

ESTRUTURAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA REFORÇADA COM SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP

Análise da aderência entre os materiais

RUI MANUEL TEIXEIRA BARBOSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À Joana

Trails of troubles, Roads of battles, Paths of victory, We shall walk.

Bob Dylan, 1964

AGRADECIMENTOS

No culminar deste trabalho, desejo exprimir o meu reconhecimento às pessoas ou entidades, que das mais variadas formas contribuíram para que fossem atingidos os objectivos propostos.

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Professor Luís Juvandes, pelo seu empenho, dedicação e disponibilidade, desde a definição das linhas orientadoras até à revisão de conteúdos deste trabalho. Queria agradecer ainda todos os ensinamentos técnicos, artigos cedidos, conselhos de organização do documento, e amizade. Foi sem dúvida um orientador presente.

Gostaria de agradecer também ao Engenheiro Sérgio Silva, que realizou a campanha experimental de aderência em flexão, pela disponibilidade e pelos esclarecimentos dados, em torno da interpretação dos dados experimentais.

Ao Engenheiro Jorge Branco, manifesto a minha gratidão pela colaboração, apoio e disponibilidade na interpretação de características ligadas ao material madeira, e pelos artigos italianos cedidos.

Agradeço, também, ao Professor Staffan Svensson, professor na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU), pelos seus ensinamentos e documentação fornecida na área da tecnologia da madeira, prestados durante o meu período de Erasmus, e pelos seus esclarecimentos seguintes em comunicação por correio electrónico.

Agradeço ainda à instituição Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), que me acolheu e transformou em bons momentos, não só esta experiência de investigação científica, como a totalidade dos 5 anos de curso.

À Secção de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da FEUP pelos meios colocados à minha disposição no decurso desta tese, e em especial à D. Maria Teresa, o meu agradecimento pelo acolhimento, atenção e colaboração prestada.

À técnica Paula Silva do Laboratório de Estruturas da FEUP (LABEST), o meu agradecimento pela total disponibilidade na realização, aquisição e interpretação dos dados da campanha experimental de ensaios de aderência em flexão.

À Flexilam, empresa que disponibilizou todos os provetes de madeira lamelada colada utilizados nas várias campanhas experimentais incluídas nesta dissertação.

Por último, queria agradecer aos meus pais e irmãos, que sempre me estimularam e me deram forças no decorrer da minha formação, em particular no ensino universitário, muitas das vezes abdicando muito de si, para me proporcionar o tempo, espaço e o apoio moral necessários.

RESUMO

A madeira tem sido usada ao longo dos tempos devido às suas características mecânicas, natureza ecológica e produção sustentável. No entanto, este material apresenta limitações estruturais que podem ser corrigidas recorrendo a outros materiais de reforço, nomeadamente, os designados materiais compósitos reforçados com fibras (FRP).

Pelo facto de ser corrente o uso da técnica de colagem para implementar a ligação entre materiais, a sua generalização à técnica de reforço de elementos de madeira por adição de compósitos de CFRP (com fibras de carbono) impõe que se conheça bem o comportamento da junta colada madeira-CFRP. A técnica pode apresentar-se com colagem externa (EBR) ou selagem numa ranhura superficial (NSM).

A via experimental foi o método preconizado neste trabalho para se esclarecer a importância de parâmetros como o valor da tensão de aderência por arrancamento (“Pull-Off”), o valor da força máxima de amarração da armadura à madeira, o valor do máximo comprimento efectivo de colagem entre os materiais, o máximo rendimento possível obter com o compósito e a sua dependência com os modos de ruína e o valor máximo da tensão tangencial média desenvolvida na interface de ligação entre os materiais.

Embora não se tendo realizado o trabalho experimental, procurou-se resumir, analisar, e interpretar campanhas de ensaios de aderência por “Pull-Off” e por “Modelos de Flexão”, realizadas por autores ligados ao Laboratório de Compósitos do DEC.

Por forma a extraírem-se ilações relativamente à definição de modelos analíticos de previsão do comportamento de juntas madeira-CFRP, terminou-se o programa de trabalhos da presente dissertação com um estudo sobre a viabilidade do ajuste de um modelo preconizado no Bulletin N° 14 do FIB indicado para betão (Modelo A) e de outro proposto por Musner e Piazza (Modelo B) para a previsão das referidas juntas.

PALAVRAS-CHAVE: madeira lamelada colada (MLC), materiais compósitos reforçados com fibras (FRP), aderência madeira-compósito, reforço por EBR e NSM, análise experimental.

ABSTRACT

The wood has been used over time owing to their mechanical characteristics, ecological nature and sustainable production. However, this material presents some structural limitations that can be overcome by using other materials to strengthen, particularly those designated fibre reinforced composite materials (FRP).

Due to being current the use of the bonding technique to implement connection between materials, it was applied the bonding of CFRP (carbon fibre) composites to wood elements, which required to know the behaviour of the glued wood-CFRP joint. The bond strengthening technique can be done on the external surface (EBR) or in a longitudinal cut near to the surface (NSM).

This document is based on experimental analysis to evaluate the importance of parameters such as the value of the bonding tension by Pull-Off, the value of the maximum bond strength between wood and reinforcement, the value of the maximum effective bonding length, the maximum efficiency of the FRP reinforcement and its dependence on the failure modes, and finally, to evaluate the maximum shear stress developed at the interface of connection between the materials.

Although the experimental work was already done by other authors linked to the Composites Laboratory of DEC, this document summarizes, analyze and interpret the results of campaigns of testing for adherence by Pull-Off and Flexural Models.

In order to draw up lessons on the definition of analytical models to predict the behaviour of wood-CFRP joints, it was also made on this dissertation, a study on the feasibility of setting a model recommended in FIB Bulletin No. 14 indicated for concrete (Model A) and another proposed by Musner and Piazza (Model B) for predictions on those joints.

KEYWORDS: glue laminated timber (GLULAM), fibre reinforced polymer materials (FRP), bond wood-composite, strengthening by EBR and NSM, experimental analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO 1

2. REFORÇO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA COM COMPÓSITOS DE FRP.....5

2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	5
2.2.1. NA LINHA DA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL	5
2.2.2. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	7
2.2.3. PRODUTOS DERIVADOS	10
2.2.4. MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC)	12
2.2.5. CONSTRUÇÕES NO PASSADO, PRESENTE E FUTURO	14
2.2.6. ADIÇÃO DE ARMADURAS À MADEIRA	19
2.3. REFORÇO DE MADEIRA COM FRP	21
2.3.1. SISTEMAS DE FRP	21
2.3.2. SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP DISPONÍVEIS EM PORTUGAL.....	22
2.3.3. COMPATIBILIDADE ENTRE OS DOIS MATERIAIS	25
2.3.4. FACTORES A TER EM CONTA NA FASE DO REFORÇO	25
2.3.5. INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA REALIZADA NESTE DOMÍNIO	27
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29

3. ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR “PULL-OFF” 31

3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. ENSAIO DE “PULL-OFF”	31
3.3. INTERFACE E MATERIAIS	34
3.3.1. MADEIRA	35
3.3.2. SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP	36
3.4. ADERÊNCIA NA TÉCNICA EBR	38

3.4.1. MODELOS EXPERIMENTAIS.....	38
3.4.2. RESULTADOS E CONCLUSÕES	39
3.5. ADERÊNCIA NA TÉCNICA NSM.....	41
3.5.1. MODELOS EXPERIMENTAIS.....	41
3.5.2. RESULTADOS E CONCLUSÕES	43
3.6. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	44

4. ENSAIOS DE ADERÊNCIA EM FLEXÃO

4.1. INTRODUÇÃO	47
4.2. DEFINIÇÃO DOS MODELOS	48
4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	52
4.4. INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMA DE ENSAIO	53
4.5. METODOLOGIA DE OBSERVAÇÃO, MEDIÇÃO E ANÁLISE	58
4.6. RESULTADOS DOS ENSAIOS	60
4.6.1. TÉCNICA EBR.....	62
4.6.2. TÉCNICA HNSM	67
4.6.3. TÉCNICA VNSM.....	72
4.7. ANÁLISE DE RESULTADOS	76
4.7.1. COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE REFORÇO	76
4.7.2. COMPARAÇÃO COM JUNTAS BETÃO-FRP	83
4.8. CONCLUSÃO	90

5. MODELOS ANALÍTICOS DE ADERÊNCIA

5.1. INTRODUÇÃO	93
5.2. REAJUSTE DO MODELO A: BULLETIN Nº. 14 DO FIB	94
5.3. REAJUSTE DO MODELO B: MUSNER E PIAZZA.....	98
5.4. COMPARAÇÃO DOS MODELOS ANALÍTICOS	107
5.5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS MODELOS ANALÍTICOS.....	109
5.6. CONCLUSÃO	112

6. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	115
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	119

7. REFERÊNCIAS	121
A1. ANEXO 1 – PROGRAMA EXPERIMENTAL DE FLEXÃO	A.1
A2. ANEXO 2 – INFORMAÇÕES DOCUMENTAIS SOBRE JUNTAS	A.11

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Madeira: material de construção sustentável (WD&B Magazine, 2005).	6
Figura 2.2 – Vários sistemas de certificação de gestão sustentável de florestas.	7
Figura 2.3 – Comportamento mecânico típico da madeira: relação tensão-extensão.	8
Figura 2.4 – Diferente comportamento da madeira em tracção e em compressão.....	9
Figura 2.5 – Comportamento da madeira ao fogo.	10
Figura 2.6 – Defeitos da madeira: presença de nós.	10
Figura 2.7 – Produtos derivados de madeira: maciça e elementos lineares.	11
Figura 2.8 – Produtos derivados de madeira: elementos planos.....	12
Figura 2.9 – Processo de fabrico de MLC.....	13
Figura 2.10 – Fotografias de algumas fases do fabrico de MLC.	13
Figura 2.11 – Grande melhoria da resistência da madeira quando transformada em MLC.....	14
Figura 2.12 – Habitação “anónima”, início do séc. XX.....	15
Figura 2.13 – Palácio de Dueñas, em Medina del Campo, 1543.	15
Figura 2.14 – Caves Cálem, no Porto, séc. XIX.	16
Figura 2.15 – Keystone Wye Bridge, Dakota do Sul – EUA, 1968.	16
Figura 2.16 – Tacoma Dome, Washington – EUA, 1983.....	17
Figura 2.17 – Superior Dome, Michigan – EUA, 1991.....	17
Figura 2.18 – Piscina Bad Dürkheim, Alemanha, 1987.....	17
Figura 2.19 – Edifício da Caixa Galicia, Vigo, reabilitado em 1994.	18
Figura 2.20 – Pavilhão Atlântico, Portugal, 1998.....	18
Figura 2.21 – Ponte pedonal Leonardo da Vinci, Noruega, 2001.....	19
Figura 2.22 – Tensões normais na secção transversal de uma viga de madeira sujeita à flexão.	20
Figura 2.23 – Os sistemas compósitos de FRP mais correntes (unidireccionais).....	21
Figura 2.24 – Exemplo de alguns sistemas comerciais de FRP disponibilizados em Portugal (Laboratório de Compósitos do DEC-FEUP).	23
Figura 3.1 – Ensaio de “Pull-Off” em madeira reforçada com FRP, técnica EBR (Martins Sá <i>et al</i> , 2005).	32
Figura 3.2 – Provetes para ensaio de “Pull-Off” ajustados à técnica NSM (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006).	32
Figura 3.3 – Interface madeira-laminado FRP, realizada na técnica EBR.	35
Figura 3.4 – Interface madeira-manta FRP, realizada na técnica EBR.....	35
Figura 3.5 – Interface madeira-manta FRP, realizada na técnica NSM.	35

Figura 3.6 – Amplitude da resistência “ $f_{m,p}$ ” para madeira e betão.....	45
Figura 4.1 – Secção transversal tipo dos modelos experimentais definidos para as 3 técnicas.....	48
Figura 4.2 – Treliza teórica de inspiração para o modelo dos ensaios de aderência em flexão.....	48
Figura 4.3 – Modelo de TPBtest para avaliação da aderência da ligação MLC-CFRP (modelo de ensaio).....	49
Figura 4.4 – Geometria dos provetes de MLC utilizados.....	49
Figura 4.5 – Esquema 3D do modelo de ensaio de aderência em flexão da técnica EBR.....	50
Figura 4.6 – Esquema 3D do modelo de ensaio de aderência em flexão da técnica HNSM.....	50
Figura 4.7 – Esquema 3D do modelo de ensaio de aderência em flexão da técnica VNSM.....	50
Figura 4.8 – Esquema 3D da disposição da instrumentação aplicada aos provetes de ensaio.....	54
Figura 4.9 – <i>Layout</i> do ensaio de aderência em flexão (dimensões em milímetros).....	55
Figura 4.10 – Diferenças geométricas entre as duas estruturas com rótulas metálicas disponíveis no laboratório.....	55
Figura 4.11 – Mecanismo de leitura de movimentos do provete no decorrer do ensaio e pormenor de análise dos erros cometidos nas leituras dos LVDTs.....	57
Figura 4.12 – Equilíbrio de momentos.....	58
Figura 4.13 – Semelhança de triângulos.....	59
Figura 4.14 – Deformação do compósito por abertura do provete.....	59
Figura 4.15 – Definição da variável escorregamento do compósito.....	60
Figura 4.16 – Curvas Momento-Deslocamento representativas do comportamento geral dos modelos EBR.....	62
Figura 4.17 – Distribuição percentual dos modos de ruína registados nos ensaios da técnica EBR...	63
Figura 4.18 – Aspecto dos modos de rotura observados nos ensaios da técnica EBR.....	64
Figura 4.19 – Força e extensão máximas no compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica EBR.....	64
Figura 4.20 – Módulo de elasticidade secante (na rotura) para cada série de 20, 40 e 60mm da técnica EBR.....	65
Figura 4.21 – Tensão tangencial na ligação (na rotura) para cada série de ensaio da técnica EBR...	66
Figura 4.22 – Escorregamento máximo do compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica EBR.....	66
Figura 4.23 – Curvas Momento-Deslocamento representativas do comportamento geral dos modelos HNSM.....	67
Figura 4.24 – Distribuição percentual dos modos de ruína registados nos ensaios da técnica HNSM.....	68
Figura 4.25 – Aspecto dos modos de rotura observados nos ensaios da técnica HNSM.....	69

Figura 4.26 – Força e extensão máximas no compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica HNSM.	69
Figura 4.27 – Módulo de elasticidade secante (na rotura) para cada série de 20, 40 e 60mm da técnica HNSM.	70
Figura 4.28 – Tensão tangencial na ligação (na rotura) para cada série de ensaio da técnica HNSM.	71
Figura 4.29 – Escorregamento máximo do compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica HNSM.	72
Figura 4.30 – Curvas Momento-Deslocamento representativas do comportamento geral dos modelos VNSM.	72
Figura 4.31 – Distribuição percentual dos modos de ruína registados nos ensaios da técnica VNSM.	73
Figura 4.32 – Aspecto dos modos de rotura observados nos ensaios da técnica VNSM.	74
Figura 4.33 – Força e extensão máximas no compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica VNSM.	74
Figura 4.34 – Módulo de elasticidade secante (na rotura) para cada série de 20, 40 e 60mm da técnica VNSM.	75
Figura 4.35 – Tensão tangencial na ligação (na rotura) para cada série de ensaio da técnica VNSM.	76
Figura 4.36 – Escorregamento máximo do compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica VNSM.	76
Figura 4.37 – Braço das forças horizontais para as diferentes técnicas de reforço.	77
Figura 4.38 – Variação do momento máximo (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.	77
Figura 4.39 – Geometria da secção transversal do CFRP (em mm), para as diferentes técnicas de reforço.	78
Figura 4.40 – Variação da força máxima (ou tensão) e extensão no compósito (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.	78
Figura 4.41 – Variação do módulo de elasticidade secante do compósito (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.	80
Figura 4.42 – Variação da tensão tangencial na interface (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.	81
Figura 4.43 – Variação do escorregamento máximo na interface (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.	82
Figura 4.44 – Ensaio de aderência em flexão com juntas betão-CFRP.	85
Figura 4.45 – Diagramas Tensão-Escorregamento em juntas betão-CFRP e madeira-CFRP.	86
Figura 4.46 – Pormenor de secção transversal reforçada com CFRP.	86
Figura 4.47 – Valores médios da tensão normal máxima no compósito em função do comprimento de colagem para juntas madeira-CFRP e betão-CFRP (técnica EBR).	88
Figura 4.48 – Valores médios da tensão normal máxima no compósito em função do comprimento de colagem para juntas madeira-CFRP e betão-CFRP (técnica NSM).	89

Figura 5.1 – Objectivo de previsão do modelo A reajustado, esquema exemplificativo, técnica de reforço EBR.	94
Figura 5.2 – Secção transversal reforçada com identificação das variáveis geométricas (modelo A). 96	
Figura 5.3 – Análise do parâmetro k_b do modelo A.	96
Figura 5.4 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo A (EBR).	97
Figura 5.5 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo A (HNSM).	98
Figura 5.6 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo A (VNSM).	98
Figura 5.7 – Esquema exemplificativo da teoria de base das previsões do modelo B.	99
Figura 5.8 – Esquema de ensaio para determinação da verdadeira resistência ao corte da madeira num plano RL (Ukyo e Masuda, 2006).	101
Figura 5.9 – Andamento qualitativo do pico de tensão tangencial com o aumento do comprimento de colagem (Musner, 2004).	103
Figura 5.10 – Ensaios “Pull-Out” de Tomasi (1999) donde Musner (2004) determinou $\beta=0.237$	104
Figura 5.11 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo B (EBR).	105
Figura 5.12 – Identificação de variáveis do modelo B: linha de distribuição de tensões tangenciais. 106	
Figura 5.13 – Distribuição das tensões tangenciais na interface colada madeira-CFRP, $l_t=55\text{mm}$. ..	106
Figura 5.14 – Esquema de posicionamento das tensões tangenciais na ligação madeira-CFRP.	106
Figura 5.15 – Gráfico de correlação entre os valores experimentais e teóricos da força máxima de tracção no compósito (modelo A).	107
Figura 5.16 – Gráfico de correlação entre os valores experimentais e teóricos da força máxima de tracção no compósito (ensaio com $l_t > l_{t,ef}$).	108
Figura 5.17 – Passos 1 a 4 do exemplo de aplicação (ligação EBR).	110
Figura 5.18 – Passos 5 a 9 do exemplo de aplicação (ligação EBR).	110
Figura 5.19 – Linhas de distribuição das tensões tangenciais no comprimento colado para cada passo de evolução do exemplo de aplicação dos modelos teóricos.	111
Figura A1.1 – Ensaios de aderência em flexão EBR 20mm.	A.3
Figura A1.2 – Ensaios de aderência em flexão EBR 40mm.	A.3
Figura A1.3 – Ensaios de aderência em flexão EBR 60mm.	A.4
Figura A1.4 – Ensaios de aderência em flexão HNSM 20mm.	A.6
Figura A1.5 – Ensaios de aderência em flexão HNSM 40mm.	A.6
Figura A1.6 – Ensaios de aderência em flexão HNSM 60mm.	A.7
Figura A1.7 – Ensaios de aderência em flexão VNSM 20mm.	A.9
Figura A1.8 – Ensaios de aderência em flexão VNSM 40mm.	A.9
Figura A1.9 – Ensaios de aderência em flexão VNSM 60mm.	A.10

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Algumas propriedades mecânicas da madeira usadas com fins estruturais (Dinwoodie, 2000).	9
Quadro 2.2 – Comparação de características de alguns materiais (direcção longitudinal) (Dimande, 2003).	22
Quadro 2.3 – Sistemas pré-fabricados comercializados em Portugal (Juvandes <i>et al</i> , 2007).	23
Quadro 2.4 – Sistemas curados “in situ” comercializados em Portugal (Juvandes <i>et al</i> , 2007).	24
Quadro 2.5 – Investigação científica realizada na área do reforço de madeira com FRP.	28
Quadro 2.6 – Resultados de vários estudos em vigas de madeira reforçada com FRP.	29
Quadro 3.1 – Critérios (esquema tipo) para realização dos ensaios de “Pull-Off”.	32
Quadro 3.2 – Modos de ruína espectáveis nos ensaios de “Pull-Off” para a técnica EBR.	33
Quadro 3.3 – Modos de ruína espectáveis nos ensaios de “Pull-Off” para a técnica NSM.	33
Quadro 3.4 – Características físicas e mecânicas da madeira estrutural (EN 338, 2003).	36
Quadro 3.5 – Sistemas compósitos usados pelos autores dos trabalhos.	37
Quadro 3.6 – Principais propriedades dos materiais.	37
Quadro 3.7 – Modelos experimentais de EBR usados pelos autores dos trabalhos.	38
Quadro 3.8 – Identificação das interfaces a analisar (juntas tipo EBR).	39
Quadro 3.9 – Resumo dos resultados para as Juntas tipo EBR.	40
Quadro 3.10 – Modelos experimentais de NSM usados pelos autores dos trabalhos.	42
Quadro 3.11 – Identificação das interfaces a analisar (juntas tipo NSM).	42
Quadro 3.12 – Resumo dos resultados para as Juntas tipo NSM.	43
Quadro 3.13 – Resumo de ensaios de “Pull-Off” em elementos de betão (Costa <i>et al</i> , 2005).	45
Quadro 4.1 – Designação dos provetes de aderência em flexão do programa experimental.	51
Quadro 4.2 – Valores possíveis para as variáveis da Figura 4.9.	56
Quadro 4.3 – Características técnicas da instrumentação utilizada nos ensaios de aderência em flexão.	56
Quadro 4.4 – Modos de ruína admissíveis nos ensaios de aderência em flexão.	61
Quadro 4.5 – Modos de ruína obtidos nos ensaios da técnica EBR.	63
Quadro 4.6 – Modos de ruína obtidos nos ensaios da técnica HNSM.	68
Quadro 4.7 – Modos de ruína obtidos nos ensaios da técnica VNSM.	73
Quadro 4.8 – Resumo dos momentos últimos (valor médio) obtidos.	77
Quadro 4.9 – Aproveitamento do compósito de carbono em cada técnica de reforço.	79

Quadro 4.10 – Estimativa da confiança na ductilidade do reforço em cada técnica de reforço.	82
Quadro 4.11 – Programas experimentais em comparação.....	84
Quadro 4.12 – Programas experimentais em comparação.....	87
Quadro 4.13 – Resumo das principais características das juntas com madeira e com betão.	89
 Quadro 5.1 – Estudo do modelo A: definição das variáveis.....	95
Quadro 5.2 – Valores recomendados para as variáveis experimentais do modelo A.	97
Quadro 5.3 – Valores de ρ , factor de junta.	102
Quadro 5.4 – Proposta de factor correctivo para o cálculo de ρ pela equação (5.9.).....	102
Quadro 5.5 – Resumo de calibração do modelo B.	105
Quadro 5.6 – Previsões teóricas do modelo B.....	107
Quadro 5.7 – Análise comparativa do desempenho dos modelos A e B de previsão.	109
Quadro 5.8 – Identificação e caracterização dos vários passos de evolução do exemplo teórico.....	112
 Quadro A1.1 – Resumo dos principais resultados (valores na ruína): Técnica EBR.	A.2
Quadro A1.2 – Resumo dos principais resultados (valores na ruína): Técnica HNSM.	A.5
Quadro A1.3 – Resumo dos principais resultados (valores na ruína): Técnica VNSM.	A.8
 Quadro A2.1 – Características do reforço usado nos trabalhos de aderência em flexão: madeira e betão.....	A.12
Quadro A2.2 – Ensaio de aderência em flexão em madeira, técnica EBR (presente trabalho).	A.12
Quadro A2.3 – Ensaio de aderência em flexão em betão, técnica EBR (Dimande, 2003).....	A.13
Quadro A2.4 – Ensaio de aderência em flexão em betão, técnica EBR (Travassos, 2004).....	A.14
Quadro A2.5 – Ensaio de aderência em flexão em madeira, técnica NSM (presente trabalho).....	A.14
Quadro A2.6 – Ensaio de aderência em flexão em betão, técnica NSM (Sena-Cruz, 2004).	A.15

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Siglas:

AFRP – polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de aramida

CFRP – polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EBR – técnica de reforço por colagem exterior (*External Bounded Reinforcement*)

EBR“lt”.“i” – modelo de aderência à flexão nº “i” de uma série de 4 ensaios todos com comprimento de colagem “lt” em mm, e reforçado segundo a técnica de reforço EBR

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FIB – Federação Internacional do Betão (*Fédération Internationale du Béton*)

FLEXILAM – empresa portuguesa de fabrico de MLC

FRP – família geral dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras contínuas

GFRP – polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro

GWP – Potencial de efeito de estufa (*Global Warming Potential*)

HNSM – especificação da técnica de reforço NSM, distinguindo a orientação horizontal das ranhuras (*Horizontal Near Surface Mounted*)

HNSM“lt”.“i” – modelo de aderência à flexão nº “i” de uma série de 4 ensaios todos com comprimento de colagem “lt” em mm, e reforçado segundo a técnica de reforço HNSM

ISO – Organização internacional de normalização (*International Organization for Standardization*)

LABEST – Laboratório da tecnologia do betão e do comportamento estrutural

LCA – Análise do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment*)

LEM – Laboratório de ensaio de materiais

LVDT – transdutor de deslocamentos do tipo “*Linear Variable Differential Transformer*”

MLC – madeira lamelada colada

MUF – melanina-ureia-formaldeído (ou fenol-resorcinol-formaldeído) é a cola usada no fabrico de MLC

NSM – técnica de reforço por inserção em ranhuras (*Near Surface Mounted*)

R1 – modo de rotura por corte na madeira, no ensaio de aderência em flexão

R2 – modo de rotura por escorregamento na interface madeira-resina, no ensaio de aderência em flexão

R3 – modo de rotura por corte na resina, no ensaio de aderência em flexão

R4 – modo de rotura por corte de uma película muito fina de fibras, no ensaio de aderência em flexão

R5 – modo de rotura por tracção do compósito, no ensaio de aderência em flexão

SFM – Gestão sustentável de florestas (*Sustainable Forest Management*)

TPBtest – ensaio de momentos de 3 pontos (*Three Point Bending test*)

VNSM – especificação da técnica de reforço NSM, distinguindo a orientação horizontal das ranhuras (*Vertical Near Surface Mounted*)

VNSM“ l_t ”.“ i ” – modelo de aderência à flexão nº “ i ” de uma série de 4 ensaios todos com comprimento de colagem “ l_t ” em mm, e reforçado segundo a técnica de reforço VNSM

Notações Escalares Latinas:

b – largura da madeira onde é feita a colagem (medida na secção transversal), usado no modelo A, capítulo 5 [mm]

b_f – largura da manta de fibras do reforço FRP [mm]

CV – coeficiente de variação [%]

c_1 e c_2 – factores obtidos por calibração de resultados de ensaios, usados em modelos analíticos

d – espessura de cola entre os materiais 1 e 2, usado no modelo B, Capítulo 5 [mm]

E_1 – módulo de elasticidade do material 1 (CFRP), usado no modelo B, Capítulo 5 [GPa]

E_2 – módulo de elasticidade do material 2 (madeira), usado no modelo B, Capítulo 5 [GPa]

E_0 – módulo de elasticidade da madeira, direcção longitudinal [GPa]

E_{90} – módulo de elasticidade da madeira, direcção perpendicular às fibras [GPa]

$E_{0,mean}$ – módulo de elasticidade médio da madeira, direcção longitudinal [GPa]

$E_{0,05}$ – módulo de elasticidade característico (quantilho 5%) da madeira, direcção longitudinal [GPa]

E_f – módulo de elasticidade à tracção longitudinal das fibras do compósito [GPa]

E_f^R – módulo de elasticidade secante do compósito na rotura, no ensaio de aderência em flexão [GPa]

F_c – força de compressão na rótula metálica, no ensaio de aderência em flexão

F_t – valor da força de tracção aplicada ao compósito [kN]

F_t^R – valor da força de tracção no compósito, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [kN]

$F_{t,max}^R$ – valor máximo espectável, para dada ligação (obrigatoriamente $l_t > l_{t,ef}$), da força de tracção no compósito, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [MPa]

$f_{c,0}$ – resistência à compressão da madeira, direcção longitudinal [MPa]

$f_{c,90}$ – resistência à compressão da madeira, direcção perpendicular às fibras [MPa]

f_f – valor da resistência última à tracção das fibras do compósito [MPa]

$f_{t,0}$ – resistência à tracção da madeira, direcção longitudinal [MPa]

$f_{t,0,k}$ – resistência característica à tracção da madeira, direcção longitudinal [MPa]

$f_{t,90}$ – resistência à tracção da madeira, direcção perpendicular às fibras [MPa]

$f_{t,90,k}$ – resistência característica à tracção da madeira, direcção perpendicular às fibras [MPa]

$f_{v,0}$ – resistência ao corte da madeira, direcção longitudinal [MPa]

- $f_{v,k}$ – resistência característica ao corte da madeira [MPa]
- $f_{m,k}$ – resistência característica da madeira à flexão [MPa]
- $f_{tm,p}$ – valor médio da tensão de tracção no ensaio “Pull-Off” [MPa]
- $f_{wtm,p}$ – valor médio da tensão de tracção perpendicular à ligação madeira-material no ensaio “Pull-Off” [MPa]
- $f_{ctm,p}$ – valor médio da tensão de tracção perpendicular à ligação betão-material no ensaio “Pull-Off” [MPa]
- $f_{wt,p}$ – tensão de tracção perpendicular à ligação madeira-material no ensaio “Pull-Off” [MPa]
- G_{ad} – módulo de distorção da resina que une o compósito à madeira [GPa]
- h – distância vertical desde a rótula metálica até à fibra inferior da madeira, no ensaio de aderência em flexão [mm]
- k_b – factor que representa a geometria da zona de ancoragem, usado no modelo A, Capítulo 5
- k_c – factor que representa o efeito da preparação da superfície, usado no modelo A, Capítulo 5
- k_{μ} – factor afecto ao tipo de ensaio e grau de reforço, usado no modelo A, Capítulo 5
- L – distância horizontal desde o apoio até à rótula metálica (ou metade do vão), antes do início do ensaio de aderência em flexão [mm]
- L' – distância horizontal desde o apoio até ao ponto mais próximo de aplicação de $P_{tot}/2$, antes do início do ensaio de aderência em flexão [mm]
- l_d – comprimento de compósito não colado (descolado) na zona central dos ensaios de aderência em flexão [mm]
- l_t – comprimento de colagem (ou comprimento de aderência) da ligação madeira-reforço [mm]
- $l_{t,ef}$ – comprimento de colagem da ligação a partir do qual se atingiu a aderência máxima [mm]
- M_{tot} – valor do momento flector total aplicado, no ensaio de aderência em flexão [N.m]
- M_{tot}^R – valor do momento flector total aplicado, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [N.m]
- m – número fiadas de reforço, igual a 1 para EBR ou 2 para NSM, no ensaio de aderência em flexão
- n – número de camadas de compósito na largura b_f definida
- P_{tot} – força total aplicada pelo actuador nos ensaios de aderência em flexão [kN]
- s_t – escorregamento na interface madeira-FRP (inclui Δl_t e γ_{ad}), no ensaio de aderência em flexão [mm]
- s_t^R – valor do escorregamento na interface madeira-FRP, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [mm]
- t_1 – espessura do material 1 (CFRP) que contribui para a ligação, usado no modelo B, Capítulo 5 [mm]
- t_2 – espessura do material 2 (madeira) que contribui para a ligação, usado no modelo B, Capítulo 5 [mm]
- t_{eq} – espessura de fabrico de 1 camada de manta de fibras de carbono [mm]

t_f – espessura de compósito colado (medida na secção transversal), usado no modelo A, Capítulo 5 [mm]

t_{rot} – espessura do mecanismo de rótula metálico dos ensaios de aderência em flexão [mm]

x – variável independente do eixo das abcissas ao longo comprimento de ligação colada, usado no modelo B, Capítulo 5

z – distância vertical desde a rótula metálica até ao centro do compósito (ou braço das forças), no ensaio de aderência em flexão [mm]

z' – distância vertical desde a rótula metálica até à linha de medida do LVDT horizontal, no ensaio de aderência em flexão [mm]

Notações Escalares Gregas:

α – coeficiente de homogeneização dos diferentes materiais, usado no modelo B, Capítulo 5

β – factor representativo do tipo de ensaio de aderência, usado no modelo B, Capítulo 5

Δ ou DP – desvio padrão

Δl_d – variação do comprimento do compósito na zona não colada, no ensaio de aderência em flexão [mm]

Δl_t – variação do comprimento do compósito na zona colada, no ensaio de aderência em flexão [mm]

δ_v – deslocamento vertical da zona central do ensaio de aderência em flexão, medido pelo LVDT vertical [mm]

δ_H' – deslocamento relativo horizontal (ou abertura) de cada meio provete à cota de instalação do LVDT horizontal, no ensaio de aderência em flexão [mm]

δ_H – deslocamento relativo horizontal (ou abertura) de cada meio provete à cota da zona central do reforço, no ensaio de aderência em flexão [mm]

ε_{max} – valor da extensão máxima do compósito à tracção longitudinal [%]

ε_f – extensão do compósito na zona descolada (na zona central) medida com extensómetros eléctricos, no ensaio de aderência em flexão [%]

ε_f^R – valor da extensão do compósito na zona descolada (na zona central), no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [%]

$\varepsilon_{f_{max}}^R$ – valor máximo espectável, para dada ligação (obrigatoriamente $l_t > l_{t,ef}$), da extensão do compósito na zona descolada, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [%]

γ_{ad} – deformação por corte (ou distorção) da resina que une o compósito à madeira

ν – coeficiente de Poisson

ρ – factor de junta (depende essencialmente do comprimento de colagem), usado no modelo B, capítulo 5

ρ_k – valor característico da massa volúmica da madeira [Kg/m³]

ρ_{mean} – valor médio da massa volúmica da madeira [Kg/m³]

σ_f – valor da tensão normal no compósito [MPa]

σ_f^R – valor da tensão normal no compósito, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [MPa]

$\sigma_{f\max}^R$ – valor máximo espectável, para dada ligação (obrigatoriamente $l_t > l_{t,ef}$), da tensão normal no compósito, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [MPa]

$\tau(x)$ – valor da tensão tangencial em função da variável x (evolução do comprimento colado), resultado do modelo B, Capítulo 5 [MPa]

$\tau_{\max}$ – valor de pico da tensão tangencial atingido no comprimento colado da ligação madeira-FRP [MPa]

τ_{med} – tensão tangencial média na ligação madeira-FRP [MPa]

τ_{med}^R – valor da tensão tangencial média na ligação madeira-FRP, no momento de rotura, no ensaio de aderência em flexão [MPa]

1

INTRODUÇÃO

A madeira pertence, desde os primórdios da civilização, aos materiais de construção mais usados. Isso deve-se ao facto de ser um material resistente, leve, facilmente trabalhável e ao seu aspecto estético. No entanto, apresenta determinadas limitações para as quais é necessário encontrar soluções. Algumas das limitações à sua aplicação residem na dificuldade em encontrar na natureza árvores das quais seja possível retirar elementos com as dimensões pretendidas, ou no facto da madeira apresentar defeitos localizados, como nós e bolsas de resina, que condicionam fortemente a resistência global do elemento. Mais recentemente, esses problemas foram ultrapassados com o desenvolvimento de produtos derivados da madeira, resultantes da colagem de peças de menores dimensões de madeira maciça, como a madeira lamelada colada (MLC). Esta tecnologia permite produzir elementos de madeira nos quais os defeitos são dispersos, garantindo um produto final com propriedades mais homogéneas, cujas dimensões são, em teoria, ilimitadas.

Com os avanços no uso da MLC foram surgindo novos desafios. A realização de obras de MLC com grandes vãos, nomeadamente pontes ou naves desportivas, implica a produção de elementos cujas dimensões nem sempre são compatíveis com os meios de produção ou transporte existentes. Outra questão prende-se com o facto dos actuais padrões de construção implicarem um melhor aproveitamento em altura dos edifícios, não sendo admissíveis elementos estruturais demasiado altos que possam condicionar o pé direito preconizado. Nesta perspectiva, tornou-se de particular importância proceder à melhoria das propriedades mecânicas da MLC, com valores de resistência e rigidez tais, que permitam a produção de elementos de secções menores.

Uma forma de resolução das questões levantadas consiste na utilização conjunta da madeira e de outros materiais com o objectivo de colmatar as limitações da madeira. A escolha do material de reforço e a técnica de aplicação dependem obviamente das características que se pretendem melhorar no elemento de madeira. Um dos materiais inicialmente usado para o reforço de vigas de madeira foi o aço, pois possui um módulo de elasticidade e uma tensão de cedência bastante superiores aos da madeira. No entanto, o aspecto estético final do elemento reforçado e a sua vulnerabilidade face à corrosão limitam a sua utilização.

Mais recentemente, foram desenvolvidas e testadas soluções de reforço de elementos de madeira recorrendo a sistemas de FRP. Estes materiais possuem uma tensão última e um módulo de elasticidade altos o que serve claramente os propósitos da aplicação do reforço. Para além disso, possuem a vantagem de serem materiais leves, resistentes à corrosão e terem alguma flexibilidade, facilitando a sua colocação e transporte.

A aplicação destes novos materiais compósitos à madeira, pode resolver os problemas de capacidade de estruturas novas em secções transversais de dimensões limitadas, mas também os problemas de

estruturas já existentes que estejam em restauro para novos usos, mais exigentes, ou por deformações excessivas dos seus elementos estruturais, necessitando de aumentos de rigidez. São ambos, promissores campos de aplicação dos compósitos FRP em estruturas de madeira.

A ligação estrutural entre estes 2 materiais é executada por colagem, com recurso a resinas epoxídicas. Os níveis de esforço a que resistem estas ligações em madeira estão ainda pouco estudados, e por isso pouco conhecidos, já que se trata de uma aplicação ainda pouco usada dos compósitos de FRP.

Este trabalho pretende ser uma mais-valia para a comunidade científica, ajudando a perceber a resistência, a rigidez da ligação, a extensão e o rendimento do compósito, os mecanismos de rotura, e ainda, os parâmetros que influenciam a ligação madeira-FRP.

Para se conseguir tal objectivo, realizou-se uma campanha experimental de aderência em flexão e, recolheu-se e resumiu-se um conjunto de dados de trabalhos paralelos de aderência por “Pull-Off”, feitos na mesma ligação madeira-FRP e usando os mesmo materiais.

Os materiais constituintes da ligação analisada neste trabalho são: madeira da espécie Pinho Nórdico (*Norway Spruce* – *Picea Abies*) de classe estrutural C30 (EN 338:2003), classe associada à quantidade de defeitos, e sistema unidireccional de FRP curado *in situ* de fibras de carbono (CFRP) da marca Sika®.

O tratamento da superfície da madeira não foi objecto de análise, porque já se conhece de outros trabalhos ser inútil a aplicação de primário, constituinte destes sistemas comerciais de FRP (mais direccionados para a aplicação em betão), bastando portanto, a abrasão por lixa e limpeza do pó remanescente para garantir uma boa aderência das resinas de epóxi à madeira.

Neste trabalho procurou-se avaliar a influência do comprimento de colagem no desempenho da ligação, tentando encontrar o comprimento a partir do qual, o seu aumento, não traz vantagem em termos de resistência da ligação: o comprimento efectivo de aderência ($l_{t,ef}$).

Outro aspecto analisado, foi a influência da técnica de reforço no desempenho da ligação. A técnica de reforço base é a colagem externa do compósito (EBR – *External Bounded Reinforcement*), mas para além desta, a inserção do reforço em pequenas ranhuras perto da superfície da madeira (NSM – *Near Surface Mounted*) pode constituir uma melhoria na técnica de aplicação deste fino e moldável reforço, que são os polímeros reforçados por fibras (FRP). Esta última técnica de reforço traz, à partida, evidentes vantagens estéticas na aplicação de FRPs em madeira, porque não perturba o aspecto natural da madeira, factor que tantas vezes é decisivo na opção por este material em detrimento do betão, por exemplo. Mais vantagens há em se inserir o reforço dentro da própria madeira, desde a sua protecção contra radiações UV que deterioram a matriz polimérica, protecção contra actos de vandalismo, e ainda a protecção ao fogo, fazendo uso das capacidades de isolamento térmico e da própria resistência à combustão da madeira, que cria uma camada carbonizada externa protegendo o seu núcleo. O objectivo é saber se em termos mecânicos, a técnica NSM apresentará igual comportamento ao da técnica EBR, esta mais comum, ou até, se o facto do reforço se encontrar envolto 360° no corpo reforçado constitui, ou não, mais uma vantagem da técnica NSM face à EBR.

Durante este trabalho tentar-se-á, sempre que possível, fazer a ponte entre os resultados aqui obtidos de caracterização da aderência de CFRP à madeira, com resultados homólogos de trabalhos já publicados, contendo valores de aderência de CFRP a betão. Isto porque a aplicação destes compósitos no reforço de estruturas de betão está mais generalizada na construção civil.

Em síntese, a satisfação dos objectivos fundamentais, é visada através do estabelecimento do seguinte conjunto de objectivos parcelares:

- a. Elaboração de uma pesquisa bibliográfica sobre experiências efectuadas, em estruturas de madeira e betão (o material de referência) reforçadas com materiais compósitos de FRP;
- b. Pesquisa direccionada à história de construção em madeira, assim como à sua evolução, desde a madeira maciça aos novos produtos derivados de madeira;
- c. Avaliação do impacto ambiental do uso de madeira na construção face ao material de eleição, o betão armado, e actuais certificações de madeira como material renovável;
- d. Realização de um conjunto de ensaios experimentais que quantifiquem a eficiência da ligação colada (interface madeira-FRP);
- e. Estudo da influência de vários parâmetros, nomeadamente, o comprimento de colagem e a técnica de aplicação do reforço;
- f. Análise e discussão do comportamento de elementos estruturais de madeira, reforçados à flexão com compósitos. Estudos dos vários modos de rotura, identificação dos parâmetros mais importantes, que influenciam as roturas prematuras e interpretação da aderência madeira-FRP;
- g. Análise dos resultados dos ensaios de arrancamento por tracção directa e de ensaios de aderência por flexão, em peças de madeira estrutural reforçadas com compósito de fibras de carbono curado *in situ*;
- h. Avaliação da possibilidade de utilização de modelos analíticos, propostos na literatura, na previsão da força última de arranque do reforço de FRP, na previsão do comprimento efectivo de aderência e ainda na previsão do pico de tensão tangencial ocorrido na interface madeira-FRP;
- i. Apresentação das principais conclusões e níveis de resistência esperados da ligação madeira-CFRP.

Com vista a ir ao encontro dos objectivos traçados, o presente trabalho está organizado em 6 capítulos e em 2 anexos. O CAPÍTULO 1 apresenta as ideias gerais sobre os objectivos do trabalho. O CAPÍTULO 2 assenta na ideologia base deste trabalho, da necessidade do reforço de estruturas de madeira, onde se apresenta a madeira na construção civil e se foca, depois, na aplicação de compósitos de FRP à madeira. O CAPÍTULO 3 é o primeiro capítulo experimental, resume ensaios de arrancamento por tracção directa (“Pull-Off”) de 3 trabalhos realizados paralelamente e em cooperação com o presente trabalho, nos mesmos materiais de madeira e FRP. O CAPÍTULO 4 constitui o corpo principal deste trabalho. Este capítulo descreve o estudo experimental de aderência em flexão de modelos de MLC reforçada com CFRP. No CAPÍTULO 5 calibram-se dois modelos analíticos de aderência, que simulam a ligação madeira-FRP que foi alvo de caracterização experimental nos capítulos precedentes. Os modelos teóricos são ainda testados conjuntamente num exemplo de aplicação. As conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no CAPÍTULO 6. As tabelas resumo e gráficos de ensaio de todos os 36 provetes de aderência em flexão estão ilustrados no Anexo 1. O Anexo 2 contém os dados importados de outros trabalhos de aderência de FRP em betão que serviram de base à comparação e balizamento da eficiência da aplicação deste material em madeira.

2

REFORÇO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA COM COMPÓSITOS DE FRP

2.1. INTRODUÇÃO

A madeira tem sido usada ao longo dos tempos devido às suas boas características mecânicas, e é um material de futuro pela ecologia da sua natureza e sustentabilidade da sua produção. A procura proporcionou o desenvolvimento de produtos derivados da madeira que conseguem dar resposta a um número muito maior de aplicações e desafios. No entanto, em determinadas situações, este material apresenta limitações que poderão ser corrigidas recorrendo a outros materiais para o reforçar. Uma das soluções possíveis será o uso de compósitos reforçados com fibras (FRP). Este capítulo procura expor, de forma resumida, o estado actual dos conhecimentos a nível científico e de inovação no sector do reforço de estruturas de madeira, em particular com o recurso a materiais FRP. A título conclusivo, termina-se com a planificação dos objectivos deste trabalho, naquilo que é a linha de evolução da investigação internacional, por forma a potenciar o reforço de estruturas de madeira com recurso a compósitos de FRP como uma competitiva opção estrutural.

2.2. MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1. NA LINHA DA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

Desde há vários séculos atrás que a madeira começou a ser utilizada como material de construção. Por todo esse historial, talvez algumas pessoas tenham começado a tomar as vantagens da madeira como características garantidas. A verdade é, que se a madeira fosse hoje introduzida ao mundo como um “novo” produto, toda a gente ficaria espantada com as suas qualidades.

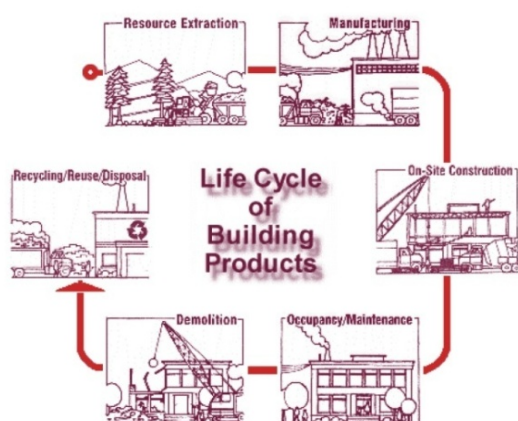
A madeira é resistente, leve, fácil de aplicar e fácil de moldar em novos produtos. Tem ainda características ambientais positivas que não passam despercebidas. Por exemplo, a madeira é não só o mais renovável material de construção, como também, o que requer menor energia de produção.

Numa era moderna onde todos os problemas de preservação do planeta, o uso sustentável de recursos, a redução de emissão de gases potenciadores do efeito de estufa e a minimização de consumo energético não renovável são questões de primordial importância, é urgente que o sector da construção adopte medidas de construção sustentável, começando pela escolha certa dos materiais a empregar.

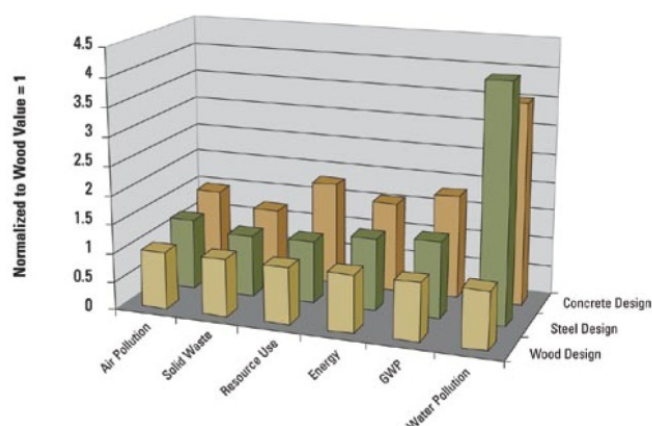
A análise do ciclo de vida, da designação internacional *Life Cycle Assessment* (LCA), é uma ferramenta que permite a análise do impacto ambiental de um produto, sistema ou processo. Essa

análise é feita sobre toda a “vida” do produto ou processo. No caso concreto de uma matéria-prima, ela abrange desde a sua extracção, passando pela sua alteração fabril, transporte, instalação, uso, manutenção, até ao seu desmantelamento e deposição de resíduos ou reutilização numa nova função (Figura 2.21.a)). Desde o início dos anos 60 que a LCA existe em várias formas, mas só no final dos anos 90 é que se estabeleceu um Protocolo de homologação de método de análise. O referido Protocolo foi criado pela ISO (*International Organization for Standardization*) na série 14040, de Gestão Ambiental, resultando o documento ISO 14042: Avaliação do impacto do ciclo de vida.

Na base da ferramenta de análise LCA, foi publicado em WD&B Magazine (2005), a mais conhecida publicação periódica sobre madeira, uma comparação do impacto ambiental de cada um dos materiais de construção mais usados em todo o mundo: aço, betão e madeira.



a) Ciclo de vida típico de um material de construção



b) Comparação do impacto ambiental de 3 materiais de construção diferentes

Figura 2.1 – Madeira: material de construção sustentável (WD&B Magazine, 2005).

O gráfico da Figura 2.1.b) compara o impacto ambiental de uma habitação unifamiliar construída em cada um dos materiais: madeira (*wood*), aço (*steel*) e betão (*concrete*). O gráfico engloba a energia total consumida durante o uso de cada tipo de edifício por um período de 20 anos. Os resultados do gráfico são apresentados em função dos gastos na habitação em madeira, podendo ver-se por exemplo que a energia consumida na habitação de aço e na de betão é 12 e 20% maior do que na de madeira, respectivamente. Emitem 15 e 29%, respectivamente, mais gases de efeito de estufa (GWP - *global warming potential*) do que a habitação em madeira. Libertam 10 e 12% mais poluentes atmosféricos, e são 300 e 225% mais poluentes para a água, respectivamente, do que a habitação homóloga construída em madeira.

A madeira é comprovadamente um material de construção “verde”, de impacto ambiental substancialmente inferior ao dos materiais mais usados em seu detrimento.

O projecto de edifícios sustentáveis está ligado ao uso de materiais de construção renováveis. E nesse sentido, garantir que a madeira empregue na construção é proveniente de florestas de gestão sustentável, é fundamental para a garantia de uma matéria-prima mesmo renovável. Isto é, que o ciclo de crescimento de uma espécie de árvore não está a ser ultrapassado pelo ritmo de uso dessa madeira. A título de curiosidade, de acordo com Gilfillan *et al* (2001), o ciclo de crescimento da árvore Abeto Americano (*Sitka spruce – Picea sitchensis*) usada na construção, papel e instrumentos musicais, chega a ser de 45 anos no Reino Unido, onde o clima é húmido e fértil para o crescimento florestal.

A necessidade de garantia que, ao aplicar madeira na construção, não se estava a destruir o planeta, desflorestando e contribuindo para a desertificação dos solos, fez com que se criassem sistemas de certificação de gestão sustentável de florestas: SFM – *Sustainable Forest Management*.

Os programas SFM surgiram no final dos anos 80 e têm vindo a crescer rapidamente nos últimos anos, dando resposta a uma grande variedade de interesses e valores. A certificação SFM interessa a produtores e clientes, porque possibilita, por um lado, aos clientes ter a certeza que a madeira que estão a comprar é de origem renovável e, por outro lado, porque permite reconhecimento da qualidade dos produtos que os produtores estão a vender, distinguindo-se dos demais produtores que não procuram obter essa certificação.

Ter uma certificação de produtos originários de florestas de gestão sustentável (certificação SFM) passou a ser um requisito de mercado para todos os produtos florestais nos países desenvolvidos, consumidores de grande maioria dos produtos florestais. E, dependendo geralmente do país de cultivo florestal, vários sistemas de certificação SFM começaram a surgir no final dos anos 90.

Os sistemas mais correntes de certificação de gestão sustentável de florestas, que certificam o uso de determinada madeira como matéria-prima renovável, são (siglas ilustradas na Figura 2.2):

- ATFS – American Tree Farm Systems;
- CSA – Canadian Standards Association: Canada's National Sustainable Forest Management Standard;
- FSC – Forest Stewardship Council;
- FEFC – Programme for Endorsement of Forest Certification Schemes;
- SFI – Sustainable Forestry Initiative.



Figura 2.2 – Vários sistemas de certificação de gestão sustentável de florestas.

Estes sistemas de certificação diferem no corpo organizacional que os criou e na própria maneira de abordar a questão, mas todos eles asseguram que a sua aplicação promove a gestão sustentável de florestas (SFM) através da aplicação de princípios, critérios e objectivos base reconhecidos por políticas governamentais de todo o mundo. Algumas das diferenças fundamentais justificam-se pelo objecto de aplicação que lhes deu origem: alguns para aplicação em países de território florestal privado, outros de território público, outros de domínio internacional.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

A madeira, o aço e o betão são os três principais materiais utilizados por engenheiros civis no projecto de estruturas. Ao contrário do aço e do betão, que são fabricados e moldados, a madeira é orgânica, e sujeita a uma variabilidade muito maior nas suas propriedades fundamentais. Se se pegar num bloco

de madeira e o ampliar muito, ver-se-á que se parece com um molho de “palhas de beber” coladas, as palhas são as células da árvore, mantidas juntas por uma frágil cola chamada lenhina (*lignin*), criando a textura fibrosa da madeira. Devido a essa organização estrutural, diz-se que a madeira é um material anisotrópico porque comporta-se de forma distinta segundo direcções diferentes, da mesma forma que é mais fácil esmagar o molho de “palhas de beber” contra si (perpendicular ao seu comprimento), do que rebentá-lo puxando na direcção longitudinal das palhas (paralelo ao seu comprimento). A madeira comporta-se de forma idêntica.

O gráfico da Figura 2.3 representa a anisotropia intrínseca a qualquer espécie de madeira, traduzida pela relação entre a tensão normal e a extensão, segundo a direcção longitudinal das fibras (a linha contínua), e a direcção perpendicular à direcção das fibras (a linha interrompida). De acordo com as classes de madeira estrutural representadas na norma EN 338 (2003), as diferenças na resistência à tracção da madeira entre a direcção longitudinal e a perpendicular às fibras pode ser da ordem das 30 vezes, a favor da direcção longitudinal. Em termos de resistência à compressão verificam-se valores da ordem das 8 vezes superior da resistência longitudinal comparando com a resistência perpendicular às fibras.

