Os ensaios do presente trabalho foram executados no departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Utilizou-se um sistema composto por duas vigas ligadas através de tábuas de pavimento de madeira com o intuito de reproduzir o sistema que existia no edifício de onde a madeira foi retirada, tendo sido possível obter 3 conjuntos de 2 vigas com pavimento completos, denominados como “pavimento de madeira” ou “pavimento” daqui em diante.

Os sistemas apresentavam 318 cm de comprimento, altura variável (devido ao facto de as vigas de madeira virem de obra e terem sido ensaiadas com a sua configuração original), distância entre vigas de 43,5 cm, e tábuas de pavimento com altura de 1 cm e comprimento de 74 cm, tal como mostra a Figura 5.1. As restantes características variam entre cada pavimento de madeira e estão sintetizadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Características das vigas de cada pavimento de madeira.

Pavimento de madeira	Viga	Altura (cm)	Largura (cm)	Técnica de Reforço
PM1	V1	17,0	9,5	-
	V2	17,5	7,5	
PM2	V3	16,0	9,5	EBR
	V4	16,0	10,5	
PM3	V5	16,0	9,5	EBRA
	V6	17,5	7,5	



Figura 5.1 – Exemplo de um pavimento de madeira.

Todos os pavimentos de madeira estão identificados: o pavimento PM1 é o de referência e é composto pelas vigas V1 e V2; o pavimento PM2 é reforçado com laminados de CFRP através da técnica EBR e é composto pelas vigas V3 e V4; o pavimento PM3 é reforçado com laminados de CFRP através da técnica EBRA e é composto pelas vigas V5 e V6.

5.1.3. Preparação dos Pavimentos de Madeira

Embora cada pavimento seja uma reprodução do existente em obra (Figura 5.2a), as vigas e tábuas de madeira foram cedidas em separado devido a questão de transporte. Para preparar cada viga, procedeu-se ao seu alisamento através de uma lixadeira mecânica, garantindo-se assim que as superfícies ficavam livres de qualquer resíduo ou pó. Nas superfícies superior e inferior retiraram-se os pregos existentes de forma a pregar as tábuas e aplicar o reforço com maior eficácia. De seguida preencheram-se os nós existentes com a resina Sikadur 52 injection [65], recorrendo-se à adição de 10 % do peso da resina em serradura, de modo a dar consistência à mistura (Figura 5.2b). Colocaram-se as vigas à distância correta em tripés e pregaram-se as tábuas de pavimento (Figura 5.2c e d).



Figura 5.2 – a) Vigas em obra; b) Preenchimento dos nós; c) e d) Pregagem das tábuas.

5.1.4. Aplicação do reforço

Como referido, para os ensaios de flexão foram aplicadas duas técnicas de reforço através de laminados de fibra de carbono (CFRP) - EBR e EBRA.

5.1.4.1 Reforço com técnica EBR

O principal objetivo deste tipo de reforço é o melhoramento do comportamento das vigas de madeira à flexão, que aparece como um problema muito usual em estruturas antigas.

Para a aplicação do reforço optou-se por colocar as 2 fibras de CFRP ao longo de toda a extensão das vigas, até perto dos apoios. Embora, teoricamente, apenas seja necessário reforçar a zona tracionada (centro da viga), o CFRP pode também ajudar a evitar a rotura por corte. Na Figura 5.3 apresenta-se o esquema da viga reforçada pela técnica EBR.

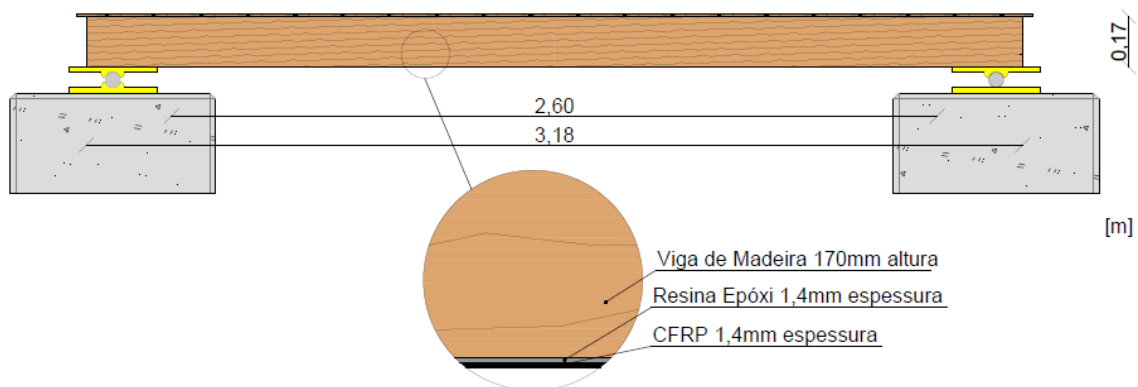


Figura 5.3 - Esquema de viga reforçada através da técnica EBR.

Definida a extensão do laminado, seguiu-se com a preparação da superfície das vigas, retirando alguns pregos existentes e passando com a lixadeira mecânica com um disco específico para alisar (Figura 5.4) com o intuito de evitar qualquer falha na madeira e torná-la lisa. De seguida utilizou-se uma lixa mecânica de forma a tornar a superfície mais rugosa e, assim, melhorar a aderência. Retiraram-se as poeiras com recurso ao jato de ar, de maneira a que a aderência entre o CFRP e a madeira fosse mais eficiente.



Figura 5.4 – Viga a ser alisada com recurso à lixadeira mecânica e aspeto após alisamento.

Uma vez que o laminado não preenche a totalidade da largura das vigas, optou-se por dividir a viga em 3 e aplicar um laminado a 1/3 e outro a 2/3 da largura, tal como mostra a Figura 5.5.

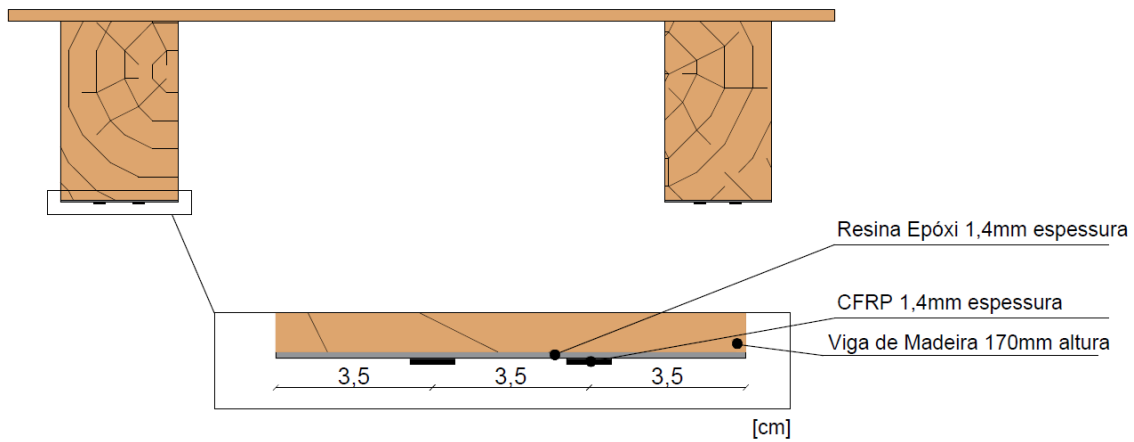


Figura 5.5 – Alçado do ensaio com a técnica EBR.

Procedeu-se ao corte do laminado com a medida correta com recurso a uma rebarbadora, de modo a não afetar as fibras, seguindo-se de uma limpeza do mesmo com acetona (Figura 5.6a). Fez-se a resina na medida certa (ver capítulo 3) e aplicou-se em toda a superfície inferior da viga (Figura 5.6b), colocando os 2 laminados nas marcas previamente feitas, garantindo que estes ficassem paralelos às superfícies das vigas. Após a colocação dos laminados, forraram-se algumas tábuas de madeira com papel antiaderente e com recurso a grampos prenderam-se estas na face da viga para garantir a ligação do laminado à resina (Figura 5.6c). Retirou-se após 7 dias, quando se começou a instrumentar o CFRP com extensómetros (descrito no ponto 5.1.6.2). Tentou-se garantir uma espessura de resina de 1,4 mm optando pelo mesmo processo definido no Capítulo 4. No final o pavimento ficou como se mostra na Figura 5.7.

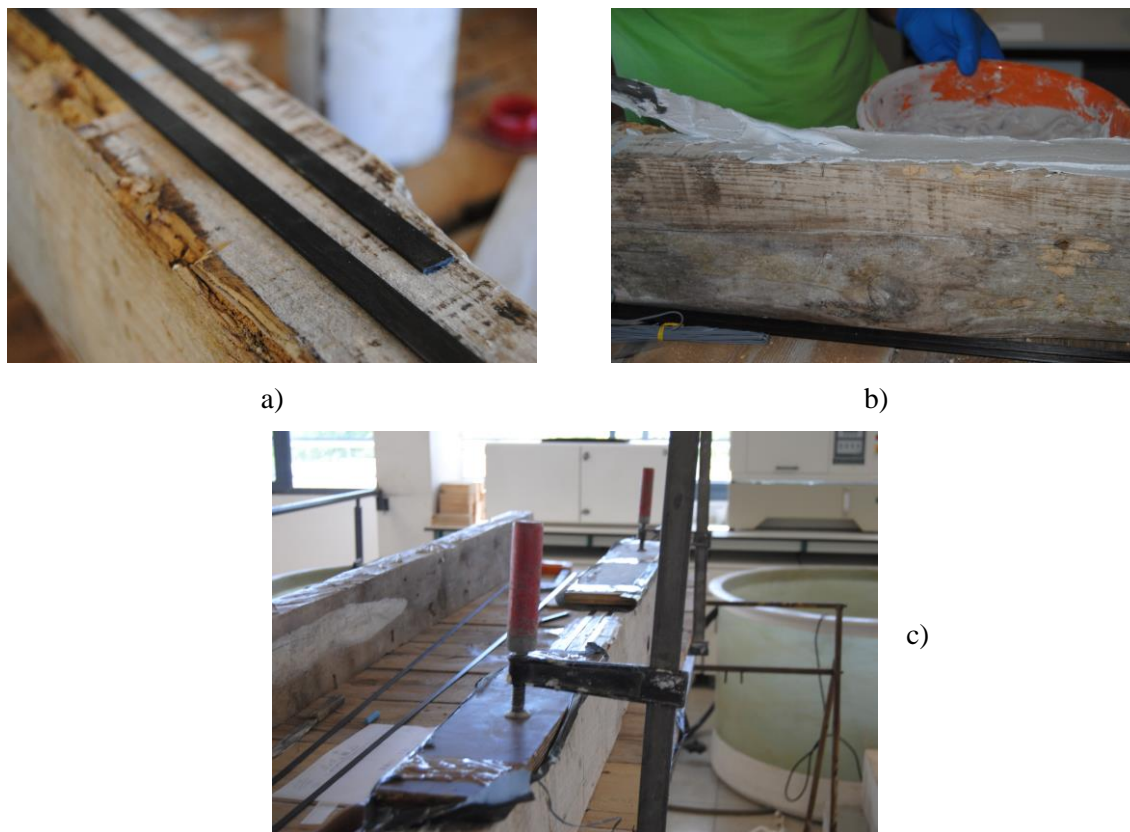


Figura 5.6 – a) CFRP cortado; b) Colocação da Resina; c) Colocação dos grampos para aderência do CFRP.



Figura 5.7 – Aspeto final da viga reforçada através de EBR.

5.1.4.2 Reforço com técnica EBRA

A técnica EBRA acaba por ser uma evolução da técnica EBR, uma vez que com esta se tenta eliminar o descolamento prematuro do CFRP, frequente nos ensaios com a técnica EBR. A técnica EBRA consiste em ancorar os cantos do CFRP, de forma a obter o rendimento máximo do reforço.

Para a ancoragem do CFRP foi necessário perfurar a viga, fazendo um furo inclinado longe da zona tracionada (centro da viga), onde se colocou o laminado com a mesma resina que na restante zona da viga.

Um dos aspetos mais importantes neste tipo de reforço está relacionado com a colocação do laminado nos furos previamente efetuados. É necessário fazer um furo com um raio de entrada (como se pode ver nas Figura 5.8 a 5.10), evitando a criação de arestas vivas ou farpas (Figura 5.10). Este aspeto é bastante importante porque qualquer imperfeição que exista nessa zona pode levar a uma quebra das fibras do laminado e conseqüentemente ao rompimento ou descolamento do mesmo.

É importante referir que no presente trabalho utilizou-se o laminado de 20 mm (1 laminado) em vez de 2 laminados de 10 mm.

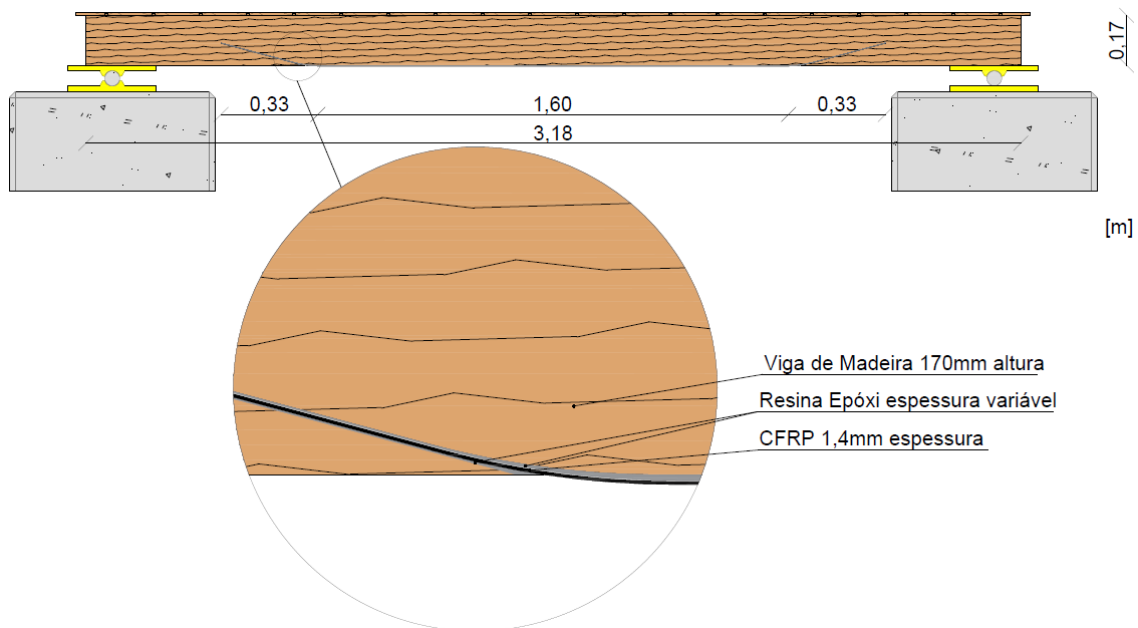


Figura 5.8 - Esquema de viga reforçada através da técnica EBRA.

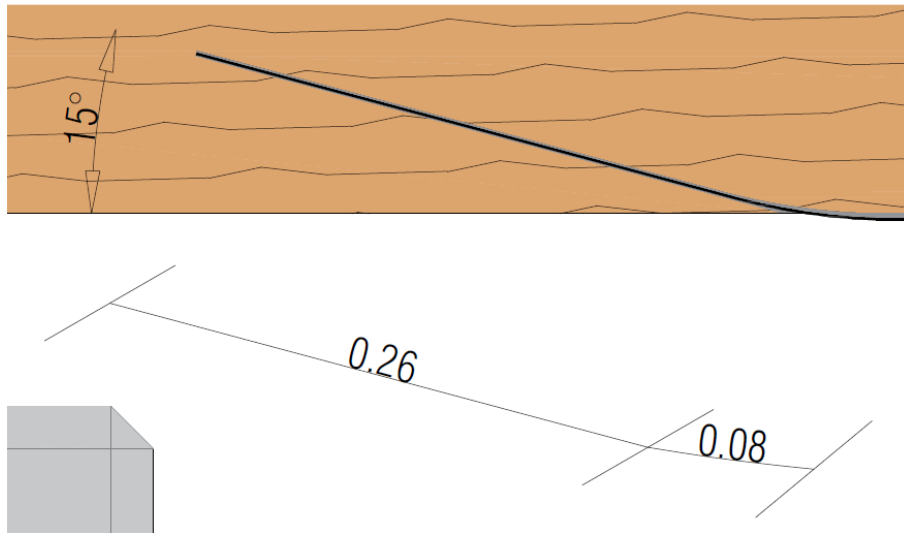


Figura 5.9 – Ângulos (em graus) e comprimentos (em metros) zona amarrada.

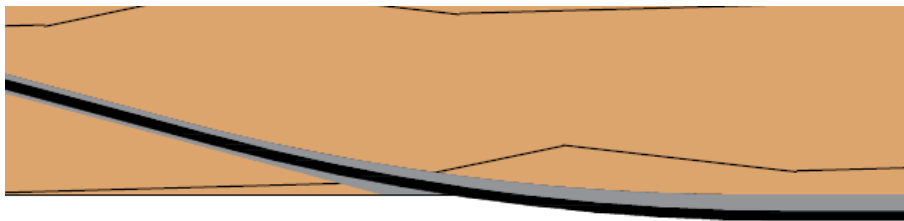


Figura 5.10 – Pormenor ângulo de entrada do CFRP.