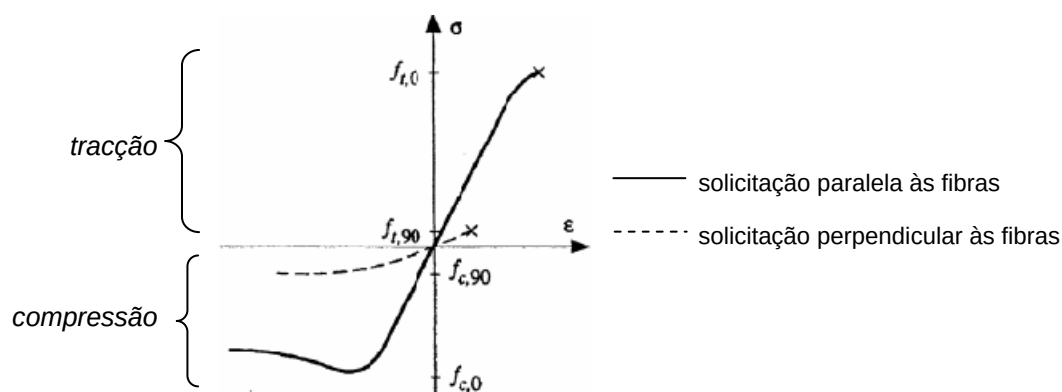


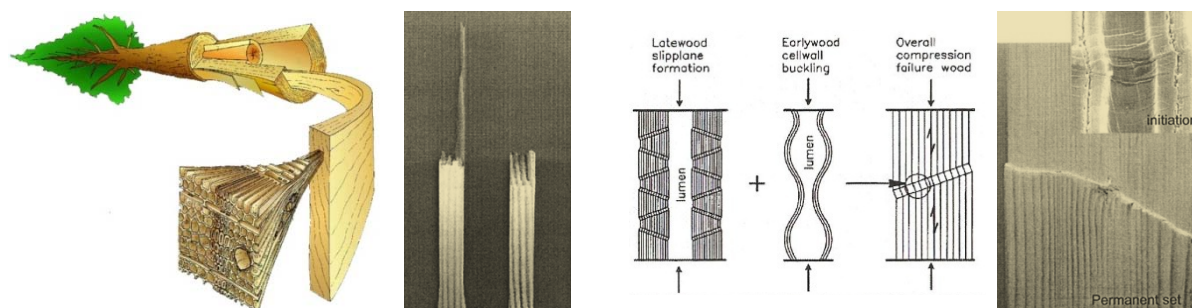
Figura 2.3 – Comportamento mecânico típico da madeira: relação tensão-extensão.

A resistência de uma peça de madeira não é só função da espécie de árvore, mas também da sua natureza orgânica. O tamanho e resistência das células de uma certa árvore e a qualidade da sua lenhina (*lignin*) (espécie de cola orgânica natural entre as fibras da madeira), são determinadas pelas condições de crescimento dessa árvore, seca ou humidade excessiva, nutrientes fornecidos à árvore, a presença de insectos ou fungos, ou ainda a presença de defeitos internos na madeira, tais como nós ou bolsas de resina. Estes são alguns dos factores que dão à madeira a sua variabilidade, e obrigam os engenheiros a adoptar factores de segurança relativamente altos quando dimensionam em madeira.

Da Figura 2.3 pode constatar-se que o comportamento da madeira à tracção e à compressão são substancialmente diferentes, passando-se o mesmo quanto à resposta nas direcções paralela ou perpendicular às fibras. Para carregamento em tracção a madeira apresenta rotura frágil, rompendo abruptamente logo após atingir o pico de resistência, enquanto para carregamento em compressão a rotura é dúctil, com aumentos consideráveis de extensão em patamar após atingido o pico de resistência. Por outras palavras, em compressão a madeira apresenta capacidade de absorver deformações grandes sem perder resistência significativa.

Pela própria natureza fibrosa da madeira se compreende que na rotura por tracção das fibras há o desacoplamento completo e imediato da madeira não havendo portanto outra forma de transferir carga

(Figura 2.4.a)). Na compressão, ao atingir-se o valor de rotura, dá-se o ondular das paredes celulares servindo-se do espaço de ar no núcleo das células da madeira (*lúmen*) até ao esmagamento, enquanto se verifica o aumento de deformação ainda em transferência de carga (Figura 2.4.b)).



a) Rotura frágil em tracção

b) Rotura dúctil em compressão

Figura 2.4 – Diferente comportamento da madeira em tracção e em compressão.

Muitas das aplicações estruturais da madeira são em vigas onde este material estará sujeito sobretudo a flexão, isto é, parte da secção em tracção e parte em compressão. Este facto leva os projectistas a ter em atenção que a zona traccionada deve ser capaz de resistir a um valor suficiente de tracção para que se desenvolvam tensões de compressão maiores do que a capacidade daquela madeira, e assim desencadear o aviso de pré-ruína (ductilidade) tão importante no dimensionamento em Estado Limite Último de uma estrutura, segundo os códigos de construção em vigor.

No Quadro 2.1 sintetizam-se os valores médios resistentes da madeira nas várias solicitações possíveis, dentro das espécies de árvores mais correntes usadas na criação de estruturas (segundo documento de Dinwoodie (2000)).

Quadro 2.1 – Algumas propriedades mecânicas da madeira usadas com fins estruturais (Dinwoodie, 2000).

Propriedade	Sigla	Valor médio
Tracção, direcção longitudinal (0°)	$f_{t,0}$	80 a 120 MPa
Tracção, direcção perpendicular (90°)	$f_{t,90}$	3 MPa
Compressão, direcção longitudinal (0°)	$f_{c,0}$	30 a 60 MPa
Compressão, direcção perpendicular (90°)	$f_{c,90}$	5 MPa
Módulo de elasticidade, direcção longitudinal (0°)	E_0	12 a 17 GPa
Módulo de elasticidade, direcção perpendicular (90°)	E_{90}	0,3 a 1 MPa
Corte, direcção longitudinal (0°)	$f_{v,0}$	7 MPa

Uma última nota em termos de características da madeira vai para o seu comportamento ao fogo, que ao contrário do que se possa pensar, a madeira não continua a arder depois da sua ignição sem que haja uma fonte externa contínua de fornecimento de energia.

Desta forma, um elemento de madeira em combustão, cria uma camada externa carbonizada (Figura 2.5.a)) que protege o interior são da madeira. O efeito volumétrico da peça de madeira é muito

importante para a resistência ao fogo, isto é, secções com menor perímetro e maior área transversal resistem melhor ao fogo, mantendo durante muito mais tempo uma grande área interior resistente.

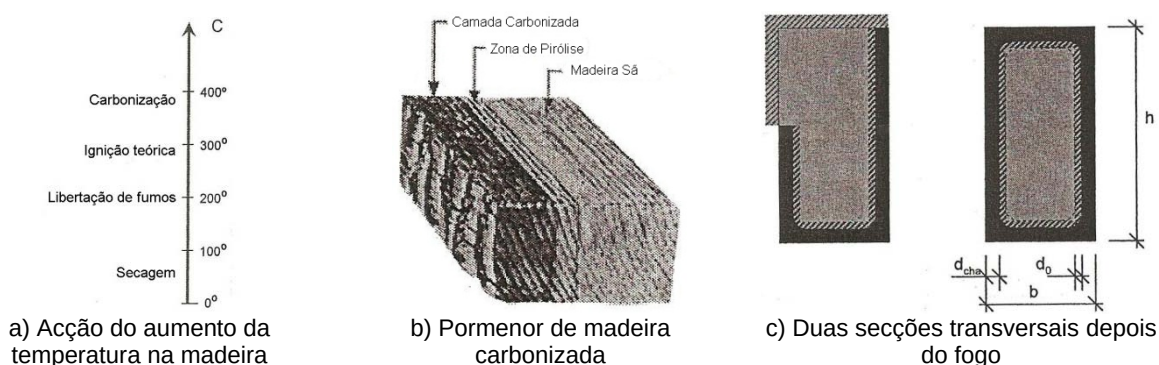


Figura 2.5 – Comportamento da madeira ao fogo.

2.2.3. PRODUTOS DERIVADOS

A aplicação da madeira nas estruturas modernas obrigou a grandes avanços na indústria da madeira ao criar desafios de rentabilidade do material, porque ao abater uma árvore só uma reduzida percentagem resultava em elemento estrutural. A par disso, a influência dos defeitos naturais da madeira tinha também de ser reduzida (o caso da presença de nós como se ilustra na Figura 2.6), porque os grandes factores de segurança necessários para precaver eventuais secções menos boas de madeira estrutural, baixavam muito a rentabilidade da secção transversal utilizada.

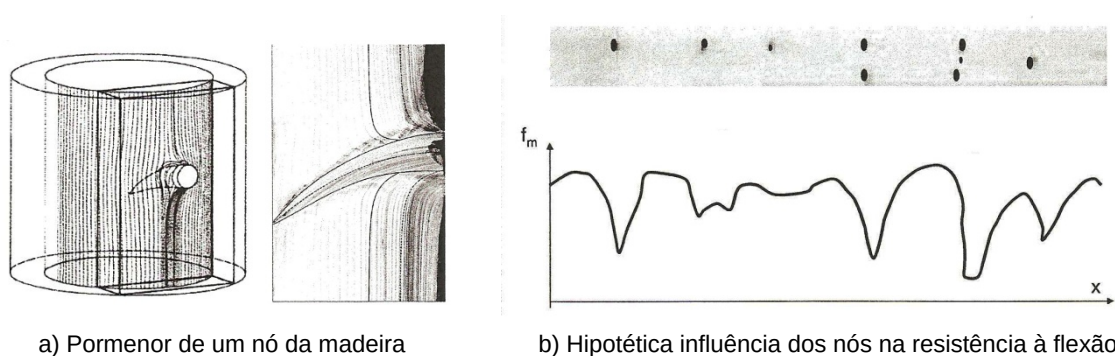


Figura 2.6 – Defeitos da madeira: presença de nós.

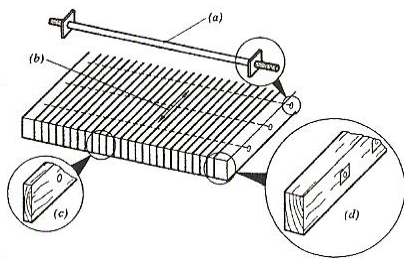
Desperdiçava-se, portanto, muito material e o dimensionamento não era óptimo, não se fazia uso das capacidades resistentes máximas do material aplicado. Por isso, surgiram no início do séc. XX formas de escolher, cortar, aglomerar e colar, madeira natural que dava entrada em unidades fabris, das quais passaram a sair produtos derivados de madeira.

Listam-se agora os principais produtos derivados de madeira relevantes para a engenharia civil:

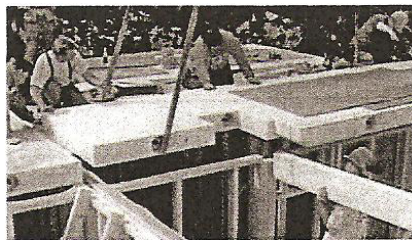
- Madeira maciça estrutural – são placas resistentes do tipo laje formadas por vigas de madeira natural justapostas, coladas e/ou comprimidas por varões roscados de aço no seu interior (Figuras 2.7.a) e b)).

- Vigas e pilares:

- o Madeira lamelada-colada (*glulam*) (de sigla MLC) – são tábuas de madeira maciça coladas longitudinalmente em juntas de dentes (*finger-joints*) para conseguir comprimentos teoricamente infinitos, e depois coladas sobre pressão lado a lado com outras tábuas iguais para conseguir alturas de secção transversal teoricamente infinitas (Figura 2.7.c));
- o LVL (*laminated veneer lumber*) (marca: Parallam®) – é obtida pela colagem de lâminas de madeira retiradas de um tronco, como se fossem desenroladas de uma bobina de papel. As lâminas são sobrepostas de modo que as fibras fiquem orientadas todas na mesma direcção, e daí o uso deste produto em elementos estruturais lineares (vigas e pilares) (Figura 2.7.d));
- o PSL (*parallel strand lumber*) (marca: Timberstrand®) – é obtida pela colagem orientada numa só direcção de tiras finas de madeira de 3 a 20mm de largura, que podem ir até aos 2 metros de comprimento (Figura 2.7.e));
- o Vigas compostas – são vigas em “I” obtidas por colagem à alma estreita de madeira mais barata (normalmente do tipo OSB – ver à frente) os banzos de madeira maciça com maior resistência (Figura 2.7.f)).



a) Madeira maciça estrutural (esquema)



b) Madeira maciça estrutural



c) Madeira lamelada-colada



d) LVL



e) PSL



f) Vigas compostas

Figura 2.7 – Produtos derivados de madeira: maciça e elementos lineares.

- Painéis e revestimentos:

- o Madeira laminada compensada ou contraplacado (*plywood*) – em tudo igual ao produto LVL, mas com as lâminas de madeira cortadas em tamanhos padrão e sobrepostas de modo que as fibras fiquem orientadas em sentido perpendicular umas as outras, e daí o uso deste produto em elementos planos de casca (paredes ou tectos) (Figura 2.8.a));

- o OSB (*oriented strand board*) – é obtida pela colagem de tiras finas (25mm) e curtas (100mm) de madeira segundo uma direcção preferencial. Esse alinhamento preferencial das fibras será perpendicular entre o núcleo e as superfícies da placa (Figura 2.8.b));
- o Madeira aglomerada (*particleboard*) (marca: Tabopan®) – é obtida da compressão de pequenas partículas de madeira (0.2x2x10mm) fixadas entre si com cola, sem orientação definida e com maior concentração de partículas finas (maior densidade) na superfície da placa (Figura 2.8.c));
- o Madeira reconstituída (*fibreboard*) – é obtida a partir da aglomeração de fibras celulósicas separadas, que é o último nível de fragmentação do tecido lenhoso de uma árvore. Os aglomerantes usados podem ser resinas sintéticas fenólicas ou lignina (integrante químico natural da madeira). As placas obtidas podem ter diferentes nomes em função da densidade final do produto, sendo o de média densidade entre 600 e 800kg/m³ o mais conhecido: MDF (*medium density fibreboard*) (Figura 2.8.d));
- o CPC (*cellulose plast compound*) – é um material novo que graças à nano tecnologia combina microfibras de madeira com a capacidade infinita de moldagem do plástico (Figura 2.8.e)).

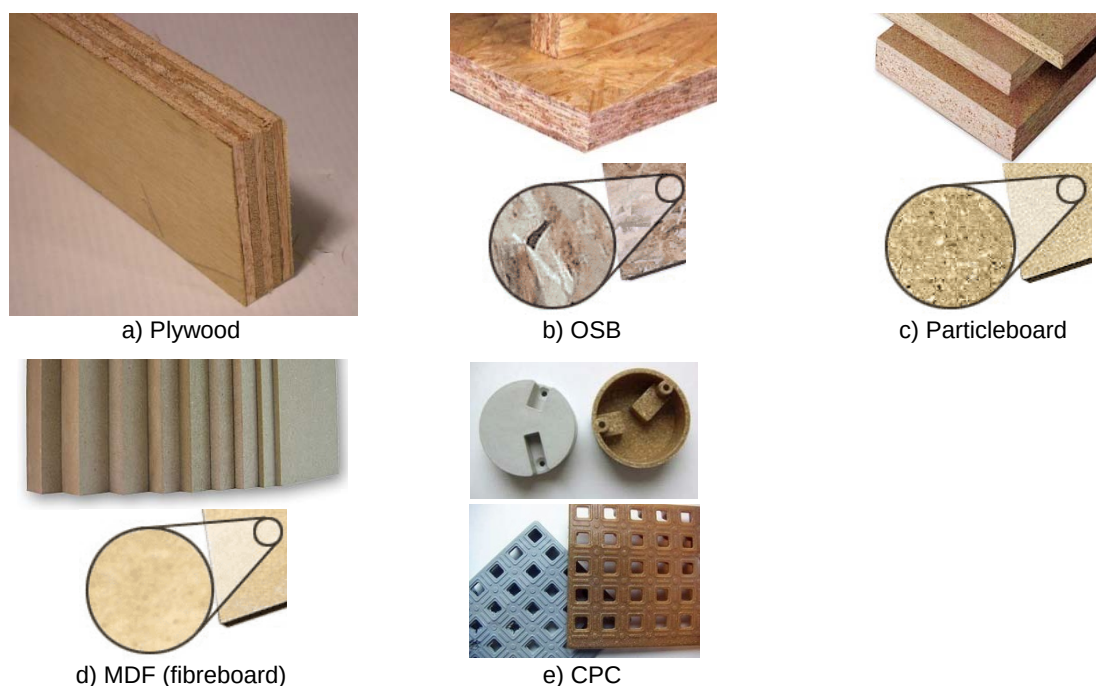


Figura 2.8 – Produtos derivados de madeira: elementos planos.

2.2.4. MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC)

Dos produtos derivados da madeira, a madeira lamelada colada (MLC) é a mais relevante e a mais usada na construção estrutural. Por este motivo este ponto procura expor com algum detalhe as suas principais características e o seu processo de fabrico. Embora o conceito da justaposição de elementos de madeira ligados para formar elementos de grande secção tenha cerca de duzentos anos e as primeiras estruturas de madeira lamelada colada datem de há cem anos, em Portugal estas estruturas são ainda muito recentes (segundo Cruz, 2007).

As estruturas de MLC apresentam excelente relação resistência-peso, excelente resistência a ambientes quimicamente agressivos e, elevada resistência ao fogo em comparação com as estruturas de aço ou de betão. E, aliando-se a estas, estão ainda características mais subjectivas deste material, como a qualidade estética ou o carácter ecológico e sustentável da madeira. Por tudo isto, projectistas em todo o mundo preferem muitas vezes aplicar MLC (madeira lamelada-colada), em detrimento do aço ou do betão.

Em MLC pode fabricar-se elementos de geometria recta ou curva, secção constante ou variável, comprimentos teoricamente infinitos, todo o tipo de ligações rótulas ou nós nas extremidades ou em qualquer ponto do elemento. Trata-se de um material ideal para actuar em sistema de pré-fabricação de elementos cuja dimensão apenas se limita pela capacidade de transporte até à obra, desenhados para montagem em obra onde apenas a imaginação dos projectistas limita a sua dimensão final.

O princípio de fabrico de elementos de madeira lamelada colada é relativamente simples, consistindo na justaposição de tábuas de madeira orientadas com as fibras sempre na mesma direcção, que são coladas de topo (por ligações designadas *finger-joints*) e de face, de forma a obter elementos com o comprimento e a secção transversal desejada. As fases do processo de fabrico da MLC estão ilustradas nas Figuras 2.9 e 2.10.

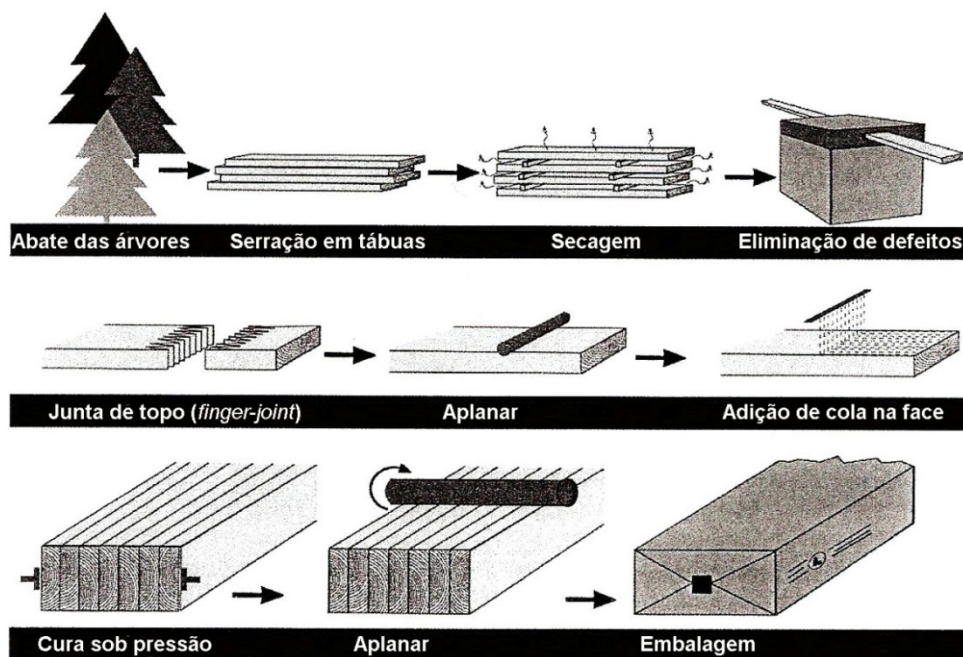


Figura 2.9 – Processo de fabrico de MLC.



Figura 2.10 – Fotografias de algumas fases do fabrico de MLC.

A madeira lamelada colada pode ser encarada como madeira maciça reconstituída, apresentando um comportamento físico e mecânico que é, na sua essência, o da madeira maciça natural. No entanto, o seu fabrico a partir de tábuas com uma espessura relativamente pequena (máximo de 45 mm, segundo EN 386 (2001)) que minimiza os efeitos da retracção de secagem ou das alterações de humidade nas dimensões da peça, e o rastreio e eliminação de concentrações de nós e bolsas de resina cortando aquela secção de tábua e refazendo a união do restante por uma *finger-joint*, conduz a um material mais homogéneo e consequentemente mais fiável e resistente.

Pela redução de defeitos, um elemento de MLC é obrigatoriamente mais homogéneo do que o seu homólogo de madeira maciça, e isso reflecte-se nas suas resistências mecânicas. Assim, apresentam maior valor médio e menor desvio padrão, resultando em significativos ganhos quando se fala em valores característicos (quantilho de 95%) que é o valor de referência dos códigos estruturais, levando a dimensionamentos muito mais económicos (Figura 2.11).

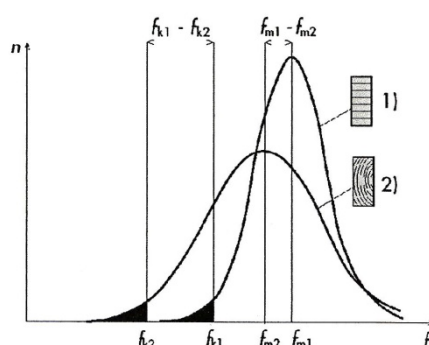


Figura 2.11 – Grande melhoria da resistência da madeira quando transformada em MLC.

As grandes secções transversais possíveis com a MLC garantem uma maior inércia à oscilação das condições ambientais (temperatura e humidade relativa do ar) e, por consequência, uma estabilidade dimensional superior à dos elementos estruturais de madeira maciça. As grandes secções transversais conduzem ainda a uma elevada resistência ao fogo destas estruturas por permitir preservar um núcleo são muito substancial protegido pela fina camada carbonizada exterior (visto na Figura 2.5), uma vez que as colas utilizadas no fabrico de elementos lamelados colados não sofrem alteração significativa com a temperatura abaixo da temperatura de carbonização da madeira, comportando-se estes elementos como elementos sólidos.

No que respeita à durabilidade, embora as linhas de cola não constituam barreira a agentes biológicos que atacam a madeira, verifica-se que, perante situações de humedificação do elemento de madeira, as suas grandes dimensões dificultam muito a penetração da água até às zonas internas, mantendo-se valores de teores em água abaixo dos 20% necessários para o desenvolvimento desses agentes deteriorantes.

2.2.5. CONSTRUÇÕES NO PASSADO, PRESENTE E FUTURO

A madeira tem sido usada ao longo dos tempos como material de construção. Aplicou-se inicialmente na construção de telhados e lajes de piso, com vigas principais (troncos) de madeira maciça a vencer a totalidade do vão, e descarregando nas largas paredes de alvenaria de pedra. As vigas principais tinham curto espaçamento e eram o suporte directo ao soalho (tábuas) também de madeira dispostas na perpendicular ao vigamento principal. Este foi durante séculos o processo de construção existente, e

havendo sobretudo diferenças de qualidade de material e acabamentos, tanto uma anónima habitação do povo como um palácio real, aplicavam a madeira como material de construção.

Apresenta-se agora um conjunto seleccionado de obras que representam a evolução da aplicação da madeira enquanto material de construção.

- *Uma habitação “anónima” típica do meio rural* (Figura 2.12), suposta do início do séc. XX, mas que retrata toda uma era de construção de habitações talvez durante 5 séculos para trás. Construiu-se assim até que se generalizou a aplicação do betão, que aconteceu em Portugal pelos anos 30 do séc. XX. Com excepção das maiores igrejas que eram feitas totalmente em alvenaria e cantaria de pedra, as construções comuns conjugavam paredes de alvenaria de pedra com telhados (ou lajes de piso) em madeira maciça, com troncos inteiros de secção transversal a chegar aos 30cm, capazes de vencer vãos de 8m ou mais. Estruturas essas com durabilidades notáveis, persistindo algumas até aos dias de hoje. Um exemplo de uma casa de telhado de madeira centenário apresenta-se na Figura 2.12, constituindo um exemplo de harmonia entre um telhado rústico e as linhas modernas de numa cozinha contemporânea depois de um restauro recente;



a) Construção alvenaria de pedra



b) Lajes vigadas de madeira maciça



c) Harmonia do rústico com o moderno

Figura 2.12 – Habitação “anónima”, início do séc. XX.

- *Antigo Palácio de Dueñas, em Medina del Campo* (Figura 2.13), com construção finalizada em 1543, é uma jóia da arquitectura renascentista. Trata-se um edifício notável, onde se prova que a madeira não é só um bom material de construção, mas pode também adquirir grande valor porque possibilita ser minuciosamente trabalhado tornando o edifício numa escultura. Tectos primitivos, contínuos e configurados por um vigamento de madeira apoiado numa parede da fachada principal e no seu paralelo que conforma o claustro (Veloso, 2005).



a) Vista mais geral



b) Tectos trabalhados de madeira



c) Pormenor de suporte do tecto

Figura 2.13 – Palácio de Dueñas, em Medina del Campo, 1543.

- *Caves de vinho do Porto Cálem* (Figura 2.14) construídas no séc. XIX, restauradas no final dos anos 90 mas mantendo a sua arquitectura, configuração e materiais iniciais. As asnas de suporte principal da cobertura constituem uma solução mista de madeira e aço, bastante avançada para a época, que denota já preocupação com alguma fragilidade da madeira submetida a tracção. Isto, para além da madeira maciça ser a única aplicação de madeira estrutural naquela data, representar limitações de comprimento (vão) que consegue vencer.

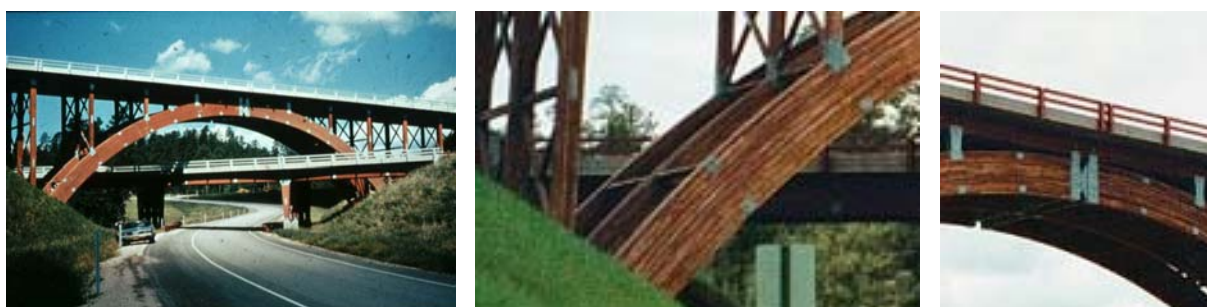


a) Treliza mista de aço-madeira b) Pormenor de suporte da cobertura c) Vista exterior do edifício

Figura 2.14 – Caves Cálem, no Porto, séc. XIX.

Com o rápido desenvolvimento industrial de meados do séc. XX, também a construção evoluiu, e o caso particular do uso da madeira como matéria-prima sofreu um grande avanço com o aparecimento de “produtos derivados da madeira”. A madeira lamelada-colada (MLC – *glulam*) foi o produto derivado de madeira que virtualmente eliminou os limites de comprimento, secção transversal ou forma das peças estruturais de madeira. São agora possíveis construir pontes (pedonais ou mesmo rodoviárias), pavilhões industriais, e ainda maiores, os pavilhões de desportos.

- *Ponte rodoviária Keystone Wye Bridge* (Figura 2.15), no estado Norte Americano de Dakota do Sul, foi construída em 1968, com um vão de 47.2m. É um marco importante na aplicação da madeira na construção porque foi a primeira ponte rodoviária, isto é, projectada para resistir a grandes cargas, inclusivamente dinâmicas, e para além do perfeito enquadramento paisagístico, provou o excelente desempenho da MLC porque nos 30 primeiros anos de utilização a única manutenção que esta ponte necessitou foi no piso de asfalto.

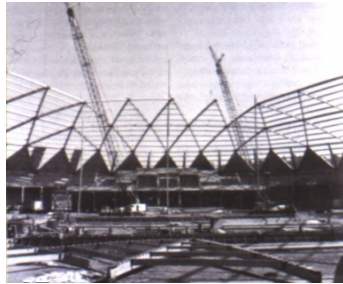


a) Vista geral b) Construção em MLC c) Rótula metálica no arco

Figura 2.15 – Keystone Wye Bridge, Dakota do Sul – EUA, 1968.

- *Pavilhão desportivo Tacoma Dome* (Figura 2.16), em Washington, foi inaugurado em 1983 como sendo a maior estrutura de cúpula do mundo, e surpreendendo muita gente por não aplicar aço na sua estrutura mas sim madeira, na sua forma melhorada: madeira lamelada-

colada. Actualmente não é a maior cúpula existente, mas ocupa ainda um lugar de destaque, 2ª posição, na lista de arenas de cobertura em madeira. O diâmetro da cúpula do Tacoma Dome mede 161.5m.



a) Construção da cúpula em MLC



b) Suporte da viga de cobertura



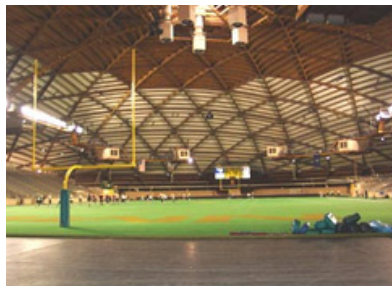
c) Vista exterior

Figura 2.16 – Tacoma Dome, Washington – EUA, 1983.

- *Pavilhão Superior Dome* (Figura 2.17), em Michigan nos EUA, inaugurado em 1991, é o sucessor do Tacoma Dome, com construção idêntica em MLC mas superando-o em dimensões (tem 163.4m de diâmetro) e é ainda a maior arena do mundo de cobertura em madeira.



a) Construção da cúpula em MLC



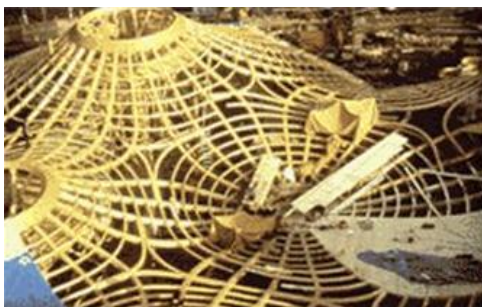
b) Vista interior



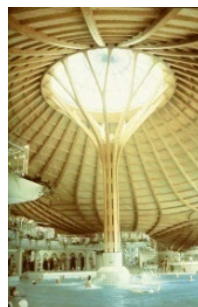
c) Vista exterior

Figura 2.17 – Superior Dome, Michigan – EUA, 1991.

- *Complexo de piscinas de água salgada do Solemar Health Resort em Bad Dürkheim* (Figura 2.18), na Alemanha, construído há mais de 20 anos em 1987, revolucionou por completo a forma das estruturas de madeira. Esta invulgar e inovativa estrutura imita a forma como as árvores suportam cargas, e faz uso total do potencial de resistência e moldagem da madeira lamelada-colada.



a) Nervuras da casca de cobertura em MLC



b) Vista geral



c) Ramos de árvore

Figura 2.18 – Piscina Bad Dürkheim, Alemanha, 1987.

- *Edifício da Caixa Galicia* (Figura 2.19), em Vigo, é um edifício senhorial de estilo barroco, tem projecto de construção datado de 1891 e foi reconstruído e ampliado em 1994. É um exemplo de harmonia de diferentes materiais e épocas, provando que o uso destes novos produtos derivados de madeira não se limita a construções novas.



a) Vista geral



b) Material novo: madeira



c) Novo piso na cobertura

Figura 2.19 – Edifício da Caixa Galicia, Vigo, reabilitado em 1994.

- *Pavilhão Atlântico* (Figura 2.20) é a maior obra de madeira em Portugal, com construção finalizada em 1998 aquando da exposição mundial Expo 98 realizada em Lisboa. A estrutura de madeira da nave principal foi inovadora a nível internacional, uma vez que constituiu um dos primeiros exemplos de uma grande estrutura dimensionada segundo o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1, 2004). A estrutura de cobertura é constituída por 17 arcos transversais triangulados com dimensões variáveis, tendo o maior arco 114 m de comprimento, e altura máxima de 47 m em relação à arena. Os elementos destes arcos são de madeira lamelada colada de Espruce (*Picea Abies*) (segundo Cruz, 2007).



a) Construção da nave principal em MLC



b) Pormenor de um arco transversal



c) Vista exterior

Figura 2.20 – Pavilhão Atlântico, Portugal, 1998.

- *Ponte pedonal Leonardo da Vinci* (Figura 2.21), próximo de Oslo na Noruega, construída em madeira lamelada-colada em 2001, com vão principal de 40m e comprimento total de 109.2m. A facilidade de moldar a madeira introduzida pelo desenvolvimento dos seus produtos derivados, cultivou a criatividade dos projectistas para criarem esculturas com função estrutural, em madeira.



a) Vista geral



b) Pormenor de encontro dos 3 arcos

Figura 2.21 – Ponte pedonal Leonardo da Vinci, Noruega, 2001.

Vistos todos estes exemplos de aplicação de madeira na construção, variadas formas e soluções estruturais, evolução das formas de aplicação da madeira e liberdade de criação dos projectistas. Só se pode esperar um futuro cheio de desafios às construções em madeira, onde se exigirão maiores vãos, mais capacidade de moldagem, mais estabilidade dimensional, mais rigidez do material e mais resistência última, ao mesmo tempo que se dimensiona mais economicamente aproximando as cargas de projecto das resistências de cálculo dos materiais e se requer estruturas dúcteis com aviso pré-ruína. Há lugar a evolução na construção com madeira.

2.2.6. ADIÇÃO DE ARMADURAS À MADEIRA

Foi focado no item 2.2.2 que o ponto fraco da madeira é a sua resistência à tracção, e acrescido o facto de o futuro obrigar a estruturas e vãos cada vez maiores para a madeira vencer, o reforço deste material na zona traccionada é uma preocupação real. Este facto pode ser implementado tanto no fabrico de elementos novos onde o reforço resultaria numa economia de secção transversal, como na reabilitação de estruturas já existentes onde o reforço aumenta a rigidez e a capacidade de carga última.

Para o dimensionamento de estruturas de aço ou betão, a maioria das normas de dimensionamento permite o uso de diagramas de tensão-extensão elasto-plásticos para a análise da resistência da secção transversal em Estado Limite Último. Em contrapartida, as estruturas de madeira continuam a ser dimensionadas, ao Estado Limite Último, com o velho e conservativo conceito da secção em regime elástico até à rotura. É uma situação caricata por duas razões principais: primeiro porque a madeira sob forças de compressão exhibe um comportamento dúctil muito melhor que o betão, depois porque a resistência à flexão de pequenos provetes de madeira limpa é muito superior à sua resistência à compressão. No entanto, estes resultados nunca foram integrados nas normas actuais de madeira (Brunner, 2002; Silva *et al*, 2004).

O principal motivo pelo qual ainda não foi adoptada a análise plástica no dimensionamento de estruturas de madeira é devido à sua grande variabilidade da resistência à tracção. Mesmo os pequenos provetes de madeira limpa exibem um comportamento frágil e imprevisível sob forças de tracção. No caso de vigas com dimensões de elementos de estruturas, a resistência à tracção pode ficar consideravelmente reduzida pelos defeitos existentes na madeira.

Portanto, a colocação de um reforço com elevado módulo de elasticidade e alta resistência à tracção, na zona traccionada das vigas flectidas, pode incrementar a resistência e rigidez à flexão, a ductilidade, e potencialmente baixar a variabilidade das propriedades mecânicas, se comparadas com vigas não reforçadas. Sem o reforço, a viga acaba por ter um comportamento praticamente elástico e dependente

da secção mais fraca à tracção do elemento. Com o reforço, espera-se ultrapassar a dependência do elemento relativamente à sua resistência à tracção, sendo possível atingir a tensão última em compressão para a qual a madeira tem um comportamento elasto-plástico (Silva *et al*, 2004). A Figura 2.22 ilustra a distribuição de tensões normais numa secção reforçada e noutra simples admitindo-se o comportamento elasto-plástico do material.

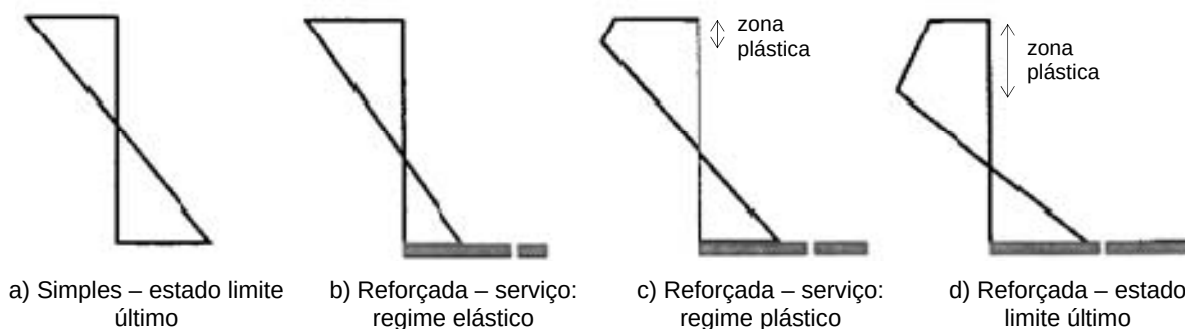


Figura 2.22 – Tensões normais na secção transversal de uma viga de madeira sujeita à flexão.

O reforço da zona traccionada cria maior capacidade resistente nessa zona, fazendo passar maiores tensões para a zona comprimida, que uma vez superada a sua capacidade máxima, despoletam o processo de rotura por compressão da madeira. Que é, como já se sabe, uma rotura dútil e que confere maior segurança em Estado Limite Último à estrutura reforçada do que à estrutura simples de madeira.

Nos últimos anos tem sido investigado o potencial de reforço associado a uma variedade de materiais, como o aço, o alumínio e mais recentemente os polímeros reforçados com fibras (FRP), que podem ser de vidro (GFRP) (Moulin *et al*, 1990; Dorey e Cheng, 1996), de carbono (CFRP) (Tingley, 1996b; Cruz *et al*, 2004; Dias *et al*, 2004) ou de aramida (AFRP) (Blaß e Romani, 2000; Dolan *et al*, 1997).

Madeira reforçada com FRP constitui um material compósito adequado a ambientes agressivos, porque ambos os materiais apresentam boa resistência a agentes químicos, e ao mesmo tempo são electricamente neutros. Quando se usa FRPs para reforçar madeira, a sua fragilidade na rotura deixa de ser preocupante porque o comportamento da madeira em compressão providencia a ductilidade necessária na ruína (Gilfillan *et al*, 2001).

Antes da aplicação dos materiais compósitos para uso estrutural, várias técnicas de reforço, com diferentes graus de eficiência, foram testadas no passado com o objectivo de aumentar a resistência e a rigidez das estruturas de madeira. Enquanto todas essas técnicas de reforço obtiveram resultados satisfatórios, apenas algumas foram discutidas ou comercializadas, e quase nenhuma chegou ao nível de ser mundialmente reconhecida e adoptada. Tal facto pode ser atribuído a várias causas, tais como dificuldades de execução, custo elevado, casos limitados de aplicação, ou necessidade de pessoal especializado. Uma outra razão poderá ser a pouca divulgação entre os projectistas da capacidade e segurança conseguidas com essas técnicas, e em especial do seu comportamento a longo prazo.

A falta de regulamentação específica para o reforço de estruturas de madeira e a falta de confiança na madeira como material estrutural, por razões que vão desde o desconhecimento técnico à discriminação infundada, têm limitado o uso da madeira à construção de coberturas e casas de montanha. É inevitável que este pequeno mercado da madeira estrutural absorva mais lentamente as inovações, por menor possibilidade de experimentação e menor investimento em investigação, do que

o mercado do reforço do betão. Daí que o reforço com FRPs esteja já bastante desenvolvido na sua aplicação em betão e não na madeira. Relembre-se que a razão não é a pior qualidade de aderência.

A Itália é o país com maior desenvolvimento científico feito nesta área do reforço de madeira com recurso a compósitos de FRP e é precisamente de lá que surgiu recentemente a versão final, publicada em Junho de 2007 pelo CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*), a compilação técnica de recomendações para o reforço de estruturas de madeira com sistemas de FRP designado por CNR-DT 201/2005 (2007). Trata-se certamente de um documento importante e impulsionador do desenvolvimento do reforço de estruturas de madeira com FRPs.

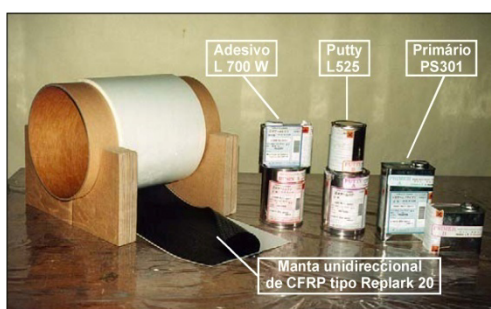
2.3. REFORÇO DE MADEIRA COM FRP

2.3.1. SISTEMAS DE FRP

Os sistemas de FRP foram desenvolvidos no decurso do séc. XX com o objectivo de criar materiais capazes de colmatar as lacunas verificadas na utilização dos materiais tradicionais.

Resultando de um princípio de heterogeneidade, os materiais compósitos são constituídos essencialmente por duas fases: fibras sintéticas ou orgânicas de elevada resistência, impregnadas numa resina polimérica denominada matriz, com características sinérgicas (proporciona a transferência de esforços entre vários subsistemas na realização de uma tarefa conjunta) e elevada elasticidade. Os compósitos de FRP podem ser encontrados no mercado sob a forma de fibras de carbono (CFRP), aramida (também conhecida pela marca Kevlar®) (AFRP), e vidro (GFRP). As principais formas comercializadas, admitindo como parâmetros de base a configuração geométrica espacial e a disposição das fibras no produto final, podem ser classificadas em três grandes grupos: unidireccionais; bidireccionais; multidireccionais (Juvandes, 1999).

As formas comerciais de sistemas de FRP mais frequentemente usadas no reforço de elementos de madeira podem dividir-se em dois grupos principais: sistemas moldados curados *in situ* e sistemas pré-fabricados (*pultrudidos*). Para os primeiros a resina e as fibras são comercializadas em separado e depois juntas no local a reforçar, funcionando a resina como agente de impregnação das fibras, mas também como adesivo, fixando o reforço à estrutura a reforçar. Quanto aos segundos, têm a forma de perfis pré-fabricados que já integram a matriz plástica curada mas onde é necessário aplicar uma resina extra (designada por adesivo) para fixar o reforço à estrutura a reforçar.



a) Manta flexível de CFRP



b) Laminado de CFRP

Figura 2.23 – Os sistemas compósitos de FRP mais correntes (unidireccionais).

Os perfis de FRP podem apresentar uma grande variedade de formas, sendo que, as mais comuns são os *laminados* com a forma de lâminas de largura e espessura variáveis (Figura 2.23.b)). Os laminados

funcionam principalmente numa direcção, que corresponde à direcção das fibras que o compõem. Os sistemas curados *in situ* são classificados, quanto à direcção que as fibras tomam no sistema, em *mantas* (Figura 2.23.a)) se as fibras forem colocadas principalmente numa direcção e *tecidos* se as fibras tomarem várias direcções.

A densidade dos materiais FRP é geralmente baixa, a par da elevada resistência última e rigidez que estes materiais também apresentam. As resistências características à tracção podem chegar a ser 10 ou 15 vezes superiores às do aço, permanecendo elevadas a altas temperaturas. Os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) ou de aramida (AFRP) têm boa resistência à fadiga, que chega a ser 3 vezes maior do que a do aço, e ainda baixo coeficiente de expansão térmica (apresentam grande estabilidade dimensional), resistência à fluência e resistência à corrosão (Gilfillan *et al*, 2001).

São apresentadas no Quadro 2.2 as principais propriedades mecânicas das várias fibras estruturais de FRP, onde é bem patente a sua elevada resistência à tracção e módulo de elasticidade, quando comparados com as mesmas propriedades na madeira, no aço e no betão.

Quadro 2.2 – Comparação de características de alguns materiais (direcção longitudinal) (Dimande, 2003).

Tipo de material	Densidade (g/cm ³)	Coef. de expansão térmica (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	Resistência à tracção (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
Aço	7.9	12	220 a 400	220 a 400
Betão	2.1 a 2.2	12	<i>desprezável</i>	20 a 50
Madeira	0.35 a 1.25	2 a 8	80 a 120	30 a 60
Fibra de Carbono	1.5 a 2.1	-1 a 0	2940 a 4600	<i>não aplicável</i>
Fibra de Vidro	1.2 a 2.1	6 a 10	2400 a 3500	<i>não aplicável</i>
Fibra de Aramida	1.2 a 1.5	-6 a -2	2900 a 3500	<i>não aplicável</i>
Resina	1.2 a 1.4	80 a 100	45 a 60	150 a 200

As fibras são responsáveis pela resistência e rigidez do compósito, que varia em função do tipo, tamanho, grau de concentração e disposição das mesmas na matriz. Os materiais compósitos quando solicitados à tracção não exibem um patamar de cedência, sendo caracterizados por possuírem um comportamento linear-elástico até a rotura.

À semelhança do que acontece nos materiais tradicionais, os compósitos de FRP quando submetidos a um processo cíclico de carregamento, perdem a capacidade de sustentar cargas (perda de resistência). No entanto, os compósitos unidireccionais de CFRP, exibem uma resistência à fadiga superior ao aço (ACI – Committee 440, 2000).

2.3.2. SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP DISPONÍVEIS EM PORTUGAL

É necessário obter dos fabricantes dos sistemas de FRP as informações indispensáveis sobre as características dos produtos que constituem o sistema para o dimensionamento dos reforços e para se garantir o seu desempenho no futuro. Nesse sentido, Juvandes e Marques (2007) procuraram identificar e resumir num documento (sobre procedimentos e controlo de qualidade para construção) os vários sistemas comerciais de FRP disponíveis em Portugal (Figura 2.24), até Outubro de 2007. Os

Quadros 2.3 e 2.4 traduzem esse reforço distinguindo-se os sistemas pré-fabricados dos curados *in situ*.



Figura 2.24 – Exemplo de alguns sistemas comerciais de FRP disponibilizados em Portugal (Laboratório de Compósitos do DEC-FEUP).

Quadro 2.3 – Sistemas pré-fabricados comercializados em Portugal (Juvandes *et al*, 2007).

MARCA (Representante)	PRODUTO	REFERÊNCIA COMERCIAL
MAPEI (Lusomapei, S.A.)	Putty	MAPEI Adesilex PG1
	Primário	Mapewrap Primer 1
	Adesivo	MAPEI Adesilex PG1 / Adesilex PG2 (varia com a temperatura)
	Laminado	MAPEI Carboplate
MBRACE (Bettor Portugal)	Putty	s/i
	Primário	MBrace Resin 50
	Adesivo	MBrace Resin 220
	Laminado	MBrace Laminado
MBRACE (BASF Construction Chemicals Portugal)	Putty	s/i
	Primário	MBrace Resin 50 (superfícies secas) MBrace PRIMER W (superfícies húmidas)
	Adesivo	MBrace Resin 220
	Laminado	MBrace Laminado
	Varão	MBar MBar JOINT
RUREDIL (Tradibau, Arquitectura e Engenharia, Lda.)	Putty	Exocem FP / PVA
	Primário	s/i
	Adesivo	Ruredil X LAM-RS 100
	Laminado	Ruredil X LAM
SIKA (Sika Portugal, S.A.)	Putty	Sikadur 41
	Primário	s/i
	Adesivo	Sikadur 30
	Laminado	Sika CarboDur
S&P REINFORCEMENT (Clever Reinforcement Ibéria, Lda.)	Putty	s/i
	Primário	S&P Resin Epoxy 50
	Adesivo	S&P Resin 220
	Laminado	S&P Laminates CKF

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Quadro 2.4 – Sistemas curados “in situ” comercializados em Portugal (Juvandes *et al*, 2007).

MARCA (Representante)	PRODUTO	REFERÊNCIA COMERCIAL
BETONTEX (BLEU LINE, Conservação e Restauro de Obras de Arte, Lda.)	Putty	s/i
	Primário	PRIMÁRIO EPOCHEM E3S + ENDURECEDOR EPOCHEM 1D E 3S
	Resina de impregnação	RESINA EPOCHEM GC E3S + ENDURECEDOR CG 1D 3S
	Manta ou Tecido	FTS GV330 U-HT / FTS GV220 U-HT / FTS GV160 U-HT (mantas de carbono)
		FTS VV320 U-HT (mantas de vidro)
MAPEI (Lusomapei, S.A.)	Putty	Mapewrap 11 / Mapewrap 12 (varia com a temperatura)
	Primário	Mapewrap Primer 1
	Resina de impregnação	Mapewrap 21 (técnica húmida) Mapewrap 31 (técnica seca)
	Manta ou Tecido	Mapewrap C UNI-AX /UNI-AX HM (manta)
		Mapewrap C BI-AX (tecido bidimensional) Mapewrap C QUADRI-AX (tecido tridimensional)
MBRACE (Bettor-MBT Portugal)	Putty	s/i
	Primário	MBrace Resin 50
	Resina de impregnação	MBrace Resin 55
	Manta ou Tecido	MBrace Mantas de Fibra (mantas e tecidos)
MBRACE (BASF Construction Chemicals Portugal)	Putty	s/i
	Primário	MBrace Resin 50 (superfícies secas) MBrace PRIMER W (superfícies húmidas)
	Resina de impregnação	MBrace Resin 55
	Manta ou Tecido	MBrace Mantas de Fibra (mantas e tecidos)
REPLARK (EcoSpring – Estudos e Representações Técnicas, Lda)	Putty	Argamassa regularização Massa L-600
	Primário	Primário SPS-400
	Resina de impregnação	Resina de saturação XL-800
	Manta ou Tecido	Replark 20, 30 e MM2 (mantas de carbono)
RUREDIL (Tradibau, Arquitectura e Engenharia, Lda.)	Putty	Exocem FP / PVA
	Primário	Ruredil X Wrap Primer
	Resina de impregnação	Ruredil X Mesh M25 (resina inorgânica) Ruredil X Wrap Resin
	Manta ou Tecido	Ruredil X Mesh C10 (mantas para alvenarias)
		Ruredil X Wrap 310 (mantas)
SIKA (Sika Portugal, S.A.)	Putty	Sikadur 41
	Primário	s/i
	Resina de impregnação	Sikadur 330 Sikadur 300
	Manta ou Tecido	SikaWrap Hex 230 C (mantas)
		SikaWrap 400C HiMod NW (mantas)
S&P REINFORCEMENT (Clever Reinforcement Ibéria, Lda.)	Putty	s/i
	Primário	S&P Resin Epoxy 50
	Resina de impregnação	S&P Resin Epoxy 55
	Manta ou Tecido	S&P C-Sheet 240 (mantas)

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

2.3.3. COMPATIBILIDADE ENTRE OS DOIS MATERIAIS

O uso de materiais compósitos de FRP em combinação com a madeira apresenta bastantes vantagens pela compatibilidade e complementaridade das suas características. Por exemplo, o baixo peso da madeira, que é uma das suas características mais apreciável, não é afectado pelo reforço com FRPs. Além disso, o defeito mais evidente da madeira que é a sua heterogeneidade mecânica, pela possibilidade de presença de numerosos defeitos, pode ser aliviado pela actuação simultânea de outro material estruturalmente eficiente como o compósito de FRP.

O uso dos FRPs no reforço de peças estruturais de madeira apresenta diversas vantagens tais como: reduz o custo quando usado correctamente; repara e reabilita danificações e deteriorações estruturais; melhora a durabilidade e reduz a manutenção requerida para as peças e juntas; aumenta a resistência à flexão e a rigidez de novas peças; melhora as propriedades estruturais das classes de madeira de menor qualidade; permite o uso de peças de menor secção transversal, com a mesma rigidez e resistência do que as peças sem reforço (Tingley, 1996a; Beber *et al*, 2000; Cunha e Dogmar, 2004).

Alguns exemplos de aplicação onde o reforço de estruturas de madeira com FRPs tem já provas dadas:

- *Reforço de elementos de madeira sujeitos a flexão*, incluindo vigas de pórticos, vigas de suporte de soalho e elementos de estruturas mais complexas como treliças. O sistema de reforço por ser formado por placas ou mantas de vários materiais, aplicados de acordo com o critério que ofereça maiores vantagens em termos de resistência, deformabilidade e ductilidade;
- *Reforço de estruturas sujeitas a acções no plano*, tipicamente os soalhos de madeira. Tais estruturas são leves, têm boa resistência, boas capacidades de isolamento térmico e acústico, mas apresentam rigidez limitada e modesta capacidade de transmitir os carregamentos verticais que suportam em forças horizontais até às vigas de suporte;
- *Reforço de juntas entre elementos de madeira*. Os objectivos do envolvimento de uma junta de elementos de estruturais de madeira por uma manta de FRP são: a redução do risco de rotura por tensões perpendiculares às fibras da madeira, a redução do espaçamento nas juntas, a melhoria do comportamento da junta em estado limite último e, a melhoria da sua capacidade de dissipação de cargas cíclicas.

Por contraponto, também existe pelo menos 1 caso onde a aplicação desta técnica de reforço se desaconselha:

- *Para reforçar elementos de madeira em compressão com FRPs*, deve ter-se em conta algumas contra-indicações. Enquanto o envolver de um pilar de betão é um confinamento adequado, não se conseguem os mesmos resultados com a mesma garantia de efectividade a longo prazo num elemento de madeira, devido aos movimentos de expansão e contracção que a madeira realiza sob variações de temperatura e humidade, e que pode subsequentemente comprometer a efectividade do confinamento.

2.3.4. FACTORES A TER EM CONTA NA FASE DO REFORÇO

A escolha do tipo de reforço, da sua geometria e do tipo de ligação devem ocorrer simultaneamente na designada fase de “projecto da intervenção de reforço”. O tipo mais comum de ligação entre o reforço de FRP e o elemento de madeira é a colagem por resinas epoxídicas, dada a sua versatilidade e compatibilidade entre o adesivo e a matriz de impregnação das fibras no compósito.

Para se obter os melhores resultados, alguns aspectos relacionados com a interface madeira-adesivo devem ser considerados:

- O adesivo deve “molhar” a superfície de madeira, e ter um comportamento reológico similar ao dos materiais que está a unir, ou seja, deve ter deformações da mesma ordem das dos materiais que está a colar;
- A superfície de madeira deve ser bem preparada para que a colagem seja uniforme em toda a superfície;
- A espessura da camada de adesivo deve ser a óptima, de acordo com as indicações do fabricante.

São importantes as características particulares de cada um dos 3 intervenientes no reforço:

- Madeira:
 - o No projecto da intervenção de reforço, não só as tensões no elemento de madeira (paralelas ou perpendiculares à direcção das fibras) devem ser tidas em atenção, mas também outras características da madeira incluindo: a sua espécie, a presença de defeitos, o teor de humidade aquando da aplicação do reforço e o que vai estar sujeita durante a vida da estrutura, entre outras;
 - o Lembre-se que a presença de nós ou deformações visíveis na madeira pode levar a comportamentos imprevisíveis da ligação reforçada madeira-FRP, resultando por exemplo em modos de ruína prematuros inesperados;
- FRP:
 - o Os materiais compósitos de FRP são só eficientes em absorver tensões na direcção das duas fibras. Por isso os compósitos unidireccionais ou multidireccionais devem ser aplicados nas situações em que se enquadrem;
- Adesivo:
 - o O adesivo com as melhores características resistentes a curto prazo após a aplicação, não é necessariamente o que se comporta melhor a longo prazo, especialmente em condições ambientais hostis;
 - o Considerando que a madeira “respira”, isto é, sofre significativas variações dimensionais relacionadas com a absorção e libertação de humidade interior, um adesivo só pode ser considerado adequado para efectuar a ligação colada madeira-FRP, se ele conseguir absorver e acompanhar essas deformações da madeira.

O problema da durabilidade é facilmente resolvido providenciando protecção ao sistema de reforço. Por exemplo, protecção contra condições ambientais, protecção contra choques ou contra actos de vandalismo, pode ser providenciada adoptando a geometria adequada para o sistema de reforço, isto é, adoptando a técnica de reforço por inserção em ranhuras superficiais (também designada na literatura por *Near Surface Mounted* – NSM) em que o reforço fica protegido pela própria madeira. É também importante que a escolha dos materiais tenha em conta uma boa resistência a ataques físicos e químicos.

As resinas tendem a perder grande parte das suas características mecânicas à volta dos 100°C, sendo portanto altamente sensíveis ao risco de incêndio. Além disso o adesivo usado para colar o reforço à madeira apresenta a sua temperatura de transição vítrea (T_g) sempre abaixo dos 100°C.

Estes problemas podem ser resolvidos retirando vantagem da grande capacidade de isolamento térmico da madeira, adoptando-se soluções de protecção do sistema de reforço. Estas incluem o uso de uma geometria adequada para cobrir o reforço com uma outra camada de madeira, protegendo assim o reforço e completando toda a estrutura do ponto de vista funcional e estético. Porque quem projecta

uma estrutura de madeira, certamente que pretende que a estrutura pareça de madeira. E nunca é demais lembrar que quanto mais importante for o reforço para a capacidade resistente de toda a estrutura, mais importante se torna a adopção de medidas de protecção adequadas do reforço.

Alguns requisitos fundamentais para garantir a durabilidade máxima de qualquer tipo de intervenção de reforço são aqui listados:

- *Limitação das tensões em condições de serviço.* Durante a fase de projecto da intervenção de reforço, é importante que se faça uma correcta avaliação das condições estáticas após o reforço;
- *Escolha cuidadosa do material de reforço.* As diferenças físicas e mecânicas de entre os vários tipos de fibras e resinas não podem ser ignoradas;
- *O correcto projecto da ligação entre os materiais.* É o ponto-chave da fase de projecto, mas também na fase de execução, garantir a correcta ligação entre o reforço e o material reforçado, constitui a operação mais importante para garantir o sucesso de toda a intervenção;
- *Proteger o sistema de reforço, adoptando detalhes particulares de construção.* As características da própria madeira permitem uma fácil protecção do reforço sem a necessidade de usar outros materiais;
- *Executar correctamente.* O uso de FRPs com fins estruturais requer pessoal especializado;
- *Planeamento adequado para as condições ambientais da vida da estrutura.* Pode incluir por exemplo a necessidade de instalação de um sistema de ventilação.

2.3.5. INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA REALIZADA NESTE DOMÍNIO

A investigação na área do comportamento de estruturas de madeira reforçada com materiais de FRP tem apresentado algum desenvolvimento visível nos 10 anos mais recentes. Constatase que são preocupações mais correntes da comunidade científica assentes na análise das vantagens e desvantagens do uso desta técnica de reforço, na avaliação da aderência e do nível de desempenho do FRP na interface madeira-compósito e até mesmo na aproximação de modelos analíticos de interpretação do comportamento de estruturas de madeira reforçada.

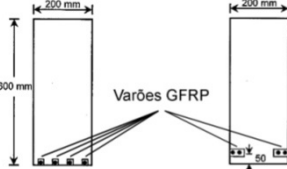
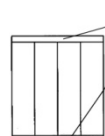
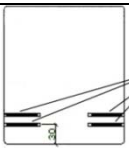
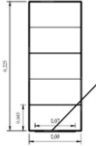
Vários autores reforçaram madeira maciça, outros reforçaram madeira lamelada-colada, uns estudaram o reforço de vigas, outros o reforço de ligações, colunas, ou mesmo soalhos inteiros. Vários factores foram sendo investigados pela sua influência no desempenho global do reforço, nomeadamente, o uso de fibras de carbono, aramida ou vidro, o uso ou não de primário na preparação da superfície, variações do comprimento de colagem, o número de camadas de reforço, até ao uso de sistemas pré-fabricados ou curados *in situ*. Neste âmbito, no Quadro 2.5 apresentam-se alguns trabalhos tomados como referência para a presente dissertação.

Quando se fala do reforço de madeira com sistemas FRP, constata-se que existem algumas técnicas até à data e que se resumem nos seguintes casos:

- Técnica de colagem exterior (designada por EBR – *External Bounded Reinforcement*), que consiste na colagem do compósito na face exterior do elemento de madeira, quer traccionada quer comprimida;
- Técnica de colagem num rasgo superficial (designado por NSM – *Near Surface Mounted Reinforcement*), que resulta da inserção e colagem do compósito em entalhes previamente realizados na superfície da madeira. Esta técnica requer um trabalho de preparação do substrato mais moroso que a técnica anterior, mas apresenta a vantagem de proteger a armadura de reforço;

- Técnica de colagem em fase de produção da madeira MLC, no geral o compósito pode ser colado numa face intercalada entre as lamelas de uma viga. Esta solução tem, por um lado, vantagens estéticas e, por outro, incrementar a protecção ao reforço pela madeira.

Quadro 2.5 – Investigação científica realizada na área do reforço de madeira com FRP.

Autor	Madeira	Sistema de FRP	Técnica de reforço	Esquema
Dolan <i>et al</i> (1997)	MLC (6 lamelas)	GFRP (fios)	Interno Pré-esforçado	
		AFRP (fios)	Interno Pré-esforçado	
Blaß e Romani (2000)	MLC (9 lamelas)	CFRP (laminado)	Externo (EBR)	
		CFRP (laminado)	Interno	
		AFRP (laminado)	Interno	
Borri <i>et al</i> (2003)	Maciça	CFRP (manta)	Externo (EBR)	
			Externo de canto (EBR)	
			Externo (EBR) Pré-esforçado	
			Externo de canto (EBR) Pré-esforçado	
		CFRP (varões)	Inserção em ranhuras (NSM) Pré-esforçado	
Gentile <i>et al</i> (2002)	Maciça	GFRP (varões)	Inserção em ranhuras (NSM)	
Lopez-Anido e Xu (2002)	MLC (4 lamelas)	GFRP (tecido – multidireccional)	Externo (EBR)	
Parisi e Piazza (2002)	Maciça	CFRP (laminado)	Inserção em ranhuras (NSM)	
Dias <i>et al</i> (2004)	MLC (5 lamelas)	CFRP (manta)	Externo (EBR)	
			Interno sem cavidade	
			Interno com cavidade	
		CFRP (laminado)	Externo (EBR)	
			Interno sem cavidade	
			Interno com cavidade	

Uma viga de madeira reforçada com fibras apresentará comportamentos diferentes em função da configuração escolhida para o reforço. No entanto, de um modo geral, os benefícios conseguidos são

semelhantes. A utilização do reforço de FRP, cuja tensão última e o módulo de elasticidade são muito superiores aos da madeira, permite obter uma secção composta com uma resistência global significativamente superior à de um elemento não reforçado.

Na vertente de reabilitação de estruturas já existentes, a utilização do reforço com FRP em estruturas de madeira constitui uma boa solução de reforço estrutural em termos de aumento de capacidade última. Na vertente do reforço de estruturas novas, a técnica permite a economia da secção transversal da madeira, traduzida na economia considerável de dimensões de secção transversal da peça.

No Quadro 2.6 expõem-se os resultados de ensaios que diversos autores efectuaram com vigas de madeira reforçadas com fibras (Silva *et al*, 2004).

Quadro 2.6 – Resultados de vários estudos em vigas de madeira reforçada com FRP.

Autor	Madeira	Sistema de FRP	% FRP	Incremento de resistência (%)	Incremento de rigidez (%)
Dorey e Cheng (1996)	MLC	GFRP (manta)	0.041	21.8	2.3
			0.083	32.9	6.7
		GFRP (laminado)	2.08	66.2	21.4
			8.23	127.3	104.3
Lindyberg (1998)	MLC	GFRP (laminado)	1.1	61.5	-
			3.3	119.0	-
Blaß e Romani (2000)	MLC	CFRP (laminado)	0.9	100.0	-
Borri <i>et al</i> (2003)	Maciça	CFRP (manta)	8.2	42.3	22.3
			12.3	60.3	29.2
Haiman e Zagar (2002)	MLC	GFRP (laminado)	3.5	30	-

Observa-se no Quadro 2.6 que, mesmo para pequenas percentagens de reforço (0,041%), o sistema de FRP permite um incremento substancial da resistência do elemento (a percentagem de reforço é obtida dividindo a área da secção de FRP pela área da secção de madeira). Na verdade, a colocação do FRP, para além de aumentar as propriedades mecânicas da secção, tem ainda a virtude de confinar a madeira sobre a qual é aplicado, limitando a ocorrência de fracturas na madeira junto de defeitos que levariam à rotura prematura do elemento (Silva *et al*, 2004).

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo procurou reunir-se um conjunto de informação que fundamenta grande parte das opções que se têm que tomar face à necessidade de concepção de uma solução de reforço à tracção de elementos de madeira MLC com materiais compósitos pela técnica de colagem.

Em vários domínios ainda não se alcançou o desejável e consensual estado de conhecimento, sendo disso exemplo o comportamento da interface madeira-compósito.

Para se reforçar madeira com FRP é importante perceber se os materiais em questão têm capacidade de transferir esforços entre eles. A interface de ligação entre os materiais é a responsável pela transmissão de esforços do FRP para o elemento de madeira, pelo que, a resistência de uma ligação

será ditada pelo valor máximo da aderência entre os materiais envolvidos na ligação. Concretamente, na interface madeira-adesivo-compósito (ou junta) e atendendo aos modos de ruína teoricamente possíveis, o problema surge ao nível da comparação dos valores das resistências ao corte e à tracção na camada superficial da madeira, da resistência coesiva do adesivo e da resistência interlaminar do compósito. Dos três casos, o condicionante será o que apresentar menor valor, que em termos correntes é a madeira. A determinação do valor da resistência à aderência é indispensável para a compreensão dos mecanismos de transmissão de esforços na junta (interface) e, nestas condições, permitir estabelecer modelos de interpretação de um reforço (Juvandes, 1999). Este tema é de extrema importância porque ele determina a eficiência de qualquer ligação colada.

A determinação do valor da aderência à madeira é indispensável para se compreender os mecanismos de transmissão de tensões na junta. A aderência pode ser avaliada através de modelos experimentais e modelos analíticos (Dimande, 2003).

A avaliação experimental do comportamento da interface colada é realizada, em termos globais, recorrendo a ensaios reduzidos de corte (junta simples ou dupla), a ensaios de flexão de vigas reforçadas e a ensaios de arrancamento de tracção (“Pull-Off”) e/ou torção (“Torque-test”) (Juvandes, 1999).

A interpretação analítica da interface, surge sobretudo por calibração a partir dos modelos experimentais, mas permite a criação de modelos analíticos bastante úteis na avaliação da aderência ao aferirem a lei de distribuição dos esforços na interface, a tensão de aderência resistente e a lei de comportamento da junta.

Pelos factos retratados neste capítulo, verifica-se ser importante investir na análise do comportamento da interface madeira-adesivo-compósito nas vertentes, quer da técnica de colagem EBR quer na técnica de selagem NSM, correntes nos casos de reforço com FRP.

São disso exemplo a necessidade de esclarecimento científico às questões seguintes:

- i. Qual é o nível máximo de tensões de corte (em termos médios “ τ_{med} ”) que é possível mobilizar nas juntas coladas madeira-FRP?
- ii. Qual é a ordem de grandeza do rendimento esperado para o desempenho do compósito de FRP na ligação à madeira?
- iii. Qual é a diferença no desempenho dos modelos de MLC reforçados pelas técnicas EBR e NSM? Qual é a resposta as questões (i) e (ii) para as duas técnicas?
- iv. Qual é o comprimento efectivo de ancoragem que mobiliza a máxima força de ancoragem na junta madeira-FRP no caso EBR e na situação NSM?
- v. Qual é o contributo científico resultante do recurso a modelos experimentais, nomeadamente, os ensaios de “Pull-Off” e os ensaios de “aderência em flexão”?
- vi. Que modelos analíticos podem ser usados na análise de previsão do comportamento de juntas madeira-FRP de forma a calibrarem critérios simples e seguros de dimensionamento?

Estas são algumas das questões que se pretendem ver esclarecidas nesta dissertação, razão pela qual contam dos objectivos principais do programa de trabalho, por forma a dar um contributo no conhecimento do uso dos compósitos nas estruturas de madeira face aos bons resultados obtidos na ligação a elementos de betão.

3

ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR “PULL-OFF”

3.1. INTRODUÇÃO

Na sequência do que são os objectivos do presente trabalho, neste capítulo expõem-se os resultados de um programa experimental cujo ensaio permite dar uma ideia do nível de aderência entre os materiais de uma junta colada. Trata-se do ensaio de “Pull-Off”, cuja função é a de avaliar a resistência à tracção directa entre os materiais que formam a interface, com algumas condicionantes a ter presente.

Procura-se, para o efeito, resumir o trabalho de vários autores sobre este assunto de forma a tirarem-se conclusões sobre a ordem de grandeza da tensão de aderência avaliada deste modo e a indicação de um valor dessa tensão para introduzir nos modelos analíticos a detalhar no Capítulo 5.

Os trabalhos em análise serão referidos neste documento como: Isaías e Luís (Martins Sá *et al*, 2005), Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006) e Salvador e Branco (Cruz *et al*, 2004). Evitou-se, neste capítulo, referir a informação detalhada incluída nos trabalhos dos autores, mas reproduzir somente os principais dados dos mesmos, com vista à sua análise por forma a ir ao encontro dos objectivos desta tese. Os documentos originais devem ser consultados quando se pretenderem informações mais detalhadas sobre os trabalhos.

Pelo exposto no Capítulo 2, a interface madeira-resina-FRP surge no reforço de estruturas de madeira por colagem de sistemas compósitos, quer na vertente técnica EBR (colagem externa), quer na técnica NSM (inserção em ranhuras). Face a isto, o programa experimental de ensaios de aderência por “Pull-Off” foram ajustados pelos autores às duas técnicas de reforço e, aqui também, serão analisados da mesma forma.

3.2. ENSAIO DE “PULL-OFF”

O ensaio de arrancamento por tracção, também designado na literatura internacional por ensaio de “Pull-Off”, deve ser realizado de acordo com a norma EN 1542 (1999). Em termos gerais, o ensaio consiste no registo da força de tracção necessária para o arrancamento de pastilhas metálicas, de secção circular com 50 mm de diâmetro, coladas à superfície de madeira. O valor da tensão de tracção ($f_{wtm,p}$) obtém-se dividindo o esforço de tracção na rotura pela secção da pastilha. De forma a circunscrever a tensão de aderência à área real de colagem da pastilha deve efectuar-se o pré-caroteamento no perímetro da pastilha.



Figura 3.1 – Ensaio de “Pull-Off” em madeira reforçada com FRP, técnica EBR (Martins Sá *et al*, 2005).

De acordo com a norma EN 1542, o ensaio é indicado para avaliação da aderência no caso da técnica de reforço EBR (Figura 3.1), pelo que no caso da técnica de reforço NSM foram introduzidas pelos autores algumas variações (sobretudo de geometria dos provetes), respeitando os procedimentos de realização do ensaio descrito na referida norma, sempre que possível (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Provetes para ensaio de “Pull-Off” ajustados à técnica NSM (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006).

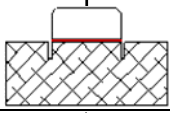
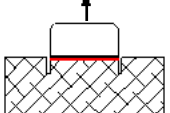
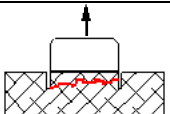
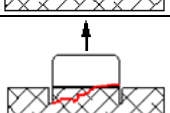
No Quadro 3.1 expõem-se os critérios (esquema tipo) adoptados pelos autores dos trabalhos para avaliar a aderência quer na junta à superfície (técnica EBR) quer na junta criada numa ranhura de madeira (técnica NSM).

Quadro 3.1 – Critérios (esquema tipo) para realização dos ensaios de “Pull-Off”.

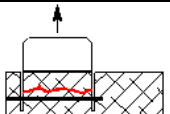
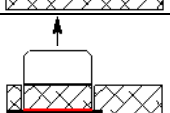
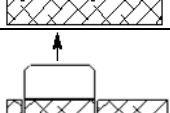
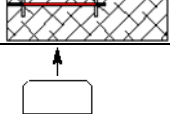
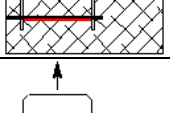
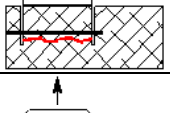
Técnica de reforço	Ensaio de “Pull-off”	
	Esquema tipo	Observações
EBR		Avaliação da aderência na junta colada à superfície da madeira
NSM		Avaliação da aderência na junta criada numa ranhura da madeira

Pela própria natureza do ensaio de arrancamento por “Pull-Off”, pode-se prever um limitado número de modos de ruína da interface madeira-FRP. As roturas podem acontecer em qualquer junta entre materiais diferentes, desenvolver-se dentro de um só material (desde que esse material apresente espessura relativa suficiente), ou ainda algum modo híbrido em que a superfície de corte atravessasse vários materiais. Nos Quadros 3.2 e 3.3 resumem-se todos os modos de ruínas espectáveis para os ensaios realizáveis nas duas técnicas de reforço (EBR e NSM).

Quadro 3.2 – Modos de ruína espectáveis nos ensaios de “Pull-Off” para a técnica EBR.

Técnica de Reforço	Modos de Ruína	
	Descrição	Esquema
EBR	Corte interlaminar no FRP	
	Corte na junta FRP-madeira	
	Corte da madeira	
	Corte híbrido em várias juntas	

Quadro 3.3 – Modos de ruína espectáveis nos ensaios de “Pull-Off” para a técnica NSM.

Técnica de Reforço	Modos de Ruína	
	Descrição	Esquema
NSM	Corte da madeira superior	
	Corte na junta madeira superior-FRP	
	Corte interlaminar no FRP	
	Corte na junta FRP-madeira inferior	
	Corte da madeira inferior	
	Corte híbrido em várias juntas	

Apesar de não incluído nos Quadros anteriores, é viável ocorrer o modo de ruína por corte na junta pastilha-FRP no caso EBR ou pastilha-madeira no caso NSM. Este modo deve ser ignorado na análise dos resultados de ensaio porque resulta de uma má aplicação dos procedimentos de ensaio.

3.3. INTERFACE E MATERIAIS

Neste trabalho, entende-se como interface, a ligação entre pelo menos 2 materiais com propriedades estruturais, possibilitando a transferência de esforços entre eles. O reforço de um elemento de madeira com um compósito de FRP constitui uma interface. Pelas várias formas como se pode realizar essa interface, várias juntas têm de ser criadas entre os vários materiais que intervêm na realização dessa interface. Ou seja, entende-se como junta, a linha de aderência entre 2 materiais diferentes.

Os materiais que intervieram nesta campanha de ensaios de aderência por “Pull-Off”, variaram de autor para autor. Face ao exposto anteriormente, neste ponto procura-se apresentar as designações das várias interfaces estudadas pelos autores dos trabalhos em análise, bem como identificar os vários tipos de materiais que as integram.

A partir dos materiais constituintes dos sistemas já identificados, foi possível diagnosticar no conjunto dos trabalhos analisados um conjunto de juntas tipo que se resumem no Quadro 3.8, através da atribuição de uma designação por forma a facilitar a análise de resultados que se propõe fazer nesta dissertação.

Assim, no trabalho de Isaías e Luís (Martins Sá *et al*, 2005) realizaram-se ensaios de arrancamento por “Pull-Off” em madeira MLC reforçada com FRP, pelas técnicas EBR e NSM, sempre com sistemas de CFRP (fibra de carbono) e do tipo manta curada *in situ*. Houve combinação com resinas comerciais diferentes da marca das fibras, mas sempre usando fibras de carbono.

No trabalho de Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006) realizaram-se ensaios em provetes reforçados também pelas técnicas EBR e NSM, sempre com sistemas de FRP do tipo manta curada *in situ*. Fez-se variar alguns sistemas comerciais, algumas resinas de impregnação, e o tipo de fibra, estudando-se fibras de carbono e vidro.

No trabalho de Salvador e Branco (Cruz *et al*, 2004) realizaram-se ensaios em provetes reforçados apenas pela técnica EBR, apenas reforçados com fibras de carbono, mas variando o tipo de sistema de reforço, estudando-se a manta curada *in situ* e o laminado pré-fabricado.

Do conjunto destes ensaios de “Pull-Off” encontram-se 3 interfaces diferentes: 2 de reforço EBR, sendo uma do tipo sistema pré-fabricado (laminado) e a outra do tipo sistema curado *in situ* (manta); 1 de reforço NSM com aplicação do tipo sistema curado *in situ* (manta).

As 3 interfaces genéricas estão ilustradas esquematicamente nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 com identificação dos materiais intervenientes. Refira-se que a designação de “araldite rapid” é a cola epoxídica usada na colagem das pastilhas metálicas à superfície a ensaiar por “Pull-Off”. Assume-se que esta cola é suficientemente forte para transferir toda a carga de arrancamento do equipamento para o provete de ensaio.

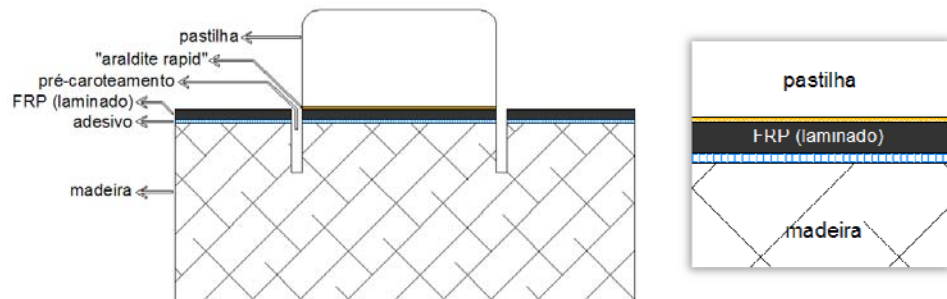


Figura 3.3 – Interface madeira-laminado FRP, realizada na técnica EBR.

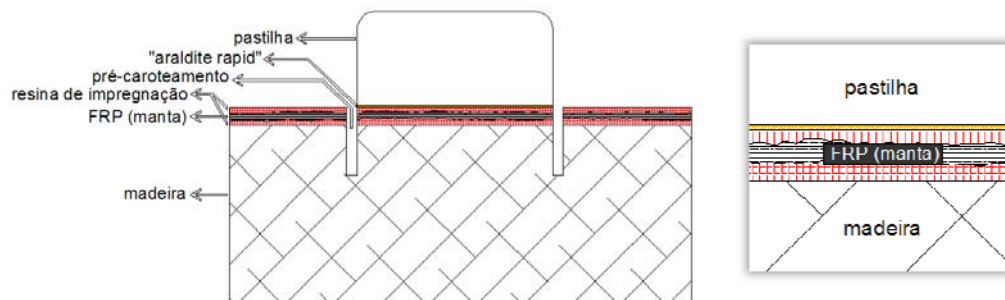


Figura 3.4 – Interface madeira-manta FRP, realizada na técnica EBR.

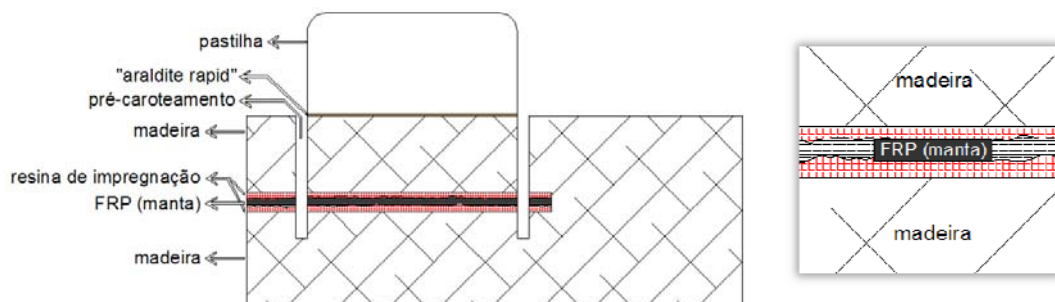


Figura 3.5 – Interface madeira-manta FRP, realizada na técnica NSM.

Em seguida, descrevem-se todos os materiais intervenientes nas interfaces que constam nos trabalhos sobre aderência por “Pull-Off”. Contudo, todos esses materiais, praticamente, acabam por integrar igualmente os trabalhos sobre aderência em flexão, a analisar no Capítulo 4.

3.3.1. MADEIRA

Nos trabalhos de Isaías e Luís (Martins Sá *et al*, 2005) e de Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006), a madeira ensaiada é da espécie Spruce (*Picea Abies*) ou Pinho Nórdico da classe de resistência C30 (de acordo com EN 338 (2003)), em provetes com 150 cm de comprimento, uma secção transversal de 12.5 cm de largura e 4.5 cm de altura. Adianta-se que esta é a mesma classe de madeira constituinte dos prismas dos ensaios de aderência em flexão a discutir no Capítulo 4.

No trabalho de Salvador e Branco (Cruz *et al*, 2004) os ensaios de “Pull-Off” foram realizados em pastilhas coladas em lamelas de madeira, da espécie do Abeto oriundo da Finlândia da classe de

resistência C18 (de acordo com EN 338 (2003)), com 60 cm de comprimento e uma secção transversal de 9 cm de largura e 4.5 cm de altura.

No Quadro 3.4 resumem-se as propriedades mais importantes das madeiras estudadas pelos autores.

Quadro 3.4 – Características físicas e mecânicas da madeira estrutural (EN 338, 2003).

Propriedades		Resinosas e Choupo	
		C18	C30
<i>Propriedades de resistência (MPa):</i>			
Flexão	$f_{m,k}$	18	30
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0,k}$	11	18
Tracção perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0.5	0.6
Corte	$f_{v,k}$	2.0	3.0
<i>Propriedades de rigidez (GPa):</i>			
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor médio)	$E_{0,mean}$	9.0	12.0
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor característico)	$E_{0,05}$	6.0	8.0
<i>Massa volúmica (kg/m³):</i>			
valor característico	ρ_k	320	380
valor médio	ρ_{mean}	380	460

3.3.2. SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP

Um sistema compósito de FRP é constituído pelo conjunto de materiais necessários à aplicação do reforço compósito no elemento estrutural de destino, de preferência, fornecidos todos pela mesma marca comercial para garantir a compatibilidade na aplicação conjunta dos materiais. Dependendo se se trata de um sistema do tipo pré-fabricado ou do tipo curado *in situ*, os vários sistemas comerciais de FRP disponíveis no mercado têm produtos diferentes entre si.

Exemplificando apenas com sistemas unidireccionais, os sistemas compósitos de FRP, para além do laminado pultrudido ou da manta de fibras secas, incluem o agente responsável pela sua colagem aos elementos a reforçar, designado por adesivo no caso dos sistemas pré-fabricados e por resina de impregnação no caso dos sistemas curados *in situ*. Os agentes de colagem são resinas epoxídicas, fornecidas em 2 componentes separados, a resina propriamente dita (*catalizador*) e o endurecedor (*polimerizador*), a combinar no momento de aplicação em proporções especificadas nas fichas técnicas do produto em causa. Porque os sistemas compósitos de FRP estão mais direccionados para aplicação em betão, os sistemas comerciais incluem normalmente um primário para dar mais coesão aos agregados superficiais do betão, e uma argamassa de regularização (também designada por “putty”) para criar uma superfície de colagem o mais regular possível (Juvandes e Marques, 2007).

No presente item de caracterização dos materiais usados, apenas os compósitos (fibras) e as resinas de colagem (adesivo ou resina de impregnação) vão ser objecto de desenvolvimento, uma vez que para o reforço de madeira nenhum dos outros materiais dos sistemas comerciais tem aplicação.

O Quadro 3.5 é o resumo da lista de todos os materiais usados nos ensaios de “Pull-Off” dos trabalhos seleccionados para análise nesta dissertação e que representam uma boa parte dos sistemas compósitos disponíveis em Portugal e sistematizados no documento Juvandes e Marques (2007).

Quadro 3.5 – Sistemas compósitos usados pelos autores dos trabalhos.

Marca (Representante)	Produto	Referência Comercial
Sistema MBRACE Manta <i>actualmente</i>	Resina de impregnação	MBrace Resin 55
Sistema BASF Manta	Manta	MBrace Mantas CF 120 (S&P 240)
Sistema MBRACE Laminado <i>actualmente</i>	Adesivo	MBrace Resin 220
Sistema BASF Laminado	Laminado	MBrace Laminado LM (S&P 150/2000)
Sistema SIKA	Resina de impregnação	Sikadur 330
	Manta	SikaWrap Hex 230 C
Sistema Misto MBRACE	Resina de impregnação	Fenol-resorcinol-formaldeído (Dynosol S-199)
	Manta	MBrace Mantas CF120 (S&P 240)
Sistema Misto SIKA	Resina de impregnação	Fenol-resorcinol-formaldeído (Dynosol S-199)
	Manta	SikaWrap Hex 230 C
Sistema Misto INEGI (1)	Resina de impregnação	MBrace Resin 55
	Tecido	INEGI Tecido de fibra de vidro (GFRP)
Sistema Misto INEGI (2)	Resina de impregnação	Fenol-resorcinol-formaldeído (Dynosol S-199)
	Tecido	INEGI Tecido de fibra de vidro (GFRP)

O motivo pelo qual se atribuiu a designação “Sistemas Mistos” a alguns casos, resulta do facto de se pretender combinar as fibras de um sistema FRP com resinas de outro sistema, nomeadamente a usada nas lamelas de madeira (a Fenol-resorcinol-formaldeído) ou uma resina de impregnação de marca diferente das fibras.

Os dados técnicos de cada um destes materiais são apresentados no Quadro 3.6, obtidos por consulta das fichas técnicas dos respectivos fabricantes.

Quadro 3.6 – Principais propriedades dos materiais.

Propriedade	MBrace Mantas CF120	Resin 55	MBrace Laminado LM	Resin 220	SikaWrap Hex 230 C	Sikadur 330	INEGI Tecido GFRP	Resorcinol Dynosol S-199
Espessura (mm)	0.117	-	1.4	-	0.13	-	0.067	-
Peso (g/m ²)	200	-	s/i	-	225	-	350	-
Densidade (g/cm ³)	1.7	1.04	1.6	1.7	1.7	1.31	2.6	1.14
E (MPa)	240000	3034	150000	s/i	230000	3800	73000	s/i
Resistência Tracção (MPa)	3800	54	2000	s/i	3500	30	3400	s/i
Extensão última (%)	1.55	2.5	1.4	s/i	1.5	s/i	4.5	s/i
Pot life (minutos)	-	≅ 45	-	≅ 60	-	≅ 30	-	s/i

s/i – sem informação específica

Volta-se a sublinhar que um dos sistemas descrito neste item irá ser usado também no assunto a discutir no Capítulo 4, concretamente o caso do sistema Sika.

3.4. ADERÊNCIA NA TÉCNICA EBR

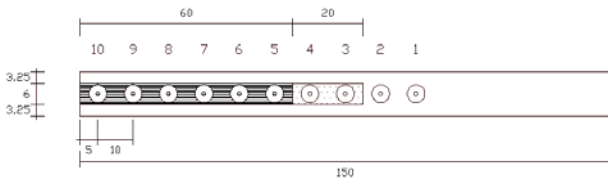
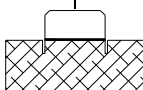
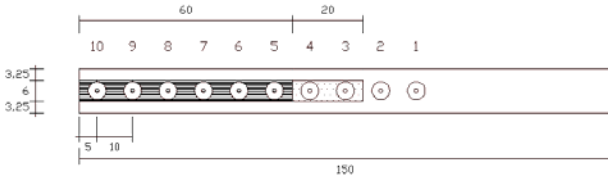
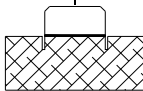
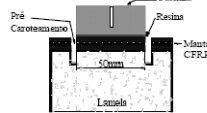
Neste ponto apresentam-se os contributos dos estudos de Isaías e Luís (Martins Sá *et al*, 2005), de Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006) e de Salvador e Branco (Cruz *et al*, 2004).

Primeiro identificam-se os modelos experimentais estipulados pelos autores, depois analisam-se os resultados dos ensaios e, por fim, tecem-se comentários finais relativamente aos parâmetros em avaliação e comparação.

3.4.1. MODELOS EXPERIMENTAIS

No Quadro 3.7 apresentam-se os modelos experimentais usados em cada um dos trabalhos consultados sobre ensaios de “Pull-Off” pela técnica EBR. A característica comum em todos eles é o facto de se realizar um reforço linear ao longo de uma tábua de madeira, e sobre ela se efectuarem vários ensaios de arrancamento por “Pull-Off”, garantindo sempre o espaçamento mínimo como se ilustram nas figuras incluídas no quadro. Realizaram-se ensaios com a pastilha colada sobre as várias camadas de materiais que constituem o sistema de reforço: directamente sobre a madeira; sobre uma camada de resina de impregnação; sobre o compósito final já curado. O objectivo foi avaliar qual destes materiais tinha comportamento pior e condicionasse a rotura do sistema, ou se ao colocar os vários materiais em conjunto (compósito final) há, ou não, perda de desempenho.

Quadro 3.7 – Modelos experimentais de EBR usados pelos autores dos trabalhos.

Autor / Trabalho	Modelo Experimental	Observações
Isaías e Luís (Martins Sá <i>et al</i> , 2005)		Pastilhas coladas: i) Madeira = 2 ii) Resina = 2 iii) FRP = 6 
Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006)		Pastilhas coladas: i) Madeira = 2 ii) Resina = 2 iii) FRP = 6 
Salvador e Branco (Cruz <i>et al</i> , 2004)		Pastilhas coladas: i) Madeira = 4 ii) Resina = 4 iii) FRP = 4 

Os vários autores usaram os sistemas de FRP definidos anteriormente no Quadro 3.5. A partir dos materiais constituintes dos sistemas já identificados, foi possível diagnosticar em todos os trabalhos um conjunto de juntas tipo que se resumem no Quadro 3.8, através da atribuição de uma designação de forma a facilitar a análise de resultados que se segue no item 3.4.2.

Assim, nos trabalhos de Isaías e Luís (Martins Sá *et al*, 2005) e Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006) cada fibra ensaiada foi impregnada e colada (sistema curado *in situ*) por 2 resinas diferentes: a própria resina do sistema, e a resina de produção de MLC (Fenol-resorcinol-formaldeído). No trabalho de Salvador e Branco (Cruz *et al*, 2004) foi sempre usado o sistema completo da marca MBrace, alguns ensaios do sistema pré-fabricado (laminado) e outros do sistema curado *in situ* (manta).

Quadro 3.8 – Identificação das interfaces a analisar (juntas tipo EBR).

Técnica de colagem	Junta			Autor(es)
	tipo	substrato	compósito	
EBR	A_EBR	Madeira lamelada colada	CFRP MBrace Manta	Isaías e Luís
	B_EBR			Roberto Ferreira
	C_EBR		CFRP SikaWrap	Isaías e Luís
	D_EBR			Roberto Ferreira
	E_EBR		GFRP INEGI Tecido	Roberto Ferreira
	F_EBR			Roberto Ferreira
	G_EBR		CFRP MBrace Manta	Salvador e Branco
	H_EBR		CFRP MBrace Laminado	Salvador e Branco

As várias juntas resultantes dos vários materiais em jogo (substrato, compósito, resina) estão descritas no Quadro 3.8 e são designadas por A_EBR, B_EBR, e assim sucessivamente até H_EBR. São avaliadas 8 juntas diferentes que, por comodidade de comparação dos resultados dos ensaios entre si, no próximo item serão referenciadas simplesmente pela primeira letra, de A a H.

3.4.2. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Admitindo para base de análise os substratos “madeira” (somente) e a ligação “madeira + resina + FRP”, no Quadro 3.9 resumem-se os valores médios da tensão de arrancamento ($f_{wtm,p}$) obtidos nas várias campanhas de ensaios de “Pull-Off”, efectuados para cada uma das juntas introduzidas no Quadro 3.8 anterior (isto é, juntas designadas de A a H).

Sempre que as informações contidas nos documentos o permitam, neste Quadro apresentam-se os valores da tensão “ $f_{wtm,p}$ ” e os respectivos desvios padrão (DP) e coeficiente de variação (COV) associados para as juntas em estudo.

Para resultados e informação mais detalhada remete-se para a consulta dos documentos dos próprios autores.

Quadro 3.9 – Resumo dos resultados para as Juntas tipo EBR.

Material	Propriedades	Juntas EBR								média
		A	B	C	D	E	F	G	H	
Madeira	$f_{wtm,p}$ (MPa)	2.31	2.91	2.70	4.08	3.34	2.92	3.80	2.50	3.07
	DP (MPa)	0.12	0.66	0.65	0.70	0.51	0.66	s/i	s/i	
	COV (%)	5.2	22.6	24.1	17.2	15.2	22.8	s/i	s/i	
Madeira + Resina + FRP	$f_{wtm,p}$ (MPa)	2.37	1.05	2.04	2.49	2.52	2.48	3.50	2.80	2.41
	DP (MPa)	0.66	2.23	1.02	0.25	0.49	0.57	s/i	s/i	
	COV (%)	27.8	21.8	50.0	10.1	19.3	22.9	s/i	s/i	

s/i – sem informação específica

Analisando primeiro a situação dos ensaios directamente sobre a madeira, conclui-se que a tensão necessária ao arrancamento por tracção da pastilha ($f_{wtm,p}$) apresenta valores consistentes (média 3.07MPa e desvio padrão 0.62MPa). Destes, refira-se que as juntas de A a F resultam de ensaios sobre madeira da classe C30 (média parcial 3.04MPa), enquanto as juntas G e H obtêm-se de ensaios em madeira da classe C18 (média parcial 3.15MPa). A semelhança de resultados entre as séries das duas classes de madeira pode conduzir à seguinte reflexão:

- A resistência ao arrancamento por tracção na direcção perpendicular à direcção principal das fibras da madeira, é independente da classe de resistência da madeira (normalizada em EN 338 (2003)), esta mais importante para definir a resistência à flexão da madeira, onde a presença e quantidade de defeitos da madeira é condicionante na sua classificação;
- O trabalho de Salvador e Branco (Cruz *et al*, 2004) usou uma classificação da madeira conservativa, porque eventualmente a tábuas (ou tábuas) retirada para os ensaios de “Pull-Off” pertenciam a um lote onde outras tábuas de qualidade inferior estavam presentes, obrigando a classificação do lote a ser nivelada pela madeira mais fraca.

Interpretando o segundo caso, a interface definida pela ligação madeira-FRP, podem avançar-se as impressões principais seguintes:

- De um modo geral esta interface conduz a resultados da tensão de arrancamento “ $f_{wtm,p}$ ” inferior aos equivalente relativos à avaliação da aderência directamente sobre a madeira;
- No caso da junta tipo B (MBrace Manta + Resorcinol), esta ligação não resultou devido aos valores muito baixos da tensão $f_{wtm,p} \approx 1.04$ MPa obtidos nos ensaios. No futuro, não se propõe o uso da resina Resorcinol na colagem das MBrace Mantas à madeira MLC, embora esse seja o agente utilizado na produção das vigas MLC;
- Nos casos das juntas tipo D (Sika Wrap + Resorcinol) e tipo F (Tecido Inegi + Resorcinol), ao contrário da situação anterior, a aplicação da Resorcinol à Manta da Sika e ao Tecido do Inegi resultou em valores satisfatórios da tensão $f_{wtm,p} \approx 2.48$ MPa a 2.49MPa, praticamente de desempenho semelhante ao uso das resinas epoxídicas indicadas pelos próprios sistemas comerciais de FRP;
- No caso de juntas tipo G (MBrace Manta) e tipo H (MBrace Laminado), constata-se que o uso do sistema Manta curado *in situ* apresenta melhor aderência à madeira (valor maior da tensão $f_{wtm,p}$) do que o equivalente aplicado com sistema laminado.

A elevada variabilidade dos resultados obtidos nos ensaios de “Pull-Off” apresentados no Quadro 3.9, com coeficientes de variação (COV) que ultrapassam em muitos casos os 20%, pode dever-se a uma multiplicidade de factores, tais como:

- Algumas deficiências na colagem das pastilhas (espalhamento desigual da cola);
- Irregularidades na superfície de colagem do reforço, principalmente nos sistemas curados *in situ* devido à flexibilidade das fibras (manta e tecido);
- Características da própria madeira como a heterogeneidade de orientação das fibras da madeira ou a presença de alguns defeitos internos.

Como nota final e um dos objectivos desta dissertação, pode concluir-se que o valor da tensão de aderência determinado por ensaios de “Pull-Off” nas interfaces analisadas aponta para o intervalo de valores seguinte:

- Interface madeira: $2.31 \leq f_{wtm,p} \leq 4.08 \text{ MPa}$ $\Rightarrow$ Valor médio = 3.07 MPa
- Interface madeira-FRP: $1.05 \leq f_{wtm,p} \leq 3.50 \text{ MPa}$ $\Rightarrow$ Valor médio = 2.41 MPa

3.5. ADERÊNCIA NA TÉCNICA NSM

Neste ponto apresentam-se os contributos dos estudos de Isaías e Luís (Martins Sá *et al*, 2005) e de Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006), expondo-se primeiro os modelos experimentais definidos pelos autores e depois comentando-se as principais conclusões sobre os trabalhos.

3.5.1. MODELOS EXPERIMENTAIS

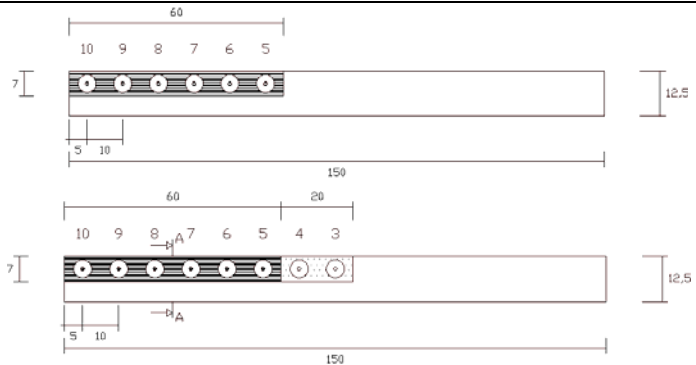
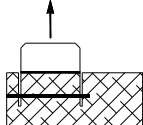
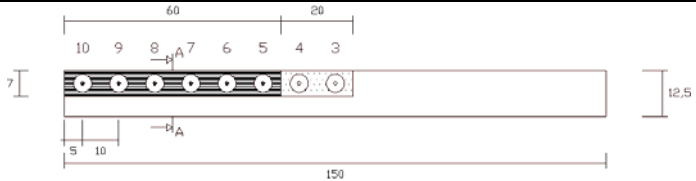
À semelhança do descrito para a técnica EBR, o Quadro 3.10 resume os modelos experimentais de “Pull-Off” pela técnica NSM estabelecidos em cada um dos trabalhos consultados. Os modelos NSM são em tudo semelhantes aos EBR, com a grande diferença do reforço não ser colado na superfície da tábua de madeira, mas sim colado num rasgo longitudinal previamente aberto por forma a simular a técnica NSM. As figuras incluídas na tabela permitem ilustrar o esquema de secção transversal dos modelos experimentais bem como o critério adoptado para os ensaios de “Pull-Off”.

Desse modo, as zonas a ensaiar foram previamente caroteadas até à profundidade onde se localiza o FRP inserido na madeira. Posteriormente, as pastilhas foram coladas à superfície nessas zonas e, após cura, submetidas ao ensaio de arrancamento. Os autores pretendiam com este modelo experimental tentar simular o comportamento da junta NSM face aos modos de ruína espectáveis nesse ensaio (identificados no Quadro 3.2), em consequência da informação escassa e vaga disponível na literatura técnica a respeito desse tema.

Sublinhe-se que nesta fase não se realizaram ensaios de aderência directamente sobre a madeira porque os mesmos autores já a tinham avaliado aquando dos ensaios EBR, na interface madeira.

Neste programa experimental sobre a técnica NSM foram usados 3 sistemas de reforço do tipo curado *in situ*, destacando-se 2 de fibras de carbono e 1 de fibras de vidro. Cada um desses sistemas foi aplicado com o uso de 2 resinas, a própria resina do sistema e a resina de produção de MLC (Resorcinol). A partir da combinação destes materiais foi possível formar 6 juntas tipo para análise, descritas no Quadro 3.11 através da atribuição de uma designação do género A_NSM, desde a letra “A” até “F”.

Quadro 3.10 – Modelos experimentais de NSM usados pelos autores dos trabalhos.

Autor / Trabalho	Modelo Experimental	Observações
Isaías e Luís (Martins Sá <i>et al</i> , 2005)	 Secção transversal: 2,7 x 1,5 x 0,3	Pastilhas coladas: i) Madeira = 0 ii) Resina = 2 (e 0) iii) FRP = 6 
Roberto Ferreira (Vidal Ferreira e Juvandes, 2006)	 Secção transversal: 2,7 x 1,5 x 0,3	Pastilhas coladas: i) Madeira = 0 ii) Resina = 2 iii) FRP = 6 

Quadro 3.11 – Identificação das interfaces a analisar (juntas tipo NSM).

Técnica de colagem	Junta			Autor(es)	
	tipo	substrato	compósito		resina
NSM	A_NSM	Madeira lamelada colada	CFRP MBrace Manta	Resin 55	Isaías e Luís
	B_NSM			Resorcinol	
	C_NSM		CFRP SikaWrap	Sikadur 330	Isaías e Luís
	D_NSM			Resorcinol	
	E_NSM		GFRP INEGI Tecido	Resin 55	Roberto Ferreira
	F_NSM			Resorcinol	

3.5.2. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O resultado de toda a campanha de ensaios de “Pull-Off” sobre a interface “madeira + resina + FRP + resina + madeira” é reunida no Quadro 3.12. Nele expõem-se os valores médios da tensão de arrancamento ($f_{wtm,p}$) (tensão de aderência) e os respectivos desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (COV), sempre que os trabalhos em estudo o permitem, para todas as juntas tipo em análise nesta dissertação.

Para resultados e informação mais detalhada remete-se para a consulta dos documentos dos próprios autores.

Uma análise geral dos resultados expostos nesta campanha permite apontar algumas conclusões que merecem alguma reflexão em seguida.

Quadro 3.12 – Resumo dos resultados para as Juntas tipo NSM.

Material	Propriedades	Juntas EBR						média
		A	B	C	D	E	F	
Madeira + Resina	$f_{wtm,p}$ (MPa)	1.40	1.00	1.01	1.39	1.66	1.14	1.27
FRP + Resina	DP (MPa)	0.71	0.39	0.66	0.49	0.22	0.73	
Madeira	COV (%)	50.7	39.0	65.3	35.3	13.3	63.6	

O tipo de fibras, carbono (juntas A, B, C e D) ou vidro (juntas E e F), aparentemente não influencia o valor de aderência por “Pull-Off”.

Por sua vez, o uso de diferentes resinas de impregnação (resinas dos sistemas de FRP vs. Resorcinol), resultou em diferenças de prestação nestes ensaios “Pull-Off”. De acordo com Isaías e Luís (Martins Sá *et al*, 2005) a baixa viscosidade da resina “Resin 55” possibilitou uma melhor execução do reforço interno (NSM), penetrando melhor no rasgo e deixando menos vazios, daí os valores da tensão $f_{wtm,p}$ das juntas A e E serem os maiores.

Analogamente, porque a resina de produção de MLC (Resorcinol) é a mais viscosa e inclui cargas, conduziu a piores resultados de tensão de aderência nas juntas onde foi usada.

De um modo geral, os valores da tensão de aderência obtidos nesta campanha NSM são muito baixos ($f_{wtm,p} \leq 1.5\text{MPa}$) quando comparados com os valores da aderência avaliados directamente sobre a superfície da madeira (recorda-se serem da ordem de $f_{wtm,p} \approx 3.07\text{MPa}$).

Uma primeira razão a apontar será a de questionar a adequabilidade do critério estabelecido para se processar o ensaio de “Pull-Off” nos modelos experimentais que representam a técnica de NSM.

Em praticamente todos os ensaios os autores dos trabalhos apontam para um deficiente controlo de qualidade de processamento da técnica NSM que pode dever-se aos aspectos seguintes:

- As resinas de impregnação com grande viscosidade dificultam quer a sua penetração no rasgo como a impregnação total das fibras, originando a presença de vazios de aderência praticamente nula;
- O pré-caroteamento em profundidade da zona a analisar a aderência, devido ao atrito entre a coroa e a madeira podem conduzir à fragilização dessa zona com repercussões na transmissão de esforços entre os materiais durante a realização do ensaio de arrancamento;
- No decurso da colagem das pastilhas à superfície a ensaiar, o espalhamento desigual da cola pode proporcionar algumas deficiências no resultado dos ensaios de “Pull-Off”;
- As características intrínsecas da madeira como a heterogeneidade da orientação das fibras e a presença de defeitos centralizados nos nós originam modos de ruína indesejáveis com baixo valor de aderência.

Apesar dos resultados do grupo de ensaios NSM indicarem uma deficiente avaliação da tensão de aderência das juntas madeira-FRP-madeira por ensaios de arrancamento, registe-se, mesmo assim, como apontamento final que a referida tensão conduziu ao intervalo de valores seguinte:

- Interface madeira-FRP: $1.00 \leq f_{wtm,p} \leq 1.66 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Valor médio} = 1.27 \text{ MPa}$

3.6. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Após a conclusão da análise de todos os resultados de aderência obtidos dos modelos EBR (colagem exterior) e dos NSM (colagem inserida em ranhuras) por ensaios de arrancamento, finaliza-se este capítulo com considerações finais sobre as principais conclusões a reter e as futuras interligações com os capítulos seguintes desta dissertação.

Os ensaios de “Pull-Off” são indicados para avaliar aderência de juntas coladas à superfície do material (caso da técnica EBR) e sofríveis para o caso de juntas inseridas em rasgos não superficiais do material (situação da técnica NSM). Segundo a norma CEB (CEB-GTG21, 1990) são aceitáveis substratos para colagem de juntas com FRP desde que o valor médio da tensão de arrancamento por “Pull-Off” seja $f_{wtm,p} \geq 1.5 \text{ MPa}$ (sobretudo se o substrato for o betão).

Em termos de avaliação da aderência directa à madeira, sublinha-se que a tensão de arrancamento atingiu os valores mais elevados de toda a campanha experimental de ensaios (incluindo EBR e NSM). Mais se concluiu que aparentemente a classificação das madeiras estruturais presente na norma EN 338 (2003) não se reflecte em diferenças de resultados de arrancamento por “Pull-Off”. Talvez porque essa classificação se baseia em quantidade e dispersão de defeitos da madeira, o que não interfere com os ensaios de “Pull-Off” porque estes são realizados em superfícies escolhidas por serem o mais limpas e homogêneas possíveis.

Relativamente à técnica de reforço por EBR pode avançar-se com as considerações seguintes:

- A alternância de resinas de impregnação (do sistema FRP vs. Resorcinol) conduziu a resultados interessantes. Por exemplo, a aplicação da resina de produção da MLC (Resorcinol) não resulta para a impregnação da manta de fibras de carbono MBrace, mas parece obter resultados tão bons como os da resina da própria marca, para a impregnação das fibras de carbono Sika e para as fibras de Vidro INEGI;
- Com a excepção da aplicação da manta MBrace com Resorcinol, todas as outras juntas com FRP apresentaram bom desempenho nos ensaios de “Pull-Off”, obtendo aderências quase do nível da madeira simples, não se distinguindo entre os resultados das fibras de carbono e das de vidro;
- O trabalho de Salvador e Branco (Cruz *et al*, 2004) permitiu concluir que o reforço com um sistema curado *in situ* (manta) apresenta melhor aderência à madeira do que o reforço com um sistema pré-fabricado (laminado).