Antes da aplicação do reforço procedeu-se ao alisamento da superfície (Figura 5.4), retirando os pregos existentes e passando a lixadeira mecânica. Criou-se alguma rugosidade na superfície com recurso a lixa mecânica. Eliminaram-se as poeiras com recurso ao jato de ar, cortou-se o laminado à medida previamente estabelecida com recurso à rebarbadora e limpou-se o mesmo com acetona. De seguida efetuaram-se os furos na viga com recurso a um berbequim com broca de madeira de 24 mm, recorrendo a uma ferramenta capaz de garantir o ângulo de furagem (Figura 5.11).



Figura 5.11 – Perfuração da viga com broca de madeira.

Em resultado da análise bibliográfica efetuada, optou-se por fazer um único furo em cada lado da viga de maneira a quebrar o mínimo de fibras possível à madeira e garantir assim a continuidade da sua resistência. Esta foi a razão do uso do laminado de 20 mm em vez de 10 mm. De salientar que outra das técnicas existentes é desfasar os furos na viga, o que permitiria a utilização de duas fibras de 10 mm.

Para a furação, a opção passou também por colocar o furo à distância de duas vezes a altura da viga (neste caso 16 cm) - 32 cm - onde já não existem forças de tração, mas sim de corte, acabando o CFRP por contribuir para a resistência ao corte. O furo foi feito com o menor ângulo possível - aproximadamente 15 ° e foi feito com 30 cm de comprimento.

Limpou-se o furo com recurso a um tubo inserido no aspirador, procedendo-se posteriormente ao seu enchimento com resina, evitando espaços de ar, como se pode ver na Figura 5.12. De seguida colocou-se a resina na viga e o laminado previamente cortado com a dimensão correta, procurando-se que este ficasse centrado em relação à largura da viga (Figura 5.13). A Figura 5.14 mostra o aspeto final da viga reforçada.



Figura 5.12 – Introdução da resina no orifício.

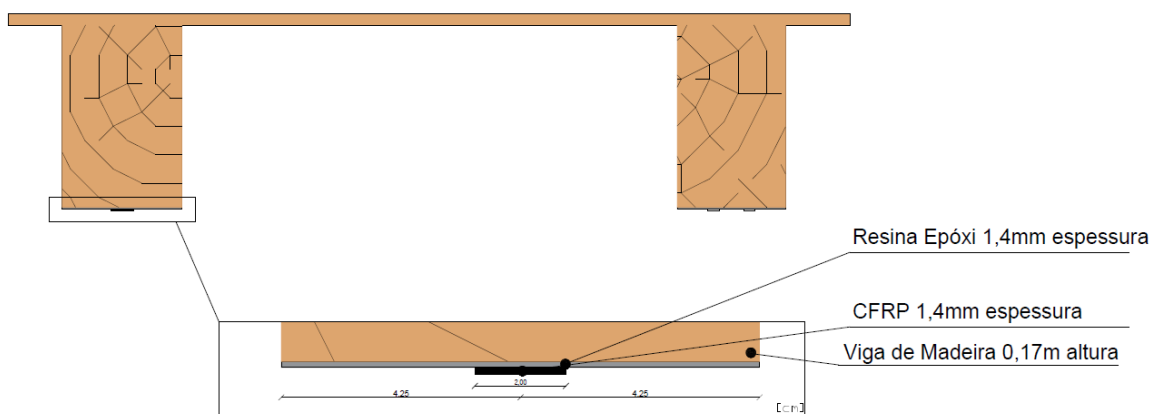


Figura 5.13 – Alçado do ensaio de EBRA.



Figura 5.14 – Aspeto final da técnica EBRA.

Tal como na técnica EBR, para garantir a ligação entre o CFRP, a resina e a madeira, forraram-se algumas tábuas com película antiaderente e com recurso a grampos prenderam-se na face reforçada da viga. Retiraram-se após 7 dias, quando se começou a instrumentar o CFRP com extensómetros. Tentou-se garantir uma espessura de resina de 1,4 mm.

5.1.5. Sistema de Ensaio e procedimento

5.1.5.1 Sistema de ensaio

Optou-se por utilizar um sistema de transmissão de cargas ao pavimento através de 4 pontos em cada viga (como mostra a Figura 5.15), simétrico em relação ao centro do pavimento. Este é um dos sistemas mais utilizados em ensaios de flexão e é também um dos sistemas que possibilita uma análise mais simples de diagramas, quer de esforço transversal, quer de momento fletor.

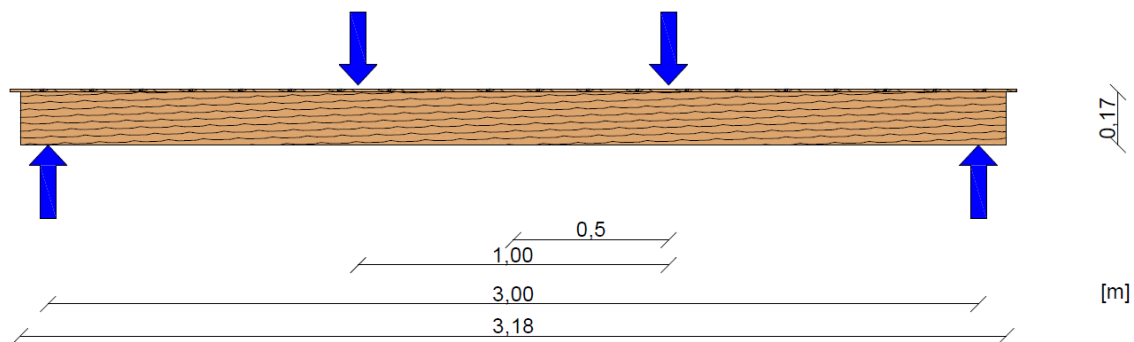


Figura 5.15 – Esquema de ensaio.

Embora o sistema de 4 pontos seja o mais habitual nos ensaios de flexão, foi a primeira vez que se ensaiou um pavimento composto por duas vigas mais tábuas na instituição onde foi realizada a dissertação, e daí a necessidade de projetar um sistema de raiz. Construíram-se dois apoios - um deslizante e um fixo, como se pode ver na Figura 5.16.



Figura 5.16 – Preparação dos apoios.

Criou-se um sistema com 2 blocos de betão a servirem de base para os apoios, onde se apoiaram as vigas. Na parte superior das vigas foram apoiados dois perfis metálicos que por sua vez apoiam num perfil metálico como se pode ver na Figura 5.17a. O perfil metálico superior apoia dois cilindros hidráulicos (ENERPAC RRH307) (Figura 5.17c), que por sua vez apoiam duas células de carga (CLC-200kN)(Figura 5.17b). Todo o sistema é simétrico, de maneira a garantir que as cargas são aplicadas de forma correta.

Para a transmissão das cargas ao pavimento colocaram-se dois apoios (um fixo e um móvel) por baixo de cada um dos perfis metálicos (Figura 5.17e). Entre os perfis metálicos criou-se uma rótula, permitindo que o pavimento se deslocasse e rodasse sem restrições (Figura 5.17d). A transmissão de cargas foi garantida através de dois varões de pré-esforço com o deslocamento impedido em ambos os lados e direções.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 5.17 – a) Esquema de Ensaio (Superior); b) Célula de Carga; c) Cilindro Hidráulico; d) Rótula criada; e) Apoios perfis metálicos.

5.1.5.2 Procedimento de ensaio

Os ensaios foram realizados em regime monotónico, com o objetivo de avaliar o comportamento ao longo de um carregamento. Assim, foi aplicada uma carga crescente até a madeira e/ou o CFRP atingirem a rotura.

Apesar do sistema ser composto por duas vigas, apenas uma delas atingiu a rotura para todos os ensaios, o que se deve à heterogeneidade das vigas.

5.1.6. Instrumentação

Para obter uma boa leitura de resultados, os pavimentos foram instrumentados com transdutores de deslocamento, extensómetros e células de carga.

A aquisição de dados de toda a instrumentação e de todos os ensaios foi feita através de um Datalogger Centipede 100 (UPM100) da HBM, ligado a um computador com o software Catman 6.0 da HBM, fornecendo os dados em Excel para posterior tratamento e análise.

5.1.6.1 Transdutores de deslocamento

Os transdutores de deslocamento (LVDT) foram usados para monitorizar o deslocamento vertical das vigas. Foram utilizados 15 no total, sendo que 12 deles são transdutores TML-CDP100 (Figura 5.18a), com um curso total de 100mm, 2 são transdutores TML-CDP50 (Figura 5.18a) com um curso total de 50mm e 1 é transdutor de fio que é TML-DP-500E (Figura 5.18b) com 500mm de curso.



Figura 5.18 – a) TML-DP-500E. b) TML-CDP100 e TML-CDP50.

Todos os transdutores foram alinhados na vertical, sendo que os TML-CDP50 foram colocados a meio vão de cada viga, que embora teoricamente seja o ponto onde a viga sofre maiores deslocamentos, também é o ponto crítico do sistema de ensaio devido ao posicionamento dos perfis metálicos, daí se ter

tomado essa opção. Os TML-CDP100 foram colocados a 25 cm, 50 cm e 75 cm para cada lado, medidos a partir do centro de cada viga. Utilizou-se esta configuração para todas as vigas. O TML-DP-500E foi colocado inferiormente ao conjunto, no centro da viga teoricamente mais suscetível à rotura (devido às secções).

A numeração e colocação de cada transdutor encontra-se esquematizada na Figura 5.19. Para a montagem dos transdutores foi necessário criar um apoio para o curso. Este apoio é composto por uma placa de acrílico ligada a uma cantoneira que por sua vez prende à viga com parafusos. Todos os LVDT's foram colocados a 10,5 cm da respetiva viga (Figura 5.23).

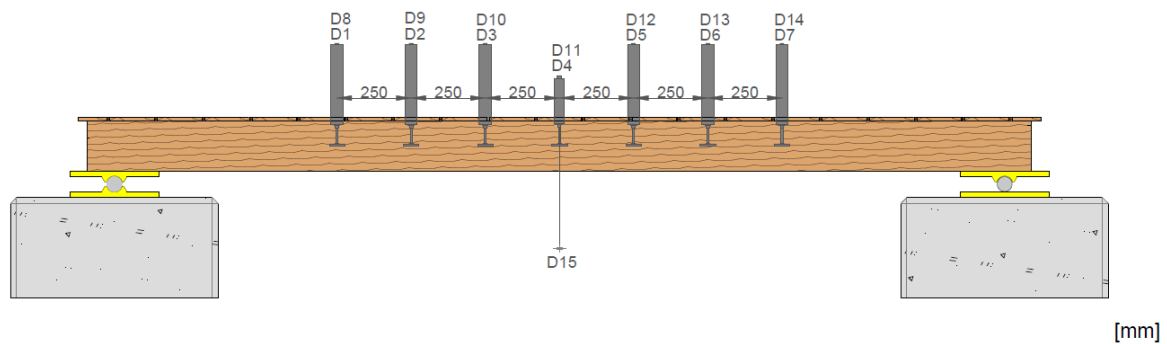


Figura 5.19 – Posicionamento e numeração dos LVDT's.

Nas Figuras 5.20 a 5.23 apresenta-se uma visão geral do posicionamento dos transdutores durante os ensaios.



Figura 5.20 – Vista dos transdutores D1 a D7.



Figura 5.21 – Vista dos transdutores D8 a D14.



Figura 5.22 – Posicionamento do D15.



Figura 5.23 – Exemplo geral das placas de acrílico (imagem após ensaio).

5.1.6.2 Extensómetros

A monitorização das extensões através da madeira previa-se difícil, pelo que se optou por colocar os extensómetros ao longo do CFRP. Todos os extensómetros utilizados foram do tipo TML-BFLA-5-5 próprios para CFRP.

No conjunto de referência não foram colocados extensómetros, enquanto no ensaio com a técnica EBR foram colocados 9 e no ensaio com a técnica EBRA foram 10 extensómetros. Para todos os ensaios apenas se monitorizou na totalidade uma viga por conjunto, por questões logísticas. No ensaio com a técnica EBRA, uma das vigas foi monitorizada com 9 extensómetros e a outra com 1 a meio vão.

A numeração e esquematização encontra-se na Figura 5.24 e Figura 5.25. A Figura 5.26 mostra a aplicação dos extensómetros em laboratório.

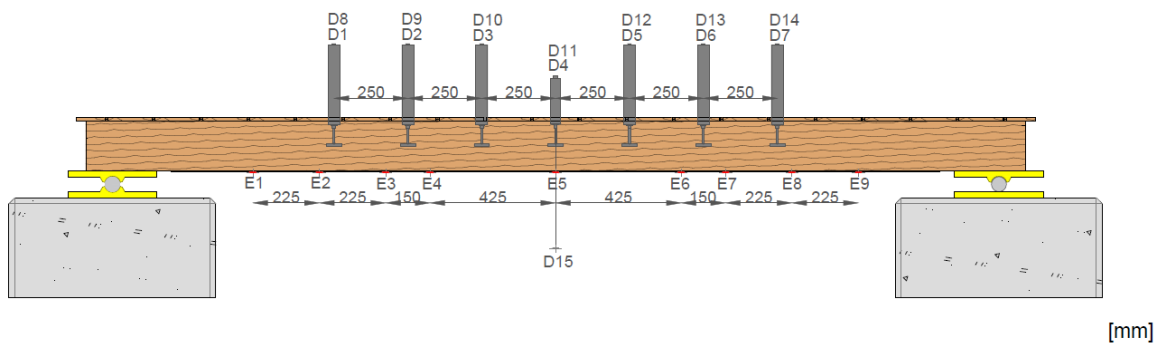


Figura 5.24 – Numeração extensómetros para o ensaio com a técnica EBR.

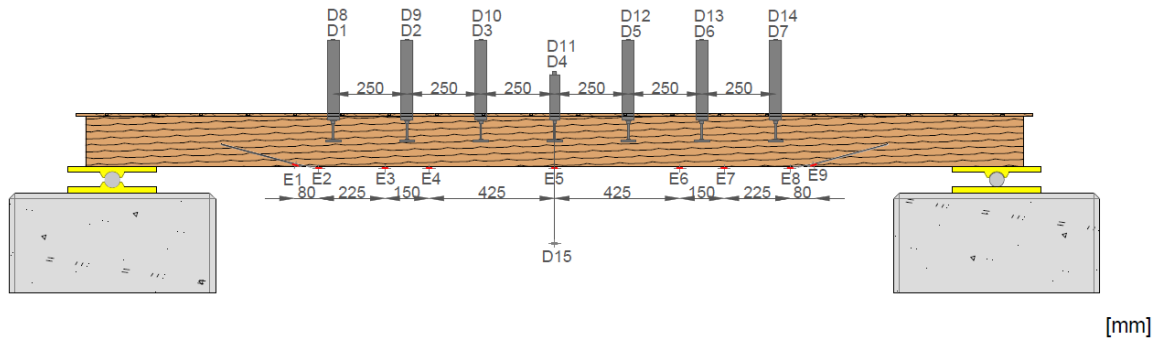


Figura 5.25 - Numeração extensômetros para o ensaio com a técnica EBRA.



Figura 5.26 – Colocação dos extensômetros no ensaio com a técnica EBR.

Devido à sua sensibilidade, a colocação dos extensômetros exige um grande cuidado e rigor. Todos os extensômetros foram colocados com os pavimentos virados com a parte inferior para cima (Figura 5.27) e antes do posicionamento dos mesmos no local do ensaio.



Figura 5.27 – Posicionamento para colocação dos extensômetros.

Começou-se por marcar a posição dos extensómetros a giz no CFRP, aplicando-se de seguida a cola na parte inferior do extensómetro e pressionando o extensómetro contra o CFRP com um plástico específico (Figura 5.28). É importante que o extensómetro fique centrado e na direção das fibras.

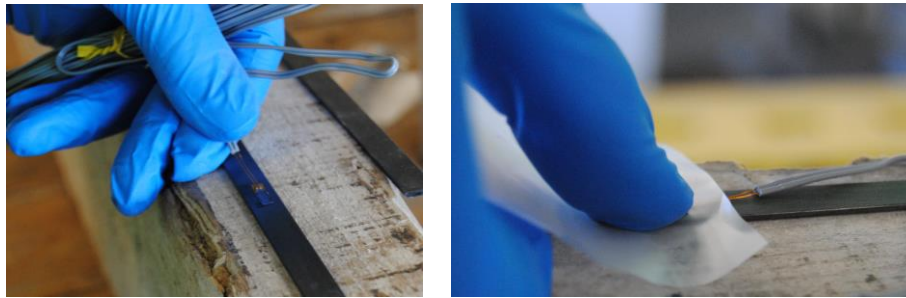


Figura 5.28 – Posicionamento do extensómetro e respetiva colagem.

De seguida separaram-se os fios elétricos para evitar que se tocassem (como se pode ver na Figura 5.29). Colaram-se os fios do extensómetro um pouco atrás conforme mostra a Figura 5.29 (no aspeto final) de maneira a que estes não se soltassem durante o ensaio. Para finalizar, aplicou-se um spray isolante de componentes elétricos (Figura 5.29). Antes da aplicação dos extensómetros, tornou-se a limpar o CFRP com acetona.



Figura 5.29 – Pormenor do spray isolante e aspeto final.

5.1.6.3 Células de carga

Durante os ensaios, toda a leitura de cargas aplicadas foi feita com 2 células de carga do tipo CLC-200 KNA (Figura 5.30).



Figura 5.30 – Célula de carga.

5.2. Apresentação dos Resultados Experimentais

5.2.1. Aspectos gerais

No presente subcapítulo apresentam-se todos os resultados dos ensaios à flexão e uma breve análise dos mesmos. Relembra-se que foram feitos ensaios a 3 pavimentos de madeira, com as características presentes na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Características das vigas de cada conjunto.

Pavimento de madeira	Viga	Altura (cm)	Largura (cm)	Rotura
PM1	V1	17,0	9,5	V1
	V2	17,5	7,5	
PM2	V3	16,0	9,5	V4
	V4	16,0	10,5	
PM3	V5	16,0	9,5	V6
	V6	17,5	7,5	

Para as vigas V1, V3 e V5 utilizaram-se os transdutores de deslocamento D1 a D7 e D15, enquanto para as vigas V2, V4 e V6 utilizaram-se os transdutores de deslocamento D8 a D14. Foram colocados 9 extensómetros nas vigas V3 e V5, e 1 extensómetro a meio vão na viga V6.

5.2.2. Força versus deslocamento

As Figuras 5.31 a 5.33 mostram as curvas força total vs. deslocamento a meio-vão obtidas nos ensaios de flexão realizados dos 3 pavimentos de madeira. As respostas dos três pavimentos são praticamente

lineares com particular destaque para o pavimento PM2 que, até ao colapso, apresentou uma resposta sempre linear. Nos restantes pavimentos a partir de certa altura deixou-se de verificar essa resposta linear. No caso do pavimento PM1, quando os 20 kN foram atingidos, surgiu uma fenda a meio-vão que fez com que o pavimento perdesse rigidez, o mesmo aconteceu aos 30 kN para o pavimento PM3.

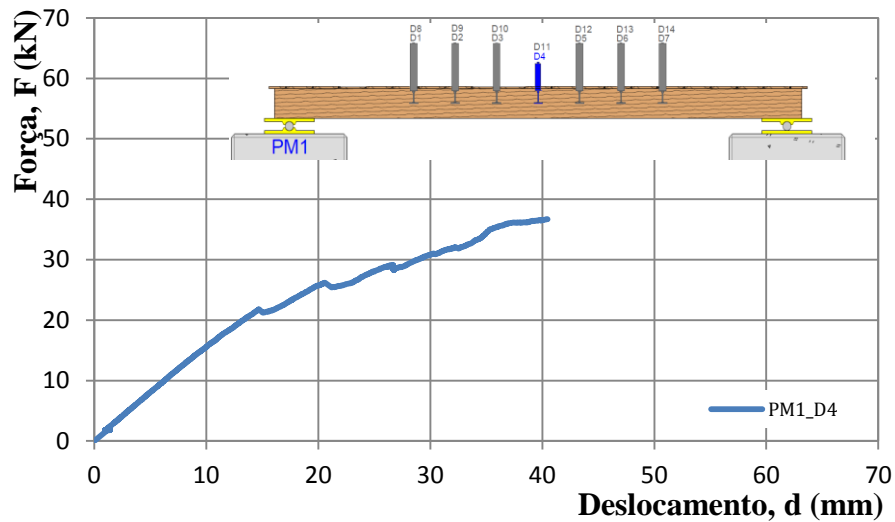


Figura 5.31 – Gráfico Força vs. Deslocamento da viga V1 do pavimento PM1.

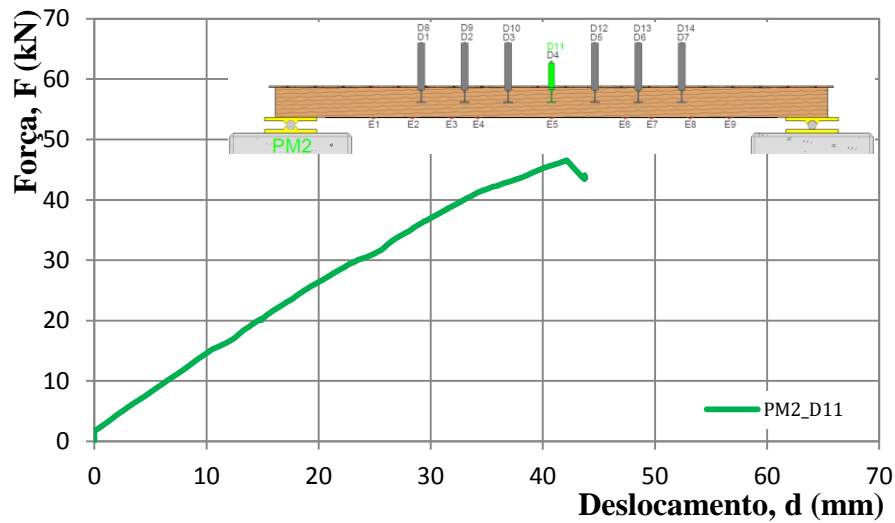


Figura 5.32 – Gráfico Força vs. Deslocamento da viga V4 do pavimento PM2.

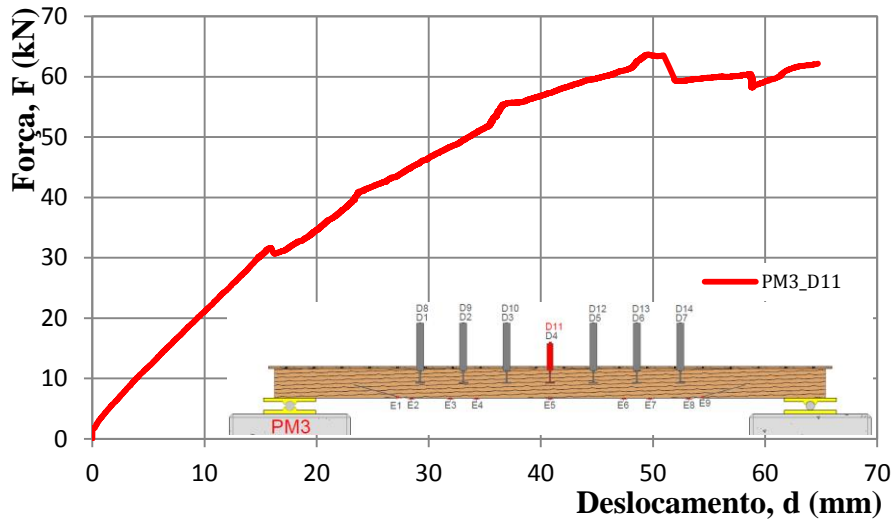


Figura 5.33 – Gráfico Força vs. Deslocamento da viga V6 do pavimento PM3.

A Tabela 5.3 resume as forças de rotura (F_r) e respetivos momentos-fletores (M_r) bem como os correspondes deslocamentos atingidos nos ensaios dos pavimentos de madeira. A percentagem de aumento da força de rotura em relação ao pavimento de referência (Δ) é ainda realçada na Tabela 5.3. Observa-se que em termos de força para o pavimento PM2 se obteve um ganho de 26,74 %, e para o pavimento PM3 se obteve um ganho de 73,35 % em relação ao pavimento de referência. Em termos de deslocamento a meio vão, os ganhos não foram assim tão notórios para o pavimento reforçado com a técnica EBR (PM2). Para o PM3 o aumento de flecha máxima foi superior a 20 mm, o que corresponde a um aumento bastante significativo.

Tabela 5.3 – Resumo gráficos força vs. deslocamento.

Pavimento de madeira	F_r [kN]	Δ [%]	M_r [kN.m]	d_r [mm]
PM1	36,73	-	18,37	40,39
PM2	46,55	26,74	23,28	42,13
PM3	63,67	73,35	31,84	64,72

5.2.3. Deformadas

Analisando os deslocamentos obtidos nos LVDTs colocados a meio vão dos pavimentos, isto é, D4 e D11, constata-se que o pavimento PM3 foi aquele que apresentou, para um mesmo nível de carga, as menores flechas. A Tabela 5.4. mostra os deslocamentos a meio vão dos pavimentos de madeira a cada 10 kN, para a respetiva viga que atingiu a rotura. Salienta-se que a viga que atingiu a rotura no pavimento PM1 foi a V1, no pavimento PM2 foi a V4 e no pavimento PM3 foi a V6.

Tabela 5.4 – Resumo das flechas a meio vão.

F [kN]	D _{D4} /D _{D11} [mm]		
	PM1	PM2	PM3
10	6,28	6,57	3,92
20	13,34	14,63	9,33
30	29,62	23,45	14,80
36,73	40,39	29,77	21,56
40		32,95	23,41
46,55		42,13	29,97
50			33,63
60			45,51
63,67			64,72

As Figuras 5.34 a 5.39 mostram as deformadas obtidas nos ensaios de flexão realizados. Em termos de flecha, para o pavimento PM1 observa-se que na viga V1 se atingiu perto de 40 mm na zona do defletómetro D3, enquanto na viga V2 se atingiu perto de 25 mm a meio vão, sendo que a rotura foi atingida na viga V1. A viga V1 teve um aumento significativo de deformações entre os 20 e os 30 kN como foi evidente no respetivo gráfico de força vs. deslocamento em que teve uma perda de rigidez.

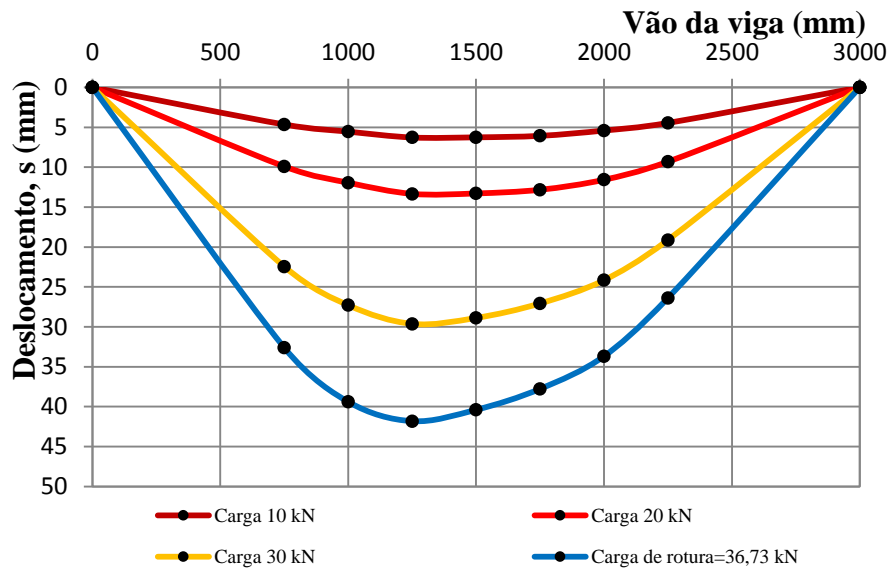


Figura 5.34 – Deformada da viga V1 (PM1).

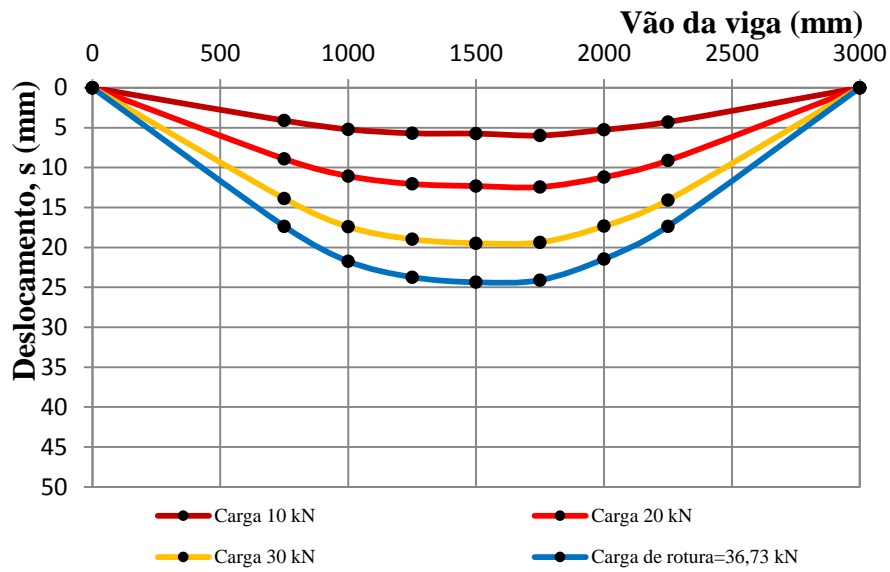


Figura 5.35 – Deformada da viga V2 (PM1).

Para o pavimento PM2 observa-se que a flecha na viga V3 teve valores muito aproximados da flecha na viga V4, sendo que na viga V4 foi sempre um pouco superior. Em ambas as vigas do pavimento PM2 a flecha máxima foi atingida no meio-vão.

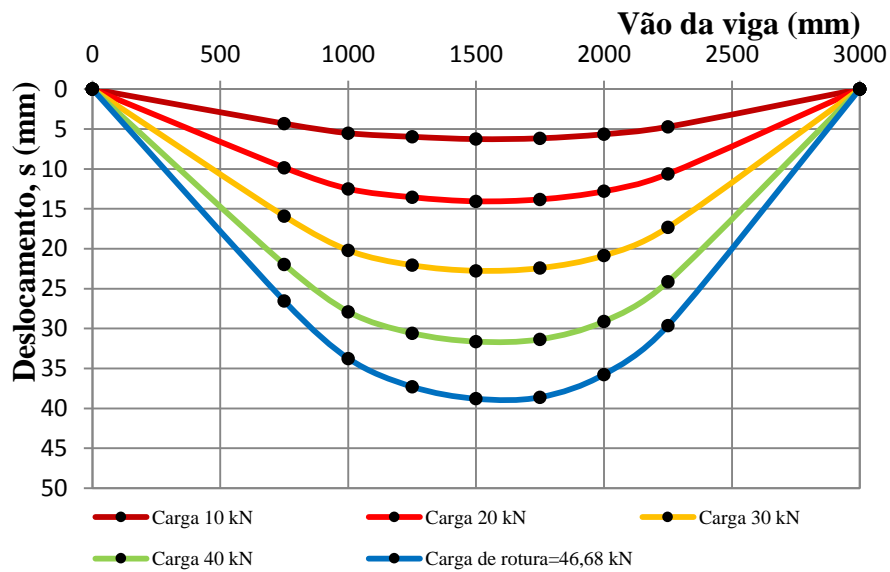


Figura 5.36 – Deformada da viga V3 (PM2).

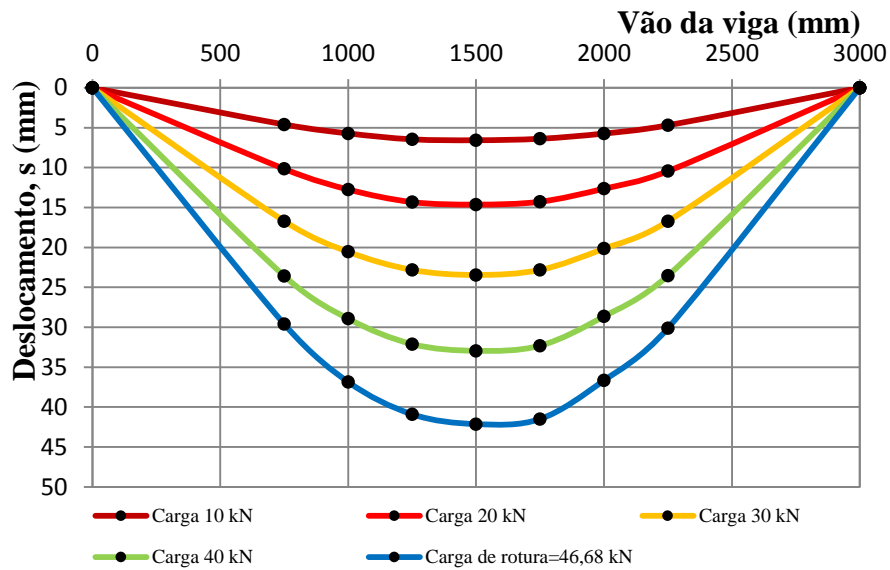


Figura 5.37 – Deformada da viga V4 (PM2).

Para o pavimento PM3 observa-se que na viga V5 se atingiu uma flecha de perto de 40 mm a meio-vão, enquanto na viga V6 se atingiu uma flecha perto de 50 mm a meio-vão, sendo que a rotura foi atingida na viga V6. A viga V6 teve um aumento significativo de deformações entre os 30 e os 40 kN como foi evidente no respetivo gráfico de força vs. deslocamento em que teve uma perda de rigidez.