No caso da técnica de reforço por NSM concluiu-se que:

- O tipo de fibras, carbono ou vidro, aparentemente não influencia o valor de aderência por “Pull-Off”;
- Por sua vez, o uso de diferentes resinas de impregnação, resultou em diferenças de prestação das juntas nestes ensaios de “Pull-Off”. A resina MBrace “Resin 55” por ser a mais fluida possibilitou uma melhor execução do reforço interno (NSM), penetrando melhor no rasgo e deixando menos vazios. Em contrapartida a resina de produção da MLC (Resorcinol) que é a mais viscosa originou os piores resultados de arrancamento por “Pull-Off”.

A ordem de grandeza dos valores de tensão de arrancamento por “Pull-Off” em elementos de betão, pode ajudar a balizar e aferir do bom ou mau desempenho destes resultados obtidos na madeira. Por essa razão consultaram-se documentos com resultados nesta área para se conhecer qual é o intervalo de valores que a tensão de arrancamento pode atingir neste material.

Foi no trabalho de Maria José Costa e Rui Barbosa (Costa *et al*, 2005) que se encontrou a resposta ao que se procurava, num quadro onde os autores resumiram não só os resultados médios da sua

campanha experimental, como lhes acrescentaram todos os resultados médios de ensaios de “Pull-Off” presentes em 3 outros trabalhos já publicados: Juvandes (1999), Dias (2001) e Dimande (2003). Todos esses resultados de tensão de arrancamento por “Pull-Off” referem-se a betão reforçado com FRP, pela técnica de colagem EBR.

Como a maior dependência dos resultados de “Pull-Off” parece estar associada mais à classe de resistência do próprio betão do que a qualquer outra propriedade da interface, os resultados do trabalho de Maria José Costa e Rui Barbosa, são apresentados no Quadro 3.13 em função da classe do betão.

Quadro 3.13 – Resumo de ensaios de “Pull-Off” em elementos de betão (Costa *et al*, 2005).

Classe de betão	$f_{ctm,p}$ (MPa)
C20/25	1.55
C25/30	2.20
C30/37	3.15
C35/45	2.71
C40/50	3.80
C45/55	3.67
C50/60	3.52

Deste estudo concluiu-se que o valor da tensão de aderência determinada por ensaios de “Pull-Off” em elementos de madeira e de betão aponta para o intervalo de valores seguinte (ilustrado na Figura 3.6):

- junta EBR_Madeira: $2.31 \leq f_{wtm,p} \leq 4.08$ MPa $\Rightarrow$ Valor médio = 3.07 MPa
- junta EBR_Madeira+FRP: $1.05 \leq f_{wtm,p} \leq 3.50$ MPa $\Rightarrow$ Valor médio = 2.41 MPa
- junta NSM_Madeira+FRP: $1.00 \leq f_{wtm,p} \leq 1.66$ MPa $\Rightarrow$ Valor médio = 1.27 MPa
- junta EBR_Betão+FRP: $1.55 \leq f_{ctm,p} \leq 3.80$ MPa $\Rightarrow$ Valor médio = 2.94 MPa

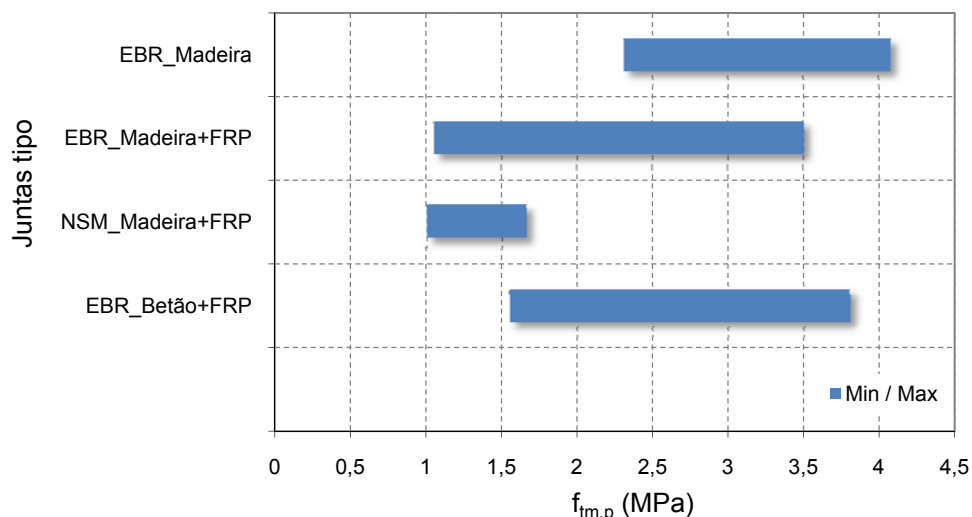


Figura 3.6 – Amplitude da resistência “ $f_{tm,p}$ ” para madeira e betão.

Fica provado que o reforço de FRP, sendo competitivo em betão, também o é em madeira. O nível de tensões de arrancamento por “Pull-Off” obtidos na madeira reforçada com FRP pela técnica EBR, são bastantes próximos aos obtidos em betão, igualmente reforçado. Relembra-se que o limite inferior de $f_{wtm,p}=1.05\text{MPa}$ obtido na junta EBR madeira-FRP se deveu a uma tentativa experimental de combinação da manta MBrace com a resina Resorcinol. Trata-se, assim, de um valor não representativo daquilo que é uma boa aplicação do reforço de FRP em madeira. Os valores máximos de $f_{wtm,p}=3.5\text{MPa}$ na madeira e $f_{ctm,p}=3.8\text{MPa}$ no betão demonstram o nível de exequibilidade do reforço de FRP em madeira.

Os “Pull-Off” efectuados directamente em madeira provam ainda que este material tem características de coesão superficial bastante boas, obtendo-se nesses ensaios os maiores valores de tensão de tracção por “Pull-Off”: $f_{wtm,p}=4.08\text{MPa}$, maiores do que qualquer ensaio realizado nos betões de maiores classes.

O deficiente controlo de qualidade da técnica de reforço NSM justifica os valores tão baixos encontrados nos ensaios de “Pull-Off”. As dificuldades de adaptação deste ensaio à madeira reforçada pela técnica NSM pode, entre outros factores, dever-se aos factos seguintes:

- As resinas de impregnação com grande viscosidade dificultam quer a sua penetração no rasgo como a impregnação total das fibras, originando a presença de vazios de aderência praticamente nula;
- O pré-caroteamento em profundidade da zona a analisar a aderência, devido ao atrito entre a coroa e a madeira podem conduzir à fragilização dessa zona com repercussões na transmissão de esforços entre os materiais durante a realização do ensaio de arrancamento;
- No decurso da colagem das pastilhas à superfície a ensaiar, o espalhamento desigual da cola pode proporcionar algumas deficiências no resultado dos ensaios de “Pull-Off”;
- As características intrínsecas da madeira como a heterogeneidade da orientação das fibras e a presença de defeitos centralizados nos nós originam modos de ruína indesejáveis com baixo valor de aderência.

Apesar das dificuldades associadas à técnica NSM, adianta-se a informação que os ensaios de aderência em flexão a descrever no próximo Capítulo 4 permitirão tecer melhores conclusões da aderência na interface madeira-FRP reforçada por esta técnica de inserção em ranhuras.

Como nota final refira-se que face à variabilidade dos resultados de aderência obtidos directamente sobre a madeira, se admitirá o valor da tensão de $f_{wtm,p}=2.5\text{MPa}$ como característica mecânica da madeira MLC a usar na calibração dos modelos analíticos, representativos da campanha experimental, a discutir no Capítulo 5.

4

ENSAIOS DE ADERÊNCIA EM FLEXÃO

4.1. INTRODUÇÃO

O Capítulo 4 representa a fase mais importante e extensa desta dissertação relativamente a um dos seus objectivos iniciais, o de acrescentar algum contributo à caracterização da ligação madeira-FRP, através da exposição de um programa experimental de análise da aderência de modelos à flexão.

Todo o programa experimental de ensaios de aderência em flexão foi realizado no período 2004-2006 e no âmbito de um projecto de investigação estruturado com o objectivo de atribuir o grau de Mestre a Sérgio Paulo Lopes Silva (Silva *et al*, 2004). Por motivos diversos o projecto foi interrompido pelo autor, embora a campanha experimental tenha sido praticamente concluída em início de 2006.

Pela importância e contributo que os resultados desse trabalho podem acrescentar à área do reforço de estruturas de madeira com novos materiais, tornou-se imperativo recuperar essa informação para o contexto da presente dissertação. Fez-se um levantamento do programa experimental e reconstrução dos dados e procedeu-se ao tratamento, análise e interpretação dos resultados com vista a compreender-se o comportamento da ligação madeira-FRP em função da aderência entre os materiais.

Os ensaios foram realizados em elementos de madeira lamelada colada (MLC), de um mesmo lote de produção, reforçados por materiais compósitos de fibras de carbono (CFRP) com referência SikaWrap, identificados no Capítulo 2 e Capítulo 3. Usaram-se as duas técnicas de reforço correntes nesta área (ver Capítulos 2 e 3), a técnica de colagem externa (EBR) e a técnica de inserção em ranhuras (NSM), sendo que esta última apresentou-se sobre duas variantes, o reforço inserido em rasgo horizontal (designado por HNSM) ou em rasgo vertical (designado por VNSM), como se ilustra na Figura 4.1. Em qualquer um dos procedimentos foi mantida constante a área de fibra de carbono e a área da superfície de colagem, variando-se apenas os comprimentos do CFRP colado à madeira que foram de 20, 40 e 60mm. Em resumo, o programa experimental em estudo inclui 3 séries com diferentes comprimentos de juntas coladas, compostas por 4 modelos experimentais cada, distribuídos por 3 técnicas de reforço diferentes, perfazendo um total de 36 ensaios (modelos).

A partir destes dados, este capítulo tem como objectivo tratar, analisar e interpretar os resultados por forma a tentar dar resposta às questões levantadas no Capítulo 2 relativas à aderência entre os materiais madeira-resina-CFRP. Procurar-se-á avaliar, entre outros aspectos, as tensões de corte na junta, o desempenho do compósito (extensão longitudinal máxima), o comprimento efectivo e a força máxima de ancoragem, quer para a técnica EBR quer para as versões NSM. Por último, procura-se comparar os níveis de desempenho do compósito aplicado à madeira MLC com os homólogos colados ao betão.

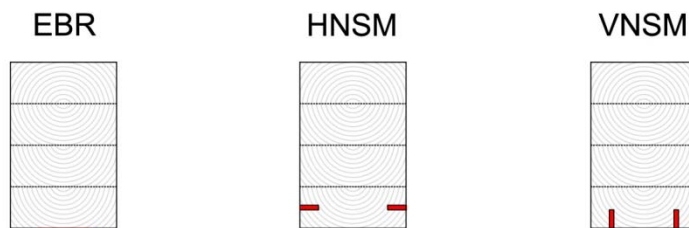


Figura 4.1 – Secção transversal tipo dos modelos experimentais definidos para as 3 técnicas.

4.2. DEFINIÇÃO DOS MODELOS

O modelo experimental para o ensaio de aderência em flexão não está normalizado, no entanto há vários autores que procuraram ajustar um à sua investigação (Juvandes, 1999; Dimande, 2003; Sena-Cruz, 2004) para caracterizar a aderência entre dois materiais colados entre si. Este ensaio, tal como apresentado aqui, é constituído por duas partes sólidas unidas por um mecanismo articulado que se pretende infinitamente rígido (ver Figuras 4.5 a 4.7). Ele permite avaliar os efeitos de arranque pelo modo de rotura *peeling* (descamar) da parte final do reforço de FRP, estudando os efeitos da variação do comprimento de colagem na resistência da ligação.

A filosofia de um ensaio de aderência entre uma armadura de reforço (de reduzidas dimensões) e um elemento reforçado (de significativas dimensões) é de traccionar o reforço mantendo fixo o reforçado. Tentou-se então criar um modelo que fizesse essa tarefa de fixação dos elementos à máquina de teste sem problemas de excentricidades de aplicação de cargas, e que minimizasse os erros de operação e realização do ensaio.

Isto foi conseguido através de um mecanismo que transformasse o nosso ensaio de aderência numa viga, sendo depois submetida a um ensaio de momentos de 3 pontos (*Three Point Bending test* – TPBtest), tão comum nos laboratórios de estruturas e onde os operadores têm já muita prática.

A Figura 4.2 ilustra o mecanismo de transferência de cargas que inspirou o modelo de ensaio definido no programa experimental, sendo possível controlar a força horizontal no compósito, medindo a carga vertical aplicada ao modelo de ensaio.

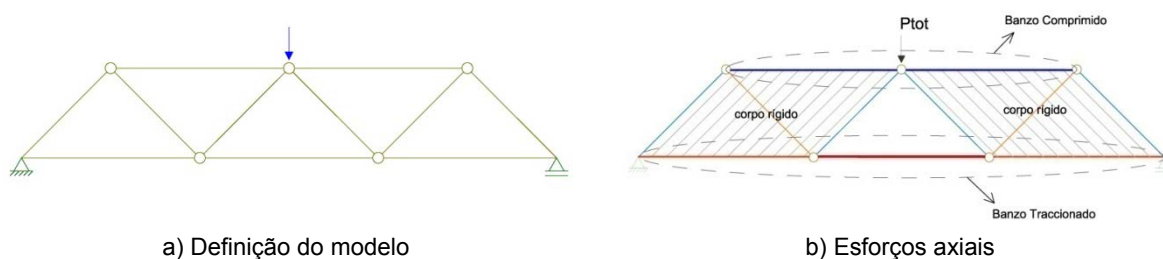
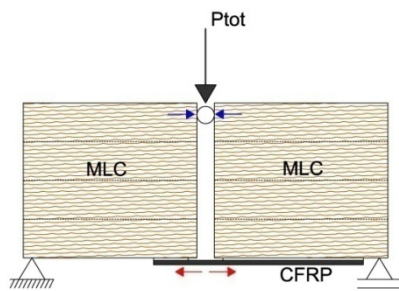
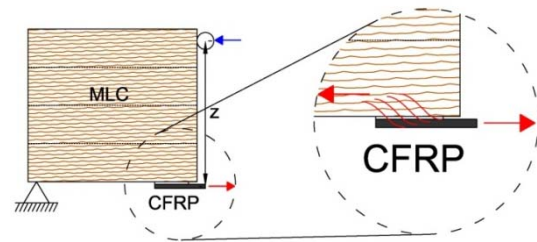


Figura 4.2 – Treliza teórica de inspiração para o modelo dos ensaios de aderência em flexão.

O modelo de ensaio foi desenhado de modo a que o braço das forças se mantenha constante ao longo do ensaio, obrigando à mobilização de compressões na rótula e tracções no compósito durante o equilíbrio de forças internas no decorrer do ensaio (ver Figura 4.3).



a) Definição do modelo



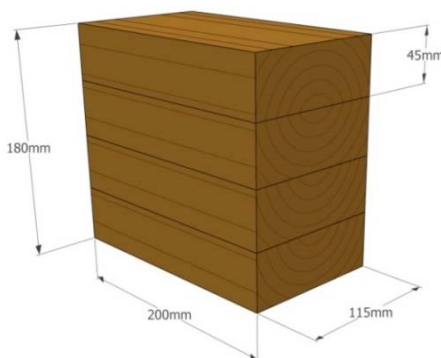
b) Binário aplicado à peça e pormenor de transferência de tracções do CFRP para a MLC

Figura 4.3 – Modelo de TPBtest para avaliação da aderência da ligação MLC-CFRP (modelo de ensaio).

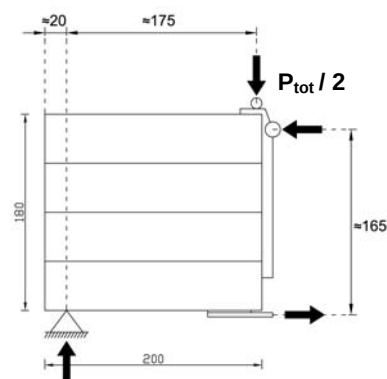
Estes ensaios de aderência em flexão tinham sido realizados por outros autores anteriormente, mas para betão. Os provetes usados para caracterização do material betão, são por conveniência e disponibilidade dos moldes, do mesmo tamanho dos provetes cúbicos de 15cm de aresta, dos ensaios de compressão normalizados. Posto isto, e sendo que o mecanismo metálico que materializa a rótula deste modelo estava já executado e disponível no Laboratório de Estruturas da FEUP (LABEST) por ensaios anteriores realizados para betão, foram procuradas dimensões de elementos de madeira MLC que fossem compatíveis com o molde de 15x15cm.

Com o auxílio da empresa Flexilam encontraram-se vigas de MLC com 4 lâminas de altura (perfazendo 18cm) e largura de 11.5cm (Figura 4.4). Estas dimensões de secção transversal seriam as mais vendidas para suportar coberturas com vãos da ordem dos 7m, e por isso houve também o interesse em estudar o reforço de um produto bastante vendido.

O comprimento escolhido para os prismas de ensaio foi 20cm, com vista à obtenção de idênticos braços de força interno (compressão na rótula e tracção no compósito) e externo (carga aplicada e reacção de apoio). Isto, para que se fosse tendo sensibilidade da força que o próprio compósito estava a desenvolver ao longo do ensaio (por comparação com metade da carga do actuador ($P_{tot}/2$) lido em cada momento.



a) Dimensões em milímetros



b) Braços das forças externas e internos aprox. iguais

Figura 4.4 – Geometria dos provetes de MLC utilizados.

Em resumo e como se ilustra na Figura 4.4.a), os provetes de ensaio usados neste programa experimental são prismas de MLC com 20cm de comprimento por 18cm de altura e 11.5cm de profundidade.

Para se potenciar que a rotura dos modelos ocorra sempre do mesmo lado da junta (instrumentada), prolongou-se suficientemente a amarração do CFRP na outra metade do modelo para que se pudesse aí considerar amarração fixa, isto é, sem escorregamento. Na técnica EBR prolongou-se 8cm e fez-se uma sobreposição transversal de 11cm com CFRP, enquanto nas inserções, horizontal e vertical, se prolongou o compósito até à extremidade da ranhura. As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 esquematizam os modelos de ensaio de aderência em flexão para as diferentes técnicas, onde o meio provete esquerdo foi o considerado para estudo da aderência (a metade direita tem o CFRP ancorado).

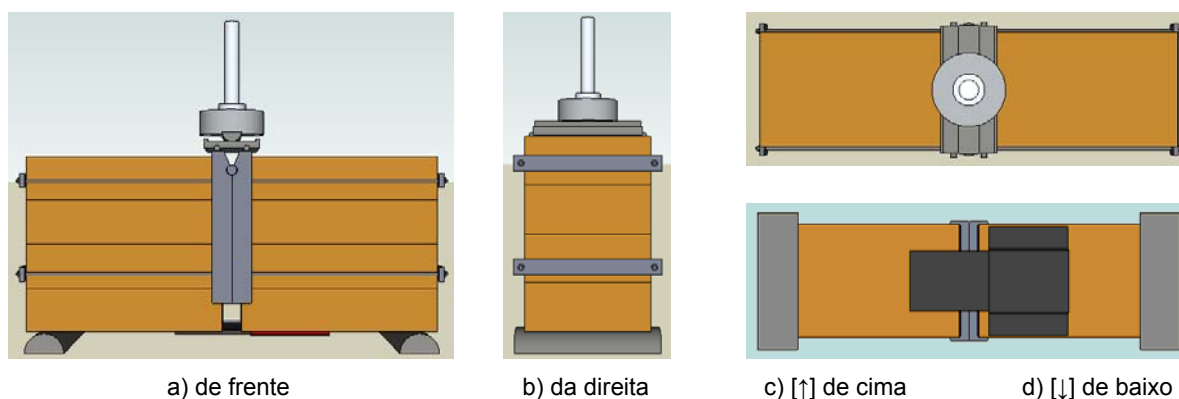


Figura 4.5 – Esquema 3D do modelo de ensaio de aderência em flexão da técnica EBR.

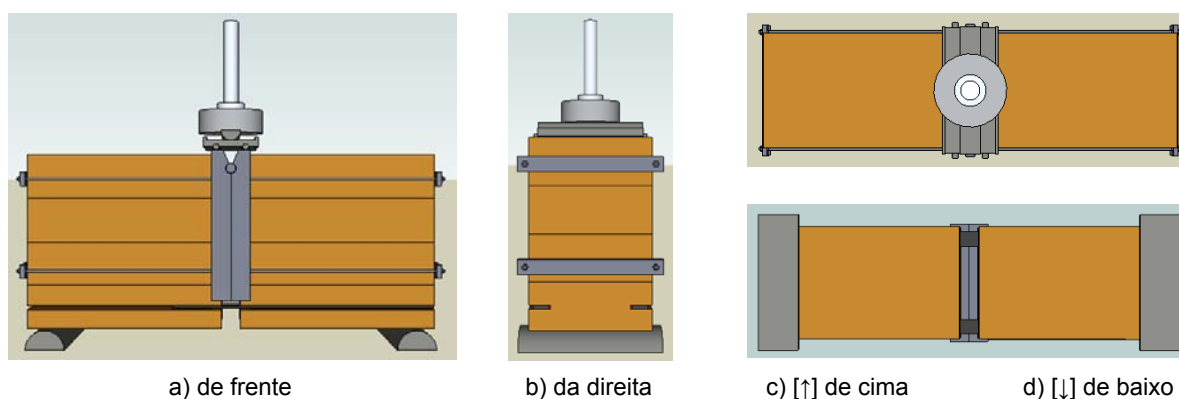


Figura 4.6 – Esquema 3D do modelo de ensaio de aderência em flexão da técnica HNSM.

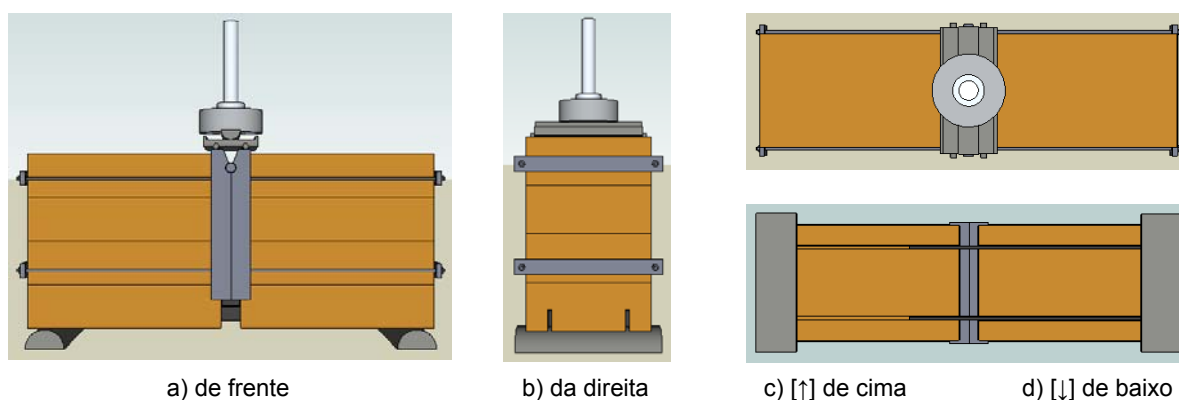
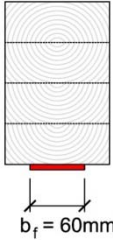
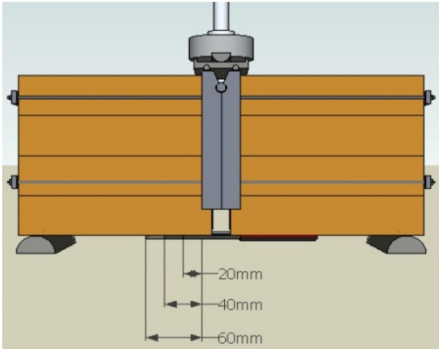
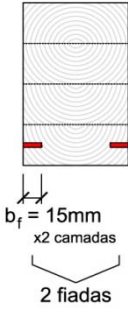
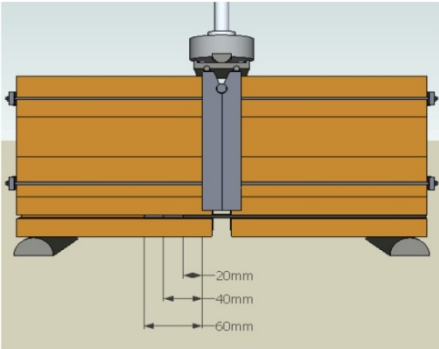
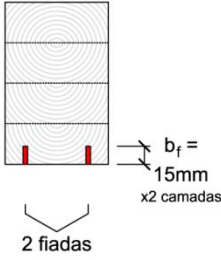
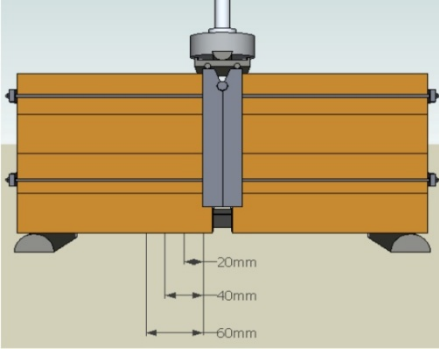


Figura 4.7 – Esquema 3D do modelo de ensaio de aderência em flexão da técnica VNSM.

A nomenclatura adoptada para identificar os modelos experimentais obedece ao critério seguinte: letras maiúsculas para identificar a técnica de reforço utilizada (EBR, HNSM ou VNSM); seguidas de algarismos que representam o comprimento de colagem em milímetros (20, 40 ou 60 mm), e identificam a série de ensaios; por fim, separado por ponto, aparece um outro algarismo que indica o número do provete em análise (varia de 1 até 4), correspondente aos 4 provetes ensaiados em cada série. Ver no Quadro 4.1 a nomenclatura completa de todos os ensaios realizados. Note-se que todas as juntas coladas têm a mesma largura de manta de fibras de 60mm.

Quadro 4.1 – Designação dos provetes de aderência em flexão do programa experimental.

Técnica de Reforço	Secção transversal	Vista de frente	Série de ensaio	Designação do provete
Colagem exterior – <i>External Bounded Reinforcement (EBR)</i>	 $b_f = 60\text{mm}$		$l_t = 20\text{mm}$	EBR20.1
				EBR20.2
				EBR20.3
				EBR20.4
			$l_t = 40\text{mm}$	EBR40.1
				EBR40.2
				EBR40.3
				EBR40.4
			$l_t = 60\text{mm}$	EBR60.1
				EBR60.2
				EBR60.3
				EBR60.4
Inserção em ranhuras horizontais – <i>Horizontal Near Surface Mounted (HNSM)</i>	 $b_f = 15\text{mm}$ x2 camadas 2 fiadas		$l_t = 20\text{mm}$	HNSM20.1
				HNSM20.2
				HNSM20.3
				HNSM20.4
			$l_t = 40\text{mm}$	HNSM40.1
				HNSM40.2
				HNSM40.3
				HNSM40.4
			$l_t = 60\text{mm}$	HNSM60.1
				HNSM60.2
				HNSM60.3
				HNSM60.4
Inserção em ranhuras verticais – <i>Vertical Near Surface Mounted (VNSM)</i>	 $b_f = 15\text{mm}$ x2 camadas 2 fiadas		$l_t = 20\text{mm}$	VNSM20.1
				VNSM20.2
				VNSM20.3
				VNSM20.4
			$l_t = 40\text{mm}$	VNSM40.1
				VNSM40.2
				VNSM40.3
				VNSM40.4
			$l_t = 60\text{mm}$	VNSM60.1
				VNSM60.2
				VNSM60.3
				VNSM60.4

4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para se conseguir estudar o comportamento de aderência entre o FRP e a madeira, é fundamental que se conheçam as características dos materiais envolvidos. Na campanha experimental de ensaios de flexão os modelos são constituídos por Madeira Lamelada Colada (MLC) e reforçados por um sistema compósito de CFRP do tipo curado *in situ* e de designação comercial SikaWrap (Manta) incluído no Quadro 2.4 exposto no Capítulo 2.

Definir as propriedades mecânicas da madeira não é nada fácil, principalmente porque se trata de um material fornecido pela natureza e envolto de grande variação de dos seus parâmetros resistentes. Resistência essa que é influenciada em primeira instância pela densidade da madeira, pela espécie e pela velocidade de crescimento da árvore, que por sua vez é influenciado por factores tais como condições climáticas e de disponibilidade de nutrientes no solo. A resistência de uma tábua de madeira varia com a quantidade tamanho e localização de defeitos para o tipo de carregamento que se está a submeter a tábua. As condições de protecção de ataques biológicos da madeira, enquanto em crescimento ou já em armazenamento, são também factores muito importantes para a resistência da madeira, embora mais decisivos na durabilidade. O próprio tamanho dos provetes de ensaio pode influenciar a resistência da madeira porque um provete mais pequeno tem menos probabilidade de encontrar defeitos significativos que condicionam a rotura para cargas baixas (Kollmann e Côté, 1968; Dinwoodie, 2001). Portanto a caracterização mecânica da madeira é um processo estatístico com muito mais dispersão do que para qualquer outro material de construção civil que estamos habituados.

A madeira usada nestes ensaios de aderência foi Madeira Lamelada Colada homogénea, isto é, todas as lamelas são da mesma classe de resistência. A designação da classe de MLC usada foi GL28h de acordo com a norma europeia NP EN 1194 (2002). Segundo esta norma, mais concretamente no seu quadro B2, faz-se equivaler à classe de resistência da madeira lamelada colada GL 28, lamelas homogéneas da classe C30. Classe C30 é a classificação de madeira estrutural normalizada em EN 338 (2003) e, como se trata de uma análise de aderência, só as propriedades da última lamela de MLC são relevantes.

As propriedades da madeira assim classificada estão transcritas no item 3.3.1, de caracterização dos materiais, no Capítulo 3 desta dissertação. Para se evitar a repetição de informação, remete-se a consulta para esse capítulo.

As propriedades mecânicas da madeira variam ainda com as condições de temperatura e humidade do material no momento do ensaio, mas quanto a esta variação foram tomadas precauções para que o armazenamento dos provetes e todos os ensaios fossem realizados para as mesmas condições padrão das normas internacionais: 65% de humidade relativa do ar e 20°C de temperatura ambiente. (EN 338, 2003).

A MLC usada foi cedida pela empresa FLEXILAM – Realização de Projectos de Madeira Laminada, Lda. situada em Mortágua, Portugal. A cola entre lamelas utilizada foi a MUF (Melamina-urea-Formaldáido), e que de acordo com a norma BS1204 (o mesmo que na EN 301 (2006)) está classificada como “*weather and boil proff*”, portanto é resistente a elevadas temperaturas e tem aptidão para utilizações interiores e exteriores.

Relativamente ao sistema compósito de CFRP usado, as referências dos produtos que constituem o reforço são: a manta unidireccional de fibras de carbono SikaWrap® Hex 230 C e a resina de impregnação Sikadur® 330 (consultar o Quadro 2.4 do Capítulo 2).

As propriedades destes materiais estão descritas nas fichas técnicas de cada um dos produtos que constituem o sistema FRP e que são fornecidas pelo fabricante. Uma vez mais remete-se a consulta dessas propriedades para o Capítulo 3, item 3.3.2, para se evitar a repetição de informação.

As propriedades mecânicas dos CFRP na direcção longitudinal são quase exclusivamente governadas pelas fibras, e quando se trata de valores resistentes em Estado Limite Último despreza-se a resistência da matriz polimérica. O comportamento das fibras é linear elástico até à rotura, sem patamar de cedência.

As mantas têm uma espessura média de décimos de milímetros (neste caso $t_{eq}=0.13\text{mm}$) e resultam do agrupamento de feixes de filamentos unidireccionais de fibras de carbono dispostos de forma contínua. É a através da resina que se cria a aderência necessária entre os 2 materiais (madeira e FRP) para possibilitar a transferência de esforços para que a estrutura funcione como um todo. O sucesso do emprego depende das propriedades do adesivo, das suas condições de cura, mas também das características porosas e coesivas da superfície da estrutura que vai ser reforçada.

Uma última nota para o facto de não ter sido aplicado nenhum primário na superfície de colagem da madeira, porque este é mais indicado para tratamento da superfície de betão já que actua impregnando-se na superfície e aumentando a adesão entre os inertes. Visto que a madeira tem uma microestrutura resistente de fibras de celulose contínuas, a própria resina penetrará pelos poros celulares envolvendo as fibras contínuas da madeira, transferindo assim, por si só tensões para o núcleo resistente da madeira. Segundo o documento de Cruz *et al* (2004) não existem, ao contrário do que acontece no betão, vantagens na aplicação de uma camada de primário para melhorar a aderência madeira-CFRP. Efectuou-se tratamento superficial da madeira, simplesmente, por abrasão mecânica da superfície e posterior limpeza de poeiras.

4.4. INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMA DE ENSAIO

Para a realização do conjunto de ensaios de flexão, o autor dos mesmos definiu um grupo de critérios sobre a instrumentação do compósito, os equipamentos de aquisição dos deslocamentos, os equipamentos de aplicação de carga e as disposições de todo o sistema para a realização do ensaio de flexão em 3 pontos.

Informação sobre a instrumentação dos provetes:

Ao compósito foram colados 2 extensómetros eléctricos na zona central dos modelos onde o compósito não é aderente à madeira e onde se desenvolvem as maiores tracções na biela rótula-FRP. Este procedimento foi ajustado a cada uma das 3 técnicas EBR, HNSM e VNSM. Pretende-se, assim, medir a deformação máxima registada no CFRP durante os ensaios.

Ao modelo global de ensaio foram aplicados 2 transdutores de deslocamento (LVDTs), em posição vertical para leitura dos deslocamentos verticais a meio vão e outro horizontal para registar a abertura entre prismas de madeira na fibra inferior do provete.

A Figura 4.8 ilustra o *layout* de instrumentação dos modelos de ensaio.

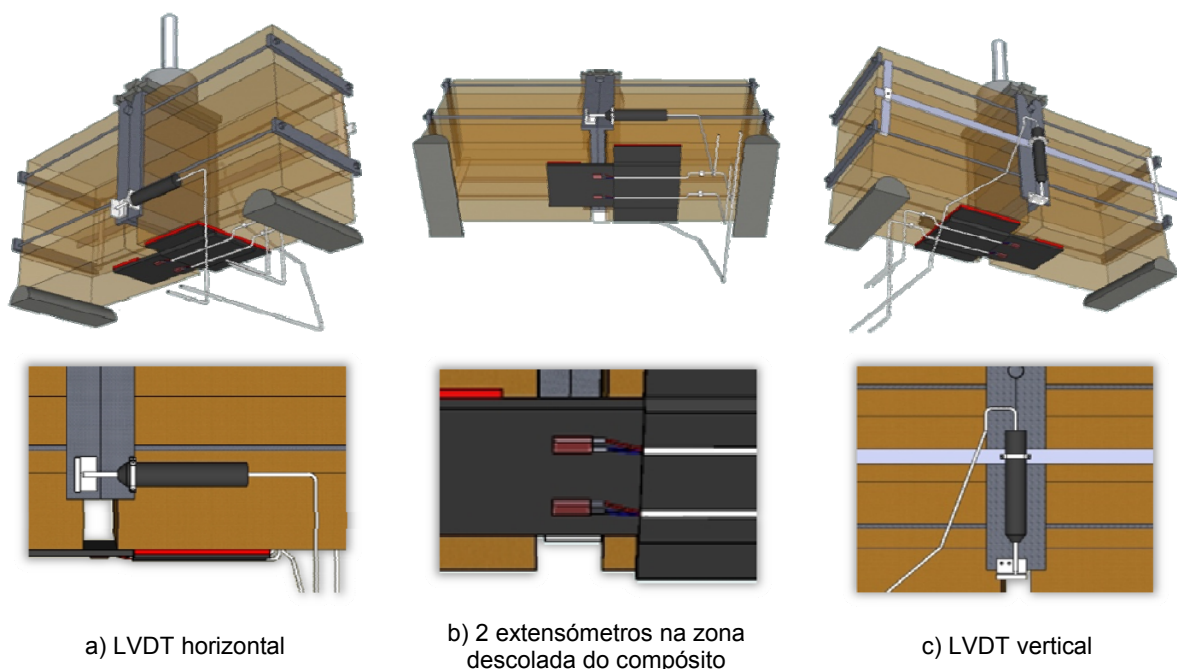


Figura 4.8 – Esquema 3D da disposição da instrumentação aplicada aos provetes de ensaio.

Informação sobre o pórtico de ensaio (sistema de ensaio):

Os modelos depois de preparados e instrumentados foram colocados num pórtico de ensaio, com a disposição dos apoios e da carga de forma a proporcionar a realização dos ensaios de flexão em 3 pontos.

O equipamento de ensaio utilizado foi um actuador da marca INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) desenvolvido pelo Prof. Francisco Freitas no ano de 2003, com capacidade máxima de carga de 100kN e precisão de 7.6329N. Cumpria perfeitamente os requisitos de carga máxima esperada de 45kN (considerando o caso limite de rotura de tracção do compósito) para estes modelos, e com a precisão suficiente para este tipo de ensaio.

Este equipamento, além da célula de carga que indica o valor de carga aplicada em cada instante, possui um outro sensor que traduz o deslocamento vertical do actuador. A informação deste transdutor de deslocamento foi desprezada para tratamento de dados, uma vez que essas leituras viriam afectadas de erros resultantes dos assentamentos de apoio, isto é, da ligeira mas sempre existente penetração das peças metálicas de apoio, na madeira de ensaio que é um material muito mais “mole”.

O *layout* do ensaio de aderência em flexão está ilustrado na Figura 4.9. Define todas as variáveis que importa ter em conta e registar em cada ensaio para posterior tratamento de resultados. As variáveis representadas são genéricas para as 3 técnicas de reforço utilizadas, sendo que por facilidade de representação escolheu-se apresentá-las num modelo da técnica EBR.



l_t – comprimento de colagem

t_{rot} – espessura da rótula metálica

L' – braço de forças verticais: $P_{\text{tot}}/2$

z' – dist. da rótula ao LVDT horizontal

h – dist. da rótula à fibra inferior da MLC



velocidade de rotura da norma, para posteriormente comparar estes valores de aderência com os valores de resistência ao corte desta classe de madeira definidos na norma EN 338 (2003).

Quadro 4.2 – Valores possíveis para as variáveis da Figura 4.9.

Variáveis	Valores (rótula pequena)	Valores (rótula grande)
t_{rot} [mm]	20	40
l_d [mm]	40	60
h [mm]	166	161
z [mm]	EBR	166
	HNSM	145 (=h-21)
	VNSM	154 (=h-12)
z' [mm]	130	125
vão [mm]	medido em cada ensaio	
L [mm]	= vão / 2	
L' [mm]	= $L - 15$	

Informações gerais:

A lista da instrumentação relevante e respectivas características técnicas, para os ensaios de aderência em flexão estão expostos no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Características técnicas da instrumentação utilizada nos ensaios de aderência em flexão.

Descrição	Fabricante	Referência	Características
Célula de Carga	INEGI (equipamento desenvolvido pelo Prof. Francisco Freitas)	Modelo: 100kN – 80.56.200 Versão: 102:2003	Carga máxima: 100 kN Resolução: 0.0076329 kN
LVDT horizontal	RDP Electronics Ltd	LDC1000C	Alcance: ± 25 mm Erro linear: $< \pm 0.5 / \pm 0.25 / \pm 0.1$ %F.S. Temperatura de operação: -50°C a $+70^\circ\text{C}$
LVDT vertical	RDP Electronics Ltd	LDC500C	Alcance: ± 12.5 mm Erro linear: $< \pm 0.5 / \pm 0.25 / \pm 0.1$ %F.S. Temperatura de operação: -50°C a $+70^\circ\text{C}$
Extensómetro 1	HBM	6/120LY61	Resistência: $120 \Omega \pm 0.30\%$ Gauge factor: $2.05 \pm 1\%$ Sensibilidade transversal: 0% Material: aço, $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ Comprimento da base do extensómetro: 6 mm Alongamento máximo: 5% = 50000 microstrain
Extensómetro 2	HBM	6/120LY61	(iguais às do extensómetro 1)
Relógio			Unidade de medida: 1 s Precisão: 0.01 s

Com o uso de toda esta instrumentação temos talvez duplicação de vias de aquisição de certos dados, mas o intuito de investir numa instrumentação redundante é:

- Criar segurança de boa leitura porque, tendo duas vias para uma mesma variável, se pode aferir erros de uma das vias e escolher o processo mais adequado para aquela leitura;
- Garantir a aquisição efectiva de dados no máximo dos ensaios visto que em certos casos ocorrem erros de conexão eléctrica, erros de software de aquisição, ou erros de posicionamento ou fixação mecânica do dispositivo de leitura, que inutilizam aqueles dados captados.

A Figura 4.11 representa uma deformada exagerada (rotação de 10°), com o intuito de se perceber os movimentos envolvidos no decorrer do ensaio. Os valores apresentados são em milímetros e pretendem demonstrar que a diferença entre os valores lidos e os valores reais é muito pequena, e para o campo de aplicação do ensaio concreto, com deformadas na ordem de 1/10 desta, pode-se desprezar o erro. Que aqui é de 5.7% no caso do LVDT horizontal e 2.6% no caso do LVDT vertical. Esta análise foi feita à escala em software de desenho assistido por computador.

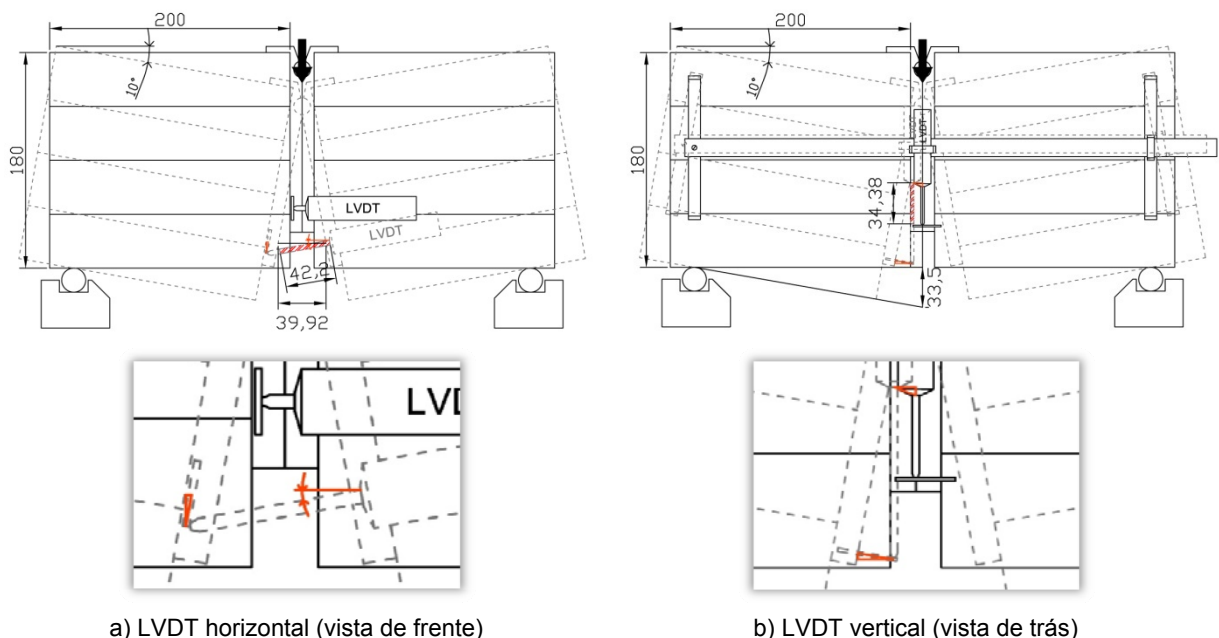


Figura 4.11 – Mecanismo de leitura de movimentos do provete no decorrer do ensaio e pormenor de análise dos erros cometidos nas leituras dos LVDTs.

No pormenor da Figura 4.11 consegue-se identificar as causas do ligeiro erro entre os verdadeiros deslocamentos e as leituras dos LVDTs. Mais se identifica que são erros muito reduzidos para deformações menores que são as que reais do ensaio, confirmando a adequada disposição dos transdutores de deslocamento.

Uma última nota para a preparação da superfície da madeira antes da colagem do compósito de reforço, que foi diferente para diferentes técnicas reforço. Nos provetes reforçados pela técnica EBR a superfície da madeira foi lixada com movimentos circulares com lixa nº80 numa 1ª fase e lixa mais fina nº120 para acabamento, seguido de uma passagem com pincel para remover o pó. Nos provetes

reforçados pelas técnicas NSM foi só feita regularização com a lixa fina (nº120) dobrada no interior da ranhura e da mesma forma seguido de uma passagem com pincel para remover o pó.

4.5. METODOLOGIA DE OBSERVAÇÃO, MEDIÇÃO E ANÁLISE

Com a informação registada pela instrumentação descrita no Quadro 4.3 e conjugada com as características geométricas dos provetes, representadas no *layout* de ensaio na Figura 4.9 e materializadas no Quadro 4.2, pode-se calcular as grandezas relevantes para avaliação da aderência do reforço de CFRP à madeira. Nesta secção descrevem-se as teorias e equações usadas para passar do conhecido à determinação dessas grandezas físicas de análise de desempenho da ligação.

Durante os ensaios medem-se as seguintes grandezas:

- Força total aplicada pelo actuador – P_{tot} [kN]
- Deslocamento vertical da zona central do ensaio – δ_v [mm]
- Deslocamento relativo horizontal (ou abertura) de cada meio provete à cota de instalação do LVDT horizontal – δ_H' [mm]
- Extensão do compósito na zona descolada (na zona central) – ε_f [microstrain]

Posteriormente, tratam-se os dados com uma série de equações para se obterem as variáveis seguintes:

- Força de tracção no compósito: F_t [kN]

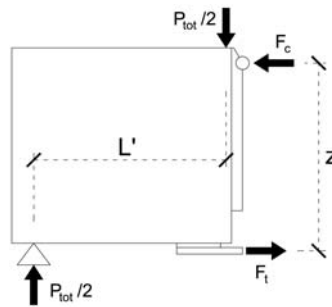


Figura 4.12 – Equilíbrio de momentos.

$$\frac{P_{tot}}{2} \times L' = F_t \times z \Leftrightarrow F_t = \frac{P_{tot} \times L'}{2 \times z} \quad [kN] \quad (4.1.)$$

onde: P_{tot} entra em [kN]
 L' e z entram em [mm]

- Momento flector total aplicado: M_{tot} [N.m]

$$M_{tot} = \frac{P_{tot} \times L'}{2} \quad [N.m] \quad (4.2.)$$

onde: P_{tot} entra em [kN]
 L' entra em [mm]

- *Abertura horizontal ao nível do compósito: δ_H [mm]*

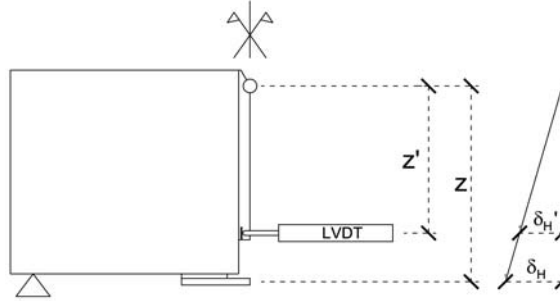


Figura 4.13 – Semelhança de triângulos.

$$\frac{\delta_H'}{z'} = \frac{\delta_H}{z} \Leftrightarrow \delta_H = \frac{\delta_H' \times z}{z'} \quad [mm] \quad (4.3.)$$

onde: δ_H , z' e z entram em [mm]

- *Variação de comprimento na zona não colada: Δl_d [mm]*

$$\Delta l_d = \varepsilon_f \times l_d \quad [mm] \quad (4.4.)$$

onde: ε_f é adimensional
 l_d entra em [mm]

- *Escorregamento do compósito: s_t [mm]*

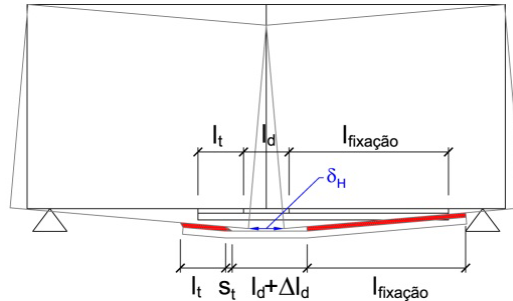


Figura 4.14 – Deformação do compósito por abertura do provete.

$$\begin{aligned} \text{comprimento inicial} + \delta_H &= \text{comprimento final} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow l_t + l_d + l_{fixação} + \delta_H &= s_t + l_t + l_d + \Delta l_d + l_{fixação} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow s_t &= \delta_H - \Delta l_d \quad [mm] \end{aligned} \quad (4.5.)$$

onde: δ_H e Δl_d entram em [mm]

Entende-se como escorregamento do compósito (s_t) a soma da deformação do compósito na zona colada por esforço axial (Δl_t) com a parcela da distorção do adesivo por esforço de corte ($\gamma_{ad} \times t_{eq}$), ilustrada no pormenor da Figura 4.15.

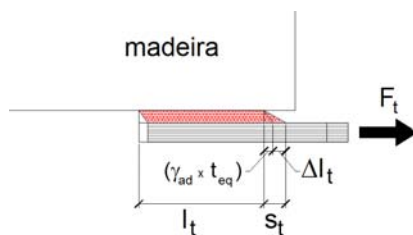


Figura 4.15 – Definição da variável escorregamento do compósito.

- Tensão no compósito: σ_f [MPa]

$$\sigma_f = \frac{F_t \times 1000}{b_f \times t_{eq} \times n \times m} \quad [MPa] \quad (4.6.)$$

onde: F_t entra em [kN]

b_f e t_{eq} entram em [mm]

$t_{eq}=0.13$ mm para todas as técnicas

$b_f=60$ mm para a técnica EBR

$b_f=15$ mm para as técnicas HNSM e VNSM

n é o nº de camadas do compósito, adimensional

$n=1$ para a técnica EBR

$n=2$ para as técnicas HNSM e VNSM

m é o nº de fiadas de reforço, adimensional

$m=1$ para a técnica EBR

$m=2$ para as técnicas HNSM e VNSM

- Tensão tangencial média na interface: τ_{med} [MPa]

$$\tau_{med} = \frac{F_t \times 1000}{b_f \times l_t \times n \times m} \quad [MPa] \quad (4.7.)$$

onde: F_t entra em [kN]

b_f e l_t entram em [mm]

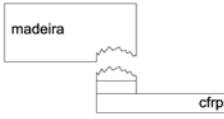
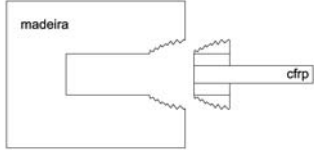
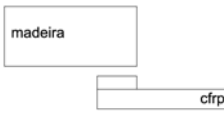
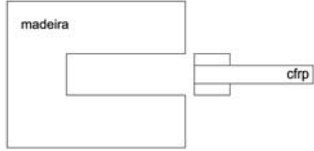
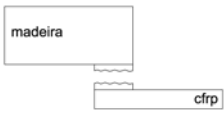
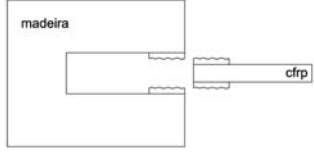
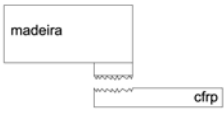
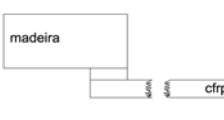
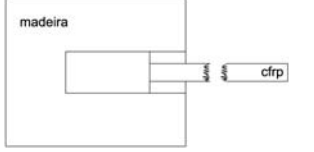
n e m são adimensionais

4.6. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Com o objectivo de se generalizar a análise dos resultados presentes neste capítulo, torna-se importante uniformizar um dos parâmetros mais ambíguos na análise deste ensaio, a interpretação dos diferentes modos de ruína possíveis na interface. Só através de uma análise concordante entre os valores de resistência na rotura e o seu respectivo modo de ruína se pode perceber se o ensaio é válido e os resultados são fiáveis. Isto porque, num ensaio experimental, podem haver erros de execução do reforço ou de montagem do sistema de carga ou outros que devem ser despistados. O controlo dos modos de ruína permite, se necessário, corrigir erros de execução para os próximos ensaios, e perceber se está a haver ou não rotura prematura.

No Quadro 4.4 descrevem-se e esquematizam-se os modos de ruína admissíveis nos ensaios de flexão, atribuindo-lhes a designação de R1 a R5 por comodidade de exposição dos mesmos ao longo do trabalho.

Quadro 4.4 – Modos de ruína admissíveis nos ensaios de aderência em flexão.

Tipo	Descrição	Designação internacional	Esquema	
			EBR	NSM
R1	Rotura por corte na madeira	Wood-tear failure		
R2	Rotura por escorregamento na interface madeira-resina	Adhesive failure		
R3	Rotura por corte na resina	Cohesive failure		
R4	Rotura por corte de uma película muito fina de fibras	Light-fiber-tear failure		
R5	Rotura por tracção do compósito	Stock-break failure		

As designações internacionais e a respectiva idealização dos esquemas foram retirados da normal americana ASTM D 5573 (1999): “*Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*”. Apesar de esta norma ser direccionada para classificar roturas de juntas entre FRPs, neste caso de ligação de FRP à madeira está igualmente presente a ideologia da ligação colada entre 2 materiais fibrosos. Os modos de ruína do Quadro 4.4 não são uma adopção total dos modos de rotura presentes na norma americana, mas sim uma importação criteriosa dos casos aplicáveis aqui.

Em avanço se informa que em todos os 12 ensaios EBR (3 séries x 4 provetes por série) não se verificou nenhuma rotura do tipo R2 ou R3, e em todos os 24 ensaios NSM também não se verificou nenhuma do tipo R2 ou R4. A ausência do modo de ruína R2 revela que o adesivo aderiu bem à superfície de madeira.

Devido à extensa informação registada em toda a campanha de ensaios, nos itens seguintes decidiu-se expor os seus resultados, em termos médios, e agrupados de acordo com o comportamento geral do modelo de flexão, o desempenho do compósito e o desempenho da junta colada madeira-CFRP, para as 3 séries de ensaio e para as 3 técnicas de reforço.

Contudo, no Anexo 1 reúnem-se todos os dados registados nessa campanha através do preenchimento de quadros e da criação de gráficos com as relações “ P_{tot} vs. δ_V ”, “ σ_f vs. ε_f ”, “ σ_f vs. S_t ” e “ τ_{med} vs. S_t ”

para os 4 provetes de cada uma das 3 séries de comprimento de colagem (20, 40 e 60mm) e segundo as 3 técnicas de reforço (EBR, HNSM e VNSM).

4.6.1. TÉCNICA EBR

Os primeiros resultados que se apresentam são os referentes aos provetes reforçados pela técnica de reforço de colagem exterior, ou seja, EBR – *External Bonded Reinforcement*.

Informação sobre o comportamento geral do modelo de flexão

O comportamento tipo dos modelos de cada uma das 3 séries com 20, 40 e 60mm de comprimento de junta madeira-CFRP está ilustrado na Figura 4.16, em termos da curva Momento vs. Deslocamento Vertical da secção a meio vão. Refira-se que cada curva representa o desempenho tipo do grupo de 4 provetes ensaiado por cada série. A razão pela qual se optou por representar estas curvas em vez da habitual relação Força vs. Deslocamento, reside no facto de na montagem dos ensaios e face ao recurso dos mecanismos metálicos com rótula nem sempre ter sido possível manter constante a distância (L') entre o apoio e a carga aplicada ao provete (consultar Figura 4.9), dificultando a análise comparativa entre modelos.

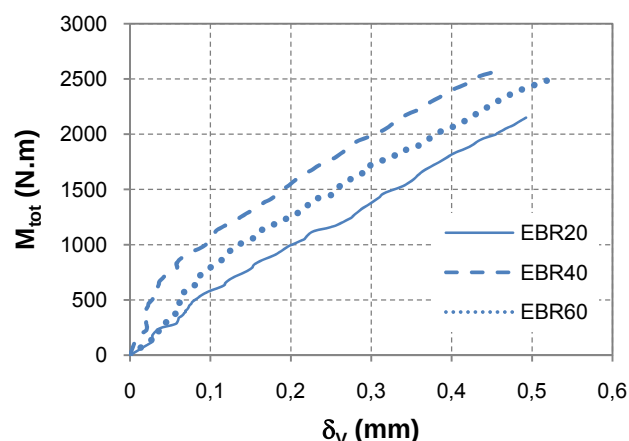


Figura 4.16 – Curvas Momento-Deslocamento representativas do comportamento geral dos modelos EBR.

A análise geral das curvas indicam existir um desempenho linear até à rotura dos modelos, independentemente da variação do comprimento de colagem do CFRP.

Na fase inicial das curvas existe um desajuste das séries EBR40 e EBR60 relativamente à EBR20, podendo inferir-se que face ao maior comprimento de colagem dos primeiros há uma eficaz transferência de esforços CFRP-madeira, perante início de escorregamento mais cedo da série EBR20.

Para níveis mais elevados de carregamento o modelo manifesta maiores valores de deslocamento vertical, justificados pela deformação do compósito e escorregamento da junta. Na rotura os modelos alcançaram momentos máximos de 2.00kN.m, 2.45kN.m e 2.24kN.m, em valores médios, respectivamente para as séries EBR20, EBR40 e EBR60 (consultar o Anexo 1).

No Quadro 4.5 expõem-se os modos de ruína de cada ensaio, com a designação concordante com a nomenclatura introduzida no Quadro 4.4.

Quadro 4.5 – Modos de ruína obtidos nos ensaios da técnica EBR.

Série	Provete	Modo de Ruína
$l_t=20\text{mm}$	EBR20.1	R1
	EBR20.2	R1
	EBR20.3	R1
	EBR20.4	R1
$l_t=40\text{mm}$	EBR40.1	R1+R4+R5
	EBR40.2	R1+R4+R5
	EBR40.3	R1
	EBR40.4	R1
$l_t=60\text{mm}$	EBR60.1	R1+R4+R5
	EBR60.2	R1
	EBR60.3	R1+R4
	EBR60.4	R1

A grande conclusão a retirar da forma como ruíram os provetes reforçados pela técnica EBR é que o “elo mais fraco” foi a madeira. A grande maioria dos ensaios rompeu por arrancamento de uma película de madeira agarrada à resina de colagem do compósito à madeira, saindo este intacto (rotura R1). Houve no entanto em 4 dos 12 ensaios a ocorrência de um modo misto de rotura potenciado pela significativa largura de colagem ($b_f=60\text{mm}$) em comparação com o comprimento de colagem ($l_t=20, 40$ e 60mm). Quando houve rotura do compósito (R5), ela iniciou-se por delaminação longitudinal do mesmo devido a forças internas despoletadas no plano transversal ao da direcção das fibras do compósito. A ruína R5 é, portanto, um modo de rotura secundário, uma vez que essas forças só se iniciaram porque houve uma zona do compósito que já tinha descolado originando excentricidades da força de tracção e, conseqüente, delaminação do compósito.

O gráfico percentual da Figura 4.17 elucida claramente a predominância da rotura por corte na madeira (rotura R1) para esta técnica de reforço de colagem exterior.

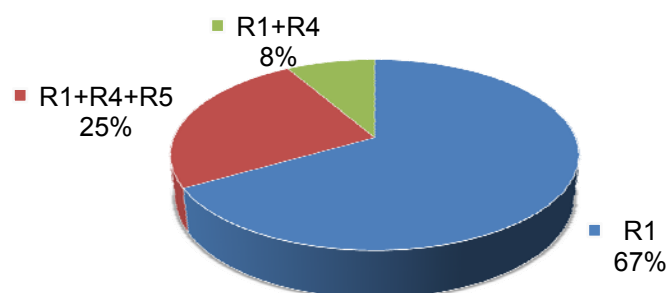


Figura 4.17 – Distribuição percentual dos modos de ruína registados nos ensaios da técnica EBR.

A Figura 4.18 ilustra os diferentes modos de ruína registados nos ensaios.

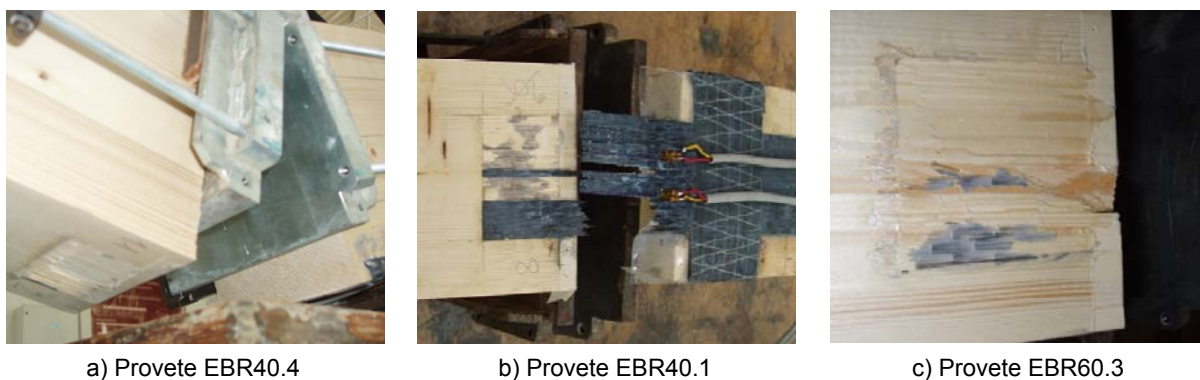


Figura 4.18 – Aspecto dos modos de rotura observados nos ensaios da técnica EBR.

Informação sobre o desempenho do CFRP

A partir do registo da carga aplicada ao provete é possível obter a força de tracção no CFRP recorrendo à equação (4.1.). A determinação dessa força na rotura para todos os 4 provetes das 3 séries EBR20, 40 e 60 permite construir o gráfico ilustrado na Figura 4.19.a) (força no compósito vs. comprimento de colagem). Em contrapartida, com o registo directo da extensão máxima do compósito (de acordo com a informação do item 4.4) é possível desenhar o gráfico apresentado na Figura 4.19.b) (extensão no CFRP vs. comprimento de colagem) para os mesmos provetes da situação (a).

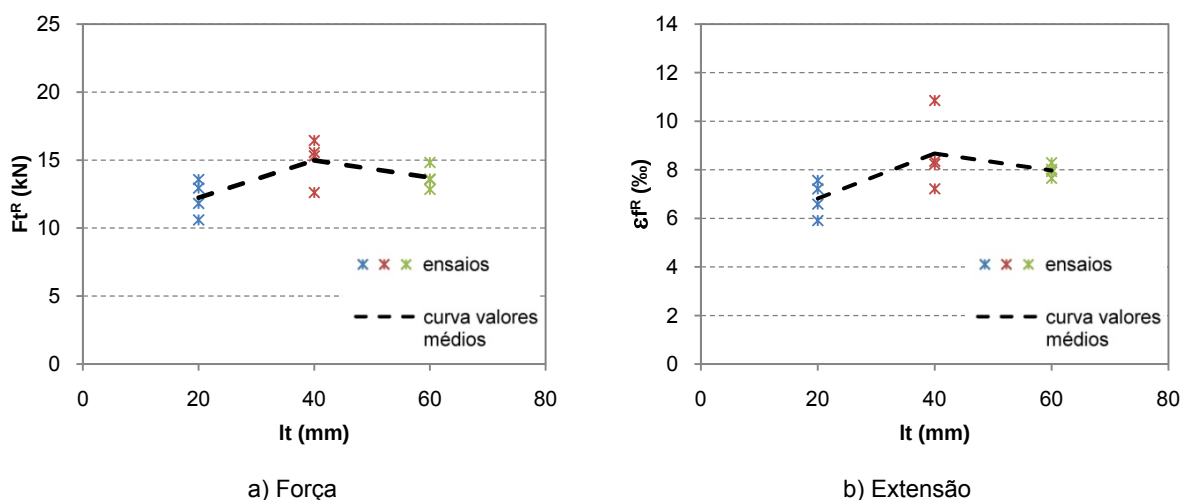


Figura 4.19 – Força e extensão máximas no compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica EBR.

Apesar de se partirem de variáveis observadas por instrumentos distintos, os dois gráficos apresentam andamentos semelhantes, como seria de esperar (há correlação entre a força e a extensão no compósito à custa da lei de Hooke).

A principal observação a reter é de que os valores máximos da força de tracção e da extensão foram observados para a série de $l_t=40\text{mm}$ e não para a de maior comprimento de colagem ($l_t=60\text{mm}$).

Tomando como base de referência o valor da força de tracção obtido para o comprimento de colagem de 20mm, verificaram-se valores sensivelmente 22% superiores para os comprimentos de colagem de 40mm e valores só 12% superiores para os ensaios de 60mm de colagem. Houve portanto um

decréscimo de desempenho do compósito na passagem do comprimento de colagem de 40mm para o de 60mm.

Esta informação vai ao encontro do relato de documentos que referem que o comprimento de colagem para o qual se obtém rendimento total do compósito é chamado de *comprimento efectivo de colagem* ($l_{t,ef}$). Nestes ensaios EBR, e para esta madeira específica, esse comprimento atingiu-se algures próximo dos 40mm, certamente depois dos 20mm e antes do 60mm. Uma vez atingido esse comprimento de colagem efectivo, o valor máximo da força no CFRP (ou extensão) mantém-se ou decresce ligeiramente.

A extensão máxima que o compósito regista na rotura reflecte o grau de eficiência e aproveitamento do material numa dada aplicação. Um compósito que se comporta em regime elástico até à rotura e tem uma extensão última referida na ficha técnica de 1.5% (=15‰) se numa aplicação desenvolver extensões de 8 a 8.5‰ no momento em que a ligação atinge a ruína, significa que concretizou 60% da sua capacidade resistente. Esta situação está patente nos valores das extensões lidas no gráfico da Figura 4.19.b), sobretudo para as séries de $l_t=40$ e 60mm.

De forma a calibrar o valor do módulo de elasticidade longitudinal do CFRP curado *in situ* (E_f) a partir dos registos próximo da rotura dos modelos como o valor indicado na ficha técnica do fornecedor (no caso $E_f=230\text{GPa}$), foi construído o gráfico ilustrado na Figura 4.20. Aqui se representam os valores dos E_f obtidos dos ensaios distribuídos pelas 3 séries e a linha representativa do valor do fornecedor. Conclui-se que, em termos médios, os valores obtidos dos ensaios são praticamente iguais ao do fornecedor, salvo dispersão justificável pelo facto de se tratar de ensaios de flexão e não de tracção axial do compósito.

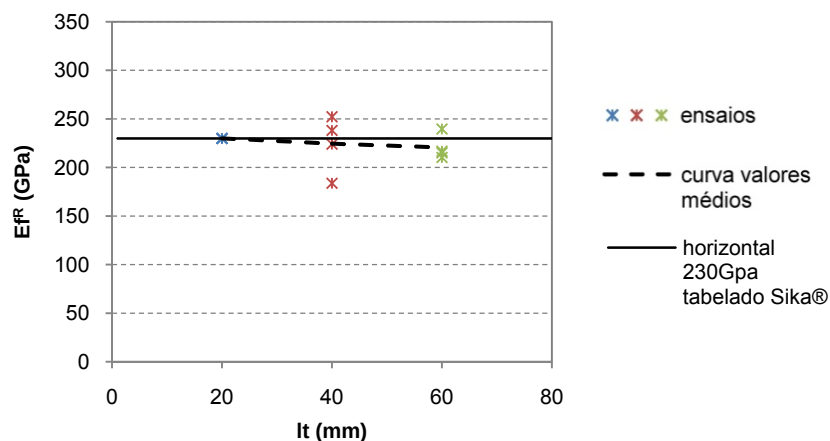


Figura 4.20 – Módulo de elasticidade secante (na rotura) para cada série de 20, 40 e 60mm da técnica EBR.

Informação sobre o desempenho da junta madeira-CFRP

Com a instrumentação disponível para esta campanha de ensaios foi possível avaliar para a interface colada madeira-CFRP as grandezas seguintes: valor médio da tensão tangencial (τ_{med}) e o escorregamento admissível (s_t) em qualquer instante do ensaio.

Na Figura 4.21 expõe-se a variação da tensão tangencial na rotura (τ_{med}^R) em função dos comprimentos de colagem (l_t). Como seria de esperar, o valor da tensão decresce (praticamente linearmente) à medida que o comprimento de colagem aumenta porque o valor da área de colagem

duplica ($l_t=40\text{mm}$) e triplica ($l_t=60\text{mm}$) relativamente à 1ª série de $l_t=20\text{mm}$. Sublinhe-se o facto de a interface ter capacidade para desenvolver τ_{med} da ordem de 8 a 11MPa como os registados no menor comprimento de colagem $l_t=20\text{mm}$ (consultar Anexo 1). Estes valores são muito elevados relativamente às propriedades mecânicas da classe de madeira de que os provetes são constituídos.

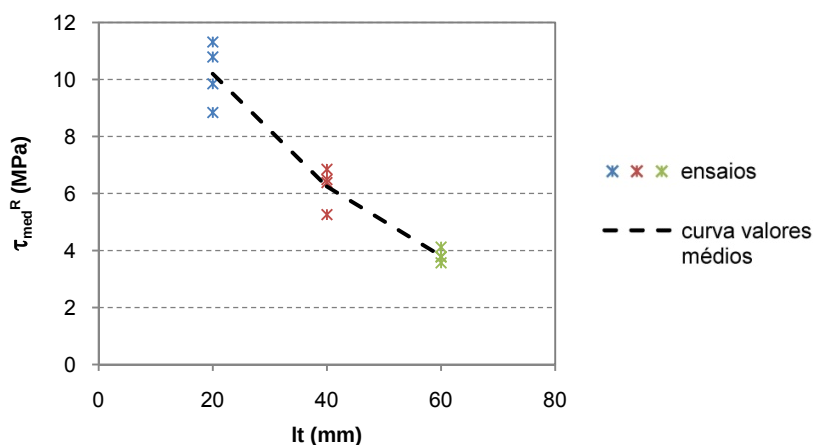


Figura 4.21 – Tensão tangencial na ligação (na rotura) para cada série de ensaio da técnica EBR.

Se por um lado, é positivo ter algum escorregamento na interface entre o reforço e a estrutura existente para denunciar a aproximação da rotura, criando uma ductilidade fictícia entre estes 2 materiais de características fundamentalmente elásticas. Por outro lado, não se quer ter escorregamento na interface para níveis de tensões de serviço, visto que tal situação denunciaria a falta de eficácia da transferência de esforços da estrutura existente para o reforço.

Na Figura 4.22 apresentam-se os valores de escorregamento máximos atingidos aquando da rotura da ligação madeira-FRP. Pode-se ver que há mais escorregamento nos comprimentos de colagem maiores (40 e 60mm), cujas médias rondam os 1.5mm comparando com os 1.3mm de média de escorregamento na interface verificada em $l_t=20\text{mm}$.

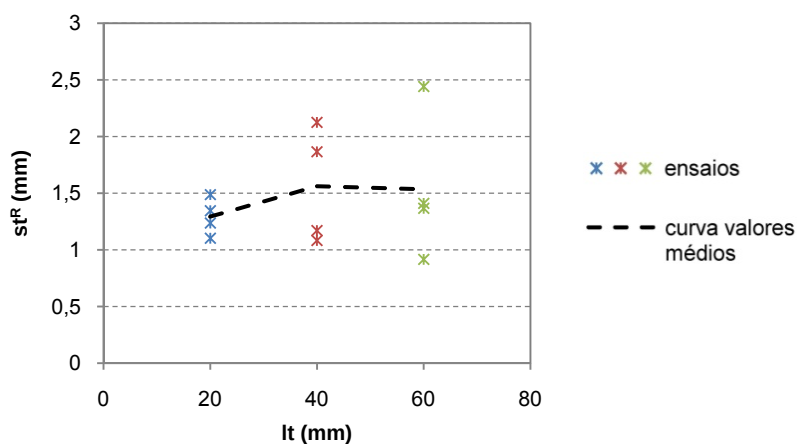


Figura 4.22 – Escorregamento máximo do compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica EBR.

Normalmente, e para uma dada abertura horizontal do provete, se o compósito começar a escorregar então não vai haver lugar a tanta força de tracção no compósito absorvida e por isso não haverá grande extensão do próprio compósito. Com esta explicação, e sabendo que os valores de S_t são calculados de acordo com a equação (4.5.), percebe-se porque é que há mais dispersão nos resultados do escorregamento do compósito (S_t^R) do que para as outras grandezas.

4.6.2. TÉCNICA HNSM

Esta técnica de reforço por inserção em ranhuras horizontais (*Horizontal Near Surface Mounted – HNSM*) apresenta melhor comportamento do que a técnica EBR, anteriormente exposta. O comportamento tipo dos modelos de cada uma das 3 séries com $l_t=20, 40$ e 60mm está ilustrado na Figura 4.23 através das curvas Momento vs. Deslocamento Vertical da secção a meio vão. Mais uma vez e de forma mais pronunciada a lei de comportamento apresenta duas fases, sendo a inicial de incremento rápido e carga com pequena deformação do provete (até momentos na ordem dos 400N.m) e a seguinte de aspecto praticamente linear e acentuada deformação até à ruína.

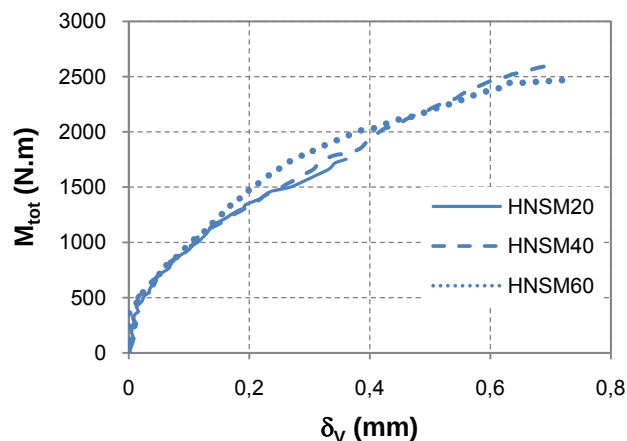


Figura 4.23 – Curvas Momento-Deslocamento representativas do comportamento geral dos modelos HNSM.

Relativamente aos modelos equivalentes de EBR, esta campanha de ensaios não só atingiu maiores momentos para deslocamentos verticais maiores (alguma ductilidade), como também se acentuou o comprimento da fase inicial de transferência “perfeita” de esforços internos da madeira para o compósito.

Uma ressalva para o modelo de 20mm de comprimento de colagem, onde se verificaram roturas claramente precoces e aquém das capacidades do reforço demonstradas nos comprimentos maiores de colagem. No comprimento de 20mm de colagem não se aproveita devidamente o compósito empregue. No entanto, ficou provado que nesta técnica de reforço o comportamento dos modelos é independente de se ter feito um comprimento de colagem deficiente, a diferença só se vai notar na carga máxima a que este vai resistir.

No Quadro 4.6 resumem-se os modos de ruína de cada ensaio, com a designação concordante com a nomenclatura introduzida no Quadro 4.4.

Quadro 4.6 – Modos de ruína obtidos nos ensaios da técnica HNSM.

Série	Provete	Modo de Ruína
$l_t=20\text{mm}$	HNSM20.1	R3+R1
	HNSM20.2	R3+R1
	HNSM20.3	R1
	HNSM20.4	R1
$l_t=40\text{mm}$	HNSM40.1	R3+R5
	HNSM40.2	R3
	HNSM40.3	R3+R5
	HNSM40.4	R3+R1
$l_t=60\text{mm}$	HNSM60.1	R3+R5
	HNSM60.2	R1+R5
	HNSM60.3	R3
	HNSM60.4	R3+R1

A principal conclusão a retirar da forma como ruíram os provetes reforçados pela técnica HNSM, é que as roturas foram essencialmente despoletadas por um escorregamento inicial do compósito, ocorrido por rotura por corte na resina (R3). Pela própria forma de reforço em 2 fiadas, quando uma delas falha, por escorregamento, na outra é introduzido o dobro do esforço num curto intervalo de tempo. Além disso, também é introduzida alguma excentricidade, o que justifica que as roturas destes provetes sejam normalmente a combinação de R3 com a rotura por corte da madeira (R1) ou mesmo a rotura por tracção do compósito (R5). A rotura por corte na resina (R3) enuncia um deficiente controlo de qualidade da técnica de reforço, devido à presença de vazios no interior da ranhura, aumentando as distorções desta.

Não houve aqui grande diferença entre os modos de rotura para os ensaios do comprimento menor de colagem (20mm), mas por serem comprimentos mais pequenos já se conseguiu ter um melhor controlo dos vazios de resina na ranhura o que aumentou a aderência do compósito à madeira e proporcionou, em 2 dos 4 ensaios, roturas por corte da madeira (R1) simultâneas em ambas as fiadas como era de esperar por ser o elemento menos resistente.

O gráfico circular da Figura 4.24 mostra que os modos de rotura mistos foram predominantes.

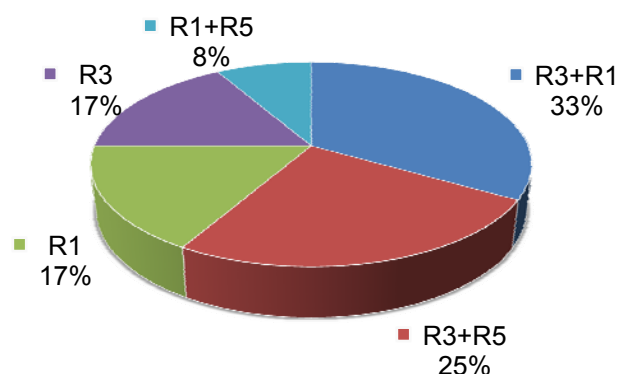


Figura 4.24 – Distribuição percentual dos modos de ruína registados nos ensaios da técnica HNSM.

A Figura 4.25 exhibe o aspecto dos diferentes modos de ruína observados nos ensaios.

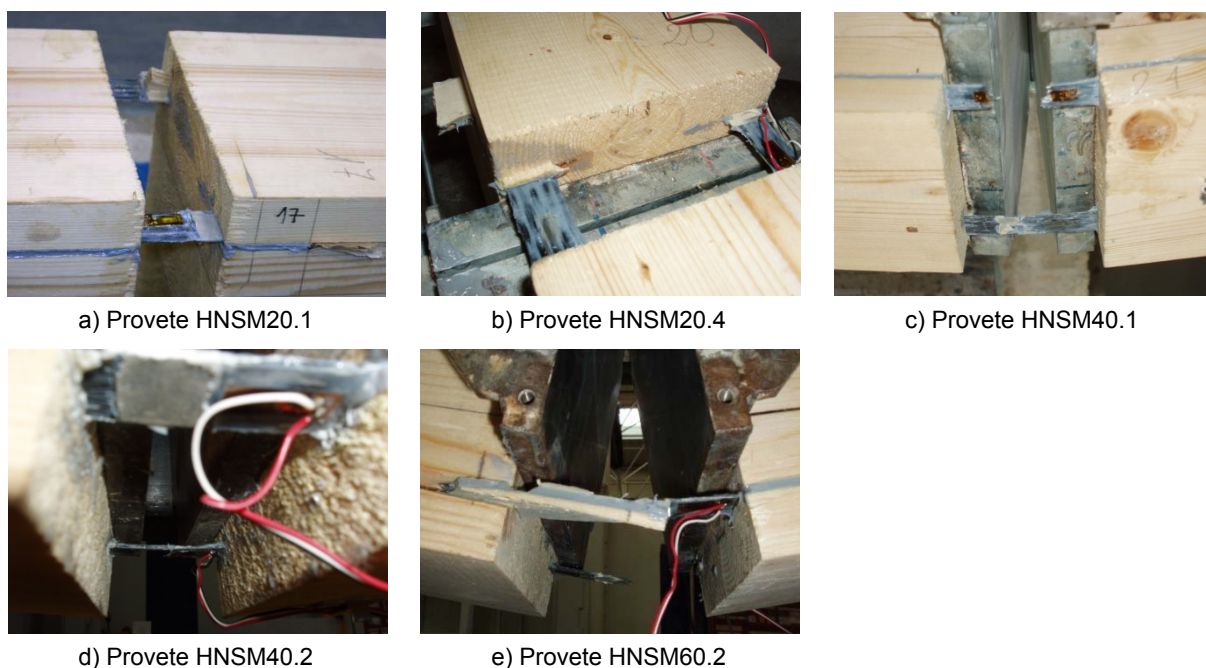


Figura 4.25 – Aspecto dos modos de rotura observados nos ensaios da técnica HNSM.

Informação sobre o desempenho do CFRP

À semelhança do que se fez para a técnica EBR foi possível construir os gráficos ilustrados na Figura 4.26.a) (força no compósito vs. comprimento de colagem) e na Figura 4.26.b) (extensão no CFRP vs. comprimento de colagem) para os 4 provetes das 3 séries HNSM20, 40 e 60.

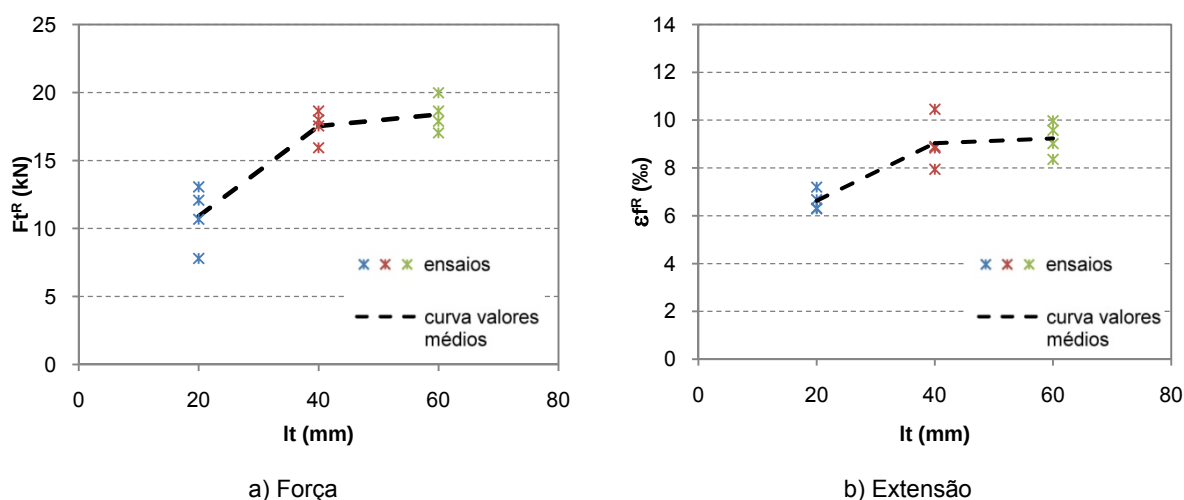


Figura 4.26 – Força e extensão máximas no compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica HNSM.

Apesar de se partirem de grandezas observadas por instrumentação distinta, os dois gráficos apresentam andamentos semelhantes.

A análise da força máxima de tracção no compósito (F_t^R) observada em cada comprimento de colagem, permite concluir que o valor máximo de ancoragem ainda não se atingiu, ou está perto de se

atingir, para o maior comprimento de colagem testado, o de 60mm. Este facto é o contrário do que aconteceu na técnica EBR em que se tinha verificado esse valor máximo da força no comprimento de colagem de 40mm.

O valor da força máxima de ancoragem para a técnica EBR ronda os 15kN e para a técnica HNSM parece ter subido para a ordem dos 19kN. Isto, parece mostrar que se conseguem melhores resultados no reforço com a técnica de inserção em ranhuras do que com a técnica de colagem exterior.

A extensão máxima que o CFRP desenvolve no ensaio reflecte a eficiência da colagem (aderência). Observa-se, da Figura 4.26.b), que os provetes reforçados segundo a técnica HNSM atingiram extensões entre 8 a 10‰, ou seja, até 70% da extensão última do material segundo indicação do fornecedor (sistema SikaWrap).

Os valores de extensão máxima do compósito (ϵ_f^R) atingidos para o comprimento de colagem de 20mm são significativamente inferiores, o que não quer dizer que a aderência entre os materiais não seja boa, vem antes confirmar que para comprimentos de colagem demasiado curtos, os valores máximos de desempenho do reforço são comprometidos.

Dos resultados analisados estima-se que o comprimento efectivo de aderência na técnica de reforço HNSM seja entre os 40 e os 60mm.

Para calibrar o valor do módulo de elasticidade longitudinal do CFRP (E_f) foi construído o gráfico ilustrado na Figura 4.27, onde se representa os valores do E_f calculados dos ensaios desta campanha e o valor indicado pelo fornecedor ($E_f=230\text{GPa}$). Em termos médios, os valores de E_f^R aqui obtidos são uma boa aproximação do valor avançado pelo fabricante.

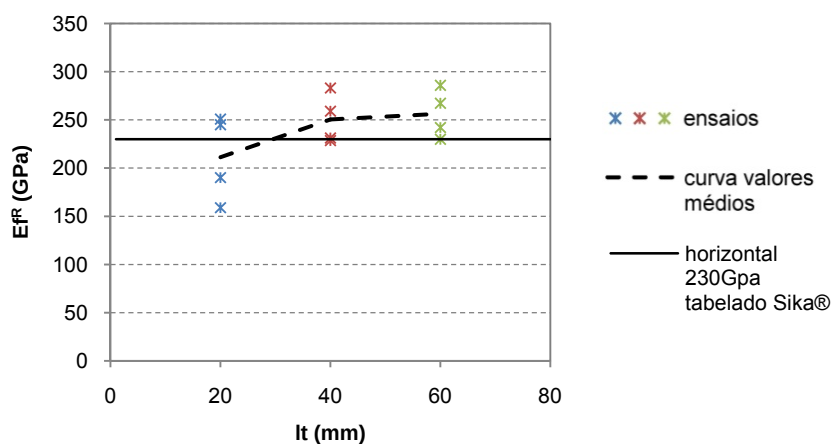


Figura 4.27 – Módulo de elasticidade secante (na rotura) para cada série de 20, 40 e 60mm da técnica HNSM.

Informação sobre o desempenho da junta madeira-CFRP

Nas mesmas circunstâncias explicadas para o caso da técnica EBR, na Figura 4.28 expõe-se a variação da tensão tangencial na rotura (τ_{med}^R) em função dos comprimentos de colagem (l_t).

Nas técnicas de reforço por inserção em ranhuras, a tensão tangencial na interface colada resulta da divisão da força de tracção do compósito por uma área de interface. Essa área é o produto de uma largura por um comprimento: comprimento de colagem (l_t) variável, e largura de tiras de 30mm de manta, mas aplicadas dobradas a meio onde só têm contacto com a madeira 15+15mm das faces exteriores da dobragem, e isto vezes 2 fiadas (lado esquerdo e direito do provete). Estes

15x2x2=60mm de largura de colagem representam a mesma largura que para a técnica de colagem exterior, e por isso os valores de tensão tangencial atingidos podem ser comparados também entre técnicas de reforço.

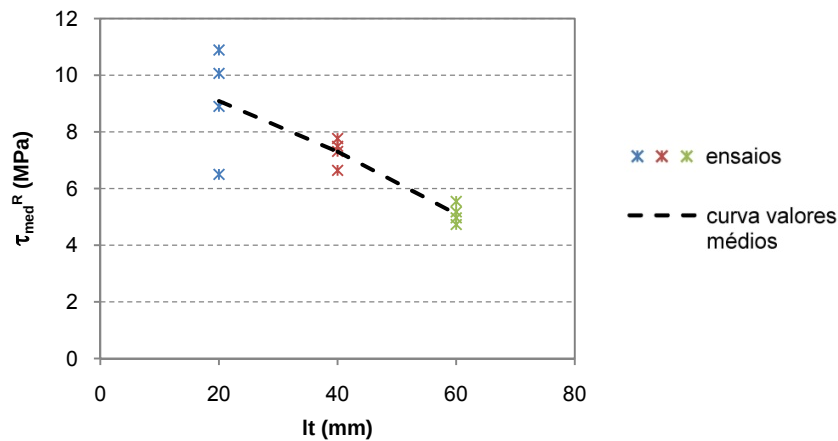


Figura 4.28 – Tensão tangencial na ligação (na rotura) para cada série de ensaio da técnica HNSM.

Além do decréscimo quase linear, já esperado, da tensão tangencial, nota-se na Figura 4.28, que é muito pequena a dispersão de resultados nos ensaios para $l_t=40$ e 60mm. Facto que é muito positivo, e significa que é uma técnica com grande controlo dos valores máximos de resistência esperados. Em projecto de engenharia civil, quanto maior for a segurança das propriedades dos materiais, mais eficaz é o dimensionamento feito e menos desperdício de material existe na construção.

Para o comprimento de colagem de 20mm obtiveram-se tensões tangenciais bastante altas, mas com dispersão alta. Este comportamento reflecte, não só, o facto de ainda não se ter atingido o comprimento efectivo de colagem necessário para o bom funcionamento da junta, como também o facto de em áreas muito pequenas de análise os eventuais defeitos da madeira (material natural) ou mesmo defeitos de colagem (inserção em ranhuras estreitas e de difícil acesso) tomam um peso maior, originando roturas aleatórias. De qualquer das formas, realça-se uma vez mais, a capacidade da interface conseguir desenvolver tensões τ_{med} de 7 a 11MPa.

Na Figura 4.29 apresentam-se os valores de escorregamento máximos atingidos aquando da rotura da ligação madeira-FRP. Pode ver-se que há mais escorregamento nos comprimentos de colagem maiores (40 e 60mm), cujas médias rondam os 1.7 e 2.0mm respectivamente comparando com os 0.8mm de média de escorregamento na interface verificada para $l_t=20$ mm. Os valores absolutos de escorregamento são logicamente proporcionais ao comprimento de colagem, mas nota-se uma tendência de estabilização quando ultrapassamos o comprimento efectivo de colagem. Neste caso da técnica HNSM, o valor de escorregamento do compósito parece estabilizar em 2.0mm, havendo, no entanto, bastante dispersão dos resultados.

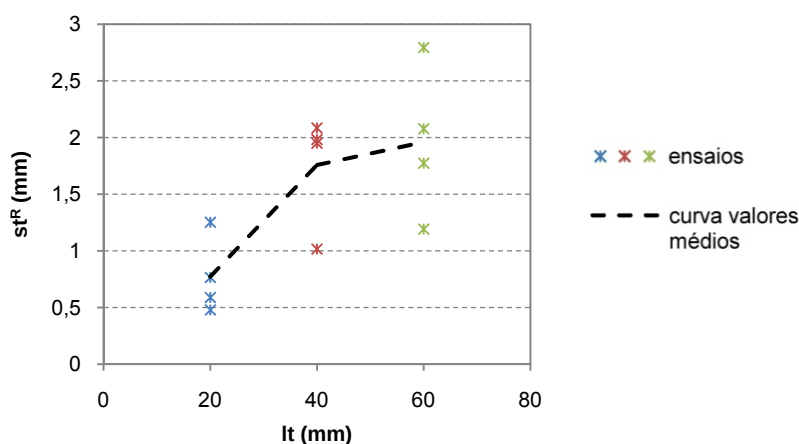


Figura 4.29 – Escorregamento máximo do compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica HNSM.

4.6.3. TÉCNICA VNSM

Os dados obtidos na campanha de ensaios desta técnica de reforço por inserção em ranhuras verticais (*Vertical Near Surface Mounted* – VNSM), vão ser apresentados e analisados à semelhança do que foi feito para as técnicas anteriores. As maiores semelhanças são de esperar entre as técnicas VNSM e HNSM já que têm natureza idêntica.

Informação sobre o comportamento geral do modelo de flexão

As curvas de comportamento tipo dos modelos deste grupo de ensaios estão ilustradas na Figura 4.30 em termos de relação Momento total (M_{tot}) e Deslocamento Vertical da secção a meio vão.

À semelhança do sucedido na técnica HNSM, aqui na técnica VNSM houve a rotura precoce dos provetes de comprimento de colagem de 20mm. No entanto, o comportamento inicial destes provetes de 20mm não foi tão bom (não teve a fase inicial de aumento de carga aplicada com pouco aumento da deformação), como o comportamento quando o reforço foi inserido na horizontal. A posição vertical do reforço origina maiores tensões nas fibras inferiores, proporcionando o início do escorregamento do compósito. Para os 15mm de altura de reforço e 20mm de comprimento de colagem, um movimento da fibra inferior desse, facilmente se repercute em toda a extensão colada, despoletando o escorregamento.

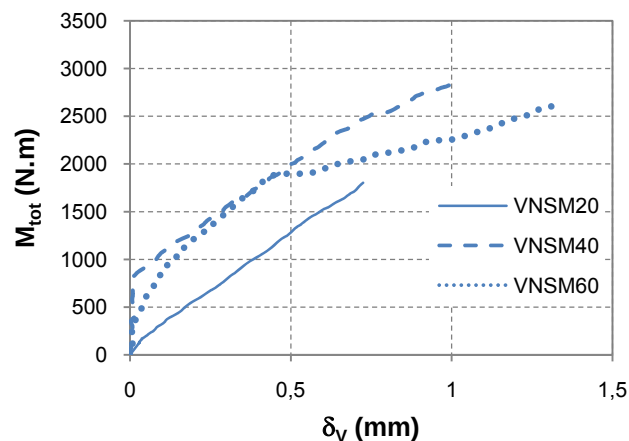


Figura 4.30 – Curvas Momento-Deslocamento representativas do comportamento geral dos modelos VNSM.

A carga necessária aplicar aos modelos para se fazer ruir a ligação madeira-CFRP, no caso dos comprimentos de colagem relevantes ($l_t=40$ e 60mm), foi a correspondente a um momento interno da ordem dos 2500N.m , semelhante ao verificado para a técnica HNSM. Por isso, a técnica VNSM constitui, também, uma técnica de reforço com melhores resultados do que a técnica de colagem exterior (EBR) com valores momento de apenas 2200N.m .

No Quadro 4.7 expõem-se os modos de ruína de cada ensaio, com a designação concordante com a nomenclatura introduzida no Quadro 4.4.

Quadro 4.7 – Modos de ruína obtidos nos ensaios da técnica VNSM.

Série	Provete	Modo de Ruína
$l_t=20\text{mm}$	VNSM20.1	R3+R1
	VNSM20.2	R3
	VNSM20.3	R3+R1
	VNSM20.4	R3
$l_t=40\text{mm}$	VNSM40.1	R3+R1
	VNSM40.2	R3+R1
	VNSM40.3	R3+R1
	VNSM40.4	R3+R1
$l_t=60\text{mm}$	VNSM60.1	R3+R5
	VNSM60.2	R3
	VNSM60.3	R3+R5
	VNSM60.4	R3+R5

A grande conclusão a retirar da forma como ruíram os provetes reforçados pela técnica VNSM é: roturas essencialmente despoletadas por escorregamento inicial do compósito, ocorrido por rotura por corte na resina (R3), em tudo semelhante ao que aconteceu na técnica HNSM. Da mesma forma também, pela constituição do reforço em 2 fiadas fisicamente distintas e associadas ao lado esquerdo e direito, as roturas destes provetes são normalmente a combinação de R3 com a rotura por corte da madeira (R1) ou mesmo a rotura por tracção do compósito (R5) (ver Figura 4.31 de distribuição percentual de ruínas).

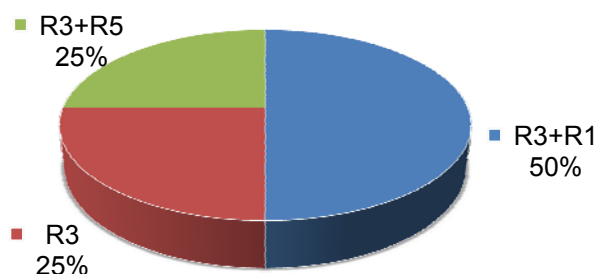


Figura 4.31 – Distribuição percentual dos modos de ruína registados nos ensaios da técnica VNSM.

A Figura 4.32 ilustra algumas fotografias dos diferentes modos de rotura exibidos nos ensaios.

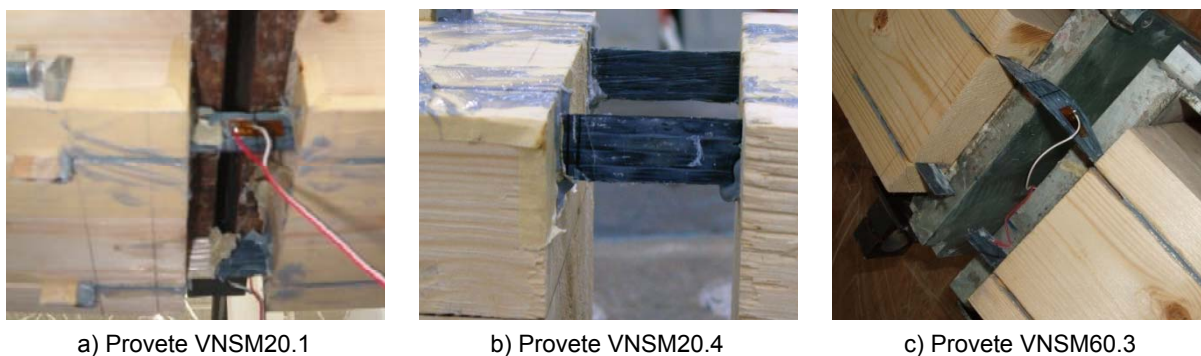


Figura 4.32 – Aspecto dos modos de rotura observados nos ensaios da técnica VNSM.

Informação sobre o desempenho do CFRP

Procedeu-se ao critério instituído na exposição dos resultados das técnicas anteriores e constituíram-se os gráficos da relação força no compósito vs. comprimento de colagem (Figura 4.33.a)) e da variação da extensão no CFRP vs. comprimento de colagem (Figura 4.33.b)) para todos os provetes das 3 séries VNSM20, 40 e 60.

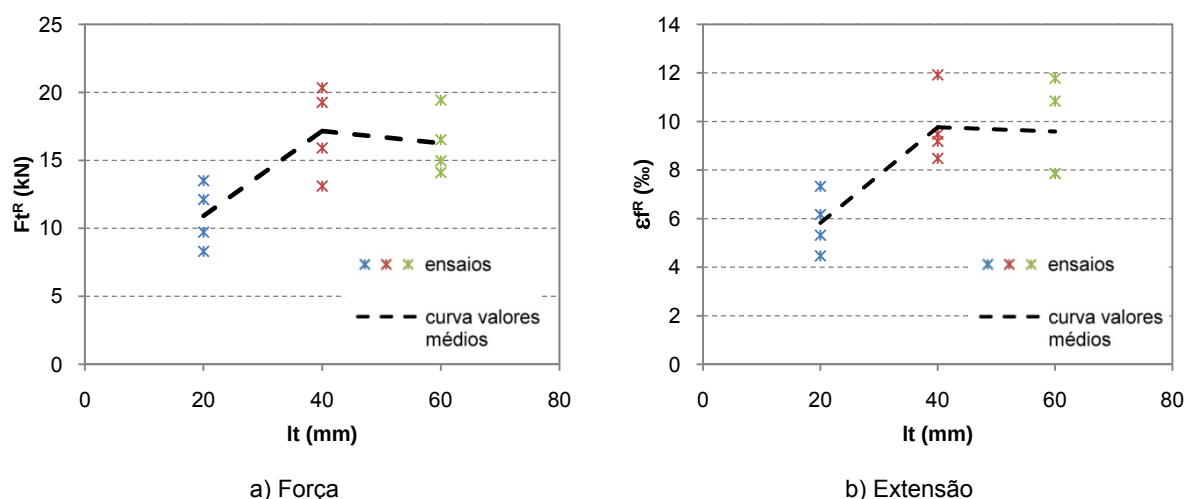


Figura 4.33 – Força e extensão máximas no compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica VNSM.

Uma vez mais se comprova que as duas grandezas apresentam curvas médias com andamentos semelhantes apesar de resultarem de registos de equipamentos (instrumentação) diferentes.

A análise dos valores da força máxima do CFRP (F_t^R) aponta para que o valor efectivo da força de ancoragem seja atingido entre os ensaios de $l_t=40\text{mm}$ e $l_t=60\text{mm}$, devido aos valores praticamente iguais dos F_t^R e ε_f^R nestas duas séries. Esse valor da força efectiva é aproximadamente de 17kN no caso VNSM, constituindo um valor maior do que o caso EBR (de 14kN), mas inferior ao da técnica HNSM (de 19kN).

Por observação da Figura 4.33.b) constata-se que o compósito conseguiu mobilizar nos ensaios valores da extensão última (ε_f^R) entre 9 e 10‰, ou seja, até 70% da extensão última à tracção do material (de acordo com especificações da ficha técnica do fornecedor). Estes valores demonstram o bom resultado

da aderência mobilizada na transferência de esforços madeira-CFRP, valores semelhantes aos observados na técnica HNSM e melhores do que o caso EBR.

Em contrapartida, o valor baixo da extensão observado na série $l_t=20\text{mm}$ expressa, uma vez mais, a insuficiência do comprimento de colagem para se desenvolver a força efectiva de ancoragem do compósito. Nesta situação acaba por ser condicionante o esgotamento da ligação devido ao valor elevado da tensão de corte desenvolvida na junta face à capacidade de absorção de corte da madeira, como se verá mais à frente neste item.

A Figura 4.34 representa os valores do módulo de elasticidade longitudinal do CFRP (E_f) avaliados para todos os provetes desta campanha de ensaios. Esses valores são comparados com o valor do $E_f=230\text{GPa}$ indicado pelo fornecedor, por forma a aferir-se a conformidade com o compósito realmente aplicado *in situ*. O gráfico mostra que os valores médios obtidos dos ensaios são muito semelhantes ao do fornecedor.

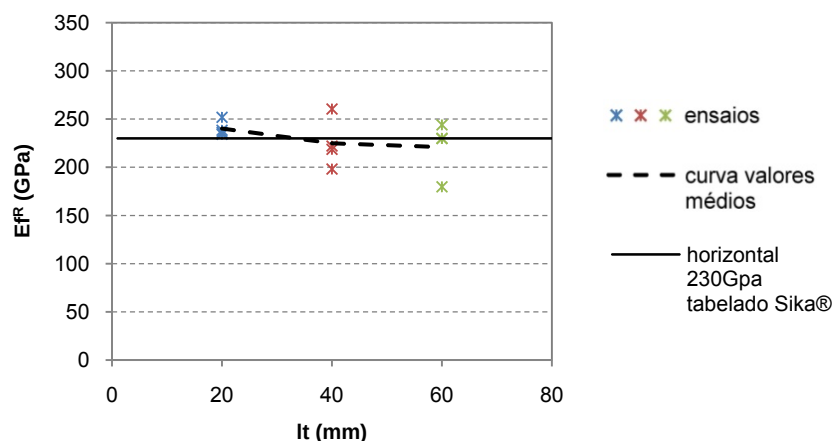


Figura 4.34 – Módulo de elasticidade secante (na rotura) para cada série de 20, 40 e 60mm da técnica VNSM.

Informação sobre o desempenho da junta madeira-CFRP

Na Figura 4.35 expõe-se a variação da tensão tangencial na rotura (τ_{med}^R) em função do comprimento de colagem (l_t) para os provetes das 3 séries em análise.

Além do decréscimo quase linear, já esperado, da tensão tangencial com o aumento do comprimento de colagem, nota-se na Figura 4.36, e à semelhança do que aconteceu na técnica HNSM, que é muito pequena a dispersão de resultados nos ensaios para $l_t=40$ e 60mm. Facto que é muito positivo e que indica haver controlo dos valores máximos de força de ancoragem esperados. Uma vez mais, sublinha-se o facto de a interface conseguir mobilizar tensões de corte (τ_{med}) da ordem de 7 a 11MPa, quando está em causa uma ligação à madeira.

Na Figura 4.36 apresentam-se os valores de escorregamento máximo atingidos aquando da rotura da ligação madeira-CFRP. Pode constatar-se que há mais escorregamento nos comprimentos de colagem maiores (40 e 60mm), cujas médias rondam os 2.0 e 2.4mm respectivamente, comparando com os 0.8mm de média de escorregamento na interface verificada para $l_t=20\text{mm}$. Estes valores de escorregamento para os comprimentos maiores ainda são superiores aos já grandes verificados para a técnica HNSM. Isto pode indicar que a execução das colagens não foi muito eficaz, deixando vazios. Em alternativa justificar-se pela grande espessura de resina usada para preencher o espaço da ranhura e

fazer aderir as fibras à madeira (espessura da ranhura de 3mm em comparação com a espessura das fibras inferior a 0.5mm). As deformações por corte do adesivo (distorções γ_{ad}) têm aqui responsabilidade nos valores grandes de escorregamento, pela forma como este é calculado na equação (4.5.) (consultar a Figura 4.15).

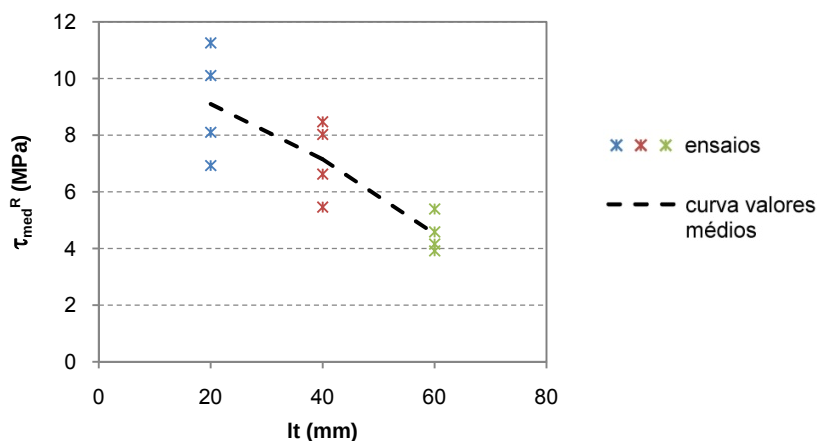


Figura 4.35 – Tensão tangencial na ligação (na rotura) para cada série de ensaio da técnica VNSM.

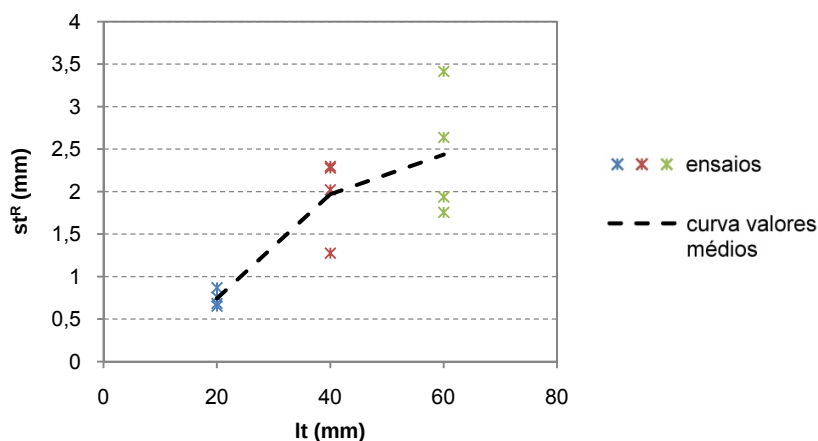


Figura 4.36 – Escorregamento máximo do compósito (na rotura) para cada série de ensaio da técnica VNSM.

4.7. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.7.1. COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE REFORÇO

Apresenta-se neste ponto uma comparação directa do desempenho das três técnicas de reforço testadas nesta campanha experimental relativa à análise da aderência do material compósito de CFRP (curado *in situ*) à madeira estrutural de Pinho Nórdico. A comparação incide sobretudo na análise da variabilidade das grandezas que foram objecto de interpretação no item 4.6, para cada técnica de reforço isoladamente.