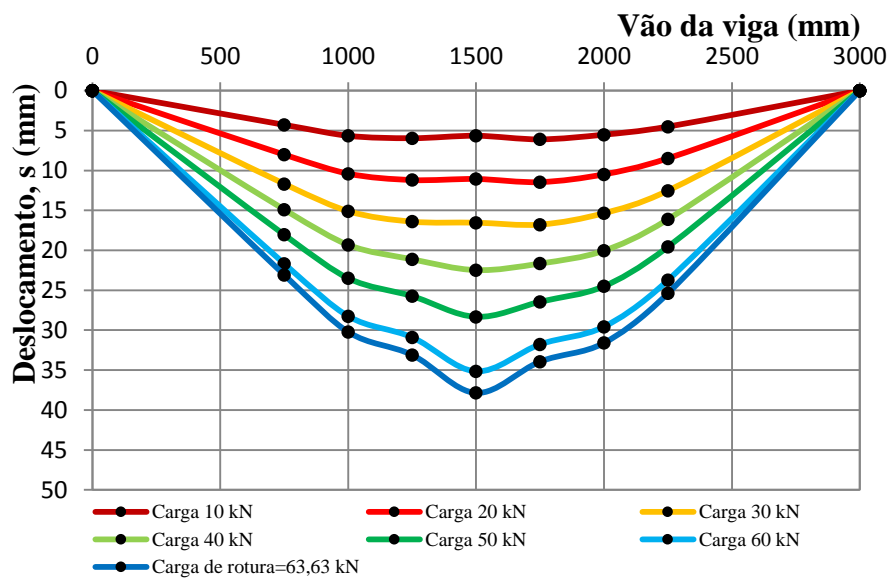


Figura 5.38 – Deformada da viga V5 (PM3).

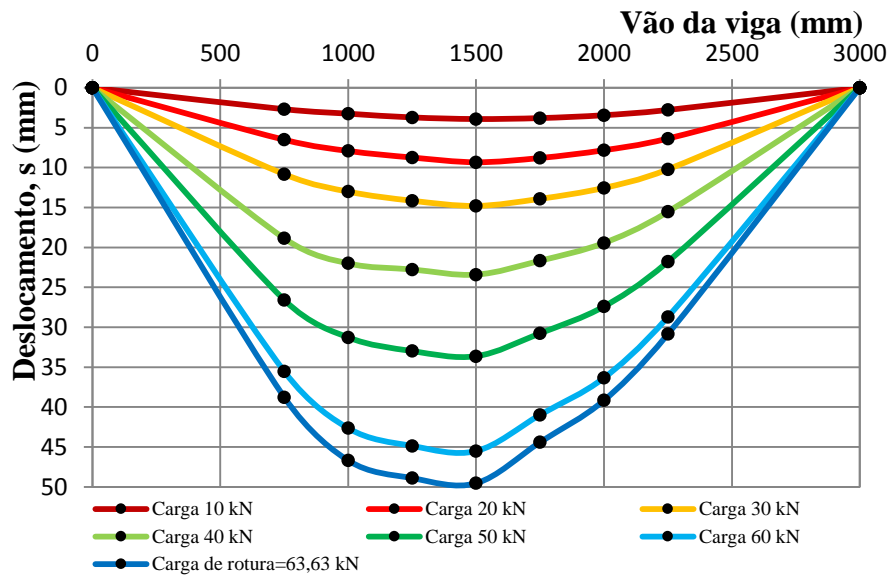


Figura 5.39 – Deformada da viga V6 (PM3).

5.2.4. Extensões no laminado

O reforço à flexão de vigas com laminados de CFRP recorrendo à técnica EBR tradicional implica que as extensões atingidas no laminado de CFRP são sempre inferiores à extensão de rotura [19]. Por conseguinte, esta técnica não tira o melhor partido das propriedades mecânicas do CFRP. Assim, e atendendo a que a extensão de rotura do laminado de CFRP usado é de 1,03 % conforme referido no Capítulo 3, definiu-se a percentagem de utilização do CFRP no ensaio de flexão de acordo com a expressão:

$$\% \text{ utilização do reforço} = \frac{\varepsilon_{max}}{1,03} \times 100 \quad (5.1)$$

Realce-se ainda que no pavimento PM3, depois de a viga atingir a rotura, o laminado continuou a funcionar à flexão. Todos os deslocamentos deixaram de ser monitorizados mas os extensómetros continuaram a medir as extensões no CFRP. O ensaio de flexão do pavimento PM3 foi realizado até à rotura do laminado, tendo-se medido uma extensão máxima de 0,89 % a meio vão da viga de madeira V6. Pela Tabela 5.5 observa-se que a extensão na rotura dos pavimentos foi bastante maior no pavimento PM3 do que no pavimento PM2. Com base em todos os extensómetros (da viga monitorizada de cada ensaio) obtiveram-se os gráficos da e Figura 5.41.

Tabela 5.5 – Resumo extensões no laminado até rotura do conjunto.

Pavimento de madeira	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	% utilização do reforço [%]
PM1	-	-
PM2	0,28	28,16
PM3	0,89*	86,40

* Rotura na viga V6 do pavimento PM3.

Com base em todos os extensómetros (da viga monitorizada de cada ensaio) obtiveram-se os gráficos da Figura 5.40 e Figura 5.41. Observa-se que quer na viga V3, como na viga V5, as extensões foram superiores a meio vão, como expectável, e que na viga V5 o valor máximo de extensão atingido foi de 0,32 %.

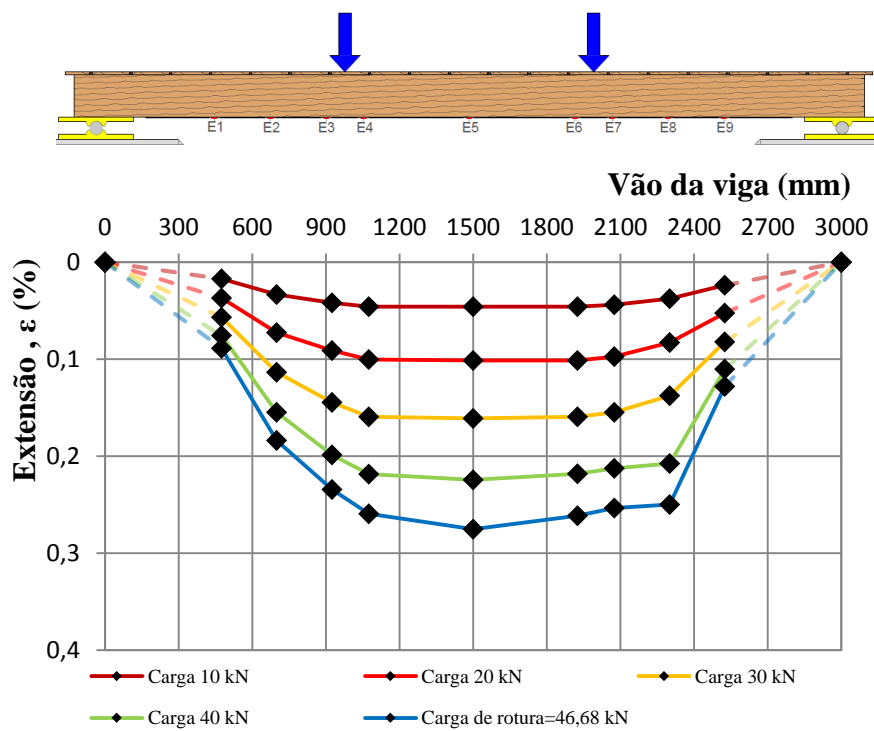


Figura 5.40 - Extensões na viga V3 (PM2).

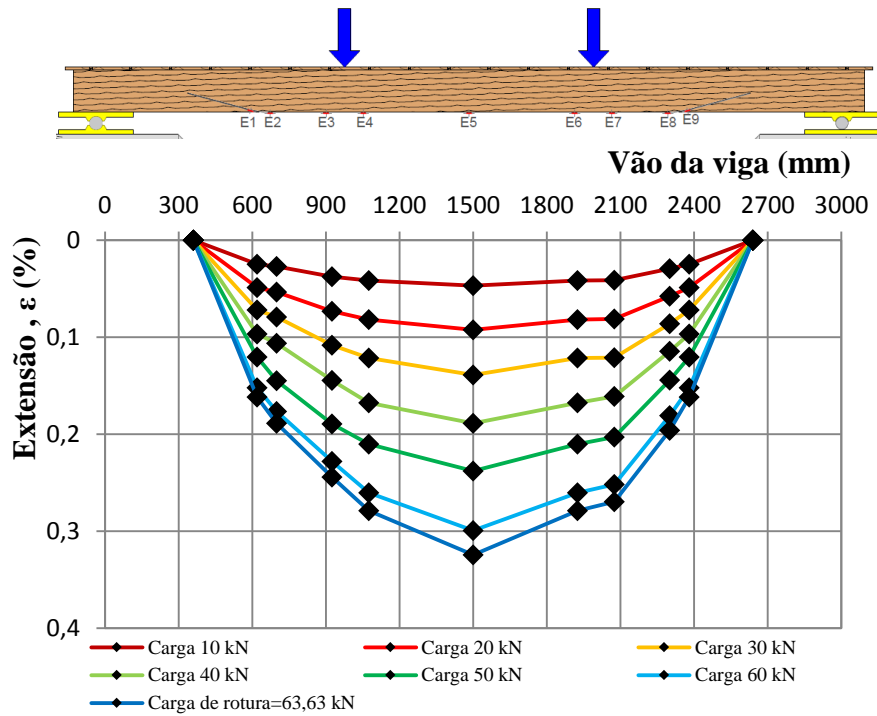


Figura 5.41– Extensões na viga V5 (PM3).

Tendo em conta a força total e a extensão a meio vão das vigas monitorizadas, obtiveram-se os gráficos da Figura 5.42 e Figura 5.43. Realce-se que a viga V3 do pavimento PM2 teve uma quebra de extensão nos 0,28 % (que corresponde à extensão máxima), a viga V5 teve também uma quebra aos 0,32 %, enquanto a viga V6 apenas teve quebra aos 0,44 %, correspondente ao momento em que a viga de madeira atingiu a rotura.

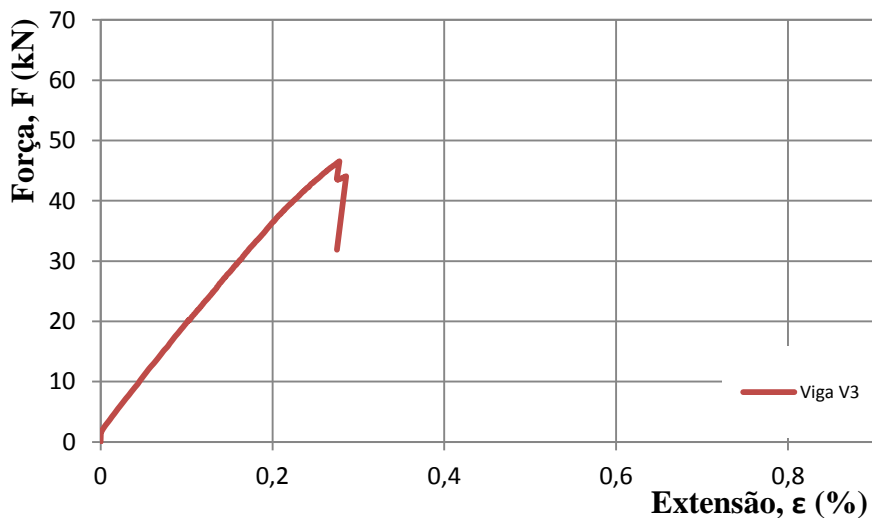


Figura 5.42 – Gráfico Força vs. Extensão a meio vão da viga V3 (PM2).

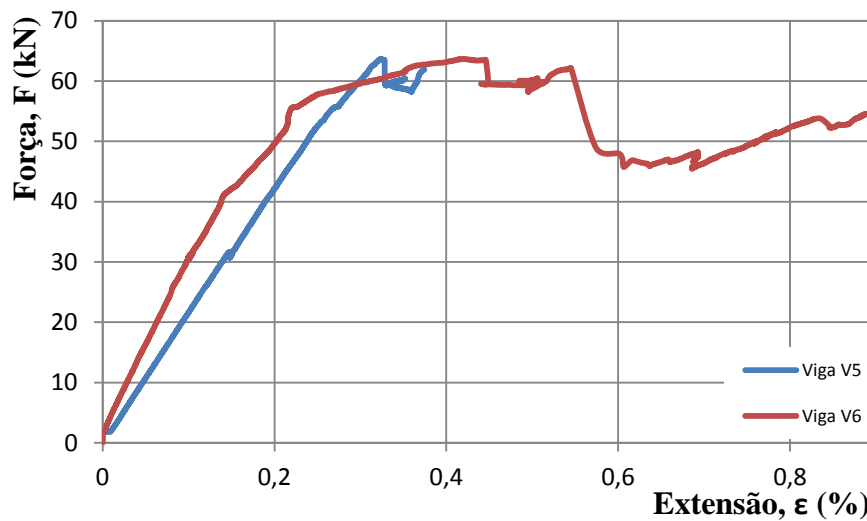


Figura 5.43 – Gráfico Força vs. Extensão a meio vão das vigas V5 e V6 (PM3).

5.2.5. Tensão de aderência ao longo da viga

Através das características do laminado de CFRP e dos valores medidos de extensões no mesmo, obteve-se as tensões de aderência de acordo com a expressão [15,34,51]:

$$\tau = E_f \cdot t_f \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x} \quad (5.2)$$

onde E_f e t_f são, respetivamente, o módulo de elasticidade e a espessura do laminado de CFRP; e $\Delta \varepsilon$ e Δx são, respetivamente, a diferença de extensões entre dois extensómetros consecutivos e a distância entre os extensómetros. De forma a analisar as tensões de aderência entre a resina e o pavimento de madeira realizaram-se os gráficos das Figuras 5.44 e 5.45, onde se apresentam as tensões de aderência para cada pavimento ao longo do comprimento colado de FRP na viga.

Observa-se que a tensão de aderência é muito superior junto às extremidades do CFRP em relação à zona central, sendo que no pavimento PM2 atinge valores perto de 1,2 MPa, enquanto no pavimento PM3 atinge valores perto de 1,4 MPa.

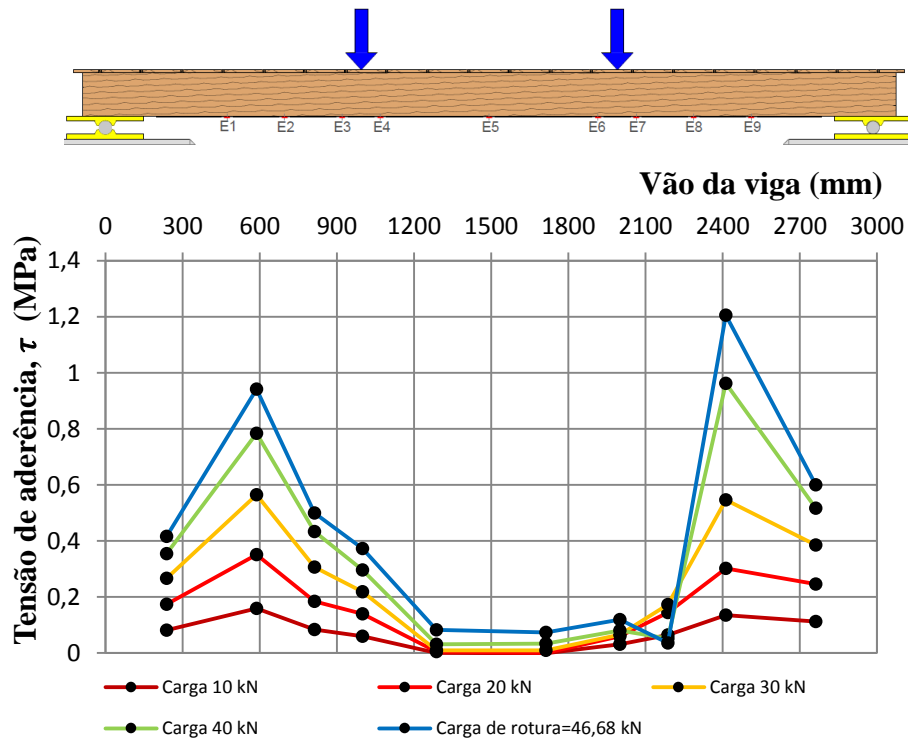


Figura 5.44 – Gráfico da Tensão de aderência vs. Desenvolvimento da viga V3 (PM2).