Para se ter presente as técnicas de reforço, na Figura 4.37 ilustram-se os esquemas de cada uma, com a identificação do valor médio do braço (Z) das forças horizontais desenvolvidas durante o ensaio. Valor esse, que é médio e não exacto, pela compreensível dispersão da geometria dos provetes de madeira

(variações da ordem dos 2mm) e, ainda, pelo próprio molde de ensaio que não foi sempre o mesmo (variação do (Z) de 5mm) como se explicou no item 4.4 (ver Figura 4.10). De notar que os cálculos do momento actuante no provete e da força de tracção no compósito têm em consideração o tamanho do molde utilizado no ensaio.

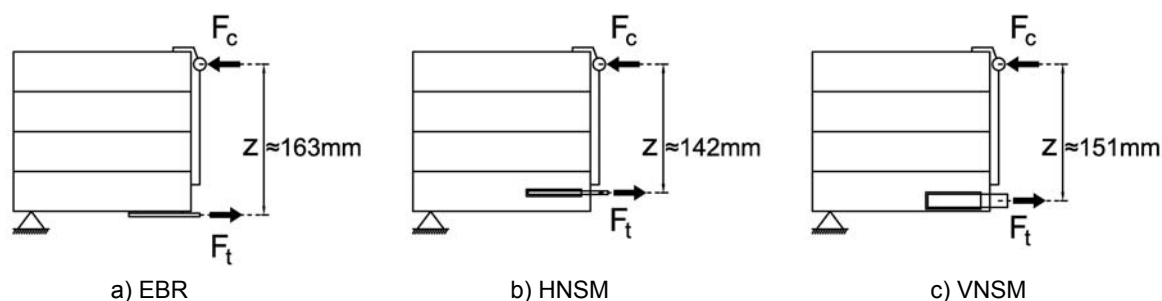


Figura 4.37 – Braço das forças horizontais para as diferentes técnicas de reforço.

Informação sobre o comportamento geral

A partir da informação exposta no Anexo 1 foi possível obter o Quadro 4.8 que resume os valores médios dos momentos últimos (na rotura) para cada série de colagem e segundo as 3 técnicas de reforço. Na Figura 4.38 representam-se as curvas respectivas de variação desses momentos últimos (valor médio) com a variação do comprimento de colagem e a técnica de reforço, por forma a perceber-se qual foi o caso que melhor desempenho apresentou.

Quadro 4.8 – Resumo dos momentos últimos (valor médio) obtidos.

Grandeza	Série	Técnica de Reforço					
		EBR		HNSM		VNSM	
M_{tot}^R (N.m)	$l_t=20\text{mm}$	2000		1556		1654	
	$l_t=40\text{mm}$	2452	$\Delta_{\text{max}} = 452\text{N.m}$	2497	$\Delta_{\text{max}} = 1063\text{N.m}$	2593	$\Delta_{\text{max}} = 939\text{N.m}$
	$l_t=60\text{mm}$	2242		2619		2462	

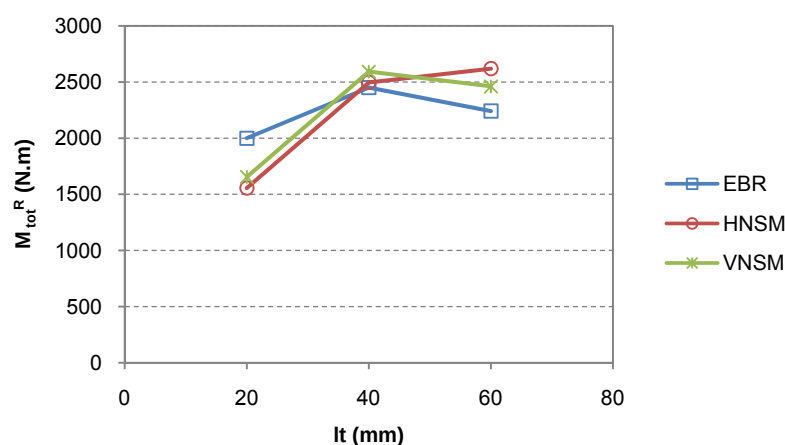


Figura 4.38 – Variação do momento máximo (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.

Segundo a Figura 4.37, era de esperar que os momentos últimos máximos (binário das forças F_c / F_t), se verificassem nos provetes de ensaio da técnica EBR por terem maior braço das forças (Z), mas tal não acontece. Os momentos máximos ocorreram nas técnicas de inserção em ranhuras (tipo NSM).

Uma vez que, a área da secção transversal e o perímetro de colagem do compósito são os mesmos para as 3 técnicas (ver Figura 4.39), pode concluir-se que o factor que justifica os maiores binários nas técnicas NSM é o efeito da transferência multidireccional de esforços (CFRP envolvido na madeira) para o corpo da madeira contrapondo a transferência simples (CFRP colado numa face) da técnica EBR.

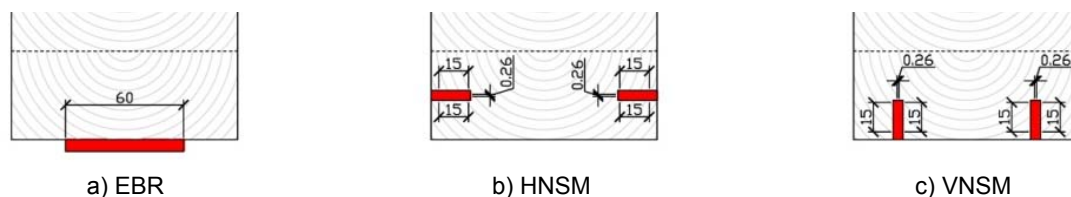


Figura 4.39 – Geometria da secção transversal do CFRP (em mm), para as diferentes técnicas de reforço.

Dos dados expostos no Quadro 4.8 e Figura 4.38 é possível inferir-se que nesta campanha de análise da aderência em modelos de flexão a amplitude do M_{tot}^R varia de 1500N.m a 2600N.m. Destaca-se, igualmente, que o incremento máximo desse momento é de $\Delta_{max}=900$ a 1000N.m nos casos NSM, o dobro do obtido para o equivalente em EBR ($\Delta_{max}=452$ N.m), quando se pensa ter atingido o comprimento efectivo de colagem do CFRP à madeira da ordem de $l_f=40$ a 60mm.

Informação sobre o desempenho do CFRP

A partir das curvas de valores médios representativos da variação da força máxima (ou tensão máxima) e da extensão máxima no compósito com o comprimento de colagem (3 séries), para as 3 técnicas de reforço, construíram-se os gráficos ilustrados nas Figuras 4.40.a) (força e tensão máxima) e 4.40.b) (extensão máxima). Os valores das grandezas aqui representadas constam nas informações contidas no Anexo 1.

Na Figura 4.40.a), o cálculo da tensão normal (σ_f^R) é directo porque em todas as técnicas de reforço foi mantida a mesma área da secção transversal de fibras de carbono (valor $60 \times 0.13 = 7.8 \text{ mm}^2$).

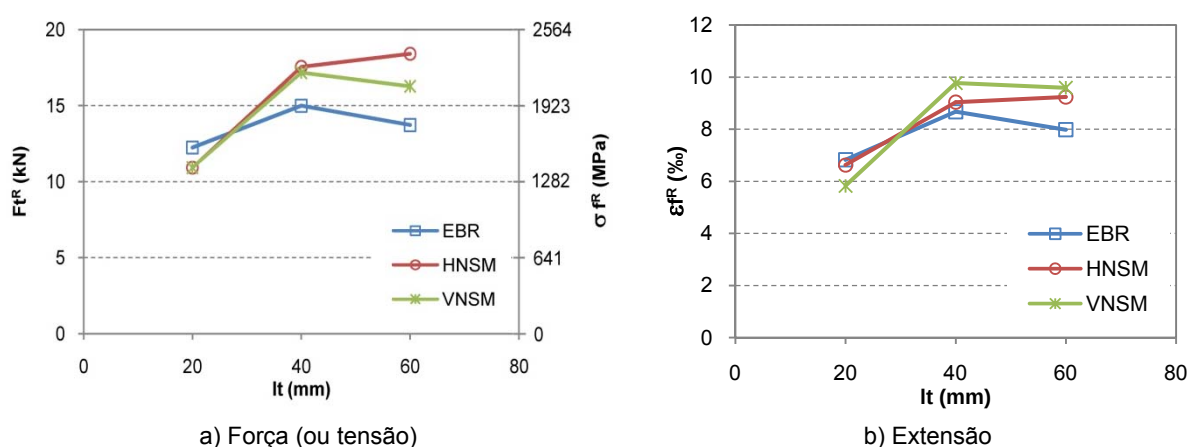


Figura 4.40 – Variação da força máxima (ou tensão) e extensão no compósito (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.

Em qualquer uma das 3 técnicas de reforço verifica-se que houve um acréscimo de F_t^R do comprimento de colagem de 20mm para o de 40mm. Para $l_t=20\text{mm}$ houve fenómenos de rotura prematura, não se conseguindo mobilizar eficazmente força no compósito. Entre a colagem de 40mm e 60mm o valor dessa força é praticamente constante, apontando para que se possa concluir que a força efectiva de ancoragem (valor médio) tenha sido atingida porque se mobilizou o comprimento efectivo de colagem também. As curvas de variação de extensão no compósito (Figura 4.40.b)) também indicam esta conclusão.

Pela análise da forma e da posição relativa dos picos nas curvas $F_t^R=f(l_t)$ e $\varepsilon_f^R=f(l_t)$, conclui-se que os comprimentos efectivos de colagem ($l_{t,ef}$), a partir dos quais se aumentar o comprimento não se traduz num aumento de resistência da ligação, para as técnicas EBR e VNSM se situa perto dos 40mm e para a técnica HNSM se situa apenas nos 60mm.

Se se analisar mais pormenorizadamente a evolução das curvas, pode-se arriscar que os comprimentos efectivos de colagem entre o Pinho Norueguês e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (CFRP) curado *in situ* sejam os seguintes:

- para a técnica de reforço de colagem exterior (EBR): $l_{t,ef} \approx 30\text{mm}$
- para a técnica de reforço de inserção em ranhuras horizontais (HNSM): $l_{t,ef} \approx 50\text{mm}$
- para a técnica de reforço de inserção em ranhuras verticais (VNSM): $l_{t,ef} \approx 40\text{mm}$

Sendo o material CFRP, um material com características mecânicas bem definidas e tabeladas pelo fabricante, comparando os valores máximos de resistência à tracção das fibras (f_f) com os valores mobilizados nestes ensaios (σ_f^R), pode-se inferir sobre o índice de aproveitamento (desempenho) do compósito na colagem à madeira. De acordo com o fabricante da SikaWrap Hex 230C (manta de fibras de carbono unidireccional), a resistência à tracção das fibras é de 3500MPa e o seu alongamento à rotura é de 15‰ (informação no item 3.3.2).

O Quadro 4.9 expressa, em percentagem, o nível de aproveitamento de compósito que se conseguiu colando-o em madeira. Os resultados apresentados englobam as 3 séries de comprimentos de colagem testadas em cada uma das 3 técnicas de reforço.

Quadro 4.9 – Aproveitamento do compósito de carbono em cada técnica de reforço.

Séries	EBR	HNSM	VNSM
	σ_f^R / f_f (%)	σ_f^R / f_f (%)	σ_f^R / f_f (%)
$l_t = 20\text{mm}$	1569/3500= 45%	1399/3500= 40%	1400/3500= 40%
$l_t = 40\text{mm}$	1921/3500= 55%	2248/3500= 64%	2200/3500= 63%
$l_t = 60\text{mm}$	1759/3500= 50%	2358/3500= 67%	2085/3500= 60%
Valor médio esperado: $l_t > l_{t,ef}$	53%	67%	61%

Conclui-se na última linha do Quadro 4.9, qual é o valor máximo de rentabilidade esperado para uma ligação madeira-CFRP para cada uma das 3 técnicas de reforço testadas nesta campanha experimental. Conclusão com base no andamento das curvas ilustradas na Figura 4.40 que aponta para estabilização das ordenadas de tensão no compósito a partir da abscissa correspondente aos comprimentos efectivos ($l_{t,ef}$) já referidos de cada técnica. Cálculo feito admitindo as seguintes tensões efectivas de ancoragem:

- para a técnica de reforço de colagem exterior (EBR): $\sigma_{f_{max}}^R \approx 1850\text{MPa}$
- para a técnica de reforço de inserção em ranhuras horizontais (HNSM): $\sigma_{f_{max}}^R \approx 2350\text{MPa}$
- para a técnica de reforço de inserção em ranhuras verticais (VNSM): $\sigma_{f_{max}}^R \approx 2150\text{MPa}$

Nestes ensaios comprova-se que o compósito conseguiu mobilizar extensões últimas na ordem de 8 a 10‰ nas técnicas NSM, ou seja, até próximo de 70% da extensão última de tracção axial do material ($\epsilon_{\max}=15\text{‰}$ conforme especificações técnicas do fornecedor). Estes valores demonstram o bom resultado da aderência mobilizada na transferência de esforços madeira-CFRP, sobretudo no comportamento da técnica NSM relativamente aos menores valores observados no caso EBR.

Para intervenções de reforço à flexão em vigas de madeira sugere-se que se aplique a técnica de reforço HNSM, conseguindo uns 5% de ganho no rendimento do compósito aplicado, comparado ao reforço em ranhuras verticais.

Melhorias no processo de execução do reforço podem levar a valores ainda maiores de rendimento, designadamente: aumentar a quantidade relativa de fibras em cada ranhura diminuindo a quantidade de resina, ou usar algum mecanismo de injeção de resina na ranhura de dentro para fora reduzindo os vazios na ligação colada, ou até usar na técnica NSM o reforço de fibras de carbono em laminado (em vez do curado *in situ*) para facilitar a execução.

Na Figura 4.41 ilustram-se as curvas de variação do módulo de elasticidade longitudinal das fibras (E_f^R) função da variação do comprimento de colagem e das técnicas de reforço. Em qualquer das circunstâncias aqui representadas, o gráfico mostra que os valores médios dessa grandeza em qualquer das 3 técnicas de reforço confirmam o valor indicado à partida pelo fornecedor do sistema, isto é, $E_f=230\text{GPa}$. Os valores experimentais desta campanha para o módulo de elasticidade podem ser consultados nos Quadros incluídos no Anexo 1.

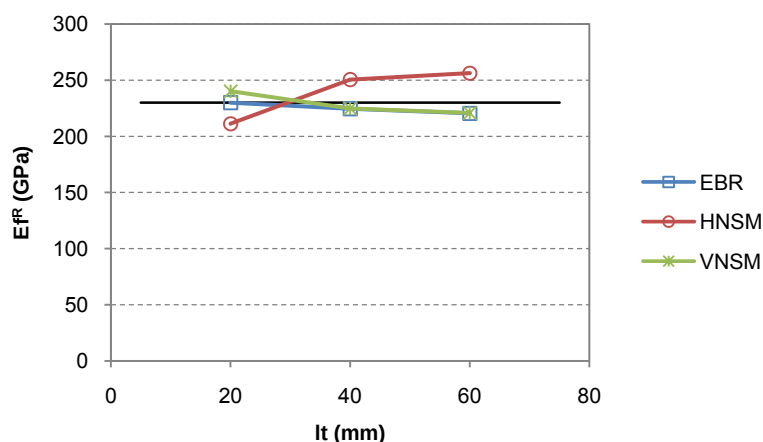


Figura 4.41 – Variação do módulo de elasticidade secante do compósito (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.

Informação sobre o desempenho da junta colada

A partir das curvas de valores médios representativos da variação da tensão tangencial média (τ_{med}^R) na interface madeira-CFRP com o comprimento de colagem (3 séries) para as técnicas de reforço estudadas, foi possível construir o gráfico ilustrado na Figura 4.42.

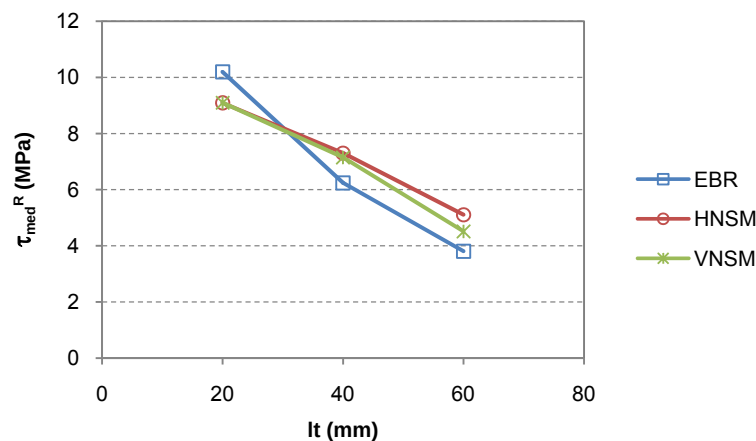


Figura 4.42 – Variação da tensão tangencial na interface (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.

O andamento decrescente da grandeza τ_{med}^R é compreensível por tudo o que foi concluído anteriormente. Surpreendente é o facto de, para $l_t=20\text{mm}$, se terem obtido valores de tensão tangencial média na interface que chegaram aos 9MPa nas técnicas NSM e ultrapassaram os 10MPa na técnica EBR. Sabendo que aqui, os modos de rotura foram essencialmente corte pela madeira (R1), torna-se extraordinário a constatação de tais valores de tensão aplicada para fazer ruir a ligação. Recorde-se que madeira de classe C30 tem resistência característica ao corte $f_{v,k}=3.0\text{MPa}$ e resistência à tracção paralela ao fio $f_{t,0,k}=18\text{MPa}$ (EN 338, 2003). Conclui-se que o mecanismo de aderência aqui testado, solicita de forma mista a madeira ao corte e à tracção, porque a penetração de resina nos poros da madeira pode formar um bloco nas primeiras camadas de fibras da madeira, criando “base” para solicitá-las à tracção. A ruína parece ser despoletada por tensão de pico na interface, e não por tensão média, uma vez que as ruínas nos comprimentos de colagem maiores, aconteceram para τ_{med}^R cada vez menores.

Note-se que na madeira, material natural, os valores característicos de resistência podem ser bastante inferiores aos valores médios. Ukyo e Masuda (2006) testaram um método mais fiável de avaliação da resistência ao corte de madeira da mesma espécie da usada aqui (Pinho Nórdico – *Norway Spruce*), onde se obtiveram valores médios numa interface 30x30mm de 9.8MPa e valores de pico de 15.6MPa.

A ductilidade de uma estrutura é entendida como a propriedade de ela se deformar sob esforço mais ou menos constante antes de romper, avisando assim através de deformação a sua rotura eminente. Daí que, até quando se projecta uma intervenção de reforço, seja bom que esse reforço permita ductilidade à estrutura para níveis de carga perto da ruína.

A Figura 4.43 expõe as curvas de variação média do escorregamento máximo na interface em função do comprimento de colagem e do tipo de técnica de reforço. A observação deste gráfico mostra existir maiores escorregamentos nas técnicas de reforço NSM que, mais uma vez, sustenta a classificação de a inserção em ranhuras ser uma melhor opção de reforço.

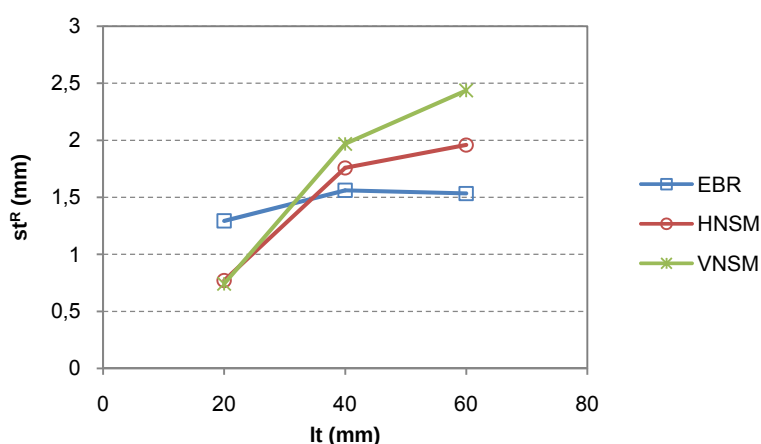


Figura 4.43 – Variação do escorregamento máximo na interface (valor médio) com o comprimento de colagem e a técnica de reforço.

Visto de outro lado, os maiores valores de escorregamento da junta para as técnicas NSM justificam-se por haver uma espessura considerável de resina na ranhura para a pouca quantidade de fibras de carbono presente. E por isso a parcela de distorção da resina (por esforço de corte) toma, nesse caso, valor significativo, aumentando o valor total de escorregamento. Não se deve esquecer que os eventuais vazios dentro da ranhura de reforço podem também contribuir para um maior escorregamento.

Para analisar o controlo da ductilidade olha-se não só ao escorregamento como também ao desvio padrão (ou coeficiente de variação) obtido na campanha de ensaios. Quanto maior escorregamento maior ductilidade tem a estrutura reforçada, e quanto menor o coeficiente de variação obtido na campanha experimental melhor é o controlo dessa ductilidade que se pode ter em projecto.

O Quadro 4.10 sintetiza os valores da Figura 4.43 e acrescenta a informação do coeficiente de variação desses resultados de escorregamento máximo na junta obtidos nos 4 ensaios de cada série.

Quadro 4.10 – Estimativa da confiança na ductilidade do reforço em cada técnica de reforço.

Séries	EBR		HNSM		VNSM	
	s_t^R (mm)	CV	s_t^R (mm)	CV	s_t^R (mm)	CV
$l_t = 40\text{mm}$	1.56	33%	1.76	28%	1.97	24%
$l_t = 60\text{mm}$	1.54	42%	1.96	34%	2.44	31%

Conclui-se que a técnica VNSM é, não só a mais dúctil, como também a que teve ensaios experimentais mais próximos uns dos outros, olhando apenas para o comprimento de 60mm onde, previsivelmente, já se ultrapassou o comprimento efectivo de colagem. Não se pode, no entanto, falar em bom controlo de ductilidade de qualquer uma destas técnicas de reforço, porque estamos com níveis de variação de ensaios de 30%, que é um erro demasiado grande para se considerar em projecto.

Em VNSM, com $l_t > 60\text{mm}$, podem esperar-se escorregamentos máximos de 2.5mm (valor médio) ou qualquer um dos extremos 1.7mm (valor inferior) e 3.2mm (valor superior). É uma variação considerável, justificada pela natureza da madeira, de características mecânicas muito variáveis, e pelo

próprio reforço com material curado *in situ*, onde uma grande componente de experiência do operador de aplicação do reforço pode influenciar os resultados.

Em qualquer uma das três técnicas de reforço aqui testadas, se mostrou o bom potencial de aplicação do reforço de CFRP em madeira.

A técnica EBR possibilita uma mobilização do seu potencial máximo de transferência de esforços entre o compósito e a madeira num comprimento de colagem inferior ao das outras duas técnicas. Constitui, assim, a melhor escolha no caso de haver pouco comprimento de amarração do compósito disponível na estrutura de madeira, quando há necessidade imediata de desenvolver grandes forças no mesmo.

A técnica HNSM apresenta-se como sendo a que consegue transmitir maiores níveis de carga às fibras do compósito, antes da rotura da junta, chegando-se a imprimir tensão de tracção nas fibras de carbono de quase 70% da sua resistência mecânica tabelada pelo fabricante.

A técnica VNSM permite a maior ductilidade da estrutura, atingindo escorregamentos de 2.5mm num comprimento de colagem de 60mm, informando assim, mais eficazmente do que as outras técnicas, a eminente falha do reforço (e falha da estrutura).

4.7.2. COMPARAÇÃO COM JUNTAS BETÃO-FRP

Face ao estudo exposto no item 4.6, relativo ao tema comportamento da aderência na interface madeira-CFRP para as 3 técnicas de colagem do compósito, achou-se conveniente confrontar as suas principais conclusões com estudos semelhantes relativos à aderência do compósito ao betão. Nesta área, o estado actual dos conhecimentos retratados em vários documentos, em número bem superior aos disponíveis para juntas madeira-FRP, permitiram balizar os principais aspectos, dificuldades e níveis de desempenho do compósito quando utilizado no reforço de estruturas de betão armado.

Dessa forma, o objectivo deste item é o de, primeiro, reunir um conjunto de trabalhos experimentais sobre o estudo de aderência de ligações betão-CFRP, processados por técnicas de adição do compósito iguais às descritas neste caso, a técnica EBR e a técnica NSM. Seguidamente, realizar uma análise comparativa das conclusões desses estudos com as obtidas nesta tese para os três níveis seguintes: análise do comportamento geral dos modelos, análise do desempenho do compósito e análise do desempenho da junta colada.

De forma a realizarem-se análises comparativas viáveis entre os modelos de betão e os de madeira, seleccionaram-se os trabalhos de Dimande (2003) e Travassos (2004) no domínio da técnica EBR e o documento de Sena-Cruz (2004) para o âmbito da técnica NSM. No Quadro 4.11 expõem-se os modelos experimentais, o nº de provetes, o tipo de junta e os respectivos autores dos trabalhos escolhidos para esta comparação com a campanha experimental de Sérgio Silva e analisada nesta tese (Rui Barbosa, 2008).

Informações e critérios sobre a selecção dos modelos escolhidos para esta análise relativos a cada documento referido estão reunidos no Anexo 2.

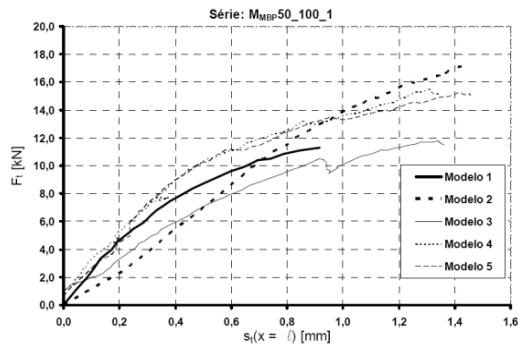
Quadro 4.11 – Programas experimentais em comparação.

Técnica de Reforço	Tipo de Junta	Modelos Experimentais de Aderência	Nº. de Provete	Trabalho/Autor
			28	Dimande (2003) (Tese Mestrado)
EBR	Betão-CFRP		6	Travassos (2004) (Tese Mestrado)
	Madeira-CFRP		12	Sérgio Silva (2004) Rui Barbosa (2008) (Tese Mestrado Integrado)
	Betão-CFRP		36	Sena-Cruz (2004) (Tese Doutorado)
NSM	Madeira-CFRP		24	Sérgio Silva (2004) Rui Barbosa (2008) (Tese Mestrado Integrado)

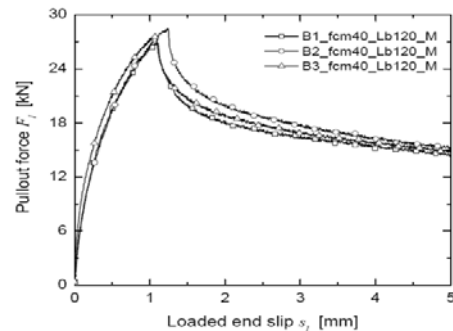
Análise do comportamento geral dos modelos

A Figura 4.44 ilustra dois gráficos com o aspecto do comportamento geral de ensaios de aderência em flexão, para juntas betão-CFRP e para as 2 técnicas de reforço EBR (caso (a)) e NSM (caso (b)).

O gráfico da Figura 4.44.a) é do trabalho de Dimande (2003) e apresenta a evolução da força de tracção no compósito em função do escorregamento na ligação. Foi escolhido este gráfico por haver um homólogo no trabalho de Sena-Cruz (2004) (Figura 4.44.b)) e, dessa forma, se identificar a principal diferença de comportamento geral da aderência de uma ligação realizada pela técnica EBR de uma outra feita pela técnica NSM. Ambos os gráficos se referem a séries de ensaio para comprimentos de aderência suficientemente grandes, na qual foi possível mobilizar o comprimento efectivo de colagem da ligação betão-CFRP, sem roturas prematuras.



a) Dimande (2003): técnica EBR, $l_f=100\text{mm}$



b) Sena-Cruz (2004): técnica NSM, $l_f=120\text{mm}$

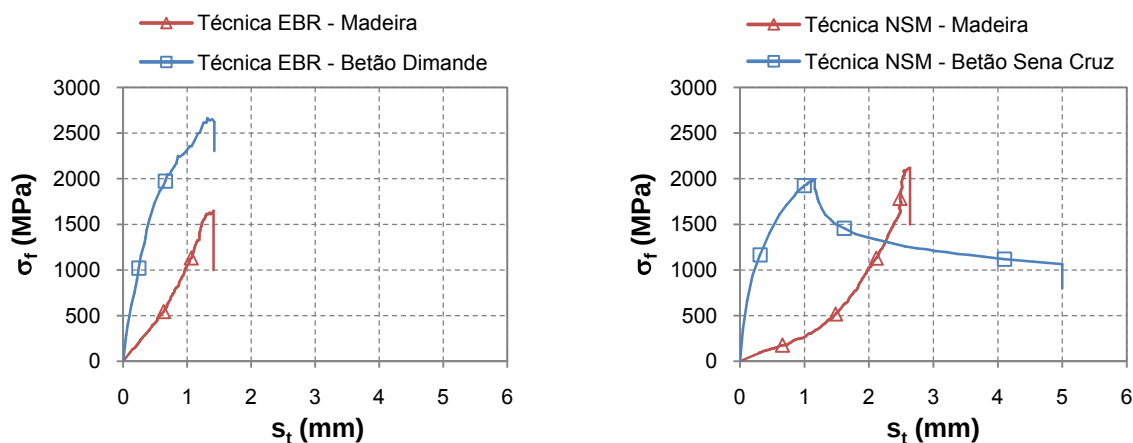
Figura 4.44 – Ensaio de aderência em flexão com juntas betão-CFRP.

Vê-se pela Figura 4.44 que o comportamento da ligação betão-CFRP é bastante diferente em cada técnica de reforço, não obstante de apresentarem semelhanças até ao pico de resistência, mas depois do pico, a rotura é frágil na técnica EBR, e bastante dúctil na técnica NSM. Na técnica NSM verifica-se o conhecido comportamento da ligação em fase fendilhada do betão: após a abertura da 1ª fenda, a força resistente da ligação cai para metade da capacidade de carga, e a ligação é capaz de manter essa resistência residual durante um deslizamento do reforço de cerca do triplo daquilo que escorregou até ao pico de carga. Atinge-se na técnica NSM 5mm de escorregamento contra apenas 1.4mm na técnica EBR. Lembra-se que os comprimentos de colagem que estão em causa são suficientemente grandes: $l_t \geq l_{t,ef}$.

Numa tentativa de comparar juntas madeira-CFRP e betão-CFRP, na Figura 4.45 apresentam-se dois diagramas em que cada um tem uma curva representativa de um ensaio em madeira a par com uma outra curva representativa de um ensaio em betão. Os diagramas estão expostos em termos de tensões normais no compósito (σ_f) vs. escorregamento na interface (s_t) para possibilitar a comparação entre todos os ensaios, sendo que a tensão é obtida dos originais da Figura 4.44 dividindo a força de tracção pela respectiva área transversal de fibra.

Na técnica EBR, a madeira tem um comportamento significativamente pior do que o betão, embora se mantenha o mesmo escorregamento máximo na ligação ($\approx 1.4\text{mm}$), o que significa igual ductilidade da estrutura reforçada. Para a madeira, as tensões máximas que se desenvolveram no compósito foram de 1600MPa contra os 2600MPa no betão, ou seja, na madeira desenvolveram-se forças que só chegaram a 60% daquelas desenvolvidas no betão. E isto para modelos de ensaio em tudo idênticos (ver Quadro 4.11), para largura de colagem de 60mm na madeira e 50mm no betão, para uma só camada de compósito de 0.13mm de espessura na madeira e 0.117mm no betão, e para comprimentos da ordem de grandeza dos efectivos para esta técnica de reforço: 60mm na madeira e 100mm no betão. Também é aceitável afirmar que na técnica EBR o reforço de estruturas de madeira com CFRP é medianamente

eficaz, porque se admite existir uma concentração demasiado alta de esforços na ligação que a textura ortotrópica da madeira não permite dissipar essa energia tão bem como o betão o faz. Uma ressalva para o facto de, ainda assim, se ter conseguido, na madeira, um bom rendimento do compósito de $\approx 50\%$ (resistência das fibras de carbono SikaWrap Hex 230C: $f_f=3500\text{MPa}$).



a) Técnica EBR: madeira EBR60.3 e betão M_{MBP50_100_1}-modelo4

b) Técnica NSM: madeira VNSM60.2 e betão fcm40_Lb120_M-B3

Figura 4.45 – Diagramas Tensão-Escorregamento em juntas betão-CFRP e madeira-CFRP.

Sublinha-se que o perímetro de transferência de tensões é muito maior na técnica NSM porque apresenta 3 faces contra apenas 1 face da técnica EBR (Figura 4.46). Este facto constitui uma mais-valia para a aderência, e explica porque é que, nos ensaios com madeira, a técnica NSM atingiu 2100MPa (Figura 4.45.b)) contra os 1600MPa da técnica EBR (Figura 4.45.a)).

Na Figura 4.45.b), por haver demasiada espessura de resina no reforço NSM da madeira, notam-se escorregamentos bastante altos, que podem mesmo condicionar a força máxima que se consegue transferir ao compósito no caso de se atingir o limite de distorção da resina e ocorrer rotura coesiva na resina. A Figura 4.46.d) apresenta a técnica de reforço recomendada com vista a obtenção do maior rendimento das fibras de carbono empregues, como norma de boa prática, quer na madeira quer no betão.

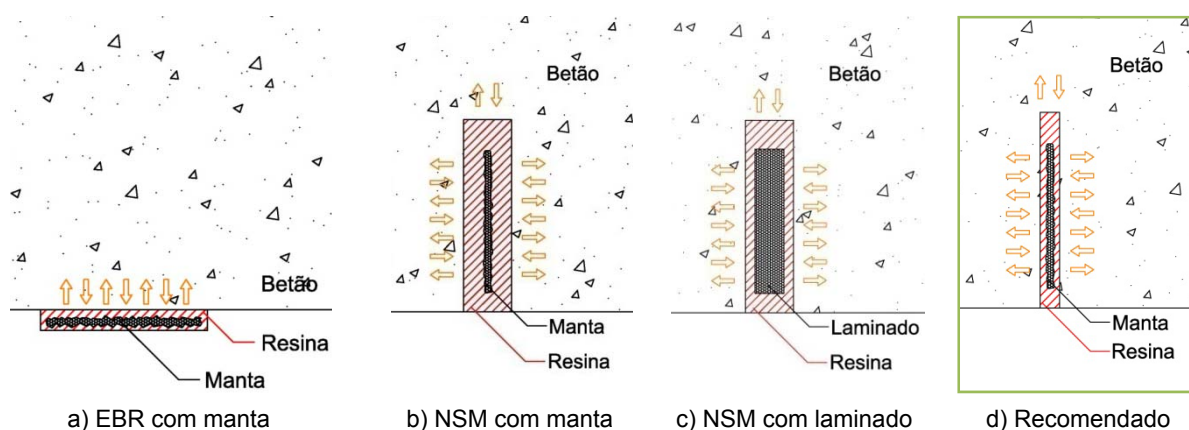


Figura 4.46 – Pormenor de secção transversal reforçada com CFRP.

Conclui-se que a colagem que conduz ao uso mais eficiente do reforço de CFRP empregue, é aquela que dá o maior perímetro de colagem (perímetro de transferência de carga) para uma dada área de fibras, ou seja, quanto mais fino e alongado for o reforço e colado a toda a volta (técnica NSM), maior é a tensão de tracção que se consegue transmitir ao reforço.

Análise do desempenho do compósito

Reunindo de todos os trabalhos em comparação, as informações relativas ao valor máximo da extensão última do compósito (máximo ε_f^R) e da tensão tangencial média no comprimento da junta colada (máximo τ_{med}^R), foi possível construir o Quadro 4.12 (consultar Anexo 2). A partir do conhecimento da extensão última do CFRP avaliou-se o nível de rendimento atingido pelo compósito (Rend (%)) face ao valor último avaliado em tracção axial e definido nas fichas técnicas do fornecedor.

Quadro 4.12 – Programas experimentais em comparação.

Junta	Técnica de Reforço	Desempenho do compósito		Desempenho da junta
		ε_f^R (‰)	Rend (%)	τ_{med}^R (MPa)
Madeira-CFRP	EBR	8.67	57.8	10.2
	NSM	9.77	65.1	9.1
Betão-CFRP	EBR	11.12 (Dimande)	71.7	7.1
		11.68 (Travassos)	75.4	1.2
	NSM	12.6	84.0	18.3

Rend (%) = $\varepsilon_f^R / \varepsilon_{max} \times 100$; ε_{max} – extensão última do FRP indicada na ficha técnica

Em termos de desempenho do compósito, quer em juntas madeira-CFRP como betão-CFRP, do Quadro 4.12 constata-se que a técnica NSM mobilizou maior rendimento do compósito relativamente à EBR, sendo o nível de valores maior para o caso das juntas betão-CFRP do que a ligação desse à madeira. Contudo, destaque-se o facto de a madeira ter conduzido ao aproveitamento do compósito acima dos 50%.

Análise do desempenho da junta colada

Ainda a propósito do Quadro 4.12 verifica-se que os níveis de tensões de corte nas juntas que envolvem madeira são, na técnica EBR superiores aos conseguidos no betão, e na técnica NSM inferiores aos conseguidos no betão. Em qualquer caso, as maiores tensões tangenciais médias nas juntas verificaram-se para os menores comprimentos ensaiados.

Em madeira, as tensões de corte verificadas na junta EBR foram idênticas às da junta NSM, 10.2MPa e 9.1MPa respectivamente, ambas para $l_t=20\text{mm}$.

Nas juntas betão-CFRP, o menor comprimento de colagem analisado por Travassos (2004) foi de 200mm, ou seja, já bastante grande, e por isso o maior valor de tensão tangencial médio na interface verificado foi de apenas 1.2MPa. Toma-se como capacidade da junta EBR betão-CFRP, o valor obtido por Dimande (2003) de 7.1MPa, para $l_t=25\text{mm}$. Nas juntas EBR de madeira-CFRP verificaram-se tensões de corte aproximadamente 30% maiores do que nas juntas EBR de betão-CFRP.

Um dado interessante é verificar-se um grande aumento de tensão de corte na junta betão-CFRP quando esta é executada segundo a técnica NSM, face à técnica EBR. Passou a verificar-se 18.3MPa

de tensão tangencial na junta NSM, num comprimento de colagem de 40mm. É um valor bastante superior ao valor de 9.1MPa verificado na junta homóloga em madeira.

Ainda no âmbito da análise do desempenho das juntas coladas, procura-se expor nos próximos parágrafos a variação da tensão normal máxima no CFRP (valor médio na rotura) em função do comprimento de colagem da junta.

Destacando, primeiro, a técnica de colagem EBR, na Figura 4.47 expõe-se a distribuição dos pontos representativos do valor médio de cada série de ensaios (juntas madeira-CFRP e betão-CFRP) incluídos nos trabalhos tomados como base de análise (Dimande, 2003; Travassos, 2004; Rui Barbosa, 2008). Estes valores constam dos quadros incluídos no Anexo 2. Ainda nessa figura, faz-se representar as curvas de andamento da tensão no compósito para as 2 juntas em comparação, de acordo com o modelo analítico recomendado no documento FIB Bulletin 14 (CEB-FIP, 2001), aspecto a desenvolver no próximo Capítulo 5.

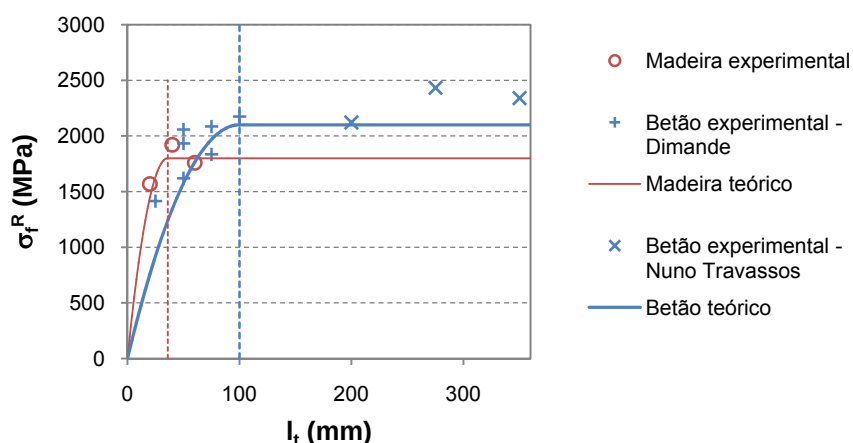


Figura 4.47 – Valores médios da tensão normal máxima no compósito em função do comprimento de colagem para juntas madeira-CFRP e betão-CFRP (técnica EBR).

Do gráfico da Figura 4.47 conclui-se que o betão é capaz de transferir maiores forças por unidade de área ao reforço do que a madeira, estando-se no entanto a comparar valores máximos bastante idênticos (1800MPa para a madeira e 2100MPa para o betão), o que é uma grande “vitória” para a madeira, visto não ser ainda uma aplicação comum deste reforço.

Conclui-se que a madeira tem boa capacidade de aderência ao CFRP. Sublinha-se que o comprimento de colagem (valor efectivo) necessário para desenvolver a força máxima da ligação, no caso da madeira, parece ser menos de metade do necessário no betão, o que é uma vantagem na aplicação em madeira sobre a aplicação em betão.

Expondo agora a técnica NSM, a Figura 4.48 ilustra a distribuição equivalente ao processo descrito para a construção da figura anterior, desta vez representativo dos ensaios incluídos nos trabalhos de Sena-Cruz (2004) e no actual documento de Rui Barbosa (2008).

Quanto à tensão máxima transmitida ao reforço (σ_f^R) na técnica NSM, os comportamentos que se verificaram na técnica EBR invertem-se, passando os melhores resultados a verificarem-se na inexperiente aplicação em madeira, face à já usual aplicação em betão. O reforço NSM em madeira

atinge níveis de tensão de 2200MPa, enquanto o reforço NSM em betão só atinge 2100 MPa, para comprimentos de colagem suficientemente grandes.

Assim sendo, não se deve concluir que a madeira tem maior capacidade de transferência de carga para o reforço do que o betão, na técnica NSM, mas sim que ambos conseguem valores bastante elevados de tensão normal no compósito (acima de 2000MPa). A ligação madeira-CFRP comporta-se, sobretudo, bastante melhor quando efectuada pela técnica NSM, pois σ_f^R de 1800MPa em EBR onde já tinha comportamento bastante bom comparando com o betão, subiu para 2200MPa na técnica NSM.

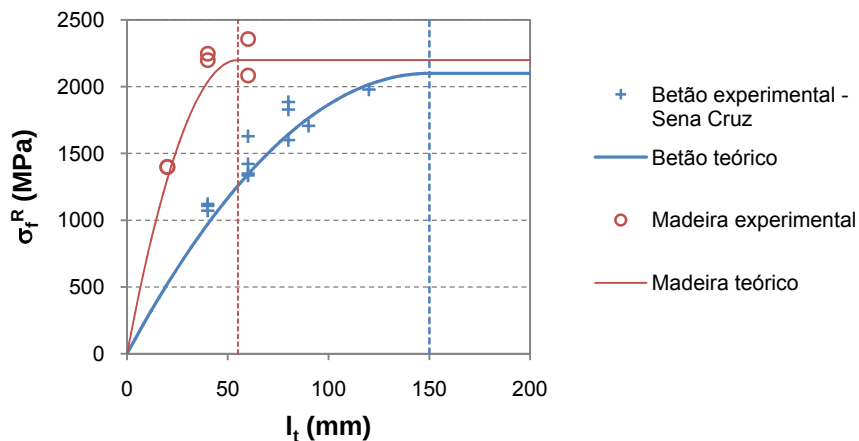


Figura 4.48 – Valores médios da tensão normal máxima no compósito em função do comprimento de colagem para juntas madeira-CFRP e betão-CFRP (técnica NSM).

A vantagem da aderência madeira-CFRP se desenvolver totalmente para comprimentos de colagem bastante inferiores aos necessários na ligação com betão, mantém-se igualmente nesta técnica de reforço.

No Quadro 4.13 resumem-se os valores esperados máximos da força por unidade de área transversal (σ_f^R) que se consegue transmitir ao compósito e, a indicação do comprimento mínimo de colagem que se tem de executar para se garantir essa aderência máxima ($l_{t,ef}$).

Quadro 4.13 – Resumo das principais características das juntas com madeira e com betão.

Grandezas	EBR			NSM		
	Madeira	Betão	Mad/Bet	Madeira	Betão	Mad/Bet
$\sigma_{f \max}^R$ (MPa)	1800	2100	86%	2200	2100	105%
$\varepsilon_{f \max}^R$ (‰)	7.8	8.8	89%	9.6	14	69%
$l_{t,ef}$ (mm)	36	100	36%	55	150	37%

Na técnica EBR, a aplicação do reforço de CFRP curado *in situ* em madeira, consegue valores de eficiência no compósito quase 90% daqueles conseguidos pela aplicação, já generalizada, do mesmo reforço de CFRP em betão. Com a vantagem de se conseguir tal nível de carga na madeira, usando apenas um comprimento de colagem que é 3 vezes inferior ao necessário no betão, ou seja, há muito menos desperdício de compósito na aplicação em madeira.

Na técnica NSM, a tensão máxima transmitida ao reforço de CFRP tem um aumento considerável daquela conseguida na técnica EBR, chegando mesmo a superar a aplicação NSM em betão. O comprimento necessário de colagem em madeira aumenta ligeiramente da técnica EBR para a técnica NSM. Contudo, no betão verifica-se exactamente a mesma coisa, mantendo-se por isso, na madeira, uma poupança de 3 vezes o comprimento de colagem necessário. A técnica NSM, constitui assim, uma aplicação ainda mais eficiente do compósito de carbono.

4.8. CONCLUSÃO

Tendo presente os objectivos desta dissertação e a informação resultante do tratamento e análise da campanha de ensaios de aderência em flexão é possível resumir em alguns parágrafos as principais conclusões deste capítulo.

Primeiro, os critérios estabelecidos na campanha experimental relativos ao modelo de ensaio, à instrumentação disponível e às metodologias de observação, medição e análise mostraram serem adequados para a análise do comportamento de juntas coladas madeira-CFRP nas 3 técnicas de reforço correntemente usadas na construção civil, a colagem exterior EBR e a selagem numa ranhura superficial NSM, nas suas vertentes vertical (VNSM) e horizontal (HNSM).

A prova do sucesso deste programa experimental está na vasta gama de grandezas observadas quer por registo directo do ensaio ou posteriormente calculados:

- momento flector total aplicado: M_{tot} [N.m]
- força de tracção no compósito: F_t [kN]
- tensão no compósito: σ_f [MPa]
- tensão tangencial média na interface: τ_{med} [MPa]
- deslocamento vertical da zona central do ensaio: δ_v [mm]
- abertura horizontal ao nível do compósito: δ_H [mm]
- extensão do compósito na zona descolada (na zona central): ε_f [microstrain]
- escorregamento do compósito: S_t [mm]

Como principal nota para o futuro sublinha-se a necessidade de instrumentar a junta colada madeira-CFRP com vários extensómetros eléctricos por forma a ser possível registar a lei de distribuição da mobilização do compósito em cada nível de carga (valor da extensão) em função da posição do extensómetro na junta. Com esta informação será admissível prever a lei de distribuição das tensões de corte na junta e detectar um valor próximo da tensão máxima de pico responsável, geralmente, pelo início dos modos de ruína prematuros das técnicas de colagem.

Em termos gerais, será possível tirar algumas ilações relativamente ao comportamento relativo entre as 3 técnicas de reforço analisadas. Qualquer uma delas mostrou ser exequível e rentável para aplicações de reforço de madeira MLC com compósitos de CFRP curados *in situ*.

A técnica EBR possibilita a mobilização da força máxima de transferência de esforços entre o compósito e a madeira num comprimento de colagem efectivo inferior ao das outras duas técnicas. Constitui, assim, a melhor escolha no caso de haver pouco comprimento de amarração do compósito disponível na estrutura de madeira e necessidades imediatas de desenvolver grandes forças no mesmo.

A técnica HNSM apresenta-se como sendo a que consegue transmitir maiores níveis de carga às fibras do compósito antes da rotura da junta, chegando-se a imprimir tensão de tracção nas fibras de carbono de quase 70% da sua resistência mecânica tabelada pelo fabricante.

A técnica VNSM permite a maior ductilidade da estrutura, atingindo escorregamentos de 2.5mm num comprimento de colagem de 60mm, avisando assim, mais eficazmente do que as outras técnicas, a eminente falha do reforço (e falha da estrutura). Contudo, este caso não difere significativamente da técnica HNSM.

Melhorias no processo de execução do reforço podem levar a valores ainda maiores de resistência da ligação, designadamente: aumentar a quantidade relativa de fibras em cada ranhura diminuindo a quantidade de resina, ou usar algum mecanismo de injeção de resina na ranhura de dentro para fora reduzindo os vazios na ligação colada, ou até usar na técnica NSM o reforço de fibras de carbono em laminado (em vez do curado *in situ*) para facilitar a execução.

Do ponto de vista do “comportamento geral dos modelos de flexão”, constatou-se que a nível de modo de ruína não houve rotura por escorregamento na interface madeira-resina (*adhesive failure*), identificado como o modo de ruína R2, indicando que o adesivo aderiu bem à superfície de madeira. Recorde-se que a superfície de madeira foi apenas tratada por abrasão mecânica (lixa) e limpeza do pó remanescente.

Concluiu-se que a interface dos provetes reforçados pela técnica EBR ruiu pelo material mais fraco, a madeira. A grande maioria dos ensaios rompeu por arrancamento de uma película de madeira agarrada à resina de colagem do compósito à madeira, saindo este intacto (rotura R1).

Já nas técnicas HNSM e VNSM, as roturas se processaram de forma idêntica entre elas, mas diferente do observado na técnica EBR. Nas técnicas NSM, as roturas foram essencialmente despoletadas por um escorregamento inicial do compósito, ocorrido por rotura por corte na resina (R3). Pela própria forma de reforço em 2 fiadas, quando uma delas falha, por escorregamento, na outra são introduzidos o dobro dos esforços em pouco intervalo de tempo e além disso é introduzida alguma excentricidade, o que justifica que as roturas destes provetes sejam normalmente a combinação de R3 com a rotura por corte da madeira (R1) ou mesmo a rotura por tracção do compósito (R5).

Os gráficos com as curvas de variação do “ M_{tot} vs. δ_v ” permitem afirmar que, em todos os ensaios, se verificou comportamento linear dos provetes reforçados, com ligeira perturbação inicial onde a resistência do modelo aumenta sem aumento de deformação, o que quer dizer que se assiste a uma transferência perfeita da força aplicada entre as fibras do compósito e as fibras da madeira. Essa perturbação ter-se-á devido a um ligeiro alinhamento das fibras do compósito por ser sistema curado *in situ*, ou a uma rigidez inicial da resina, não se deformando por corte.

O desempenho do compósito nos modelos foi avaliado pelos indicadores do valor máximo da sua extensão próxima da ruína e das curvas de variação da força máxima no CFRP para diferentes comprimentos de colagem (F_t vs. l_t).

Nestes ensaios comprovou-se que o compósito conseguiu mobilizar extensões máximas na ordem de 8‰ a 10‰ (EBR – 8.7‰; HNSM – 9.2‰; VNSM – 9.8‰), ou seja, até próximo de 70% da extensão última do material à tracção ($\epsilon_{max}=15\%$ conforme especificações do fornecedor). Estes valores demonstram o bom resultado da aderência solicitada na transferência de esforços madeira-CFRP, sobretudo no comportamento da técnica NSM relativamente ao caso EBR.

A partir das curvas de relação “ F_t vs. l_t ” apontaram-se valores previsíveis de comprimento efectivo de colagem para cada uma das 3 técnicas de reforço. Neste trabalho será admissível avançar com a informação de que os comprimentos efectivos de colagem entre o Pinho Norueguês e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (CFRP) curado *in situ*, sejam os seguintes:

- para a técnica de reforço de colagem exterior (EBR): $l_{t,ef} \approx 30\text{mm}$
- para a técnica de reforço de inserção em ranhuras horizontais (HNSM): $l_{t,ef} \approx 50\text{mm}$

- para a técnica de reforço de inserção em ranhuras verticais (VNSM): $l_{t,ef} \approx 40\text{mm}$

Por fim, o desempenho das juntas madeira-CFRP foi interpretado com base nos níveis do valor da tensão tangencial média resultante na interface entre os dois materiais.

Para $l_t=20\text{mm}$, obtiveram-se valores máximos de tensão tangencial média na interface que chegaram aos 9MPa nas técnicas NSM e ultrapassaram os 10MPa na técnica EBR. Sabendo que aqui, os modos de rotura foram essencialmente corte pela madeira (R1), torna-se surpreendente a constatação de tais valores de tensão aplicada para fazer ruir a ligação. Recorde-se que madeira de classe C30 tem resistência característica ao corte $f_{v,k}=3.0\text{MPa}$ e resistência à tracção paralela ao fio $f_{t,0,k}=18\text{MPa}$ (EN 338, 2003). Conclui-se que, o mecanismo de aderência aqui testado solicita de forma mista a madeira ao corte e à tracção, porque a penetração de resina nos poros da madeira pode formar um bloco nas primeiras camadas de fibras da madeira, criando “base” para solicitá-las à tracção. A ruína parece ser despoletada por tensão de pico na interface, e não por tensão média, uma vez que as ruínas nos comprimentos de colagem maiores, aconteceram para τ_{med}^R cada vez menores.

Note-se que na madeira, material natural, os valores característicos de resistência podem ser bastante inferiores aos valores médios: em Ukyo e Masuda (2006) testou-se um método mais fiável de avaliação da resistência ao corte de madeira da mesma espécie da usada aqui (Pinho Nórdico – *Norway Spruce*), onde se obtiveram valores médios numa interface 30x30mm de 9.8MPa e valores de pico de 15.6MPa.

A terminar, tornou-se imperativo sustentar a conclusão de que a madeira constitui um mercado viável de aplicação de reforços de FRP, já que a sua utilização em estruturas de betão é generalizada e tem provas reais dadas.