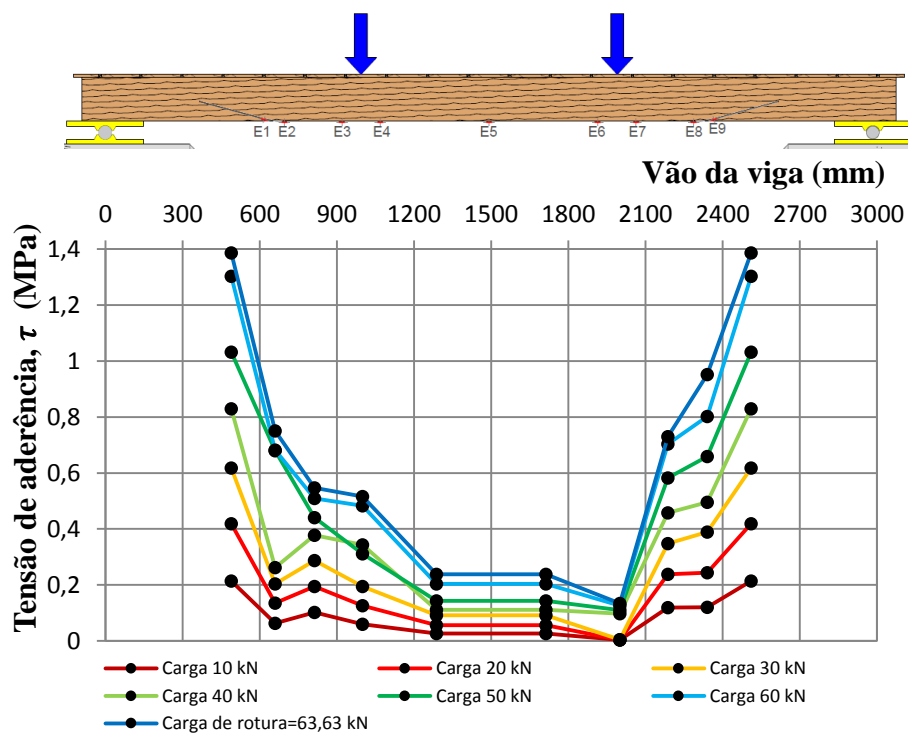


Figura 5.45 – Gráfico da Tensão de aderência vs. Desenvolvimento da viga V5 (PM3).

5.2.6. Modos de rotura

Na Figura 5.46, apresenta-se o modo de rotura ocorrido na viga V1 pertencente ao pavimento PM1. É possível observar que a rotura ocorreu a meio vão devido à presença de um nó na face inferior da viga.

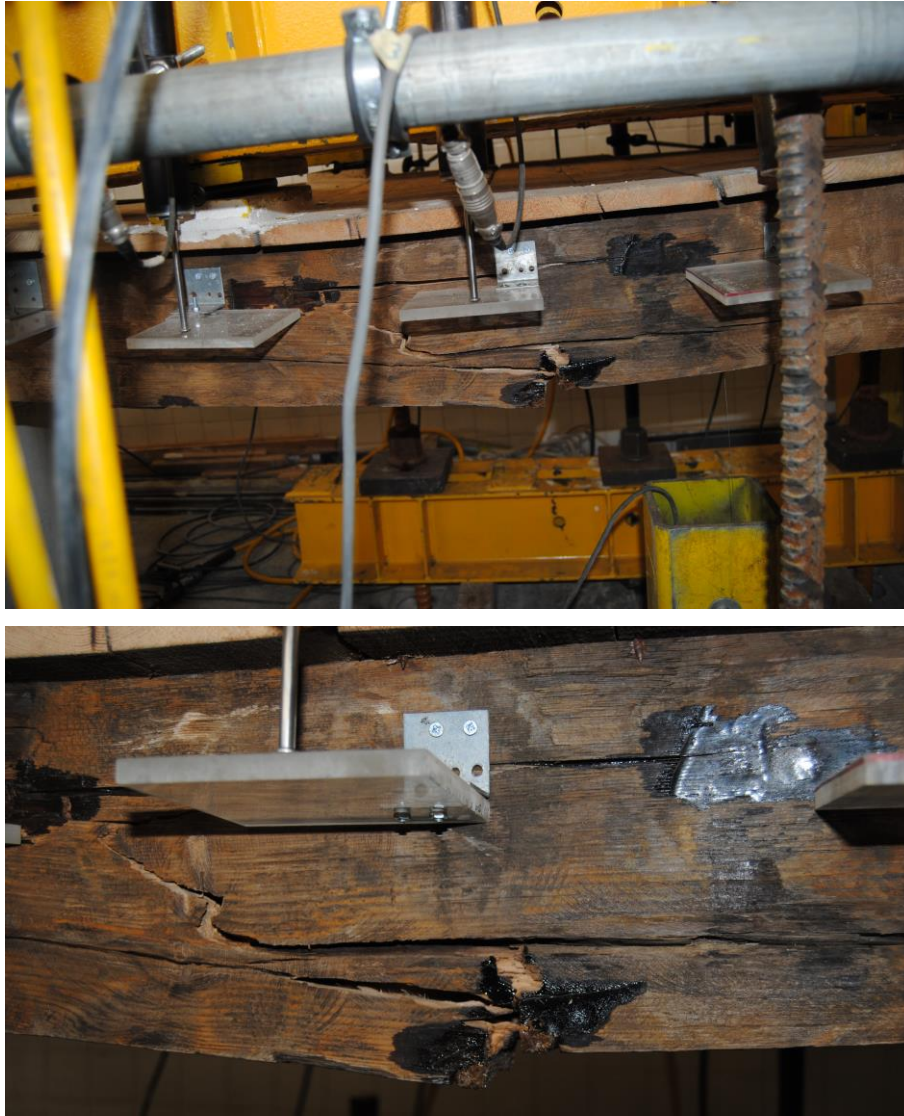


Figura 5.46 – Pormenor da rotura da viga V1 (PM1).

No pavimento PM2, como se pode observar na Figura 5.47, verificou-se uma rotura por descolamento prematuro do laminado de CFRP, observando-se que este começou a descolar a partir da extremidade livre em direção ao centro da viga.

Analisando a Figura 5.48 que mostra o modo de rotura observado no pavimento PM3, é possível verificar que a rotura ocorreu por corte, localizando-se mais uma vez na zona central da viga, onde também se verificou o descolamento do laminado, após a rotura das fibras na extremidade, devido ao facto de a partir do momento que ocorre a rotura por corte, a viga ter alturas diferentes em ambos os lados da fenda na sua face inferior.



Figura 5.47 – Rotura da viga V4 (PM2).



a)

b)

Figura 5.48 a) Rotura da viga V6 (PM3); b) Rotura do Laminado na extremidade.

5.3. Análise dos Resultados Experimentais

Neste subcapítulo apresenta-se a análise de todos os dados apresentados na secção anterior. Faz-se uma análise entre os 3 pavimentos de madeira (referência, reforço pela técnica EBR e EBRA) dando uma atenção especial aos 2 reforçados.

5.3.1. Força *versus* deslocamento

A madeira apresenta um comportamento elasto-plástico, tendo depois uma rotura frágil, enquanto o reforço utilizado (compósitos de CFRP) apresentam um comportamento elástico linear com uma rotura frágil. A Figura 5.49 compara as respostas força vs. deslocamento a meio-vão dos pavimentos ensaiados à flexão.

Individualmente e por fases, observou-se que o pavimento PM1 (referência) tem um comportamento elástico linear até um deslocamento de cerca de 15 mm, onde se começam a partir as fibras da madeira e conseqüentemente há uma diminuição de rigidez até ocorrer a rotura.

No pavimento PM2 (EBR) observa-se um comportamento elástico linear desde o início até ao descolamento das fibras de carbono e rotura do conjunto.

No pavimento PM3 (EBRA) observa-se um comportamento elástico linear até cerca de 15 mm de deslocamento, tal como se tinha verificado para o conjunto 1, verificando-se uma perda de rigidez a partir daí, continuando até à rotura da madeira por volta dos 50 mm de deslocamento. A partir da rotura da madeira apenas o compósito de CFRP (com várias fibras a partir-se desde aí) conseguiu absorver os esforços da viga até à rotura do CFRP. Isto deve-se ao facto de o compósito de CFRP estar ancorado nas extremidades demonstrando a eficiência desta técnica de reforço.

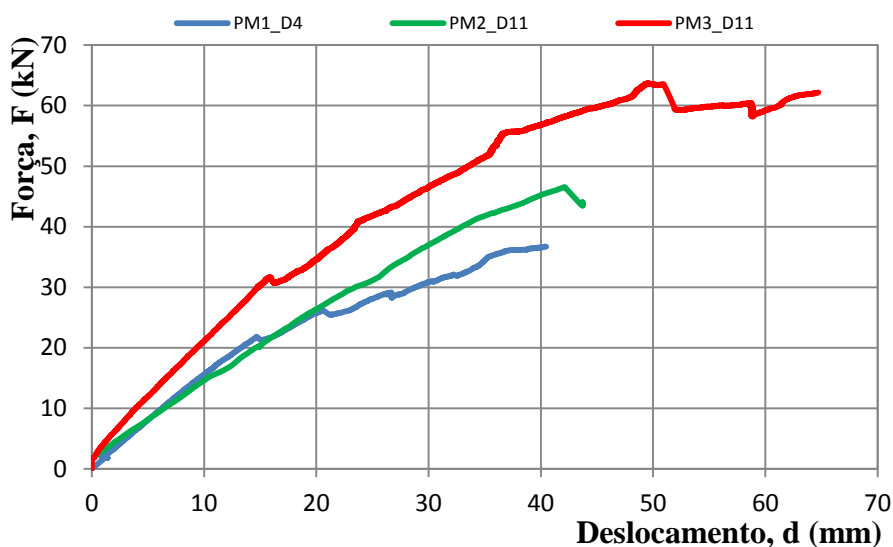


Figura 5.49 – Gráfico Força vs, Deslocamento dos pavimentos a meio-vão.

Comparando o sistema de referência com o reforçado através da técnica EBR, pode-se dizer que o comportamento até aos 15 mm de deslocamento é muito semelhante, não se evidenciando a técnica de reforço devido à diferença de secções das vigas de madeira (no pavimento de referência são superiores). A partir daí, o pavimento PM1 começou a apresentar algumas roturas nas fibras da madeira enquanto que no pavimento PM2 isso não aconteceu. Na rotura ambos os pavimentos apresentaram roturas frágeis, muito devido ao prematuro descolamento do CFRP, que é uma das roturas mais comuns nos sistemas de EBR. Este descolamento ocorreu para uma extensão no laminado de CFRP de 0,28 %, pelo que não se consegue tirar partido das capacidades últimas (extensão) do CFRP.

No pavimento PM1 a rotura ocorreu na viga V1 aos 36,73 kN quando o deslocamento a meio-vão foi de 40,39 mm, enquanto no pavimento PM2 a rotura ocorreu para uma força total aplicada ao pavimento de 46,55 kN quando a flecha na viga V4 era de 42,13 mm, o que significa um aumento de 26,74 % e 4,31 % respetivamente.

Comparando o pavimento PM1 com o pavimento PM3 (EBRA), observa-se que desde o início o laminado de CFRP faz aumentar bastante a rigidez do pavimento PM3. Repara-se também que os dois pavimentos tiveram uma quebra de rigidez aos 15 mm de deslocamento a meio-vão. Apesar da rotura da madeira ser frágil nos dois pavimentos, nota-se que após a rotura da madeira, o pavimento PM3 não teve uma rotura frágil uma vez que o laminado de CFRP conseguiu evitar esse tipo de rotura. Comparativamente ao pavimento PM1 o reforço usado no pavimento PM3 fez aumentar a capacidade de carga e a flecha na rotura em 73,35 % e 50,85 %, respetivamente.

Comparando os dois pavimentos reforçados (PM2 e PM3), nota-se o aumento de rigidez conferido pelo reforço EBRA, atuando desde o início do ensaio. Em termos de rotura, como já foi dito, a da viga do pavimento PM2 foi frágil e conjunta com o descolamento do reforço, enquanto a do pavimento PM3 foi frágil na viga mas após a rotura da viga o laminado de CFRP continuou a atuar até atingir a rotura. Comparativamente ao pavimento PM2, o pavimento 3 apresentou um ganho de capacidade de carga e de flecha na rotura de 36,78 % e 49,70 % respetivamente.

5.3.2. Deformadas

As deformadas dos pavimentos são condicionadas pelas características mecânicas e geométricas dos materiais usados em cada pavimento permitindo, por conseguinte, observar o funcionamento global dos pavimentos quando sujeitos a esforços de flexão.

Para comparar os vários pavimentos em termos de deformadas mostram-se as deformadas das vigas que atingiram a rotura (1 em cada pavimento) e compararam-se 2 a 2 (Figura 5.50 a Figura 5.52), e o mesmo para as que não atingiram a rotura (Figura 5.53 a Figura 5.55). Todos os gráficos foram realizados para várias cargas.

Pela análise do gráfico da Figura 5.50 pode-se observar que até aos 10 kN não se nota a influência da técnica de reforço EBR, mas a partir dos 20 kN já se começa a notar, aumentando a rigidez e consequentemente reduzindo as deformações. Para a carga de 30 kN e na rotura é evidente a influência do reforço uma vez que as flechas na viga V4 (EBR) são bastante inferiores às da viga V1. Para o gráfico da Figura 5.51 salienta-se que tal como no gráfico de força vs. deslocamento, é evidente desde o início a influência do reforço EBRA uma vez que para uma mesma carga as deformações na viga V6 são sempre menores do que na viga V1. Comparando ambas as técnicas de reforço (Figura 5.52), também tal como no gráfico de força vs. deslocamento, verifica-se que a técnica EBRA mostra-se bastante mais eficaz em termos de deformação desde o início do ensaio observando-se sempre menores deformadas para a mesma carga aplicada aos pavimentos.

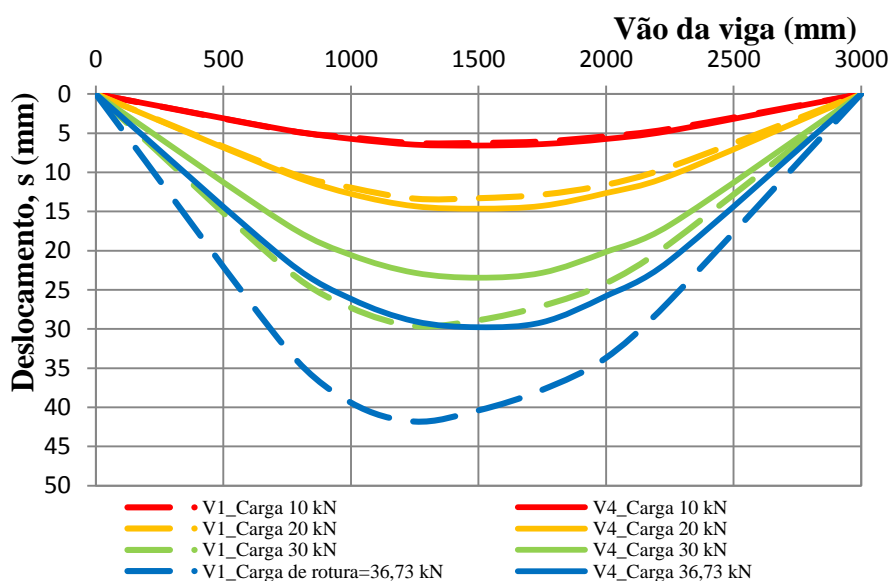


Figura 5.50 – Deformada das vigas V1 e V4.

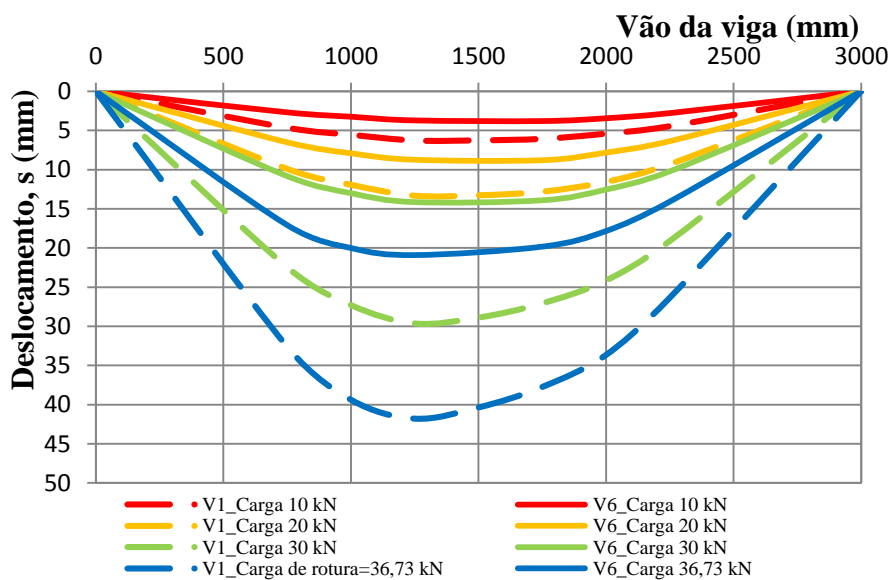
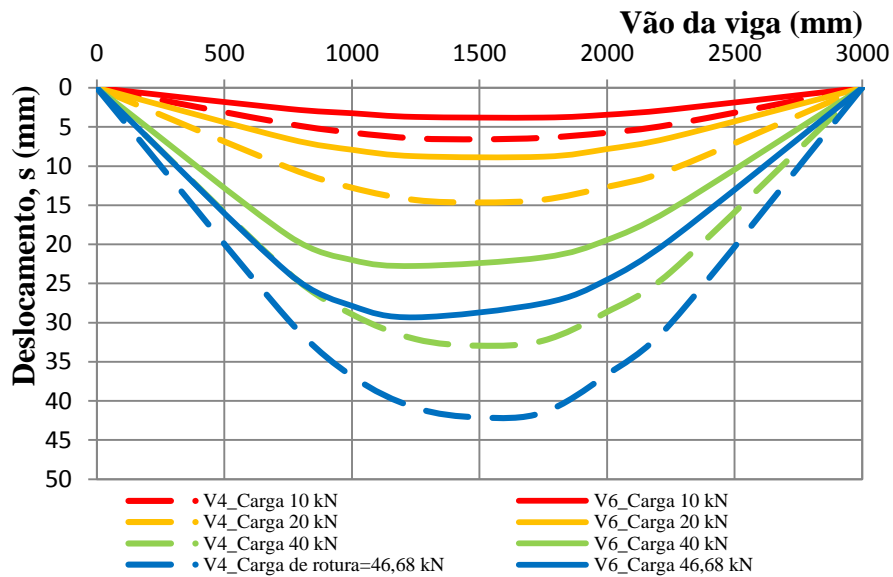


Figura 5.51 – Deformada das vigas V1 e V6.



Na Tabela 5.6 pode-se observar os valores dos deslocamentos a meio-vão para as 3 vigas apresentadas conforme a carga. Salienta-se que os valores apresentados são do LVDT D4 para a viga V1 (PM1), do D11 para a viga V4 (PM2) e do D11 para a viga V6 (PM3). Embora não tenham o mesmo posicionamento, representam os valores máximos, o que facilita a comparação. Da Tabela 5.6 pode-se analisar a influência do reforço para a viga V4 (PM2) a partir dos 30 kN, como referido na análise dos gráficos, assim como a diferença entre os reforços sempre superior para o reforço EBRA.

Tabela 5.6 – Valores dos deslocamentos das vigas com rotura.

Viga	F [kN]	d [mm]	Δ_{V1} [%]	Δ_{V4} [%]
V1	10	6,28	-	-
V4		6,57	-4,62	-
V6		3,92	37,58	40,33
V1	20	13,34	-	-
V4		14,63	-9,67	-
V6		9,33	30,06	36,23
V1	30	29,62	-	-
V4		23,45	20,83	-
V6		14,80	50,03	36,89
V1	36,73	41,81	-	-
V4		29,77	28,80	-
V6		21,56	48,43	27,58
V4	40	32,95	-	-
V6		23,41	-	28,95
V4		40,39	-	-
V6	46,55	29,97	-	28,86

As Figuras 5.55 a 5.57 mostram os resultados obtidos nas vigas que não atingiram a rotura. Observando a Figura 5.53, as conclusões são opostas às dos que atingiram a rotura (V1-V4), em que pela deformada não se nota a influência do reforço, o que pode ser justificado pela diferença de altura das vigas, o que aumenta bastante a inércia da viga V2 (PM1) em relação à V3 (PM2).

A Figura 5.54 mostra que, ao contrário dos pavimentos que atingiram a rotura, onde era evidente a influência do reforço desde o início do ensaio, a influência do reforço manifesta-se apenas a partir dos 20 kN. Tal como no caso anterior, esta observação pode ser justificada pela diferença de altura das vigas, e consequente momento de inércia, uma vez que o ganho de rigidez que o reforço dá à viga V5, na viga V2 é dado pela superior altura e consequente momento de inércia.

Comparando os dois sistemas de reforço (Figura 5.55) a diferença entre eles começa-se a notar a partir dos 10 kN, onde a viga V5 (PM3) obtém menores deslocamentos comparando com a V3 (PM2) tornando mais uma vez evidente a eficácia do sistema EBRA em relação ao EBR.

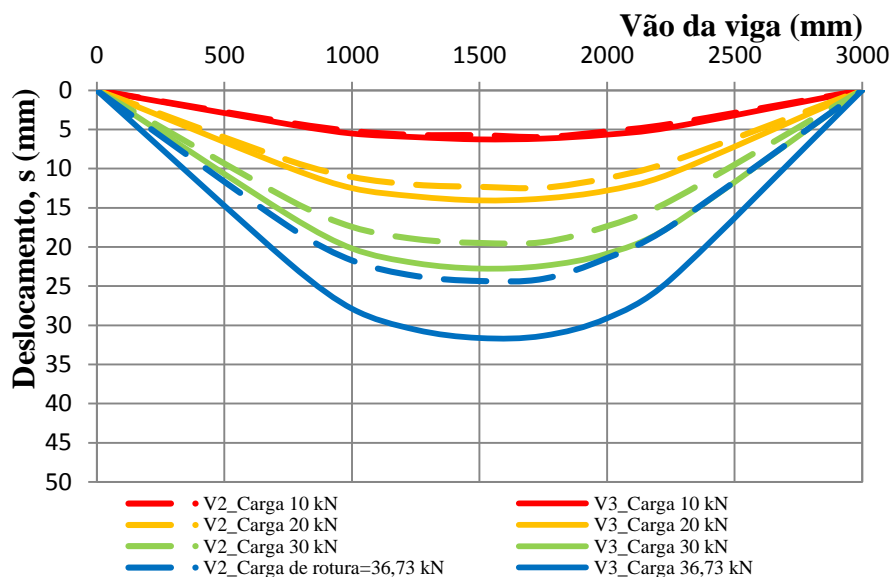


Figura 5.53 – Deformada das vigas V2 e V3.

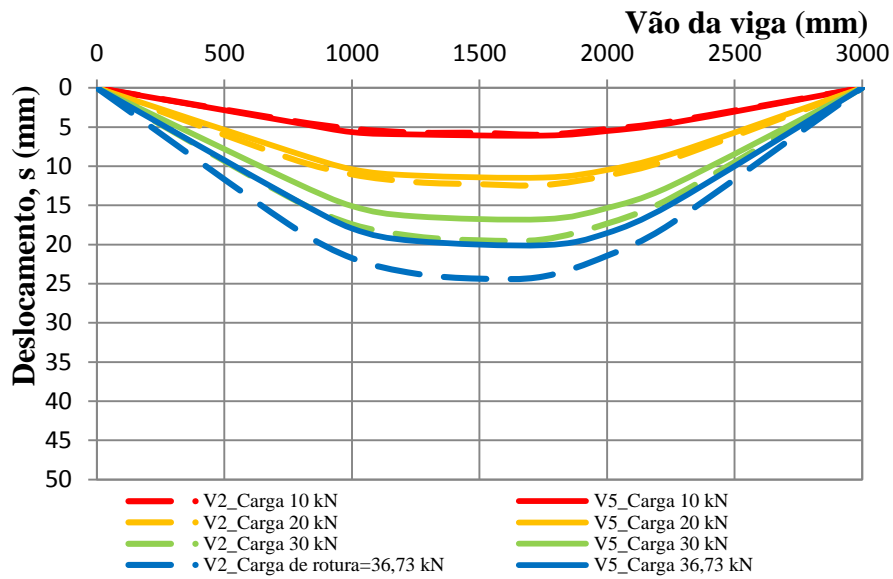


Figura 5.54 – Deformada das vigas V2 e V5.

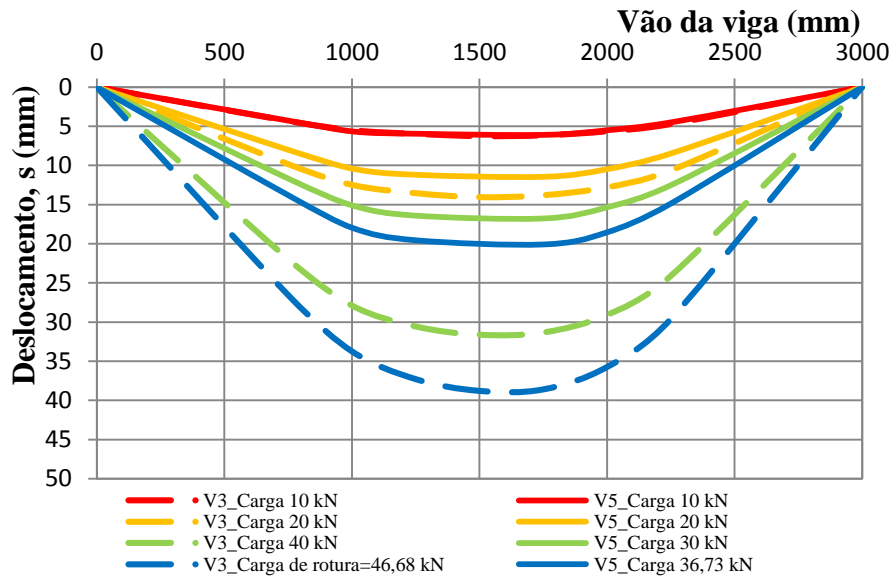


Figura 5.55 – Deformada das vigas V3 e V5.

Na Tabela 5.7 apresentam-se os deslocamentos para as 3 vigas que não atingiram a rotura. Os valores apresentados para a viga V2 (PM1) correspondem ao LVDT D12, para a V3 (PM2) utilizou-se o D4 e para a V5 (PM3) o D5. Escolheram-se os LVDT onde se obtiveram os deslocamentos máximos.

Repara-se que a viga sem reforço teve uma deformação inferior à reforçada por EBR, e que a reforçada por EBRA tem uma deformação bastante inferior às restantes.

Tabela 5.7 – Valores das deformações das vigas sem rotura.

Viga	F [kN]	d [mm]	Δ_{V2} [%]	Δ_{V3} [%]
V2	10	5,98	-	-
V3		6,27	-4,85	-
V5		6,09	-1,84	2,87
V2	20	12,43	-	-
V3		14,06	-13,11	-
V5		11,45	7,88	18,56
V2	30	19,36	-	-
V3		22,76	-17,56	-
V5		16,77	13,38	26,32
V2	36,73	24,09	-	-
V3		28,57	-18,60	-
V5		20,09	16,60	29,68
V3	40	31,63	-	-
V5		21,65	-	31,55
V3	46,55	38,79	-	-
V5		24,85	-	35,94

5.3.3. Extensões no laminado de CFRP

Nas extensões apenas foram possíveis comparar as vigas V3 (EBR) e V5 (EBRA), sendo que nenhuma atingiu a rotura. Tal como na deformação, a extensão para os 10 kN apresenta poucas diferenças, mas a partir daí a extensão no EBRA é muito menor. A Figura 5.56 mostra as extensões no CFRP ao longo do vão das vigas V3 e V5 para patamares de carga iguais.

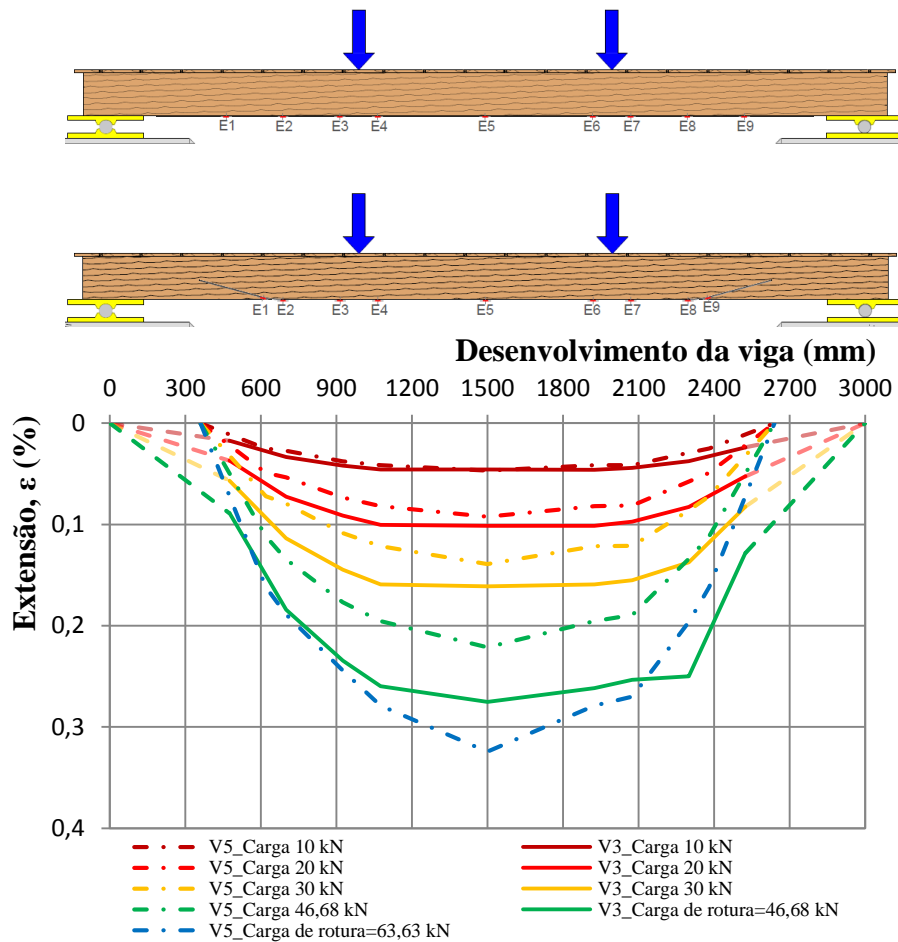


Figura 5.56 – Extensão no laminado para as vigas V3 e V5.

A Tabela 5.8 apresenta as extensões no laminado de CFRP a meio-vão das vigas V3, V5 e V6, para patamares de carga, e o ganho de extensão nas vigas V5 e V6 em relação à V3. Na viga V6 apenas se monitorizou o meio-vão. Nota-se que a extensão no CFRP a meio-vão da viga V6 (EBRA) foi sempre bastante inferior à viga V3 (EBR), assim como a extensão a meio-vão da viga V5 (EBRA) em relação à viga V3 (EBR).

Para se realçar melhor o aproveitamento do laminado de CFRP, o gráfico da Figura 5.57 permite verificar que o laminado de CFRP atinge uma extensão de 0,89 %, o que representa 86,41 % da extensão de rotura média do laminado pelo que neste ensaio o laminado foi bastante bem explorado. Este valor foi observado a meio-vão, e a rotura do laminado foi atingida numa das extremidades, pelo que o valor real da extensão (medida no ponto de rotura) atingida na rotura do laminado será superior aos 0,89 % medidos.

Tabela 5.8 – Extensões a meio vão nos laminados.

Viga	F [kN]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Δ_{V3} [%]
V3	10	0,046	-
V5		0,047	-2,17
V6		0,028	39,13
V3	20	0,101	-
V5		0,092	8,91
V6		0,063	37,62
V3	30	0,161	-
V5		0,139	13,66
V6		0,098	39,13
V3	40	0,224	-
V5		0,189	15,63
V6		0,138	38,39
V3	46,55	0,278	-
V5		0,221	20,50
V6		0,181	34,89

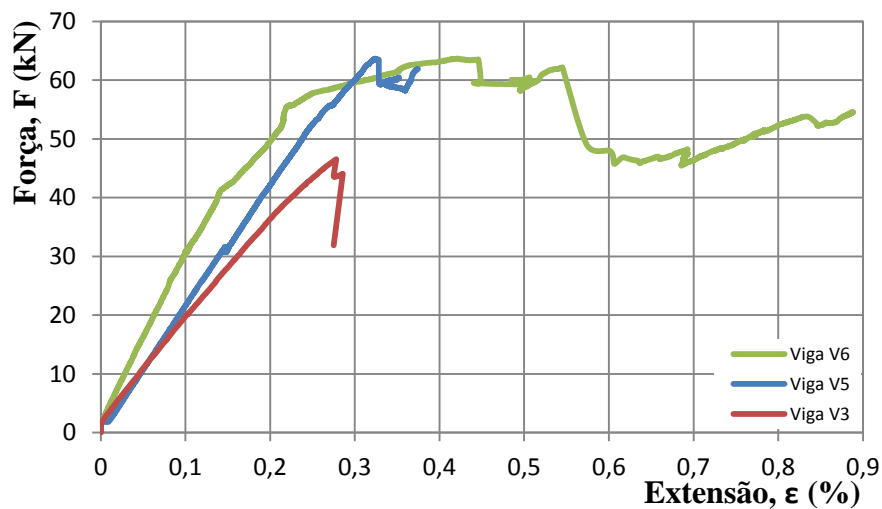


Figura 5.57 – Gráfico Força vs. extensão a meio vão das vigas V3, V5 e V6.

5.3.4. Tensões de aderência

As tensões de aderência, tal como as extensões, foi calculada a partir das leituras realizadas pelos extensómetros e conforme a expressão (5.2). A Figura 5.58 mostra as tensões de aderência ao longo do laminado de CFRP do pavimento PM2 e pavimento PM3 para a carga de 10 kN, carga de rotura do pavimento PM2 e carga de rotura do pavimento PM3.