Na técnica EBR, a aplicação do reforço de CFRP curado *in situ* em madeira, consegue valores de eficiência no compósito quase 90% daqueles conseguidos pela aplicação, já generalizada, do mesmo reforço de CFRP em betão. Com a vantagem de se conseguir tal nível de carga na madeira, usando apenas um comprimento de colagem que é 3 vezes inferior ao necessário no betão, ou seja, há muito menos desperdício de compósito na aplicação em madeira.

Na técnica NSM, a tensão máxima transmitida ao reforço de CFRP tem um aumento considerável daquela conseguida na técnica EBR, chegando mesmo a superar a aplicação NSM em betão. O comprimento necessário de colagem em madeira aumenta ligeiramente do necessário na técnica EBR, mas no betão verifica-se exactamente a mesma coisa, mantendo-se por isso uma poupança de 3 vezes o comprimento necessário de colagem. A técnica NSM, constitui assim, uma aplicação ainda mais eficiente do compósito de carbono.

5

MODELOS ANALÍTICOS DE ADERÊNCIA

5.1. INTRODUÇÃO

O objectivo do presente capítulo é a calibração de modelos teóricos que permitam estimar a capacidade aderente da ligação madeira-CFRP. Modelos esses que, no futuro, possam ser ferramentas úteis de previsão de parâmetros tais como: a força de tracção no compósito na rotura (F_t^R), o comprimento efectivo de colagem ($l_{t,ef}$) ou, a tensão tangencial de pico obtida na interface colada (τ_{max}). Que possibilitem futuras análises da aderência entre estes 2 materiais, dispensando a realização de um programa experimental como o apresentado no Capítulo 4.

Vão ser calibrados 2 modelos ligeiramente diferentes, em itens distintos deste capítulo: Modelo do Bulletin n.º.14 do FIB (modelo A) (CEB-FIP, 2001) e Modelo Musner e Piazza (modelo B) (Musner, 2004).

Os modelos teóricos baseiam-se em características geométricas da ligação, em parâmetros calibrados experimentalmente e, em características mecânicas dos materiais. As características do compósito são fornecidas pelo fabricante e apresentam pequena dispersão, sendo por isso confiáveis, ao passo que as características da madeira, pelas suas características de material natural, têm grande variação, e as normas recomendam valores característicos das suas resistências que podem estar muito abaixo dos reais.

As roturas esperadas são roturas de corte na madeira, na direcção paralela às suas fibras, e por isso o valor (f_v) de resistência ao corte paralelo às fibras (EN 338, 2003), vai ser substituído pelo valor médio da resistência ao arrancamento perpendicular às fibras obtido por média de ensaios superficiais de “Pull-Off” ($f_{wtm,p}$), ver Capítulo 3. O uso dos valores de ensaios de “Pull-Off” traduz-se numa grande vantagem de previsão da força resistente esperada na ligação, para situações futuras em que os modelos aqui calibrados sejam usados no reforço de estruturas de madeira reais já existentes, onde o estado de conservação da madeira é também captado pelo valor do ensaio de “Pull-Off” ($f_{wtm,p}$).

Comparar-se-á o desempenho final dos modelos teóricos A e B, depois de devidamente calibrados, usando curvas de correlação entre a força de tracção no compósito prevista pelos modelos teóricos e, a mesma força de tracção lida nos ensaios experimentais de aderência em flexão (mostrados no Capítulo 4).

Termina-se este capítulo, com um exemplo de aplicação dos modelos teóricos, executados em cooperação, por assim dizer, onde a resistência da ligação é dada pelo modelo A, e pelo modelo B se desenha, em cada passo, a linha das tensões tangenciais ao longo da ligação, analisando-se os picos de

tensão e o comportamento da ligação. Dessa forma, pode-se analisar teoricamente, a aderência da ligação EBR madeira-CFRP curado *in situ*, num valor de comprimento de colagem inicial que nunca foi testado experimentalmente.

5.2. REAJUSTE DO MODELO A: BULLETIN Nº.14 DO FIB

O modelo teórico de cálculo da força máxima de ancoragem de FRP em betão, proposto pelo FIB (*Fédération Internationale du Béton*) em 2001, e publicado no seu Bulletin nº.14 (CEB-FIP, 2001), é um dos mais conhecidos e confiáveis para o projecto de estruturas reforçadas com este material. Essa proposta condensa informação e recomendações de várias bases de dados de vários autores (Holzenkämpfer, 1994; Neubauer e Rostásy, 1997; Matthys, 2000) sendo por isso um instrumento de previsão teórico de base sólida.

Várias propostas existentes elegem a extensão do compósito como o parâmetro chave a ser limitado no projecto da ligação reforçada de betão-FRP. O presente modelo do FIB (designado neste trabalho por modelo A), baseia-se na limitação da força máxima de tracção suportada pelo compósito. Defende-se que este critério de força se traduz num dimensionamento mais económico, porque tira partido de conhecimentos da lei de aderência da interface em análise, de conhecimentos da mecânica de fractura e, das roturas possíveis na ligação, provenientes de largas bases de dados experimentais.

No presente trabalho, pretende-se calibrar este modelo para a previsão de força de ancoragem máxima na ligação FRP em madeira. Usam-se os dados experimentais de aderência em flexão apresentados no Capítulo 4 e, testam-se variações no menor número possível de parâmetros das expressões do modelo teórico, de forma a conseguir sugerir valores desses parâmetros que adequem as previsões aos resultados obtidos na campanha de ensaios realizada.

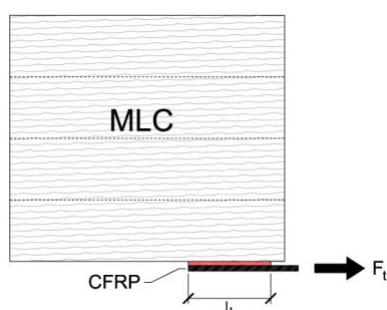


Figura 5.1 – Objectivo de previsão do modelo A reajustado, esquema exemplificativo, técnica de reforço EBR.

Todas as equações finais necessárias à aplicação do modelo A são apresentadas de (5.1.) a (5.4.). O significado de cada variável constituinte dessas equações apresenta-se no Quadro 5.1 e, a Figura 5.2 identifica as variáveis geométricas consideradas nas diferentes técnicas de reforço, essas mais difíceis de descrever por palavras.

$$F_{t_{max}}^R = c_1 \cdot k_b \cdot k_c \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{wtm,p} \cdot k_\mu} \quad [N] \quad (5.1.)$$

$$l_{t,ef} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{wtm,p}}} \quad [mm] \quad (5.2.)$$

$$k_b = 1.06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad \wedge \quad 1 \leq k_b \leq 1.29 \quad (5.3.)$$

$$F_t^R = F_{t_{max}}^R \cdot \frac{l_t}{l_{t,ef}} \cdot \left(2 - \frac{l_t}{l_{t,ef}}\right) \quad [N] \quad (5.4.)$$

Quadro 5.1 – Estudo do modelo A: definição das variáveis.

Variáveis	Definição das variáveis	Quantificação das variáveis		
		EBR	HNSM	VNSM
C ₁	Factor obtido por calibração de resultados de ensaios	0.7	1.05	0.9
C ₂	Factor obtido por calibração de resultados de ensaios	10	7	10
t _f	Espessura de compósito colado (medida na secção transversal) [mm]	0.13	0.26	0.26
k _c	Factor que representa o efeito da preparação da superfície (varia de 0.67 até 1.0 para melhores e mais compactas superfícies)	1	1	1
k _μ	É afecto ao tipo de ensaio e grau de reforço	1	1	1
f _{wtm,p}	Resistência de aderência de arrancamento da madeira pelo Ensaio de PullOff: valor médio dos ensaios (Capítulo 3) onde a rotura ocorreu pela madeira (característica da madeira) – substitui na fórmula original para betão o valor de resistência à tracção f _{ctm} [MPa]	2.5	2.5	2.5
E _f	Módulo de elasticidade à tracção das fibras de reforço (tabelado pelo fabricante) [MPa]	230000	230000	230000
b _f	Largura de compósito colado (medida na secção transversal) [mm]	60	30	30
b	Largura da madeira onde é feita a colagem (medida na secção transversal) [mm]	115	não aplicável	não aplicável
k _b	Factor que representa a geometria da zona de ancoragem (tem expressão própria)	1.2018	1.5	1.5
l _{t,ef}	Comprimento efectivo de colagem [mm]	34.6	58.5	48.9
F _{t max} ^R	Força de Amarração Máxima = Força de tracção no compósito Máxima obtida (na rotura) para comprimento de colagem suficientemente grande [N]	13800.3	18296.3	15659.4

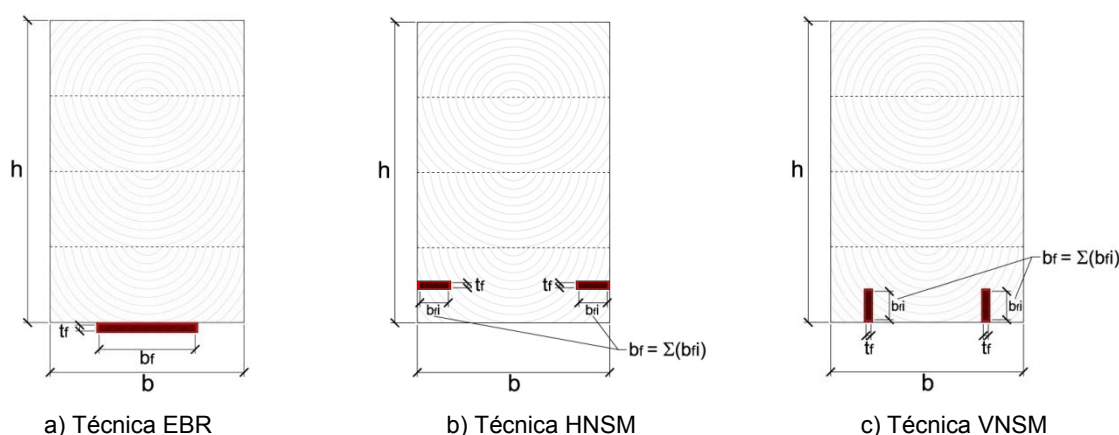


Figura 5.2 – Secção transversal reforçada com identificação das variáveis geométricas (modelo A).

Antes de se olhar aos resultados de força de tracção máxima no compósito para cada comprimento de colagem que aparecem já no Quadro 5.1, abre-se um parêntesis para justificar os valores atribuídos a algumas das variáveis das expressões. Sobretudo para justificar os coeficientes adimensionais, já que as grandezas geométricas ou as características mecânicas dos materiais, são parâmetros mais objectivos.

Os parâmetros variáveis conforme as condições físicas e geométricas do modelo em estudo resumem-se nos termos k_c , k_μ e k_b . Pelo facto de, no actual estudo as condições físicas dos modelos experimentais serem semelhantes, inicia-se esta abordagem analítica ao modelo do FIB ajustando apenas o parâmetro k_b .

Assim, para os modelos da técnica de reforço EBR, k_b é representado pela equação (5.3.) original do documento do FIB porque, também ela foi deduzida para a situação de EBR. Na tentativa de alargar o campo de aplicação deste modelo A, às restantes técnicas de reforço por inserção em ranhuras (HNSM e VNSM), a equação (5.3.) deixa de fazer sentido e por isso procurou-se uma outra filosofia para avaliar o parâmetro k_b .

Pela definição inicial, k_b é um factor amplificativo da aderência para situações de largura suficiente no interior do corpo maior reforçado, onde as tensões concentradas no reforço tenham espaço de se dissipar “em leque”. Nas técnicas NSM, por haver quase 360° de espaço de transferência de tensões do reforço para o corpo maior reforçado, o valor de k_b deve simular a maior amplificação possível. Justifica-se dessa forma o valor de $k_b=1.5$, que é máximo previsto numericamente pela equação (5.3.), como se pode comprovar pelo gráfico da Figura 5.3. Tentou-se assim simular a melhor aderência teórica, da técnica de inserção em ranhuras (NSM), face à técnica de colagem exterior (EBR).

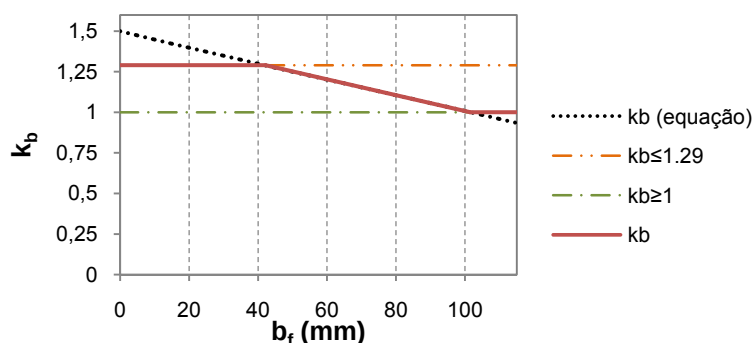


Figura 5.3 – Análise do parâmetro k_b do modelo A.

Os parâmetros de calibração experimental, c_1 e c_2 , como o próprio nome indica foram calibrados para que a curva de previsão teórica se adequasse aos resultados experimentais. Criou-se um intervalo de valores recomendados, possíveis, para estes parâmetros, para cada técnica de reforço (ver Quadro 5.2). Esta informação de calibração experimental pode ser valiosa em aplicações futuras deste modelo teórico para previsão da resistência da ligação colada madeira-CFRP curado *in situ*.

Quadro 5.2 – Valores recomendados para as variáveis experimentais do modelo A.

Técnica	c_1		c_2	
	Intervalo admissível	Valor recomendado	Intervalo admissível	Valor recomendado
EBR	[0.6;0.8]	0.7	[6;12]	10
HNSM	[0.95;1.15]	1.05	[5;10]	7
VNSM	[0.8;1.1]	0.9	[7;11]	10

Maiores valores de c_1 indicam maiores forças de ancoragem máximas (F_t^R), e maiores valores de c_2 indicam menores comprimentos de amarração ($l_{t,ef}$). Os intervalos apresentados no Quadro 5.2 resultam da manipulação da curva teórica do modelo A até englobar, por defeito e, por excesso, todos os resultados experimentais de aderência em flexão madeira-CFRP realizados.

Analisando, finalmente, a previsão feita pelo modelo A devidamente reajustado pelas variáveis expostas no Quadro 5.1, para cada técnica de reforço, apresentam-se nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, os gráficos da força de tracção do compósito na rotura (F_t^R) em função do comprimento de colagem (l_t), por cada técnica de reforço. Em todos se vê uma aproximação bastante satisfatória da teoria à prática.

Nos gráficos das Figuras 5.4 a 5.6, a linha contínua de previsão teórica que materializa o modelo A (modelo FIB) é constituída por 2 ramos, sendo o ramo crescente dado pela equação (5.4.) e o ramo horizontal constante dado pela equação (5.1.):

$$\text{Modelo FIB} \begin{cases} \text{eq. 5.4.} & \text{se } l_t < l_{t,ef} \\ \text{eq. 5.1.} & \text{se } l_t \geq l_{t,ef} \end{cases}$$

A linha traço-ponto vertical sinaliza o comprimento efectivo de aderência ($l_{t,ef}$) onde os 2 ramos do modelo teórico se juntam.

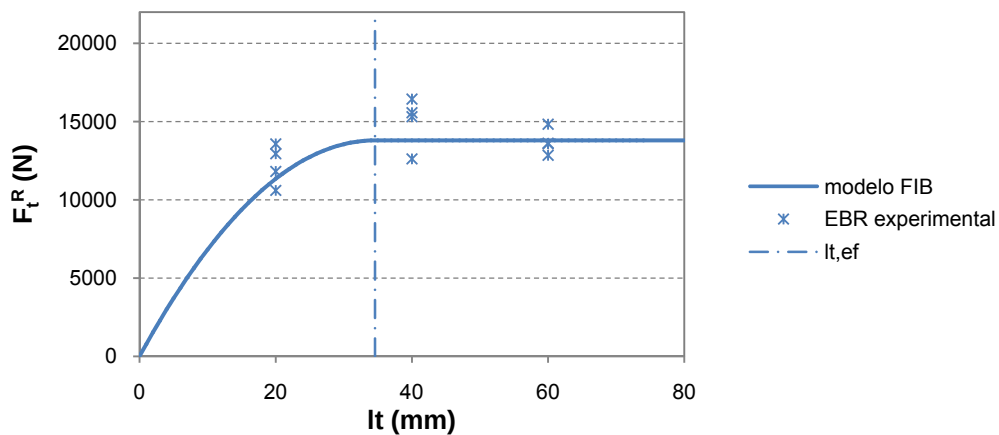


Figura 5.4 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo A (técnica EBR).

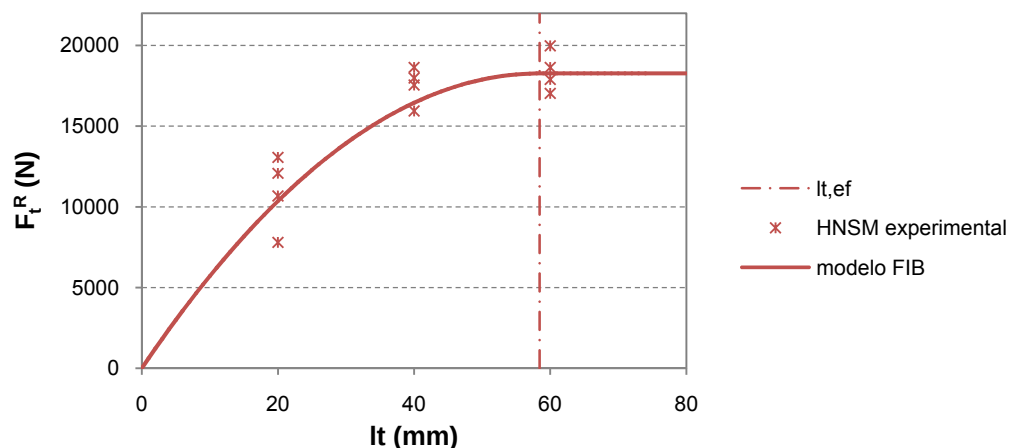


Figura 5.5 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo A (técnica HNSM).

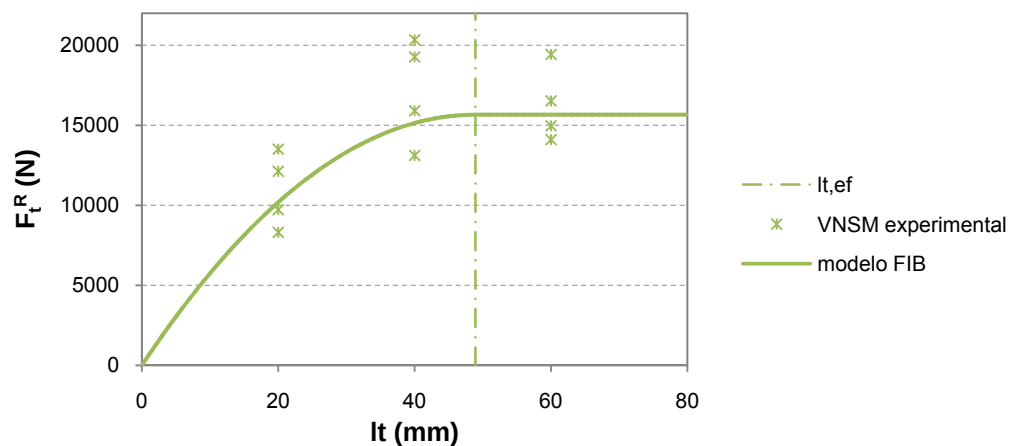


Figura 5.6 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo A (técnica VNSM).

Conseguiu-se através deste modelo teórico, usando os parâmetros materializados no Quadro 5.1, obter uma curva que representa bastante bem todos os resultados experimentais em todas as técnicas de reforço estudadas. O modelo A, aqui calibrado, revela-se uma boa ferramenta de previsão futura da força de ancoragem (F_t^R) de uma ligação madeira-CFRP.

5.3. REAJUSTE DO MODELO B: MUSNER E PIAZZA

O modelo de Musner e Piazza (designado neste trabalho por modelo B) é um modelo teórico retirado da Dissertação de Mestrado de Simone Musner, finalizada em 2004 (Musner, 2004). Estiveram envolvidos nesse trabalho, dois Professores de referência internacional: como orientador o Prof. Maurizio Piazza, um especialista conhecido internacionalmente no campo das madeiras, e como co-orientador o Prof. Antonio Borri, por sua vez, um especialista internacional no campo dos materiais compósitos. Outra particularidade desse documento, é ser um de poucos, contendo a interpretação teórica já calibrada para a aderência de um reforço de FRP a madeira.

Este modelo B, parte de uma legítima simplificação, onde considera o comportamento linear e elástico dos materiais constituintes da ligação de aderência. Legítima, porque as fibras de carbono e a própria madeira submetida a tracção na direcção das suas fibras, têm regime linear elástico até à rotura, salvo

nas zonas de defeitos da madeira, as quais não são possíveis de modelar sistematicamente e, daí a aplicação de factores de segurança em projecto.

Ele baseia-se na mecânica da fractura não linear, ou teoria de Volkersen, para descrever a evolução das tensões tangenciais na interface. Admite-se que os materiais aderentes são capazes de se deformar linearmente, e que o adesivo experimenta apenas distorção, isto é, deformação por tensão tangencial (ver Figura 5.7). Segue a teoria inicial de Volkersen depois de desenvolvida e adaptada por vários autores tais como: Wernerson e Gustafson (1996), Kalamkarov (1997), e com confirmações numéricas e experimentais em trabalhos como o de Senno *et al* (2004).

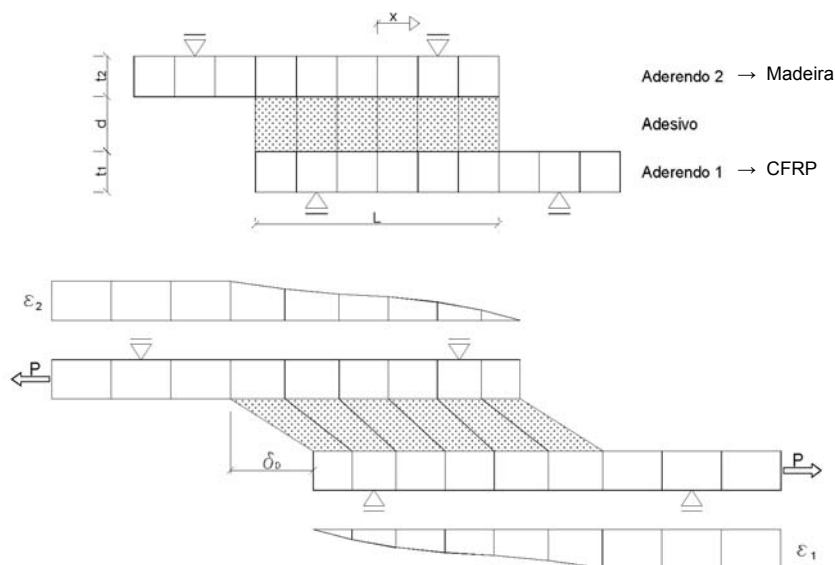


Figura 5.7 – Esquema exemplificativo da teoria de base das previsões do modelo B.

O modelo permite calcular teoricamente, e apenas com calibração de alguns parâmetros experimentais, 3 grandezas:

- o comprimento efectivo de colagem ($l_{t,ef}$);
- a força máxima de tracção no compósito colado à madeira ($F_t^R_{max}$) que se consegue atingir desde que colado um comprimento suficiente ($l_t > l_{t,ef}$);
- definir a curva de distribuição das tensões tangenciais no comprimento colado destes 2 materiais fibrosos ($\tau(x)=f(l_t)$), possibilitando ler o valor de pico teórico da tensão tangencial (τ_{max}), desde que introduzida a força de tracção aplicada ao compósito. Força esta, que só é determinada autonomamente por este modelo teórico, para ligações com $l_t > l_{t,ef}$.

Trata-se de um modelo mais rígido do que o modelo A, porque apresenta os seus parâmetros de calibração experimental mais definidos, e acaba por não deixar tanta liberdade de manobra na sua aplicação. Razão pela qual só será calibrado para a técnica EBR, tal como ele próprio é apresentado no documento original (Musner, 2004).

O modelo B assenta em três equações principais para calcular cada uma das 3 grandezas referidas acima:

$$l_{t,ef} = \frac{4}{c_1} \cdot \sqrt{\frac{E_1 \cdot t_1 \cdot d}{G_{ad} \cdot (1 + \alpha)}} \quad [S.I.] \quad (5.5.)$$

$$F_{t,max}^R = \frac{0.8}{\beta} \cdot b_f \cdot l_{t,ef} \cdot f_{wtm,p} \quad [S.I.] \quad (5.6.)$$

$$\tau(x) = \frac{F_t^R}{l_t \cdot b_f} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left[\frac{\cosh\left(\rho \cdot \frac{x}{l_t}\right)}{\sinh\left(\frac{\rho}{2}\right)} + \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \cdot \frac{\sinh\left(\rho \cdot \frac{x}{l_t}\right)}{\cosh\left(\frac{\rho}{2}\right)} \right] \quad [S.I.] \quad (5.7.)$$

Passe-se a identificar e determinar os vários termos presentes nessas 3 equações, começando pelo valor de α , designado por coeficiente de homogeneização dos diferentes materiais.

“ α ” resulta da combinação de 4 factores (ver equação (5.8.)), mas afigura-se imediatamente evidente que o mais difícil de determinar é t_2 , a espessura da camada de madeira envolvida no reforço. Embora não seja possível determinar com certeza a extensão dessa espessura, um valor aproximado justificado é aceitável para a modelação teórica. O valor de α terá um papel determinante tanto no cálculo do comprimento efectivo de ancoragem, como no cálculo da força máxima resistente da ligação. Um valor excessivo conduz a um sub-dimensionamento do comprimento necessário de colagem e ainda a uma sobre-previsão da força resistente da ligação, agindo contra a segurança.

$$\alpha = \frac{E_1 \cdot t_1}{E_2 \cdot t_2} \quad (5.8.)$$

Onde: material 1: CFRP $\begin{cases} E_1 = 230 \text{ GPa} \\ t_1 = 0.13 \text{ mm} \end{cases}$

material 2: Madeira $\begin{cases} E_2 = 12 \text{ GPa} \\ t_2 = 13 \text{ mm} \end{cases}$

Portanto: $\alpha = 0.192$

No documento original do modelo B (Musner, 2004), recomenda-se o uso de $t_2 = 10 \cdot t_1$ no caso de reforço com inserção de varões de FRP no corpo de madeira, podendo chegar até $t_2 = 20 \cdot t_1$ no caso do reforço por EBR de laminados de FRP. Analisando então o nível de valores recomendado de t_2 , com espessuras de laminados de CFRP comuns à volta de 1.4mm, resulta em 14 a 28mm de espessura de madeira afectada ao reforço. Para calibrar ao caso corrente de reforço de madeira, com 1 camada de manta de CFRP curado *in situ*, cuja espessura de fibra é de 0.13mm, decidiu adoptar-se $t_2 = 100 \cdot t_1$, obtendo assim $t_2=13\text{mm}$. É um valor plausível, mesmo estando bastante abaixo do t_2 recomendado aquando do uso de laminados, porque a quantidade de fibras de reforço num sistema curado *in situ* de 1 camada é, também, bastante inferior à quantidade de fibras de um sistema laminado, tendo assim menor capacidade de transferência de força para a madeira, mobilizando menor espessura t_2 .

“ α ” poderá assumir valores entre 0.01 e 10, mas por ser improvável que se aplique um compósito de módulo de elasticidade muito alto numa superfície a ser reforçada que apresente uma espessura muito fina, sugere-se que aqui na teoria, o valor de alfa seja limitado a $\alpha \leq 3$.

Um outro factor teórico de grande importância é o factor de junta (ρ), que representa o comprimento de colagem da junta.

$$\rho = \sqrt{\frac{l_t^2}{E_1 \cdot t_1} \cdot \frac{G_{ad}}{d} \cdot (1 + \alpha)} \quad (5.9.)$$

Onde: l_t é o comprimento de colagem da junta, em unidades S.I.;

$G_{ad} = \frac{E_{ad}}{2 \cdot (1 + \nu)} = 1.407 \times 10^9 \text{ Pa}$, considerando o módulo de elasticidade à tracção da resina adesiva $E_{ad} = 3.8 \text{ GPa}$, e coeficiente de poisson $\nu = 0.35$, suportados pelo trabalho de doutoramento de Eva Oller Ibars (Ibars, 2005);

$d = 0.65 - 0.13 = 0.42 \text{ mm}$ é a espessura de adesivo que, mais uma vez apoiado em Ibars (2005), se admite de 0.42mm. Partindo do princípio que, um sistema curado *in situ* tem espessura total de aproximadamente metade da espessura total de um sistema pré-fabricado, isto é, 0.65mm de espessura total.

O factor de junta (ρ) influencia a tensão tangencial máxima que ocorre na interface (τ_{max}) e que ditará o início da rotura da ligação colada. O pico de tensão tangencial que a interface suporta (τ_{max}) é ditado pela madeira, que é o material mais frágil.

Por falta de tempo, não se efectuaram ensaios de corte específicos para os espécimens de madeira usados nos ensaios de aderência, permitindo saber a sua resistência efectiva ao corte. No entanto, um trabalho internacional já publicado, do mesmo âmbito e realizado na mesma espécie de madeira (Pinho Norueguês – *Norway Spruce*), possibilitou esse conhecimento das tensões tangenciais média e máxima num plano de corte controlado no maciço de madeira. Trata-se do trabalho de Ukyo e Masuda (2006). O plano de corte que fornece a propriedade da madeira relevante para este caso é o plano RL, isto é, perpendicular ao eixo radial e solicitado segundo a direcção longitudinal das fibras de madeira. A Figura 5.8 ilustra a geometria das peças de madeira e o esquema de ensaio utilizado.

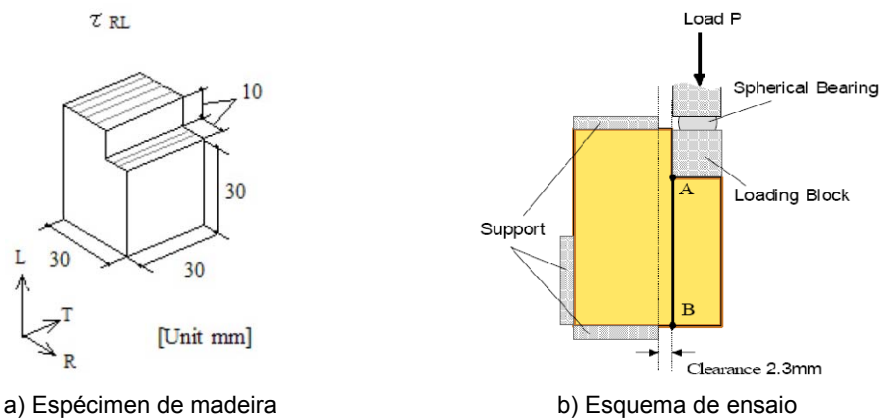


Figura 5.8 – Esquema de ensaio para determinação da verdadeira resistência ao corte da madeira num plano RL (Ukyo e Masuda, 2006).

Os resultados relevantes são:

- $\tau_{med} = 9.8 \text{ MPa}$ com coeficiente de variação de 3.6%;
- $\tau_{max} = 15.6 \text{ MPa}$ com coeficiente de variação de 24%.

Sabendo então agora, que se podem atingir tensões tangenciais máximas nesta madeira de 15MPa, a equação (5.10.), para cálculo da tensão tangencial máxima na interface, permite, por inversão, retirar o valor de ρ satisfatório.

$$\tau_{max} = \frac{F_t^R}{2 \cdot b_f} \cdot \frac{\rho}{l_t} \cdot \max \left\{ \left[\coth\left(\frac{\rho}{2}\right) + \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \tanh\left(\frac{\rho}{2}\right) \right] \right. \\ \left. \left[\coth\left(\frac{\rho}{2}\right) - \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \tanh\left(\frac{\rho}{2}\right) \right] \right\} \quad (5.10.)$$

Onde, usando o critério de rotura de $\tau_{max} = 15 \text{ MPa}$, e os valores médios de F_t^R dos ensaios EBR de aderência em flexão madeira-CFRP (ver Capítulo 4), para cada comprimento de colagem, se determinou o respectivo valor do parâmetro ρ ideal:

$$l_t = 20 \text{ mm} \Rightarrow F_t^R = 12240 \text{ N};$$

$$l_t = 40 \text{ mm} \Rightarrow F_t^R = 14988 \text{ N};$$

$$l_t = 60 \text{ mm} \Rightarrow F_t^R = 13720 \text{ N};$$

$$b_f = 0.060 \text{ m} \text{ é a largura de colagem do reforço};$$

$$\alpha = 0.192, \text{ determinado pela equação (5.8.)}$$

Quadro 5.3 – Valores de ρ , factor de junta.

	$l_t=20\text{mm}$	$l_t=40\text{mm}$	$l_t=60\text{mm}$
ρ (ideal) (eq.5.10.)	1.44	2.77	4.67
ρ (eq.5.9.)	7.31	14.62	21.93

Os valores de ρ obtidos pela equação (5.9.) (ver segunda linha do Quadro 5.3) são perigosamente elevados. Surgiu daí a necessidade de se encontrar um factor correctivo, caso contrário haveria picos de tensão tangencial muito altos, para os materiais em questão.

Quadro 5.4 – Proposta de factor correctivo para o cálculo de ρ pela equação (5.9.).

	$l_t=20\text{mm}$	$l_t=40\text{mm}$	$l_t=60\text{mm}$
$\rho_{\text{eq5.10.}} / \rho_{\text{eq5.9.}}$	0.197	0.189	0.213

Decidiu aplicar-se uma constante de proporcionalidade $c_1 = 0.2$ de forma a corrigir a equação (5.9.), e obter valores de ρ calibrados para a junta madeira-CFRP curado *in situ*, segundo a técnica EBR, em análise. Passa então a aplicar-se a equação (5.11.) para o cálculo do parâmetro ρ , factor de junta.

$$\rho = c_1 \cdot \sqrt{\frac{l_t^2}{E_1 \cdot t_1} \cdot \frac{G_{ad}}{d} \cdot (1 + \alpha)} \quad ; \quad c_1 = 0.2 \quad (5.11.)$$

Na sequência da definição do parâmetro ρ , que depende essencialmente do comprimento de colagem, surge a altura ideal para esclarecer a equação (5.5.) de cálculo do comprimento efectivo de colagem, apresentada inicialmente neste modelo. O gráfico da Figura 5.9 importado do documento original de Musner (2004), mostra a influência de ρ no pico de tensão tangencial, e sugere que a partir de certo

valor de ρ , ou seja, a partir de certo valor de l_t , não se consegue retirar melhor proveito da ligação madeira-CFRP porque o parâmetro ρ deixa de influenciar os picos de tensão tangencial obtidos.

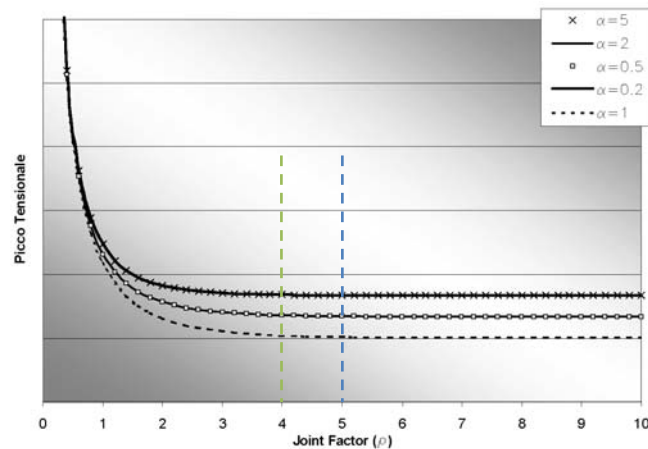


Figura 5.9 – Andamento qualitativo do pico de tensão tangencial com o aumento do comprimento de colagem (Musner, 2004).

No texto original sugere-se que, para $\rho > 5$ se atingiu essa independência das tensões obtidas face ao comprimento de colagem, no entanto, analisando o gráfico vê-se que para $\rho > 4$ já se pode considerar que se atingiu o comprimento efectivo.

Assim, a equação (5.5.) de cálculo de $l_{t,ef}$ resulta directamente da equação (5.11.) considerando $\rho = 4$, e mantendo logicamente $c_1 = 0.2$.

O valor obtido é $l_{t,ef} = 55 \text{ mm}$. Se se tivesse considerado, como sugerido, $\rho = 5$, o valor obtido para $l_{t,ef}$ seria de 68mm, distanciando-se já bastante dos resultados experimentais do Capítulo 4 da técnica EBR ($\approx 30\text{mm}$), e da própria previsão do modelo A (34.6mm).

A previsão da carga máxima de tracção suportada pela ligação (F_t^R), dada neste modelo B pela equação (5.6.), é determinada por características mecânicas e geométricas e, por um parâmetro β calibrado experimentalmente. Explicam-se, de seguida, as considerações feitas para a definição do parâmetro β , procurando representar o tipo de ensaio de aderência.

De acordo com o documento original de Musner (2004), $\beta = 0.237$ e resulta da calibração feita na base de dados dos ensaios de Tomasi (1999), ensaios de “Pull-Out” de um varão de FRP inserido no centro de um bloco de madeira (ver Figura 5.10). Assim sendo, é lógico que não se considere o mesmo valor de β no presente caso de colagem exterior. A aderência no caso de colagem exterior, com contacto dos dois materiais numa só face (metade do perímetro do reforço), será possivelmente metade daquela atingida na colagem de um varão inserido, onde há contacto a toda a volta da barra.

O parâmetro β , na equação (5.6.), é inversamente proporcional à previsão da força de tracção máxima resistida pela ligação (F_t^R). Para que o efeito de β se reflecta em metade da carga máxima prevista, ter-se-á de usar um valor de β duas vezes superior ao previsto pelos ensaios de “Pull-Out” de Tomasi (1999).



Figura 5.10 – Ensaio “Pull-Out” de Tomasi (1999) donde Musner (2004) determinou $\beta=0.237$.

O valor de β já calibrado para o caso em estudo, será: $\beta = 2 \times 0.237 = 0.474$.

$$F_{t \max}^R = \frac{0.8}{\beta} \cdot b_f \cdot l_{t,ef} \cdot f_{wtm,p} \quad ; \quad \beta = 0.474 \quad (5.12.)$$

Onde: $l_{t,ef} = 0.055 \text{ m}$ calculado pela equação (5.5.);

$f_{wtm,p} = 2.5 \text{ MPa}$ é a resistência da madeira ao arrancamento por “Pull-Off” num plano perpendicular à direcção das fibras (ver Capítulo 3);

Portanto: $F_{t \max}^R = 13924 \text{ N}$.

Obteve-se assim, pelo modelo B calibrado, um valor de $F_{t \max}^R$ muito bom. Comparativamente aos resultados dos ensaios apresentados no capítulo 4, onde o valor médio comparável a este é de 13720N. Trata-se do valor médio dos ensaios EBR para $l_t=60\text{mm}$, uma vez que são os únicos ensaios com $l_t > l_{t,ef}$.

Uma vez explicadas todas as considerações que estão na base da definição dos parâmetros de calibração deste modelo teórico B, apresentam-se no Quadro 5.5 os valores das variáveis constituintes das equações matemáticas deste modelo: parâmetros calibrados experimentalmente, grandezas geométricas e características mecânicas dos materiais.

O modelo B calcula somente a aderência máxima conseguida numa ligação de 2 materiais fibrosos de características definidas, pelo que quando essa ligação é mal executada, incluindo-se aqui o comprimento insuficiente de colagem, não se obterá o máximo desempenho da ligação. O modelo B não prevê a força de tracção aquando da rotura, para ligações em que $l_t < l_{t,ef}$.

O gráfico da Figura 5.11 é análogo ao determinado para o modelo A para a técnica de reforço EBR. A previsão de força máxima deste modelo B apresentada na Figura 5.11 respeita o seguinte:

$$\text{Modelo B} \begin{cases} \text{não definido} & \text{se } l_t < l_{t,ef} \\ \text{eq. 5.12.} & \text{se } l_t \geq l_{t,ef} \end{cases}$$

Na Figura 5.11, a linha traço-ponto vertical sinaliza o comprimento efectivo de aderência ($l_{t,ef}=55\text{mm}$), calculado também pelo modelo B, pela equação (5.5.).

Quadro 5.5 – Resumo de calibração do modelo B.

Variáveis das expressões	Quantificação das variáveis	
Dados do material 1: compósito de carbono curado <i>in situ</i>	E_1	230×10^9 Pa
	t_1	0.13×10^{-3} m
Dados do material 2: madeira da classe C30	E_2	12×10^9 Pa
	t_2	13×10^{-3} m
Dados da resina	E_{ad}	3.8×10^9 Pa
	d	0.42×10^{-3} m
	ν	0.35
	G_{ad}	1.407×10^9 Pa
Largura do reforço (tira de manta de fibras de carbono)	b_f	0.060 m
Resistência da madeira ao arrancamento por “Pull-Off”	$f_{wtm,p}$	2.5×10^6 Pa
Constante de proporcionalidade para o factor de junta	c_1	0.2
Coeficiente de homogeneização dos diferentes materiais aderentes	α	0.192
Factor obtido por calibração de resultados experimentais para previsão de F_t^R max	β	0.474

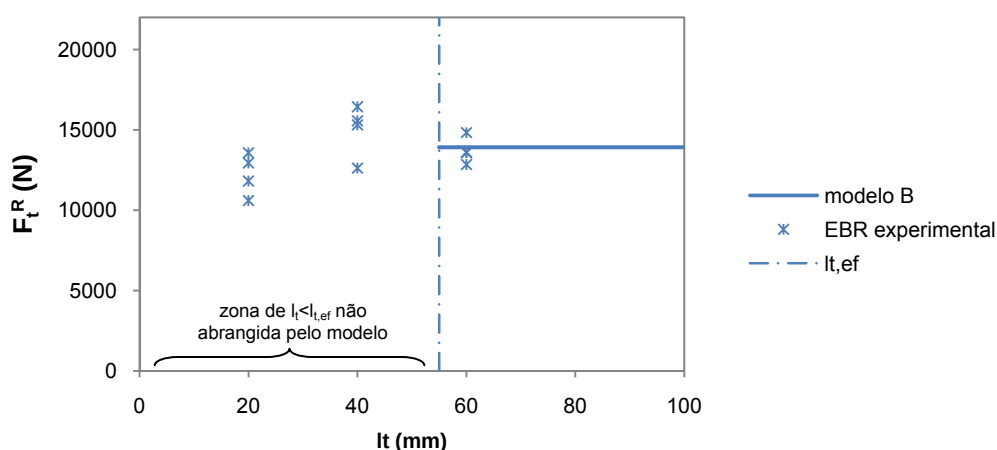


Figura 5.11 – Previsão de força máxima de ancoragem madeira-CFRP pelo modelo B (técnica EBR).

A maior potencialidade deste modelo, não é prever a força máxima de ancoragem (Figura 5.11), mas sim criar uma linha de distribuição teórica das tensões tangenciais ao longo do comprimento colado (Figura 5.13). A previsão da distribuição de tensões tangenciais é feita mediante a introdução da força actuante na interface nesse instante. Se se considerar o instante imediatamente anterior à rotura da ligação, consegue-se avaliar o valor de tensão tangencial de pico ocorrido na interface, que constitui o critério de rotura da interface, segundo este modelo.

O gráfico da Figura 5.13 ilustra essa linha de tensões tangenciais distribuídas ao longo do comprimento colado, para $l_t = l_{t,ef} = 55$ mm, apresentando picos de tensão em cada extremidade da ligação. O valor máximo absoluto ocorre do lado traccionado do compósito, diminuindo no centro, e subindo apenas ligeiramente no final do comprimento de colagem. Significa isto, que a abertura da fenda, se inicia do lado onde está aplicada a força de tracção.

A linha teórica de distribuição das tensões tangenciais na interface colada madeira-CFRP é dada pela equação (5.7), com a variável dependente x definida na Figura 5.12 e pertencente ao intervalo $x \in \left[-\frac{l_t}{2}; +\frac{l_t}{2}\right]$. O valor de F_t^R é retirado da previsão anterior, ilustrada na Figura 5.11, e o valor de ρ é função do l_t que se está a analisar, dado pela equação (5.11.).

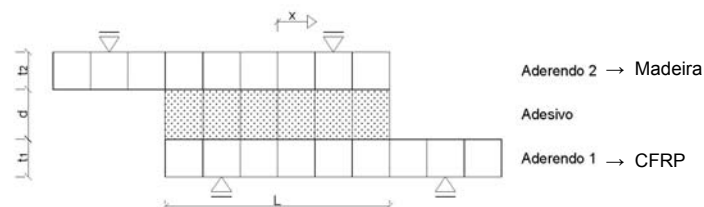


Figura 5.12 – Identificação de variáveis do modelo B: linha de distribuição de tensões tangenciais.

A Figura 5.14 apresenta o esquema da ligação colada madeira-CFRP em questão, reforçado pela técnica EBR, sobreposto a um esquema da distribuição das tensões tangenciais dadas pelo gráfico da Figura 5.13, ajudando assim a ligar a teoria à prática.

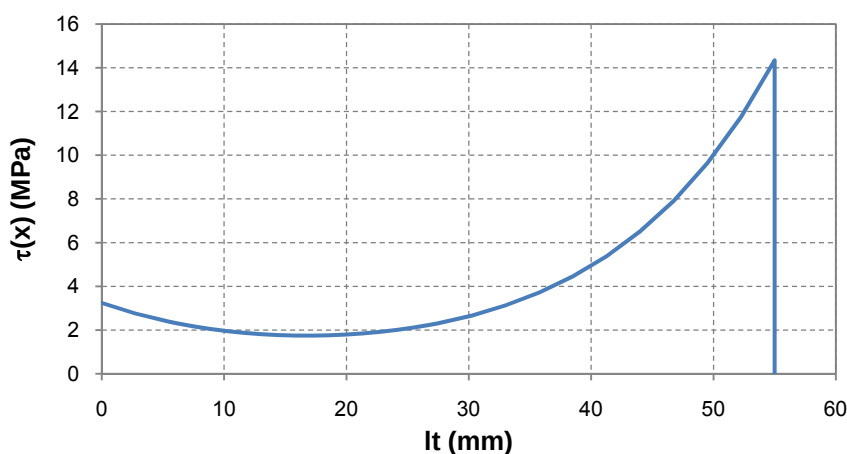


Figura 5.13 – Distribuição das tensões tangenciais na interface colada madeira-CFRP, $l_t=55\text{mm}$.

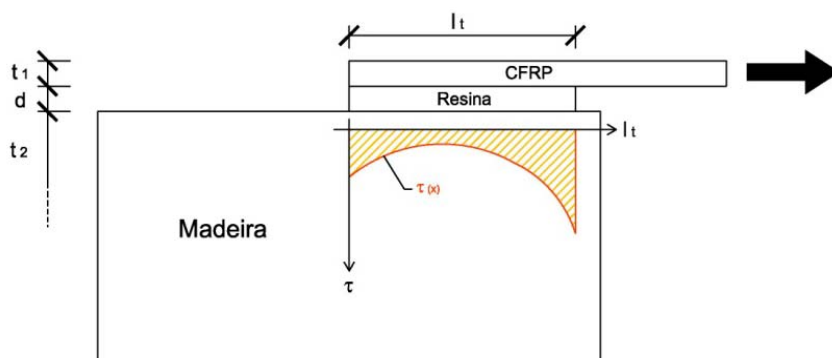


Figura 5.14 – Esquema de posicionamento das tensões tangenciais na ligação madeira-CFRP.

Em jeito de conclusão, apresentam-se no Quadro 5.6 as previsões teóricas feitas pelo modelo B, calibrado à análise de aderência madeira-CFRP curado *in situ* e reforçado segundo a técnica EBR.

Quadro 5.6 – Previsões teóricas do modelo B.

Descrição da grandeza	Valor previsto
$l_{t,ef}$	55 mm
$F_t^R \text{ max}$	13.9 kN
τ_{max}	14.34 MPa

5.4. COMPARAÇÃO DOS MODELOS ANALÍTICOS

Neste ponto apresenta-se a comparação do desempenho dos modelos A e B, no que diz respeito à previsão da força de tracção no compósito na rotura da ligação (F_t^R).

O modelo A, por ter sido calibrado para a totalidade dos 36 ensaios experimentais realizados (Capítulo 4), permite criar um gráfico bastante completo de correlação dos resultados teóricos com os experimentais. A Figura 5.15 representa esse gráfico de correlação do modelo A e, nele se pode ver um bom desempenho do modelo, com a nuvem de pontos situada à volta da recta a 45°. Tal recta, neste tipo de gráfico, significa a previsão teórica coincidente com a realidade experimental.

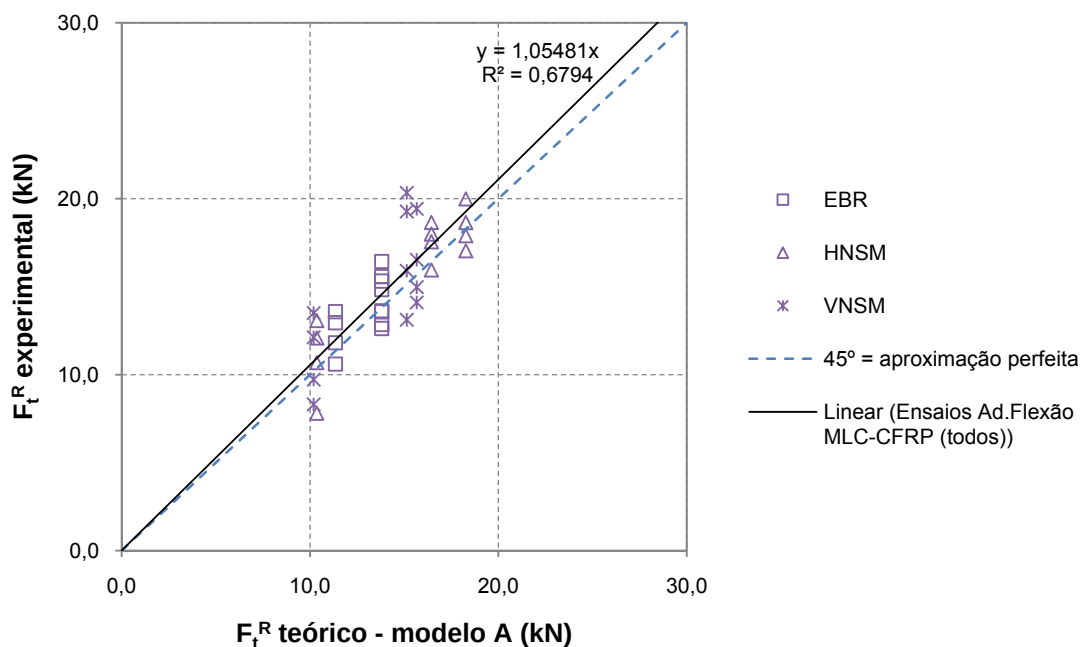


Figura 5.15 – Gráfico de correlação entre os valores experimentais e teóricos da força máxima de tracção no compósito (modelo A).

Para se comparar as previsões de F_t^R do modelo A com as do modelo B, reduziram-se os resultados obtidos no modelo A por forma a ter só os elementos com $l_t > l_{t,ef}$. Isto porque o modelo B só permite prever F_t^R para comprimentos de colagem superiores ao efectivo.

O modelo B, para previsão da força máxima de tracção da ligação, é bastante mais redutor do que o modelo A. Ele só foi calibrado para a técnica de reforço EBR, porque a teoria em que se baseia não prevê nenhum coeficiente que simule a distribuição tridimensional de tensões, o que acontece no caso do reforço inserido no corpo reforçado (técnicas NSM).

Posto isto, a Figura 5.16 compara, lado a lado, a correlação $F_{t,experimental}^R$ com $F_{t,teórico}^R$, obtida então para $l_t > l_{t,ef}$, de acordo com cada modelo.

No modelo A:

- $l_{t,ef}^{EBR} = 34.6\text{mm}$ → usa-se os ensaios de $l_t = 40\text{mm}$ e $l_t = 60\text{mm}$;
- $l_{t,ef}^{HNSM} = 58.5\text{mm}$ → usa-se apenas os ensaios de $l_t = 60\text{mm}$;
- $l_{t,ef}^{VNSM} = 48.9\text{mm}$ → usa-se também só os ensaios de $l_t = 60\text{mm}$.

No modelo B:

- só há previsão EBR, onde $l_{t,ef} = 55\text{mm}$ → usa-se os ensaios de $l_t = 60\text{mm}$.