Analisando os resultados mostrados na Figura 5.58 pode-se afirmar que para a carga de 10 kN, isto é, para uma fase inicial do ensaio, a diferença de tensões de aderência ainda não é muito acentuada entre pavimentos. Na rotura, o pavimento PM2 atingiu uma tensão de aderência máxima de 1,20 MPa. Em ambos os pavimentos verifica-se que a tensão de aderência é bastante maior entre a carga e as extremidades de colagem do CFRP. Na rotura o pavimento PM3 atingiu 1,40 MPa de tensão de aderência máxima. Em ambas as vigas, note-se que as tensões de aderência na zona entre cargas tomam valores perto do 0, isto deve-se ao facto de nessa zona o momento fletor ser constante.

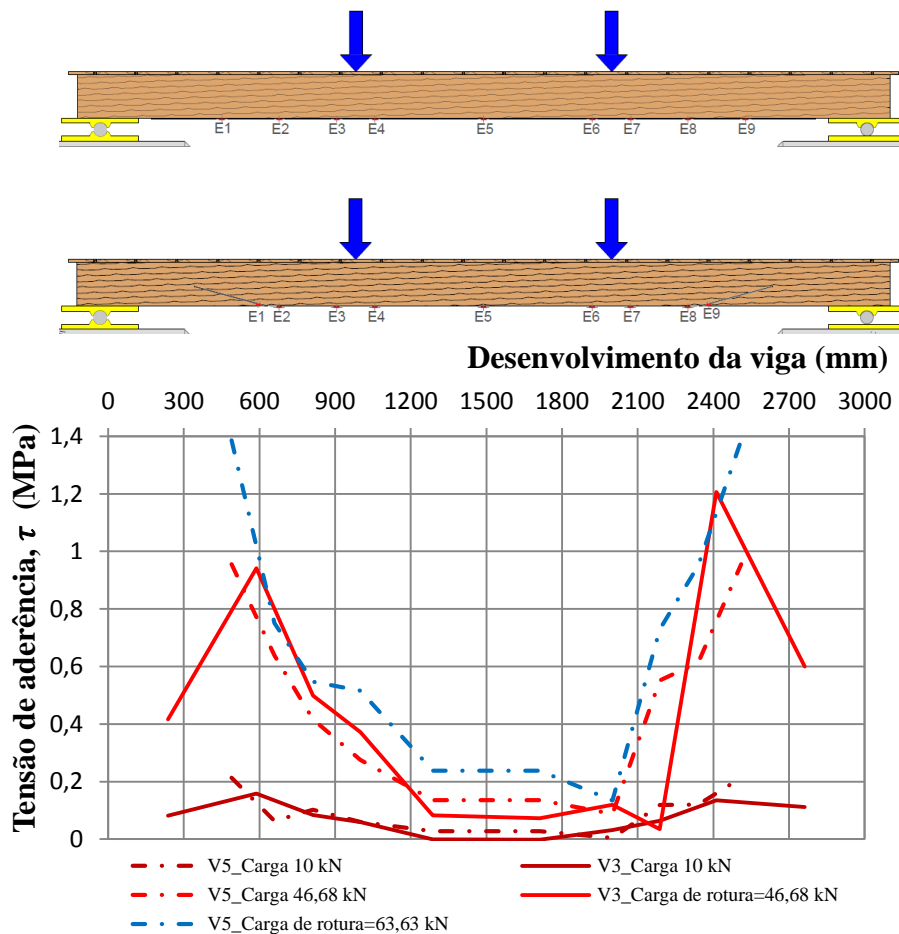


Figura 5.58 – Tensão de aderência nos pavimentos PM2 e PM3.

Estes resultados são algo distintos daqueles reportados por Biscaia [13] que ensaiou vigas de betão armado reforçadas com GFRP. As grandes diferenças entre os resultados obtidos para as vigas de betão e vigas de madeira reside precisamente na fendilhação que ocorre no betão e que altera a transferência de tensões de aderência entre materiais. Assim, no caso do betão, as tensões de aderência foram oscilando entre valores negativos e positivos devido ao aparecimento e desenvolvimento de fendas desenvolvendo-se maiores tensões de aderência na zona de aplicação das cargas. Quanto à madeira, pela Figura 5.58 pode-se afirmar que, contrariamente ao betão, as tensões de aderência desenvolvidas na

interface CFRP/madeira não apresentam variações bruscas e acentuadas (sem inversão de tensões) uma vez que não existe o mesmo tipo de fendilhação na madeira. Por conseguinte, as tensões de aderência na interface CFRP/madeira desenvolvem-se maioritariamente nas zonas entre o apoio e a carga.

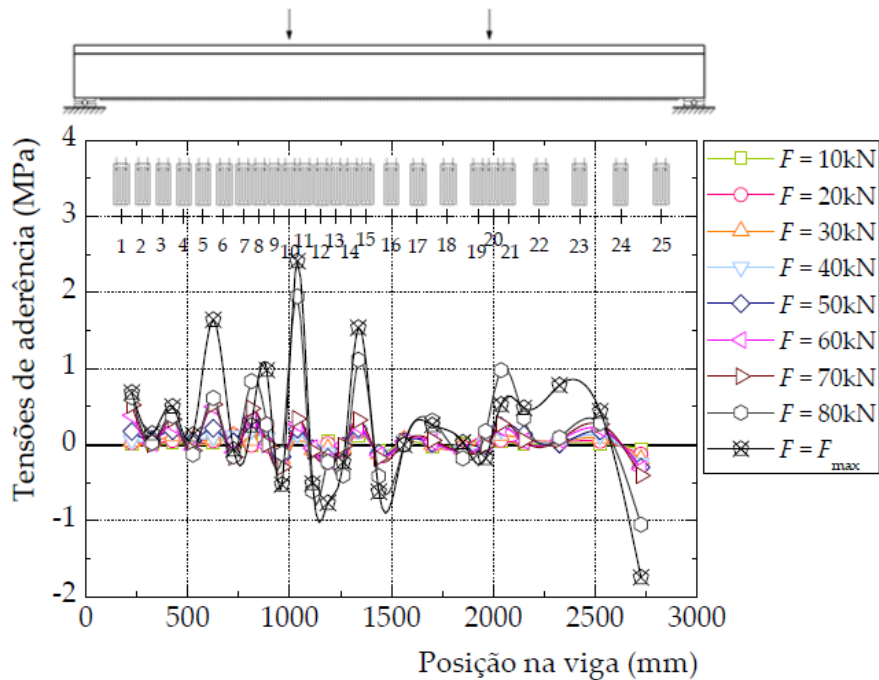


Figura 5.59 – Distribuição das tensões de aderência no betão [13].

5.4. Modelo analítico

Neste subcapítulo apresenta-se um modelo analítico de forma a estimar a capacidade de carga de cada técnica de reforço.

No desenvolvimento do modelo analítico admitiu-se, em conformidade com o ponto 3.1.2 do EC 5 [33], que a madeira tem um comportamento elástico linear quando sujeita à tração, que tem um comportamento elasto-plástico quando sujeito à compressão. A Figura 5.60 representa o comportamento constitutivo adotado para a madeira. Assumiu-se que os laminados de CFRP têm um comportamento elástico linear até à rotura, e que não há deslizamentos entre os laminados e o substrato de madeira.

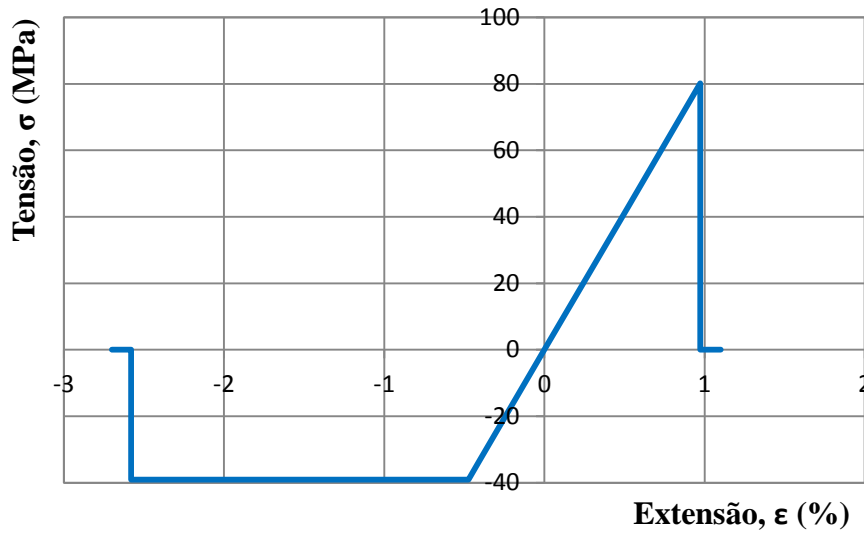


Figura 5.60 – Comportamento da madeira adotado.

Nesta secção, uma vez que as vigas de madeira têm dimensões, quantidades de nós, fendas iniciais, envelhecimentos diferentes, faz-se a análise de apenas uma viga de madeira por forma a realçar os valores alcançados na rotura de cada uma delas. As características geométricas e mecânicas para o cálculo da capacidade de carga dos pavimentos de madeira estão apresentadas na Figura 5.61 e na Tabela 5.9.

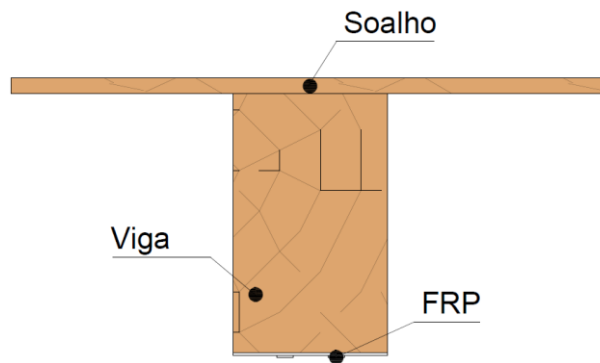


Figura 5.61 – Pavimento tipo.

Tabela 5.9 – Características dos materiais.

Características	Comprimento, L [mm]	Altura, h [mm]	Largura, b [mm]	Módulo de Elasticidade à flexão, E [MPa]	Módulo de Elasticidade à compressão, E [MPa]	Tensão de corte, τ_c [MPa]
Material						
Madeira						
Viga	3300	160	95	9300	2760	1,5*
Soalho	3300	10	370			
CFRP (1 fibra)	2600	1,4	10 (cada)	159000		-

*Valor médio retirado da Tabela 3.2 para a madeira utilizada na presente dissertação.

a) Reforço pela técnica EBR

Através dos ensaios de corte simples com a técnica de reforço EBR, foi descrita uma curva *bond-slip* teórica [11]. Segundo Dai *et al.* [26], é possível prever a extensão de rotura do laminado por flexão através dos dados desta curva teórica, dada pela expressão:

$$\varepsilon_{max} = \sqrt{\frac{2G_F}{E_f \cdot t_f}} \quad (5.3)$$

onde E_f e t_f são, respetivamente, o módulo de elasticidade e a espessura do compósito, ε_{max} é a extensão máxima no compósito de FRP e G_F é a energia de fratura (área delimitada pela curva *bond-slip*), que pelo ponto 4.3.2 toma o valor de 3,07 N/mm. Obteve-se um valor de ε_{max} de 0,525 %.

Para se estimar o momento-fletor para o qual a madeira atinge a rotura por flexão, calcula-se o momento resistente (M_1) através da expressão:

$$M_1 = \frac{\sigma_t \times I_h}{y} \quad (5.4)$$

onde a tensão de tração, σ_t , é obtida multiplicando a ε_{max} pelo módulo de elasticidade das vigas de madeira e I_h é o momento de inércia da secção homogeneizada.

Admitindo que a viga de madeira é o único elemento capaz de resistir ao corte, já que a espessura de CFRP e de soalho são muito pequenas quando comparado com as espessuras das vigas de madeira, pode-se calcular o esforço transversal resistente das vigas e por sua vez, o momento-fletor correspondente (M_2):

$$M_2 = \frac{\tau_c \times A_{viga} \times 2 \times L_c}{3} \quad (5.5)$$

Onde L_c é o vão de corte, tomando o valor de 1 metro.

Para este efeito, homogeneizou-se a secção, tendo-se obtido um coeficiente de homogeneização, $\alpha = 17,10$, uma largura da secção de FRP homogeneizada de 343,80 mm, uma área de FRP homogeneizada de 481,32 mm² e uma área final de 19 381,30 mm² (veja-se a Figura 5.62).

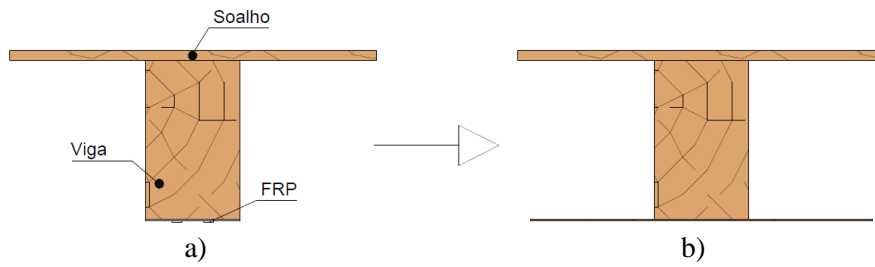


Figura 5.62 – a) Secção original; b) Secção homogeneizada.

A seguir, calculou-se o momento de inércia desta secção, e para o caso em que os materiais têm um comportamento elástico e linear, o centro de gravidade corresponde com a posição da linha neutra, isto é, $x = 74,91$ mm (medido a partir do topo da viga), e a inércia homogeneizada obtida a partir das inércias separadas, do soalho ($1,81 \times 10^7 \text{ mm}^4$), da viga ($3,59 \times 10^7 \text{ mm}^4$) e do FRP ($6,18 \times 10^6 \text{ mm}^4$), obteve-se o valor de $6,02 \times 10^7 \text{ mm}^4$.

A extensão de tração máxima no laminado de CFRP como referido toma o valor de 0,525 %. Sabendo o valor da extensão no CFRP que corresponde ao seu descolamento prematuro da superfície de madeira e com a Figura 5.63, sabe-se que a madeira se encontra em fase elástica, pelo que pode-se calcular a extensão de compressão máxima.

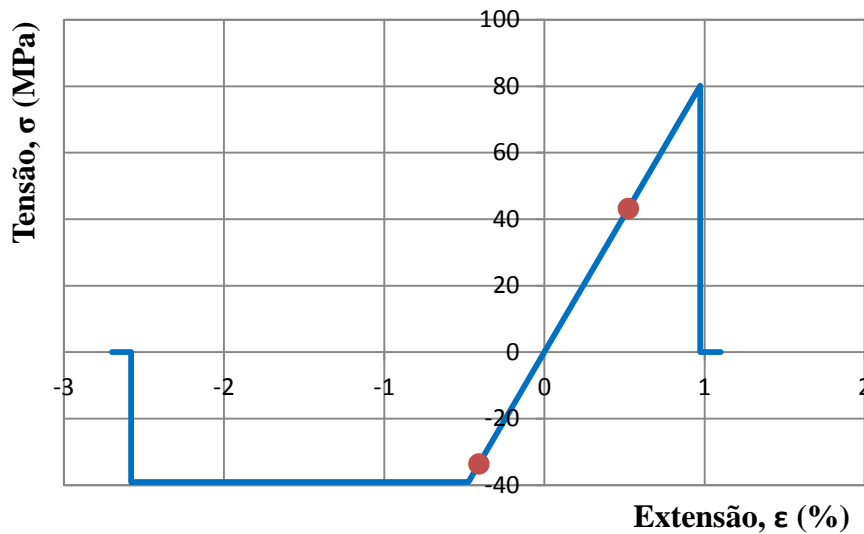


Figura 5.63 – Extensão máxima teórica de tração e de compressão.

Sabendo a extensão de tração máxima, 0,525 %, é possível calcular a extensão de compressão máxima com base na Figura 5.64:

$$\epsilon_c = \frac{0,525 \times 74,71}{96,49} = 0,408 \%$$

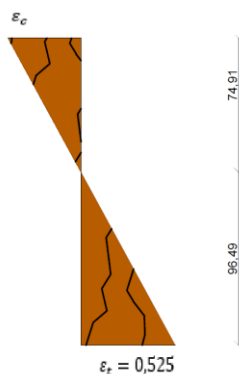


Figura 5.64 – Diagrama da extensão à tração e à compressão da madeira.

Nestas circunstâncias, a viga de madeira está ainda em fase elástica (Figura 5.64).

Para o cálculo do momento de resistência à flexão, teve-se em conta o estudo efetuado por Wan *et al* [68] que refere que a distância entre a superfície colada com o CFRP e a medula (centro do tronco) da madeira tem de ser considerada. Nos ensaios realizados por Wan *et al*. [68] as cargas de rotura máximas obtidas em ensaios de arrancamento em que o CFRP foi colado numa superfície mais próxima da medula foram superiores em cerca de 60 % à situação em que o CFRP ficou colado numa superfície mais afastada do centro da madeira. Tendo em conta que nos ensaios de corte simples se utilizou uma zona interior da viga, isto é, com superfícies mais perto do centro da madeira, e nos ensaios de flexão se utilizou a viga na totalidade, o valor de extensão do CFRP para a qual este descola foi reduzida em 40 %, obtendo-se então a extensão máxima no CFRP de 0,315 %.

Calculou-se então o valor do momento resistente à flexão através da Eq. (5.4), tendo em conta os parâmetros já definidos, obtendo-se um valor final de 18,28 kN.m.

Por fim, calculou-se o valor do momento resistente para o qual a viga colapsa ao corte através da Eq. (5.5), obtendo-se um valor final de 15,20 kN.m.

Assim, perante estes resultados pode afirmar-se que a viga reforçada com a técnica EBR colapsou devido a problema de corte antes de atingir a rotura por flexão. Comparando o valor obtido em ensaio (11,64 kN.m) e o valor da rotura por corte (15,20 kN.m), a diferença entre ambos é de cerca de 23 % pelo que pode-se afirmar que a rotura da viga de madeira ocorreu por corte.

b) Reforço pela técnica EBRA

Para o reforço através da técnica EBRA, o valor de rotura atingido foi de 15,88 kN.m, um pouco superior ao valor de resistência ao corte (15,20 kN.m). No ensaio realizado com a técnica EBRA a rotura atingida foi por corte, no entanto este tipo de reforço melhorou a capacidade resistente da viga à flexão, mas aquando do corte, o CFRP conseguiu prevenir uma rotura frágil.

Neste sentido, de modo a melhorar o desempenho à flexão de ambas as técnicas de reforço, deverá utilizar-se, conjuntamente com o reforço efetuado, um reforço ao corte, em conformidade com o já descrito no ponto 2.3.

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1. Conclusões

No presente capítulo apresentam-se as conclusões mais relevantes sobre o trabalho desenvolvido, tendo em conta os objetivos inicialmente propostos e os objetivos alcançados. Apresentam-se ainda alguns aspetos que podem ser considerados como desenvolvimentos futuros com o objetivo de aumentar a eficácia dos reforços com CFRP.

Ao longo do presente trabalho realizaram-se ensaios de corte simples em provetes de madeira reforçados com compósitos de CFRP para se perceber a influência do comprimento colado e da técnica de colagem dos compósitos de CFRP na ligação entre o CFRP e a madeira. As técnicas de colagem utilizadas foram o *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) e a *Near surface mounted* (NSM).

No que diz respeito à aplicação dos sistemas de reforço, processo que desempenha um papel fulcral em qualquer aplicação de reforço, constatou-se que a técnica EBR é bastante mais fácil de aplicar em relação à técnica NSM.

O modelo tri-linear proposto poderá conduzir a expressões analíticas que poderão ser úteis a implementar em códigos ou normas de dimensionamento de ligações entre CFRP/madeira para reforço EBR. A curva bond-slip proposta ajusta-se bastante aos ensaios realizados, e teoricamente ajustar-se-á às amostras reforçadas com a técnica NSM.

A partir dos ensaios experimentais conclui-se que em qualquer das duas técnicas de colagem estudadas, a força transmitida ao compósito de CFRP aumenta com o comprimento de colagem. No entanto, a resistência da ligação deixa de aumentar a partir de um certo comprimento colado, o qual se identifica

como comprimento efetivo da ligação. Com base nos ensaios experimentais, conclui-se que para ambas as técnicas (EBR e NSM) o comprimento de ligação se situa entre os 125 mm e os 155 mm.

Dos resultados obtidos, conclui-se que se conseguem impor forças cerca de 30 % superiores nas amostras reforçadas pela técnica NSM comparativamente às amostras reforçadas pela técnica EBR.

Para as amostras reforçadas por EBR ocorreram 3 tipos de rotura diferentes, rotura adesiva na interface entre o CFRP e a resina, rotura mista entre rotura na interface entre a madeira e a resina e rotura na interface entre o CFRP e a resina, e por fim rotura mista entre destacamento da madeira e rotura na interface entre o CFRP e a resina, sendo que a mais predominante (50 % das amostras) foi a rotura adesiva na interface entre o CFRP e a resina. Para as amostras reforçadas por NSM, a rotura em todas aconteceu por destacamento da madeira, exceto o ensaio que foi condicionado pelo dispositivo de amarração, que ocorreu a rotura do CFRP mas que não foi considerado um ensaio válido.

Foram também estudados três pavimentos de madeira à flexão. Compostos por duas vigas com soalho na ligação entre estas, sendo um de referência, um reforçado com laminados de CFRP através da técnica EBR e outro com laminados de CFRP com uma técnica em desenvolvimento no DEC da FCT durante a dissertação denominada de *Externally Bonded Reinforcement Anchorage* (EBRA), sendo esta última totalmente inovadora. Realizou-se uma análise comparativa do desempenho de ambas as técnicas em ensaios monotónicos.

No que diz respeito à aplicação dos sistemas de reforço, processo que desempenha um papel fulcral em qualquer aplicação de reforço, constatou-se que ambos são fáceis e rápidos de aplicar, mesmo comparativamente a outras técnicas como a substituição das vigas ou reforço com vigas metálicas. Para a técnica EBRA teve que se executar uma furação na madeira, o que se justifica face à eficácia da técnica.

Em termos do comportamento estrutural, verificou-se que ambas as técnicas apresentaram melhorias nos resultados face ao pavimento não reforçado. Na rotura, o sistema EBR contabilizou um aumento de força máxima de 26,74 % em relação ao pavimento de referência, enquanto o sistema EBRA em termos de força máxima contabilizou um aumento de 73,35 % face ao pavimento de referência e 36,78 % face à técnica EBR.

Em termos de rigidez global dos elementos verificou-se que a técnica EBRA apresentou sempre valores superiores comparativamente à EBR e ao pavimento de referência. Por outro lado, a técnica EBRA é claramente mais dúctil em relação aos outros dois pavimentos, uma vez que na rotura obteve um incremento de deslocamento de 50,85 % e 49,70 % em relação ao pavimento de rotura e à técnica EBR respetivamente.

A técnica de reforço EBR em relação ao pavimento de referência não obteve ganhos relevantes de flechas. Já a técnica de reforço EBRA teve um ganho em média de 41 % em relação ao pavimento PM1 (Referência) e de cerca de 32 % em relação ao pavimento PM2 (EBR).

No que diz respeito aos mecanismos de rotura, foi possível constatar que no sistema EBRA o laminado foi testado ao limite sendo que a rotura ocorreu na zona da amarração já após o colapso da madeira, tendo-se atingido uma extensão de 0,89 % do laminado, o que corresponde a 86,41 % da extensão de rotura do mesmo, enquanto no EBR a rotura foi precoce e deu-se por descolamento do laminado, onde foi possível constatar que não foi testado ao limite visto que apenas atingiu uma extensão de 0,28 %, o que corresponde a 27,18 % da extensão de rotura do mesmo, sendo esta uma das grandes vantagens do sistema EBRA.

Uma análise global permite afirmar que o reforço pela técnica EBRA é bastante eficiente, quer em relação à técnica EBR, quer ao sistema sem reforço. Também é possível afirmar que a técnica EBR melhora a solução, o que constitui um bom reforço, sendo que fica um pouco aquém no que se refere a aproveitar as capacidades do laminado.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Tendo-se alcançado de forma geral todos os objetivos inicialmente propostos no âmbito deste trabalho, é natural que no final do mesmo, novas questões tomem forma. Para tal, neste subcapítulo apresentam-se possíveis desenvolvimentos futuros.

Como se pôde constatar, os resultados para o corte simples em relação à técnica de reforço NSM foram reduzidos, de maneira que se propõe uma repetição dos ensaios, desta vez com recurso a extensómetros de forma a obter uma melhor monitorização dos resultados.

Seria interessante repetir os ensaios de corte simples, quer da técnica de reforço EBR, quer NSM para outro tipo de madeira, de forma a perceber a influência deste parâmetro. Seria também relevante observar este efeito em madeira lamelada colada que é bastante mais utilizada nos dias de hoje.

Seria importante fazer variar o tipo de CFRP, por exemplo utilizando varões circulares, por forma a constatar a eficácia de cada solução. Seria também interessante fazer variar a espessura e a largura da resina aplicada nos ensaios de corte simples, para compreender a influência destes parâmetros neste tipo de ligação.

De forma a compreender e poder prever os ensaios da técnica de reforço EBRA, seria importante replicar os ensaios de corte simples desta vez com essa técnica.

Seria interessante replicar os ensaios de flexão também com outro tipo de madeira, e também com madeira lamelada colada. Seria relevante aplicar a técnica NSM em ensaios de flexão. No que diz respeito aos furos da técnica de reforço EBRA, seria importante fazer um estudo mais aprofundado sobre a influência da inclinação e profundidade do furo.

Referências Bibliográficas

- [1] André, A.: “*Fibres for Strengthening of a timber structures*”. Research report, Lulea University of Technology, 2006.
- [2] Appleton, J.: “*Reabilitação de edifícios antigos – Patologias e tecnologias de intervenção*”, Edições Òrion, 2011.
- [3] ASTM-D143: “*Standard Test Method for Small Clear Specimens of Timber*”, 2000.
- [4] ASTM-D3039/D3039M.: “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”. Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [5] Balseiro, A.: “*Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP*”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [6] Barbosa, R.: “*Estruturas de madeira lamelada colada reforçada com sistemas compósitos de FRP*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [7] Barros, J.A.O.: “*Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão: parte I: propriedades e técnicas*”, Publindústria, 2007.
- [8] Bastos, J.: “*Asnas tradicionais de madeira: caracterização e reforço*”. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2011.
- [9] Beber, A., Campos Filho, A. e Campagnolo, J.: “*Reforço de estruturas de concreto armado com tecidos pré-impregnados de fibras de carbono*”, Revista Técnica, 2000.
- [10] Benedetti, A. e Colla, C.: “*Strengthening of old timber beams by means of externally bonded reinforcement*”. World Conference on Timber Engineering, WCTE2010, Trentino, Italy, 20-24 June 2010.

- [11] Biscaia, H., Chastre, C., Borba, I., Cinderela, S. e Cruz, D.: “*Experimental Evaluation of Bonding between CFRP Laminates and Different Structural Materials*”. Journal of Composites for Construction, 2015.
- [12] Biscaia, H., Chastre, C., Silva, Manuel.: “*Linear and Nonlinear Analysis of Bond-Slip Models for Interfaces Between FRP Composites and Concrete*”. Composites Part B Engineering, 2013.
- [13] Biscaia, H.: “*Comportamento e modelação da ligação GFRP/Betão em elementos de betão armado expostos a ambientes agressivos*”. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [14] Biscaia, H.: “*Rotura por perda de aderência entre reforços poliméricos com fibras de vidro e elementos estruturais de betão*”, Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2006.
- [15] Biscaia, HC, Chastre, C e Viegas, A.: “*A new discrete method to model FRP-to-parent material bonded joints*”, Composite Structures, 2015.
- [16] Borba, I.: “*Comportamento da ligação CFRP/betão em estruturas de betão armado*”. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [17] Borri, A., Corradi, M. e Grazini, A.: “*A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials*”. Science Direct, 2005;36:143-153.
- [18] Botelho, J.: “*Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [19] Carvalho, T.: “*Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP*”. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [20] CNR-DT 201-2005, *Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Timber structures*. CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Roma, 2007.
- [21] Coutinho, J.: *Apontamentos das aulas teóricas de Materiais de Construção I*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.
- [22] Cruz, H. e Nunes, L.: “*A madeira como material de construção*”, Núcleo de Estruturas de Madeira, LNEC.
- [23] Cruz, H.: “*Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal. Instrumentos para a garantia da qualidade*”. Revista portuguesa de engenharia de estruturas, 2007.
- [24] Cruz, P.J.S., Dias, S.J.E. e Branco, J.M.: “*Avaliação da aderência da ligação colada madeira-CFRP*”, 1º Congresso Ibérico - A madeira na Construção, Guimarães, Março, 2004.
- [25] Cunha, J. e Dogmar, S. Jr.: “*Avaliação estrutural de peças de madeira reforçadas por fibras de carbono*”, Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, Nº 20, 05/2004, página 71-81, 2004.

- [26] Dai, J., Ueda, T., e Sato, Y.: “Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method”. *Journal of Composites for Construction*, 2005; 9(1):52-62.
- [27] Dias, S., Branco, J. e Cruz, P.: “*Reforço à flexão com compósitos de CFRP de vigas de madeira lamelada-colada*”. Universidade do Minho.
- [28] Dourado, N., Pereira, F.A.M., Moura, M.F.S.F. e Morais, J.J.L.: “*Repairing wood beams under bending using carbon-epoxy composites*”. *Engineering Structures*, 2012;34:342-350.
- [29] EN 1542: “*Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off*”, European Standard, CEN, Brussels, 1999.
- [30] EN 338: “*Structural Timber – Strength classes*”. European Standard, CEN, Brussels, 2009.
- [31] EN 350: “*Durability of wood and wood-based products. Natural durability of solid wood*”. European Standard, CEN, Brussels, 1993.
- [32] EN 408: “*Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*”, 2003.
- [33] Eurocode 5 (EC5): “*Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings*”. EN 1995-1-1; November 2004.
- [34] Ferracuti, B.: “*Strengthening of RC structures by FRP: Experimental analyses and numerical modeling*”. Tese de Doutorado, Università degli Studi di Bologna, Italy, 2006.
- [35] *Fib-Bulletin 14, Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, 2001.
- [36] Franco, S.: “*Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual in situ*”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [37] Green, D. W.: “*Wood Handbook - Wood as an engineering material*”. Forest Products Laboratory, 1999.
- [38] Henriques, D.: “*Tratamento e consolidação de madeira de Pinho bravo degradada em elementos estruturais de edifícios antigos*”. Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico, 2011.
- [39] <http://www.panoramio.com/photo/23762299>, acessado a 6 de Junho.
- [40] <http://www.panoramio.com/photo/69905142>, acessado a 6 de Junho.
- [41] <http://www.panoramio.com/photo/79452239>, acessado a 6 de Junho.
- [42] Johnsson, H., Blanksv, T. e Carolin, A.: “*Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement*”. *Materials and Structures*, 2006;40:47-56.
- [43] Juvandes, L.F.P. e Barbosa, R.M.T.: “*Bond analysis of Timber Structures Strengthened with FRP Systems*”. *Strain*, 2012;48(2):124-135.
- [44] Kollmann, F. e Côté, W.: “*Principles of wood science and technology*”, 1968.
- [45] Lawrence, C.B., “*Composites for Construction: Structural design with FRP materials*”. ed. I. John Wiley & Sons., Hoboken, New Jersey, 2006.

- [46] LNEC E31: “*Terminologia de madeiras*”. Lisboa, 1955.
- [47] LNEC M1: “*Madeira para construção. Especificação de Madeiras para estruturas*”. Lisboa, 1997.
- [48] LNEC M4: “*Madeira para construção. Casquinha*”. Lisboa, 1997.
- [49] LNEC M9: “*Madeira para construção. Humidade da Madeira*”. Lisboa, 1997.
- [50] Martins, T.: “*Dimensionamento de estruturas em madeira*”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [51] Matthys, S.: “*Structural behavior and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement*”. Tese de Doutoramento, Universidade de Ghent, 2000.
- [52] Mazzotti, C, Savoia, M e Ferracuti, B.: “*An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete*”. *Construction and Building Materials*, 2008; 22:1409-1421.
- [53] Monteiro, A.: “*Reforço de vigas de betão armado com armaduras exteriores de FRP*”. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [54] Moreschi, J.: “*Propriedades da Madeira*”. Apontamentos do Setor de Ciências Agrárias da UFPR, Curitiba, 2014.
- [55] Negrão, H. e Faria, A.: “*Projecto de estruturas de Madeira*”. Publindústria, 2009.
- [56] Negrão, H.: “*Dimensionamento de elementos de madeira segundo o Eurocódigo 5*”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2004.
- [57] NP 617: “*Madeiras – Determinação da Dureza*”. IPQ, Lisboa, 1973.
- [58] NP 618: “*Madeiras - Ensaio de compressão axial*”. IPQ, Lisboa, 1973.
- [59] NP 619: “*Madeiras - Ensaio de flexão estática*”. IPQ, Lisboa, 1973.
- [60] Pereira, S.: “*Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga*”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [61] S&P Laminates CFK: “*Prefabricated carbon fibre plates*”. Technical Data Sheet, 2012.
- [62] S&P Resin 220 epoxy adhesive: “*Two-component epoxy resin-based adhesive for S&P FRP Systems*”. Technical Data Sheet, 2013.
- [63] Santos, J.: “*Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira*”. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2007.
- [64] Sardinha, A.: “*Ciência e tecnologia dos materiais – A Madeira*”, Capítulo III, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 1988.
- [65] Sikadur – 52 injection. Technical Data Sheet, 2011.
- [66] Soares, A.M. e Martins, J.G.: “*Reforço de Estruturas de Betão Armado com CFRP*”, Monografia, UFP, 2006.

- [67] Tingley, D.: “*Over a decade of research results in new, improved glulam*”, Canadian Consulting Engineer, 1996.
- [68] Wan, J., Smith, S.T. e Qiao, P.Z.: “*FRP-to-Softwood Joints: Experimental Investigation*”. The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Beijing, China, 2010.