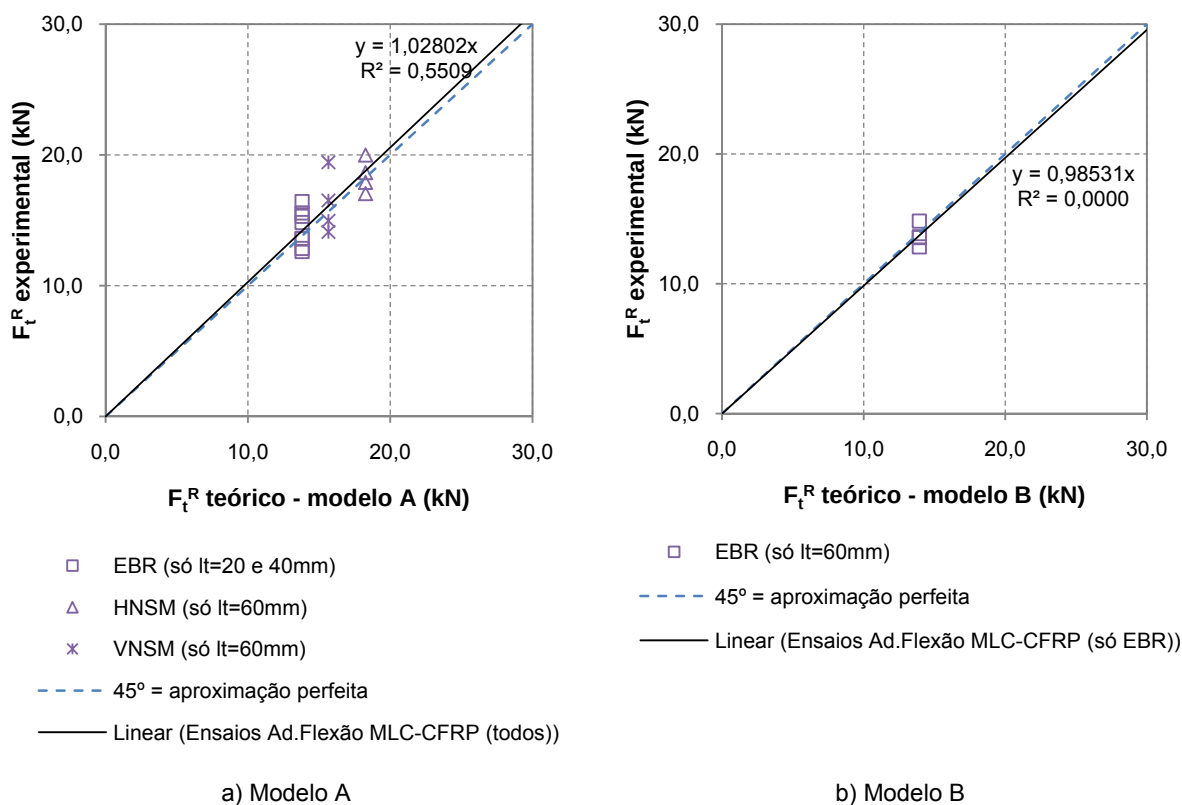


Figura 5.16 – Gráfico de correlação entre os valores experimentais e teóricos da força máxima de tracção no compósito (ensaio com $l_t > l_{t,ef}$).

As conclusões a que se chega fazendo aproximação linear à nuvem de pontos de correlação de cada modelo teórico apresentam-se no Quadro 5.12. Com um primeiro olhar aos gráficos da Figura 5.16, parecem ambos os modelos bastante bons, tecendo previsões de força máxima resistente da ligação

madeira-CFRP que estão precisamente na média dos resultados obtidos experimentalmente. Os 2 modelos teóricos aqui calibrados, constituem boas ferramentas de previsão do valor médio de F_t^R , tendo a partir daqui de se aplicar os coeficientes de segurança que se achar necessários.

No Quadro 5.7 faz-se uma interpretação mais pormenorizada, calculando o ângulo (α) com a horizontal que faz a recta de aproximação linear à nuvem de pontos. Percebe-se, dessa forma, se a previsão média de cada modelo é ligeiramente por excesso (contra a segurança quando $\alpha < 45^\circ$) ou se, pelo contrário, se trata de uma previsão ligeiramente por defeito (a favor da segurança quando $\alpha > 45^\circ$).

Quadro 5.7 – Análise comparativa do desempenho dos modelos A e B de previsão.

Modelo	Regressão linear	Ângulo α com a horizontal	Conclusões	Observações
Modelo A (só $l_t > l_{t,ef}$)	$Y = 1.02802 * X$	45.79°	$> 45^\circ$ SEGURANÇA	Em média: $F_{t,experimental}^R = 103.1\% * F_{t,teórico}^R$
Modelo B	$Y = 0.98531 * X$	44.58°	$< 45^\circ$ PERIGO	Em média: $F_{t,experimental}^R = 98.5\% * F_{t,teórico}^R$
Modelo A (tudo – fig.5.15.)	$Y = 1.05481 * X$	46.53°	$> 45^\circ$ SEGURANÇA	Em média: $F_{t,experimental}^R = 105.9\% * F_{t,teórico}^R$

Conclui-se então que, na Figura 5.16 onde se comparou apenas as previsões de $l_t > l_{t,ef}$ e a força prevista é a máxima para aquele tipo de ligação:

- O modelo A apresenta previsões ligeiramente pelo lado da segurança com os resultados experimentais a serem 3.1% superiores aos previstos;
- E o modelo B, por sua vez, está ligeiramente do lado do perigo, com previsões 1.5% superiores aos resultados experimentais.

O modelo A revela-se uma ferramenta de previsão de força máxima para ligações completamente desenvolvidas ($F_{t,max}^R$), melhor que o modelo B.

Uma nota para a análise do modelo A na sua total aplicação (também apresentada no Quadro 5.7), apresentando ainda melhores resultados do que na análise restrita aos comprimentos maiores. Sobe a sua margem de segurança (mantendo-se perto da previsão ideal dos 45°), com previsões médias que subiram agora para um valor de 5.9% de margem de segurança. Provando que, onde há mais imprecisão, para comprimentos curtos de colagem, este modelo aumenta a segurança das suas previsões.

5.5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS MODELOS ANALÍTICOS

Para se juntar o “melhor dos dois mundos” criou-se um exemplo teórico de reforço de madeira com CFRP por colagem externa (EBR). Em tudo semelhante ao programa experimental realizado de aderência em flexão (Capítulo 4), mas agora com comprimento inicial de 80mm (um comprimento não testado experimentalmente). Com recurso aos modelos analíticos A e B já calibrados, previu-se a força de tracção que se podia aplicar ao compósito (F_t) e a distribuição de tensões tangenciais na interface ($\tau(x)$) que daí resultava, para vários instantes de carregamento.

Mostra-se aqui um exemplo de cooperação dos 2 modelos teóricos, onde as forças resistidas pela ligação são dadas pelo modelo A, e a linha de distribuição das tensões tangenciais ao longo da ligação é dada pelo modelo B.

Descrição do exemplo:

- Colagem de CFRP curado *in situ* a madeira estrutural C30 de Pinho Nórdico pela técnica EBR, e traccionado na direcção longitudinal das fibras de ambos os elementos;
- Colagem inicial de 80mm, e avaliação da evolução de carga de tracção no compósito até atingir a tensão tangencial de pico na interface que provoca a abertura da fenda (ver Figura 5.17);
- Posterior propagação da fenda sobre carga máxima enquanto $l_t \geq l_{t,ef}$, seguido de diminuição da resistência da ligação por evolução da fenda até rotura completa (ver Figura 5.18).

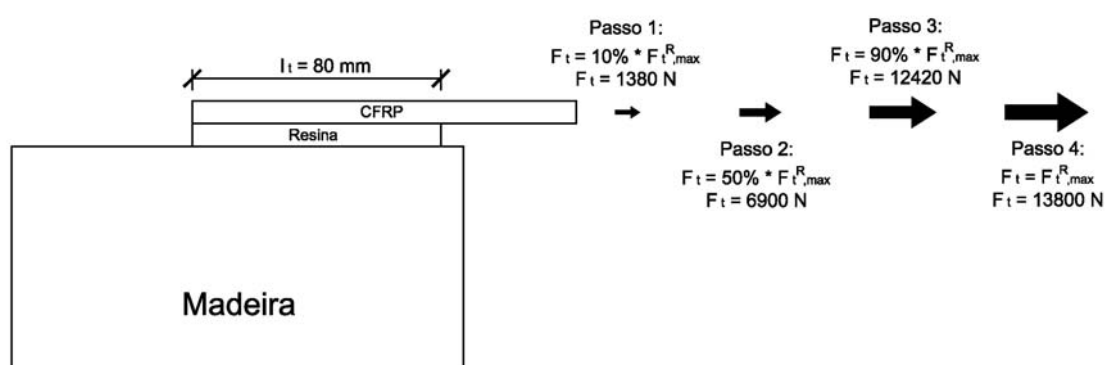


Figura 5.17 – Passos 1 a 4 do exemplo de aplicação (ligação EBR).

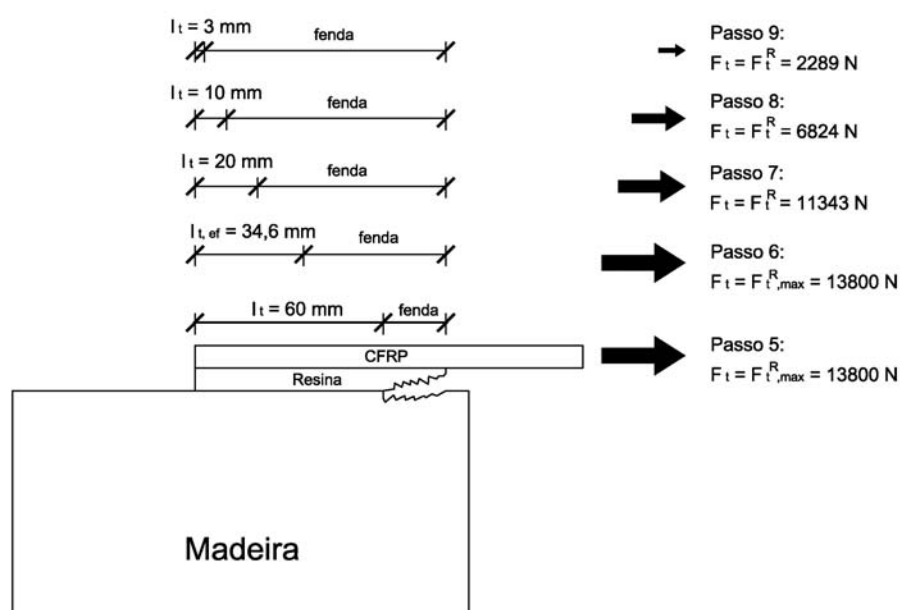


Figura 5.18 – Passos 5 a 9 do exemplo de aplicação (ligação EBR).

A Figura 5.19 possibilita a percepção do “filme” de evolução das tensões sentidas no interior da ligação. Percebe-se que as tensões máximas que vão ditar a abertura da fenda e consequente rotura da ligação, se desenvolvem do lado interior da colagem, do lado onde é traccionado o compósito.

Os passos de cálculo de 1 a 4 são a representação de um processo crescente de aplicação de carga enquanto a ligação inicial não sofreu danos, mantém-se o comprimento de colagem de 80mm.

No passo 4 atinge-se a carga máxima de tracção no compósito que a ligação tem capacidade de absorver. É, portanto, o instante em que se atinge o critério de rotura, abre-se a fenda.

Começa então a aumentar o comprimento de fenda aberta e, enquanto se mantiver o comprimento de colagem acima do valor de comprimento efectivo de colagem ($l_{t,ef}=34.6\text{mm}$ previsto pelo modelo A), mantém-se a força resistente igual à máxima, ou seja, não há perda de eficácia da ligação. Justifica-se este comportamento, pela noção de comprimento efectivo de colagem, que diz que acima desse valor de comprimento de colagem não há ganho de capacidade da ligação, logo na sua diminuição e, enquanto se mantiver $l_t > l_{t,ef}$, também não haverá perda de capacidade da ligação.

Finalmente, os passos 7, 8 e 9 simulam a rotura da ligação onde a resistência começa a diminuir, já não há comprimento de colagem suficiente para que as tensões se distribuam eficazmente no corpo maior de madeira. As forças são calculadas no ramo parabólico ascendente do modelo A, segundo a equação (5.4.) (ver Figura 5.4).

Para estes passos finais de cálculo, parece que há um maior aproveitamento de todo o comprimento de colagem, sentindo-se tensões tangenciais bastante elevadas, próximas do máximo, em todo o comprimento que resta de colagem, mas no entanto a força de tracção que a ligação está a transferir é bastante reduzida. Todos os valores relevantes das linhas da Figura 5.19 estão presentes no Quadro 5.8 para complemento de informação.

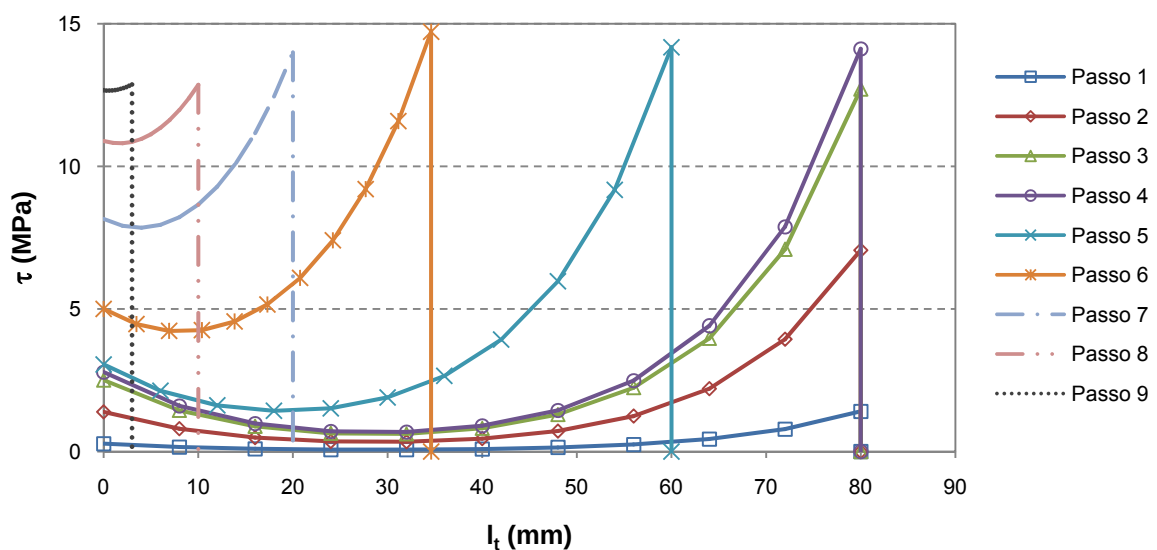


Figura 5.19 – Linhas de distribuição das tensões tangenciais no comprimento colado para cada passo de evolução do exemplo de aplicação dos modelos teóricos.

Atingem-se tensões de pico de 14MPa, que ditam a rotura da ligação pela madeira (Pinho Norueguês), por corte em planos RL (perpendicular ao eixo radial e orientado segundo o eixo longitudinal das fibras). Percebe-se então, que usar maiores áreas de fibra de carbono, só ia resultar em redução das tensões normais sentidas no reforço, não ia melhorar a capacidade da ligação, uma vez que as roturas são ditadas pela madeira. Recomenda-se o uso do compósito o mais fino possível para se poder

empregar pouca área de fibra, ocupando no entanto a maior largura de colagem possível, reduzindo tensões tangenciais na ligação para a mesma força resistente.

Quadro 5.8 – Identificação e caracterização dos vários passos de evolução do exemplo teórico.

Evolução da ligação	l_t (mm)	Modelo A: F_t^R (kN)	Modelo B: $\tau=f(l_t)$			Estado
			ρ	$\tau_{med}=F_t^R/(l_t*b_t)$ (MPa)	τ_{max} (MPa)	
Passo 1	80	(10%) 1.38	5.846	0.29	1.41	Sem fenda
Passo 2		(50%) 6.90		1.44	7.06	
Passo 3		(90%) 12.42		2.59	12.71	
Passo 4		(100%) 13.80		2.88	14.12	
Passo 5	60	13.80	4.385	3.83	14.18	Propagação da fenda mas sem afectar a resistência da ligação
Passo 6	34.6	13.80	2.528	6.65	14.72	
Passo 7	20	11.34	1.462	9.45	14.00	Rotura da ligação com perda acentuada da resistência à medida que a fenda avança
Passo 8	10	6.82	0.731	11.37	12.86	
Passo 9	3	2.29	0.219	12.72	12.87	

O bom funcionamento desta análise teórica comprova que o trabalho feito na calibração destes modelos poupará tempo e investimento em futuros programas experimentais de análise da aderência entre: madeira e CFRP curado *in situ*, reforçado pela técnica EBR, permitindo análise paramétrica de variações do comprimento de colagem.

5.6. CONCLUSÃO

Foram calibrados 2 modelos analíticos que conseguem prever a aderência máxima de ligações madeira-CFRP através de parâmetros mecânicos conhecidos dos materiais envolvidos e características geométricas da ligação. A aderência máxima é prevista na forma de força máxima de tracção que se consegue aplicar ao compósito no momento de rotura (F_t^R) quando se mobiliza um comprimento de colagem suficientemente grande, isto é, pelo menos o comprimento efectivo de colagem ($l_t \geq l_{t,ef}$).

Admitindo os provetes testados com a técnica EBR e para comprimentos de colagem suficientemente grandes, segundo o modelo A previu-se uma força máxima de ancoragem de 13.8kN e segundo o modelo B essa previsão foi de 13.9kN. Recordando a força máxima de 13.7kN obtida nos ensaios de aderência em flexão (Capítulo 4) para $l_t=60$ mm, verifica-se que a previsão se ajusta bem à campanha experimental realizada.

O modelo A foi também usado para as técnicas HNSM e VNSM e conduziu a previsões de $F_{t,max}^R$ de 18.3kN e 15.7kN respectivamente. Comparativamente, os ensaios experimentais do Capítulo 4 apontaram para forças de tracção do compósito, na rotura, de 18.4kN em HNSM e 16.3kN em VNSM. Constata-se que a diferença entre as inserções horizontais e as verticais é mais acentuada na previsão analítica do que nos resultados experimentais.

Os comprimentos efectivos de colagem previstos pelo modelo A são de 35mm para o reforço de MLC com CFRP curado *in situ* pela técnica EBR, de 59mm pela técnica HNSM e 49mm pela técnica VNSM, que são valores suportados pelos resultados do Capítulo 4.

Com o modelo B, apenas se previu a força de arranque para a técnica EBR com $l_t \geq l_{t,ef}$, que foi, como já dito, de 13.9kN, o que resulta numa tensão de pico (τ_{max}) de 14.34MPa. Quando, por exemplo, a tensão média esperada numa interface de $l_t = l_{t,ef}^{modB} = 55\text{mm}$, é de $\tau_{med} = 13900 / (55 \times 60) = 4.21\text{MPa}$. Aqui se vê a importância da previsão do pico de tensão, que desencadeará a rotura da ligação madeira-FRP.

Por comparação directa do desempenho dos 2 modelos analíticos, no que diz respeito à previsão da força máxima de tracção no compósito, concluiu-se que:

- O modelo A apresenta previsões ligeiramente pelo lado da segurança com os resultados experimentais a serem 3.1% superiores aos previstos;
- E o modelo B, por sua vez, está ligeiramente do lado do perigo, com previsões 1.5% superiores aos resultados experimentais.

Concluiu-se com um exemplo de cooperação dos 2 modelos teóricos, onde as forças resistidas pela ligação foram dadas pelo modelo A, e a linha de distribuição das tensões tangenciais ao longo da ligação foi dada pelo modelo B. Isto para instantes de carregamento que começa por aumentos de carga aplicada ao compósito e, depois de se atingir τ_{max} admissível, abriu-se uma fenda, que ao propagar-se até rotura total da interface, criou os instantes seguintes de cálculo do exemplo.

O bom funcionamento desse exemplo teórico comprova que o trabalho feito na calibração destes modelos poupará tempo e investimento em futuros programas experimentais de análise da aderência entre madeira e CFRP curado *in situ*, reforçado pela técnica EBR, porque permite simular os efeitos da variação de comprimento de colagem através de uma análise paramétrica simples.

6

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O trabalho que agora se concluiu permitiu trazer mais uma contribuição na área do reforço de estruturas de madeira por colagem externa de compósitos à base de fibras de carbono. O principal objectivo desta dissertação incidiu, sobretudo, no estudo do comportamento da aderência na interface da ligação colada entre a madeira e o compósito, visto que, no reforço por colagem de sistemas de material compósito à madeira a aderência é um factor determinante. Obviamente que esta técnica não é a solução geral para reforço de estruturas de madeira, cabendo pois, ao engenheiro projectista, escolher a melhor solução, com o devido conhecimento das potencialidades e dos condicionalismos das várias opções de reforço. Devem ser sempre tidos em conta aspectos técnicos, económicos, estéticos e de durabilidade. Este documento pretende ser uma boa fonte científica de apresentação das fortes potencialidades dos compósitos de FRP como opção de reforço de estruturas de madeira.

No geral, considera-se que os principais objectivos deste trabalho foram alcançados e algumas das conclusões extraídas deste trabalho vêm reforçar o leque das contribuições de outros investigadores ou centros de investigação nesta área.

As principais conclusões a extrair deste trabalho de investigação foram devidamente assinaladas nos capítulos anteriores, pelo que, neste capítulo apenas serão registadas aquelas consideradas mais pertinentes.

A madeira é um material de construção cada vez mais procurado porque ser resistente, leve e esteticamente apelativo, pelos seus produtos derivados ganhou condição de dimensões ilimitadas e propriedades mecânicas definidas e controladas, o que, associado à certificação de recurso renovável, o torna numa excelente opção de construção futura ambientalmente eficaz.

O objectivo de reforçar madeira é fundamentalmente aumentar a capacidade resistente e a rigidez do elemento. Um elemento de madeira reforçado na zona traccionada, sujeito a flexão, apresenta comportamento dúctil na rotura porque o reforço garante a integridade da zona traccionada, obrigando a madeira a ruir por compressão, onde apresenta comportamento dúctil. Desta forma, há enormes vantagens em reforçar estruturas novas de madeira podendo, no processo de dimensionamento, assumir-se comportamento elasto-plástico da secção em Estado Limite Último.

Os polímeros reforçados com fibras (FRP) constituem uma promissora solução de reforço de madeira. Sistematizam-se as vantagens gerais de aplicar este reforço em elementos estruturais de madeira:

- Aumenta a capacidade resistente da madeira;

- Aumenta a rigidez da estrutura de madeira, reduzindo as deformações em serviço;
- Reduz a influência dos defeitos da madeira;
- Reduz as variações dimensionais da madeira por variações externas de humidade e temperatura;
- Aplicando-se em estruturas novas, vantagem de reduzir o gasto de madeira, reduzir a secção transversal do elemento estrutural, porque aumenta a capacidade resistente global do elemento;
- Aplicando-se em estruturas existentes, vantagem de ser de fácil aplicação, ser pouco invasivo, não necessitando de preparações da estrutura para se poder aplicar o reforço de FRP;
- Usando-se a técnica de reforço NSM, vantagem do reforço ficar totalmente escondido na madeira, não alterando o aspecto visual da estrutura de madeira original. Factor que é muito importante porque há estruturas antigas de madeira que são autênticas obras de arte;
- A aplicação NSM de FRP em madeira anula o grande ponto fraco destes materiais compósitos, o funcionamento exclusivo numa reduzida gama de temperaturas, de -50°C a +100°C, porque a madeira que envolve exteriormente o reforço inserido, possibilita a protecção ideal, simples e económica que estes compósitos necessitam.

Neste trabalho mostrou-se que a aplicação de compósito de CFRP curado *in situ* em madeira, não constitui, de todo, um reforço desproporcionado, onde a rigidez e capacidade última da armadura de reforço são desmesuradamente superiores às mesmas características na estrutura reforçada de madeira. Mostrou-se que as roturas da ligação madeira-CFRP aconteceram, de facto, por esgotamento da capacidade da madeira, mas para níveis de extensão do compósito que chegaram aos 70% da capacidade última de alongamento das fibras de carbono. Em comparação com idêntico reforço em betão, também feita neste documento, a madeira provou conseguir níveis de eficiência do compósito empregue da ordem de 90% da eficiência conseguida pelo betão. Sendo que esta aplicação em betão é já uma comprovada boa aplicação de compósitos de FRP.

O sucesso de elementos reforçados com FRP recorrendo à técnica de colagem depende da adequada compatibilidade entre os materiais intervenientes na interface de colagem/ligação entre os mesmos. No presente trabalho, essa dependência é manifestada pelo condicionalismo da aderência entre madeira-resina-FRP.

A aderência entre o CFRP e o betão depende de parâmetros como o comprimento de colagem da armadura adicional, a técnica de reforço (colagem exterior ou inserção em ranhuras), o tipo de sistema de reforço (tipo manta ou tipo laminado), a fluidez da resina que garante a aderência entre as fibras de FRP e as fibras de madeira, o tipo de preparação e o estado de conservação da superfície da madeira.

Uma forma de se compreender a importância desses parâmetros no desempenho da técnica de reforço é o de realizar ensaios de aderência recorrendo à técnica de “Pull-Off” ou modelos de flexão simples, entre outros, de modo a se extrair ilações sobre o comportamento dos modelos. Neste trabalho recorreu-se a esse procedimento e procurou reunir-se as principais recomendações para a optimização do desempenho da estrutura reforçada.

Vários modos de ruína da ligação colada são possíveis de ocorrer. Nos ensaios de arrancamento por “Pull-Off”, quando se conseguiram boas aplicações do reforço, sem vazios significativos na zona de resina, as roturas foram sempre observadas por rotura interlaminar da madeira (rotura coesiva na madeira). Os modos de ruína observados nos ensaios de aderência por flexão foram diferentes consoante a técnica de reforço por colagem exterior (EBR) ou por inserção em ranhuras (NSM). Em EBR sentiram-se sobretudo roturas por corte na madeira (tipo R1 – ver Quadro 4.4 no Capítulo 4), enquanto em NSM se verificaram roturas predominantemente mistas, originadas sobretudo pela

geometria do reforço em duas fiadas, em que se iniciava o escorregamento pela rotura por corte da resina (tipo R3) numa delas, e acabava por induzir maiores esforços na outra fiada, resultando em rotura por corte da madeira (tipo R1) ou mesmo em rotura por tracção do compósito (tipo R5).

Resumidamente, os limites dos valores de ensaios de “Pull-Off” em madeira e em betão, são os seguintes:

- junta madeira: $2.31 \leq f_{wtm,p} \leq 4.08 \text{ MPa}$ $\Rightarrow$ Valor médio = 3.07 MPa
- junta EBR: $1.05 \leq f_{wtm,p} \leq 3.50 \text{ MPa}$ $\Rightarrow$ Valor médio = 2.41 MPa
- junta NSM: $1.00 \leq f_{wtm,p} \leq 1.66 \text{ MPa}$ $\Rightarrow$ Valor médio = 1.27 MPa
- junta betão EBR: $1.55 \leq f_{ctm,p} \leq 3.80 \text{ MPa}$ $\Rightarrow$ Valor médio = 2.94 MPa

Os “Pull-Off” efectuados directamente em madeira provam ainda que este material tem características de coesão superficial bastante boas, obtendo-se nesses ensaios os maiores valores de tensão de tracção por “Pull-Off”, maiores do que qualquer ensaio realizado nos betões de melhores classes.

Os valores médios de tensão de “Pull-Off” obtidos nas juntas EBR em madeira, são aproximadamente 85% dos obtidos nas juntas homólogas em betão. Mostrando-se nestes ensaios, que o reforço de FRP em madeira se comporta ao nível da sua aplicação em betão.

O ajuste do modelo de ensaio e o deficiente controlo de qualidade no caso do reforço NSM conduziu a valores muito baixos da tensão de aderência por “Pull-Off”. Concluiu-se que o ensaio de “Pull-Off” não é o indicado para aferir a aderência desta técnica de reforço.

Em contrapartida, os ensaios de aderência recorrendo a modelos de flexão mostraram boa adaptabilidade às técnicas EBR e NSM e vantagens pela extensa informação que deles se pode concluir.

Em termos gerais, os valores médios da tensão obtida no compósito para as 3 séries de comprimento de colagem e 3 técnicas de reforço da campanha experimental de flexão são os seguintes:

- EBR: $l_t=20 \Rightarrow \sigma_f^R=1569\text{MPa}$ $l_t=40 \Rightarrow \sigma_f^R=1922\text{MPa}$ $l_t=60 \Rightarrow \sigma_f^R=1759\text{MPa}$
- HNSM: $l_t=20 \Rightarrow \sigma_f^R=1399\text{MPa}$ $l_t=40 \Rightarrow \sigma_f^R=2248\text{MPa}$ $l_t=60 \Rightarrow \sigma_f^R=2358\text{MPa}$
- VNSM: $l_t=20 \Rightarrow \sigma_f^R=1400\text{MPa}$ $l_t=40 \Rightarrow \sigma_f^R=2200\text{MPa}$ $l_t=60 \Rightarrow \sigma_f^R=2058\text{MPa}$

O aumento do comprimento de colagem (ou aderência) conduziu ao aumento da força no compósito e do escorregamento da interface na rotura. Contudo, a influência do comprimento de aderência diminui para comprimentos maiores. O aumento do comprimento de aderência provoca ainda uma redução do valor das tensões médias de corte na interface madeira-CFRP devido, em parte, ao aumento da área do compósito envolvente na colagem.

Baseado nestes resultados de tensão normal máxima transmitida ao compósito, e no seu valor de resistência tabelado pelo fabricante ($f_f=3500\text{MPa}$), pode-se concluir que o valor máximo esperado de rentabilidade no compósito, para uma ligação bem executada (com mobilização do comprimento efectivo de colagem, $l_t > l_{t,ef}$) de madeira-CFRP, é aproximadamente de:

- Na técnica de reforço EBR: *Rendimento máximo do compósito = 55%*
- Na técnica de reforço HNSM: *Rendimento máximo do compósito = 70%*
- Na técnica de reforço VNSM: *Rendimento máximo do compósito = 65%*

A aplicação do reforço de CFRP pela técnica de inserção em ranhuras (NSM) permite melhor aderência, isto é, são necessárias maiores forças de tracção no compósito para fazer ruir a ligação. Inserindo o compósito em ranhuras verticais, técnica aqui designada de VNSM, não se consegue tanta aderência como inserindo o mesmo compósito em ranhuras horizontais (HNSM), porque o ensaio

executado foi de flexão, e que simula bastante bem o reforço de vigas, mas origina maiores esforços nas fibras inferiores do compósito que apresenta desenvolvimento em altura. Dessa forma, em VNSM conseguem-se forças máximas de arranque do reforço que são 90% das conseguidas em HNSM, ao mesmo tempo que o escorregamento máximo da interface aumenta para 120% do observado em HNSM, porque as fibras mais traccionadas começam a deslizar primeiro.

Obtiveram-se desempenhos ligeiramente piores na técnica VNSM do que na HNSM, porque o ensaio em flexão induziu maiores esforços (potenciando rotura prematura) nas fibras inferiores do reforço VNSM, que apresenta 15mm de altura enquanto o reforço HNSM tem expressão linear em altura. Para intervenções de reforço em vigas de madeira, sujeitas também à flexão como aqui, sugere-se que se aplique a técnica de reforço HNSM, conseguindo uns 5% de ganho no rendimento do compósito aplicado, comparado ao reforço em ranhuras verticais.

Será admissível avançar com a informação de que, pelos resultados dos ensaios de aderência em flexão, os comprimentos efectivos de colagem entre o Pinho Norueguês e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (CFRP) curado *in situ*, sejam aproximadamente os seguintes:

- Na técnica de reforço EBR: $l_{t,ef} \approx 30\text{mm}$
- Na técnica de reforço HNSM: $l_{t,ef} \approx 50\text{mm}$
- Na técnica de reforço VNSM: $l_{t,ef} \approx 40\text{mm}$

Dados retirados de publicações, revelam que os valores aqui obtidos em madeira, são da ordem de 90% no reforço EBR e 100% no reforço NSM, dos valores de aderência de CFRP em betão. Revelam ainda que o comprimento efectivo de aderência ($l_{t,ef}$) na madeira é em média 3 vezes inferior ao necessário numa ligação em betão, ou seja, há muito menos desperdício de compósito na aplicação em madeira.

Em qualquer uma das três técnicas de reforço aqui testadas, se mostrou o bom potencial de aplicação do reforço de CFRP em madeira.

A técnica EBR possibilita a mobilização da força máxima de transferência de esforços entre o compósito e a madeira num comprimento de colagem efectivo inferior ao das outras duas técnicas. Constituindo, assim, a melhor escolha no caso de haver pouco comprimento de amarração do compósito disponível na estrutura de madeira e necessidades imediatas de desenvolver grandes forças no mesmo.

A técnica HNSM apresenta-se como sendo a que consegue transmitir maiores níveis de carga às fibras do compósito antes da rotura da junta, chegando-se a imprimir tensão de tracção nas fibras de carbono de quase 70% da sua resistência mecânica tabelada pelo fabricante.

A técnica VNSM permite a maior ductilidade da estrutura, atingindo escorregamentos de 2.5mm num comprimento de colagem de 60mm, avisando assim, mais eficazmente do que as outras técnicas, a eminente falha do reforço (e falha da estrutura).

Melhorias no processo de execução do reforço podem levar a valores ainda maiores de resistência da ligação, designadamente: aumentar a quantidade relativa de fibras em cada ranhura diminuindo a quantidade de resina, ou usar algum mecanismo de injeção de resina na ranhura de dentro para fora reduzindo os vazios na ligação colada, ou até usar na técnica NSM o reforço de fibras de carbono em laminado (em vez do curado *in situ*) para facilitar a execução.

Em termos de desempenho da junta madeira-CFRP sublinha-se que o valor máximo da tensão tangencial média na interface chegou aos 9MPa na técnica NSM e ultrapassou os 10MPa na técnica EBR. Recorde-se que madeira de classe C30, aqui usada, tem resistência característica ao corte

$f_{v,k}=3.0\text{MPa}$ e resistência à tracção paralela ao fio $f_{t,0,k}=18\text{MPa}$ (EN 338, 2003). Conclui-se que, o mecanismo de aderência aqui testado solicita de forma mista a madeira ao corte e à tracção, porque a penetração de resina nos poros da madeira pode formar um bloco nas primeiras camadas de fibras da madeira, criando “base” para solicitá-las à tracção. A ruína parece ser despoletada por tensão de pico na interface, e não por tensão média, uma vez que as ruínas nos comprimentos de colagem maiores, aconteceram para τ_{med}^R cada vez menores.

Finalmente, no Capítulo 5 foram calibrados 2 modelos analíticos, o modelo A (CEB-FIP, 2001) e o modelo B (Musner, 2004), que conseguem prever a aderência máxima de ligações madeira-CFRP através de parâmetros mecânicos conhecidos dos materiais envolvidos e características geométricas da ligação. A aderência máxima é prevista na forma de força máxima de tracção que se consegue aplicar ao compósito no momento de rotura (F_t^R) quando se mobiliza pelo menos o comprimento efectivo de colagem.

Por comparação directa do desempenho dos 2 modelos analíticos, no que diz respeito à previsão da força máxima de tracção no compósito, concluiu-se que:

- O modelo A apresenta previsões ligeiramente pelo lado da segurança com os resultados experimentais a serem 3.1% superiores aos previstos;
- E o modelo B, por sua vez, está ligeiramente do lado do perigo, com previsões 1.5% superiores aos resultados experimentais.

Realce-se que ambos os modelos fornecem previsões muito próximas dos resultados dos ensaios experimentais de aderência em flexão.

Com o modelo B, foi possível perceber a importância da previsão do pico de tensão, que desencadeia a rotura da ligação madeira-FRP, já que, por exemplo numa ligação madeira-CFRP de $l_t=l_{t,ef}^{modB}=55\text{mm}$, se obtém uma tensão de pico $\tau_{max}=14.34\text{MPa}$, quando a tensão média calculada nessa interface era apenas de $\tau_{med}=4.21\text{MPa}$. Este pico de tensão ocorre junto ao ponto de aplicação da carga e, com a propagação da fendilhação na interface, move-se em direcção à extremidade, provocando o destacamento total do CFRP.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O reforço, de estruturas antigas ou de estruturas novas com forte presença de madeira, poderá ser realizado com o auxílio de compósitos de FRP. Estes materiais possuem uma grande versatilidade e como se viu podem ser aplicados com sucesso num número elevado de situações. Contudo, subsistem alguns pontos merecedores de desenvolvimento, nomeadamente, o comportamento a longo prazo, o desempenho sob a acção do fogo e o custo do sistema.

A abordagem feita no Capítulo 5 reforça o facto de que não existe ainda claramente definida uma lei constitutiva, comumente aceite na comunidade científica, que retrate o comportamento da interface madeira-adesivo-FRP. Pelo que a sua pesquisa e avaliação poderia ser um grande passo nesta área. Recomendações e regras de dimensionamento, nos códigos estruturais, tais como o Eurocódigo 5, de estruturas em madeira, são indispensáveis no futuro. Dessa forma, divulgavam-se largamente as vantagens resistentes e de segurança da aplicação de reforços de FRP em madeira entre os projectistas, criando-se estruturas novas de madeira prontas para os desafios do novo século.

Na área da reabilitação urbana, a conjugação de elementos de madeira e de perfis pultrudidos de GFRP (fibras de vidro) são um interessante desafio à construção modelar, mais aligeirada e de execução rápida no tecido urbano.

REFERÊNCIAS

- ACI – Committee 440 (2000). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills, Michigan.
- ASTM D 5573 (1999). *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. American Society for Testing and Materials, 10/04/1999, Philadelphia, EUA.
- Beber, A. J., Campos Filho, A., Campagnolo, J. L. (2000). *Reforço de estruturas de concreto armado com tecidos pré-impregnados de fibras de carbono*. Revista Técnica, p 52-55.
- Blaß, H. J., Romani, M. (2000). *Reinforcement of glulam beams with FRP reinforcement*. <http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~gc20/IHB/PUBLIC/23.pdf>, 05/06/2008, University of Karlsruhe, Alemanha, 7p.
- Borri, A., Corradi, M., Grazini, A. (2003). *FRP reinforcement of wood elements under bending loads*. Proceedings, Structural Faults and Repair, Londres, 13p.
- Brunner, M. (2002). *Theoretical strength limits of timber beams fortified with prestressed artificial fibres*. WCTE 2002 – The 7th World Conference on Timber Engineering, 12 a 15 Agosto, Shah Alam, Malaysia, p 118-124.
- BS 1204:1993 (1993). *Specification for type MR phenolic and aminoplastic synthetic resin adhesives for wood*. BSI British Standards, 15/01/1993, 16p, Londres.
- CEB-GTG 21 (1990). *Redesign of concrete structures*. Redesign of concrete structures, Novembro.
- CEB-FIP (2001). *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. FIB Bulletin 14, Technical report on the Design and Use of Externally Bonded Fibre reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced concrete structures, Task Group 9.3, Julho, Sprint-Digital-Druck, Stuttgart.
- CNR-DT 201/2005 (2007). *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, 06/2007, Rome.
- Costa, M. J. P. M., Barbosa, R., Juvandes, L. F. P. (2005). *Análise de aderência das ligações coladas betão-FRP e sua correlação com as propriedades mecânicas do betão*. Relatório de investigação, Seminário MPC, Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P (FEUP), Porto, Junho, 61p.
- Cruz, H. (2007). *Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal. Instrumentos para a garantia da qualidade*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, série II, nº1, 07/2007, p 45-56, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Divisão de Edições e Artes Gráficas, Lisboa.
- Cruz, P., Dias, S., Branco, J. (2004). *Avaliação da aderência da ligação colada madeira-CFRP*. Cimd'04 – A Madeira na Construção – 1.º Congresso Ibérico, 25 e 26 Março, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho Portugal, Guimarães, p 469-478.

- Cunha, J., Dogmar, S. Jr. (2004). *Avaliação estrutural de peças de madeira reforçadas por fibras de carbono*. Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, N° 20, 05/2004, p 71-81, A. Gomes Correia – U.M., Guimarães.
- Dias, S. J. E. (2001). *Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*. Dissertação de Mestrado, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Dias, S., Branco, J., Cruz, P. (2004). *Reforço à flexão com compósitos de CFRP de vigas de madeira lamelada-colada*. Cimaad'04 – A Madeira na Construção – 1.º Congresso Ibérico, 25 e 26 Março, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho Portugal, Guimarães, p 479-488.
- Dias, S., Branco, J., Cruz, P. (2006). *Compósitos de CFRP unidireccionais no reforço de vigas de madeira lamelada-colada*. Revista Internacional Construlink, Vol. 4, N° 11, 02/2006, p 25-33, Construlink.com – Tecnologias de Informação S.A., Lisboa.
- Dimande, A. O. (2003). *Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas de FRP*. Dissertação de Mestrado, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Dinwoodie, J. M. (2000). *Timber, Its Nature and Behavior*. E & FN Spon, London.
- Dolan, C. W., Galloway, T. L., Tsunemori, A. (1997). *Prestressed glued-laminated timber beam – pilot study*. Journal of Composites for Construction, Vol. 1, N° 1, 02/1997, p 10-16, ASCE Publications, Reston, EUA.
- Dorey, A. B., Cheng, J. J. R. (1996). *The behavior of GFRP glued laminated timber beams*. Advanced composites materials in bridges and structures, Ed. M. M. El-Badry, Montreal, Québec, p 787-794.
- EN 301:2006. *Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures. Classification and performance requirements*.
- EN 338:2003. *Structural timber. Strength classes*.
- EN 386:2001. *Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements*.
- EN 408:2003. *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*.
- EN 1542:1999. *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off*.
- EN 1995-1-1:2004. *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings*.
- Gentile, C., Svecova, D., Rizkalla, S. H. (2002) *Timber beams strengthened with GFRP bars: Development and applications*. Journal of composites for construction, Vol. 6, N° 3, 02/2002, p 11-20, ASCE Publications, Reston, EUA.

- Gilfillan, R., Gilbed, S., Patrick, G. (2001). *The use of FRP composites to enhance the structural performance of timber beams*. FRP Composites in Civil Engineering, Vol.11, Elsevier Science Ltd, p 1371-1378.
- Haiman, M., Zagar, Z. (2002). *Strengthening the timber glulam beams with FRP plates*. WCTE 2002 – The 7th World Conference on Timber Engineering, 12 a 15 Agosto, Shah Alam, Malaysia, p 110-117.
- Holzenkämpfer, P (1994). *Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile*. Dissertação de Doutoramento, Technische Universität Braunschweig, Germany.
- Ibars, E. O. (2005). *Peeling failure in beams strengthened by plate bonding – A design proposal*. Dissertação de Doutoramento, Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Juvandes, L. F. P. (1999). *Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão usando Materiais compósitos de CFRP*. Dissertação de Doutoramento, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Juvandes, L. F. P., Marques, N. (2007). *Reforço de estruturas por colagem exterior de sistemas compósitos de FRP – Manual de procedimentos de controlo de qualidade para construção*. Relatório LEMC-JUV[003-2007, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Kollmann, F. F. P., Côté, W. A. Jr. (1968). *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I. Solid Wood*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kalamkarov, A. L. (1997). *Stress analysis in elastic joint structures*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 39, N° 7, 07/1997, p 873-883, Elsevier Ltd.
- Lopez-Anido, R., Xu, H. (2002). *Structural Characterization of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Glulam Panels for Bridge Decks*. Journal of composites for construction, Vol. 6, N° 1, 08/2002, p 194-203, ASCE Publications, Reston, EUA.
- Matthys, S. (2000). *Structural Behaviour and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement*. Dissertação de Doutoramento, Ghent University, Faculty of Applied Sciences Department of Structural Engineering.
- Martins Sá, I. B., Branco, L. A. M. V., Juvandes, L. F. P. (2005). *Análise da aderência de Ligações coladas entre sistemas de FRP e elementos de Madeira Lamelada Colada - ensaios de “Pull-Off”*. Relatório de investigação, Seminário MPC, Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P (FEUP), Porto, Junho, 67p.
- Moulin, J. M., Pluvinage, G., Jodin, P. (1990). *FGRG: fiberglass reinforced gluelam – A new composite*. Wood Science Technology, Vol. 24, N° 3, 07/1990, p 289-294, Springer Berlin, Heidelberg.
- Musner, S. (2004). *Compositi FRP – Applicazione al legno, Studio delle potenzialità applicative e delle problematiche connesse*. Dissertação de Mestrado, Facoltà di Ingegneria Università Degli Studi di Trento.

- Neubauer, U., Rostásy, F. S. (1997). *Design Aspects of Concrete Structures Strengthened with Externally Bonded CFRP Plates*. Proceedings of the 7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, 07/1997, Edinburgh, Scotland, Vol. 2, p 109-118, ECS Publications.
- NP EN 1194:2002. *Estruturas de madeira. Madeira lamelada-colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos*.
- Parisi, M. A., Piazza, M. (2002). *Rehabilitation of timber structures by new materials and connectors*. 15p.
- Sena-Cruz, J. M., Barros, J. A. O. (2002). *Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*. Relatório técnico 02-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 54p.
- Sena-Cruz, J. M. (2004). *Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips*. Dissertação de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- Senno, M., Piazza, M., Tomasi, R. (2004). *Axial glued-in steel timber joints – experimental and numerical analysis*. Journal Holz als Roh- und Werkstoff, 02/04/2004, p 137-146, Springer Berlin, Heidelberg.
- Silva, S. P. L., Cachim, P. B., Juvandes, L. F. P. (2004). *Técnicas avançadas de reforço de estruturas de madeira com compósitos reforçados com fibras (FRP)*. Cimad'04 – A Madeira na Construção – 1.º Congresso Ibérico, 25 e 26 Março, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho Portugal, Guimarães, p 613-622.
- Travassos, N. A. C. (2004). *Caracterização do comportamento da ligação CFRP-betão*. Dissertação de Mestrado, IST – Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Tingley, D. A. (1996a). *Over a decade of research results in new, improved glulam*. Canadian Consulting Engineer, Março/Abril, p 24-28.
- Tingley, D. A. (1996b). *High-strength fiber-reinforced plastic reinforcement of wood and wood composite*. 41st International Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) Symposium, Março, Anaheim, California, p 667-673.
- Tomasi, R. (1999). *Analisi del comportamento in campo elastico ed a rottura di giunti legno acciaio*. Dissertação de Mestrado, Università di Trento.
- Ukyo, S., Masuda, M. (2006). *A New Method for Measuring the True Shear Strength of Wood*. WCTE 2006 – 9th World Conference on Timber Engineering, 6 a 10 Agosto, Portland, EUA, 7p.
- Veloso, M. A. (2005). *Espaços Recriados*. Grupo Ascensores Enor S.A., Vigo.
- Vidal Ferreira, R. B., Juvandes, L. F. P. (2006). *Comportamento de juntas coladas madeira-CFRP e madeira-GFRP através de ensaios de “Pull-Off”*. Relatório de investigação, Projecto MPC, Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P (FEUP), Porto, Julho, 20p.

WD&B Magazine (2005). *Quick Facts – Sustainable Building Series*. Wood Design & Building Magazine, 23/05/2005, Canadian Wood Council, Ottawa, <http://www.cwc.ca/Publications/PDF%20Publications/?Language=EN>. 20/05/2008.

Wernerson, Gustafson (1996). *A mixed-mode model for analysis of brittle and ductile glued joints*. WCTE 1996 – The 4th World Conference on Timber Engineering, Vol.4, p 481-487, New Orleans, EUA.

A1

ANEXO 1 – PROGRAMA EXPERIMENTAL DE FLEXÃO

Neste anexo resumem-se os principais registos recolhidos dos 4provetes $\times$ 3comprimentos $\times$ 3técnicas = 36ensaios na totalidade. Os dados deste anexo suportam os valores apresentados no Capítulo 4 desta dissertação. O anexo é formado 3 tabelas resumo e 9 grupos de 4 gráficos.

Cada tabela resumo, contém os valores singulares de cada ensaio e a respectiva análise estatística dentro de cada serie de 4 ensaios semelhantes. As grandezas físicas abrangidas são:

- Parâmetros do comportamento geral:
 - o M_{tot}^R [N.m]: momento flector total aplicado, no momento de rotura;
- Parâmetros do comportamento do compósito:
 - o F_t^R [kN]: força de tracção no compósito, no momento de rotura;
 - o σ_f^R [MPa]: tensão normal no compósito, no momento de rotura;
 - o ε_f^R [%]: extensão do compósito na zona descolada (na zona central), no momento de rotura;
 - o E_f^R [GPa]: módulo de elasticidade secante do compósito na rotura;
- Parâmetros do comportamento da junta:
 - o τ_{med}^R [MPa]: tensão tangencial média na ligação madeira-FRP, no momento de rotura;
 - o S_t^R [mm]: escorregamento na interface madeira-FRP, no momento de rotura;
- Modos de ruína:
 - o R1, R2, R3, R4, R5: de acordo com a nomenclatura definida no Quadro 4.4 no item 4.6 do Capítulo 4.

Os gráficos apresentam-se agrupados em conjuntos de 4, referente a uma só série, mas cada gráfico contém uma linha de cada provete ensaiado. Cada um dos 4 gráficos corresponde a uma das seguintes relações, que se consideram ser as mais relevantes para a interpretação do desempenho de um provete:

- $P_{tot}=f(\delta_v)$: carga total aplicada em função do deslocamento vertical;
- $\sigma_f=f(\varepsilon_f)$: tensão normal no compósito em função da sua extensão;
- $\sigma_f=f(S_t)$: tensão normal no compósito em função do escorregamento na interface;
- $\tau_{med}=f(S_t)$: tensão tangencial média na ligação em função do escorregamento na interface.

Note-se que, por erros de captação de dados da extensometria do compósito, durante os 4 ensaios EBR de $l_t=20\text{mm}$, esses valores lidos foram descartados. Fez-se uma reconstituição teórica da extensão esperada no compósito, com base na relação linear $\varepsilon=\sigma/E$, usando o valor de módulo de elasticidade à tracção das fibras tabelado pelo fabricante.

Quadro A1.1.1 – Resumo dos principais resultados (valores na ruína): Técnica EBR.

Parâmetros	Proveite nº	Comprimento de colagem											
		l _t = 20 mm				l _t = 40 mm				l _t = 60 mm			
		valor	média	Δ	cv (%)	valor	média	Δ	cv (%)	valor	média	Δ	cv (%)
G ^R M _{tot} (N.m)	1	1761				2585				2389			
	2	2150				2542				2252			
	3	1903				2032				2133			
	4	2186				2647				2193			
F ^R (kN)	1	10.609				15.570				14.836			
	2	12.951				15.315				13.568			
	3	11.820				12.623				12.850			
	4	13.579				16.442				13.624			
σ ^R (MPa)	1	1360.2				1996.2				1902.0			
	2	1660.4				1963.5				1739.5			
	3	1515.4				1618.3				1647.5			
	4	1741.0				2108.0				1746.6			
ε ^R (‰)	1	5.914				10.859				7.934			
	2	7.219				8.242				8.024			
	3	6.589				7.223				7.655			
	4	7.569				8.356				8.298			
E ^R (GPa)	1	230.000				183.826				239.732			
	2	229.998				238.231				216.783			
	3	229.997				224.041				215.217			
	4	230.007				252.261				210.499			
τ ^R (MPa)	1	8.841				6.488				4.120			
	2	10.792				6.382				3.768			
	3	9.850				5.260				3.570			
	4	11.316				6.850				3.784			
J ^R s _t (mm)	1	1.238				1.867				2.443			
	2	1.346				1.083				0.917			
	3	1.489				1.171				1.411			
	4	1.103				2.126				1.367			
Modo de Ruína (ver descrição detalhada no item 4.6)	1		R1				R1 e R3 e R4				R1 e R3 e R4		
	2		R1				R1 e R3 e R4				R1		
	3		R1				R1				R1 e R3		
	4		R1				R1				R1		

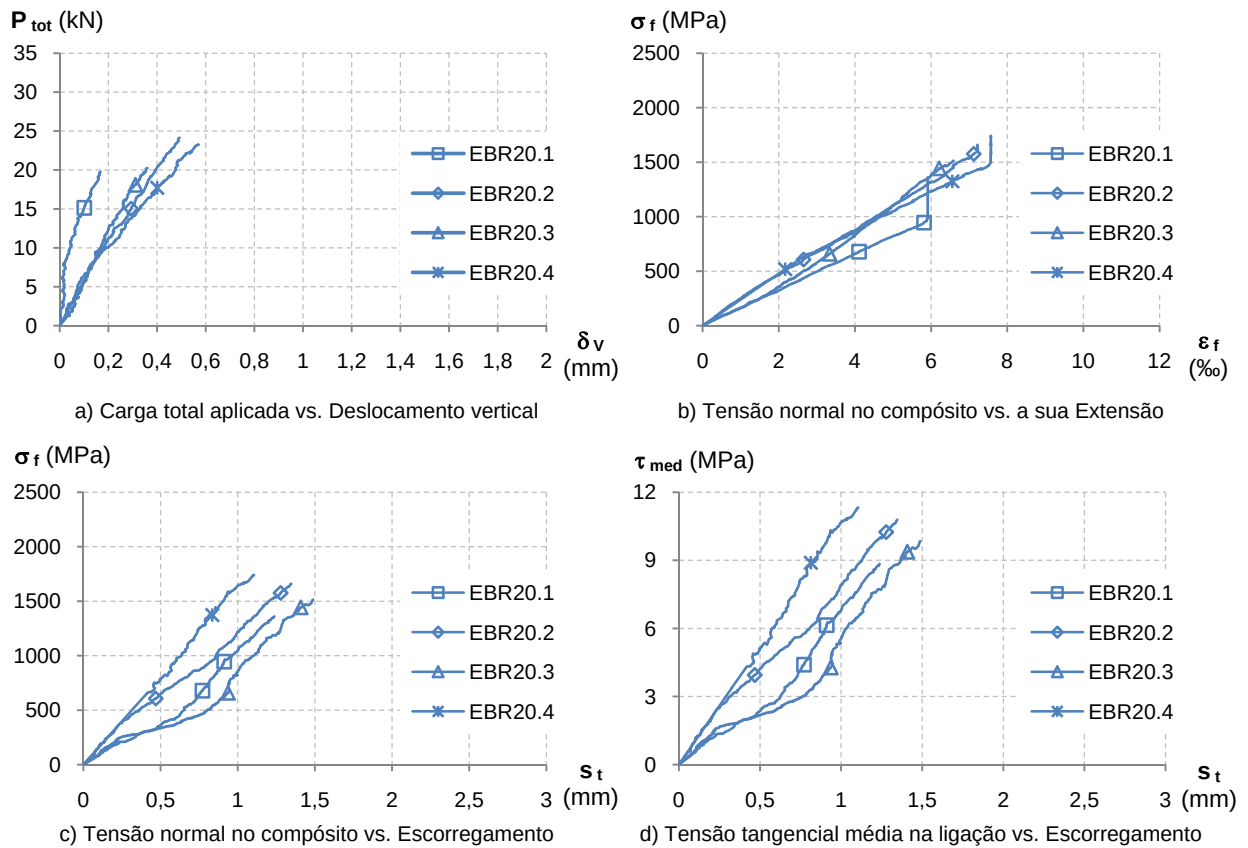


Figura A1.1 – Ensaio de aderência em flexão EBR 20mm.

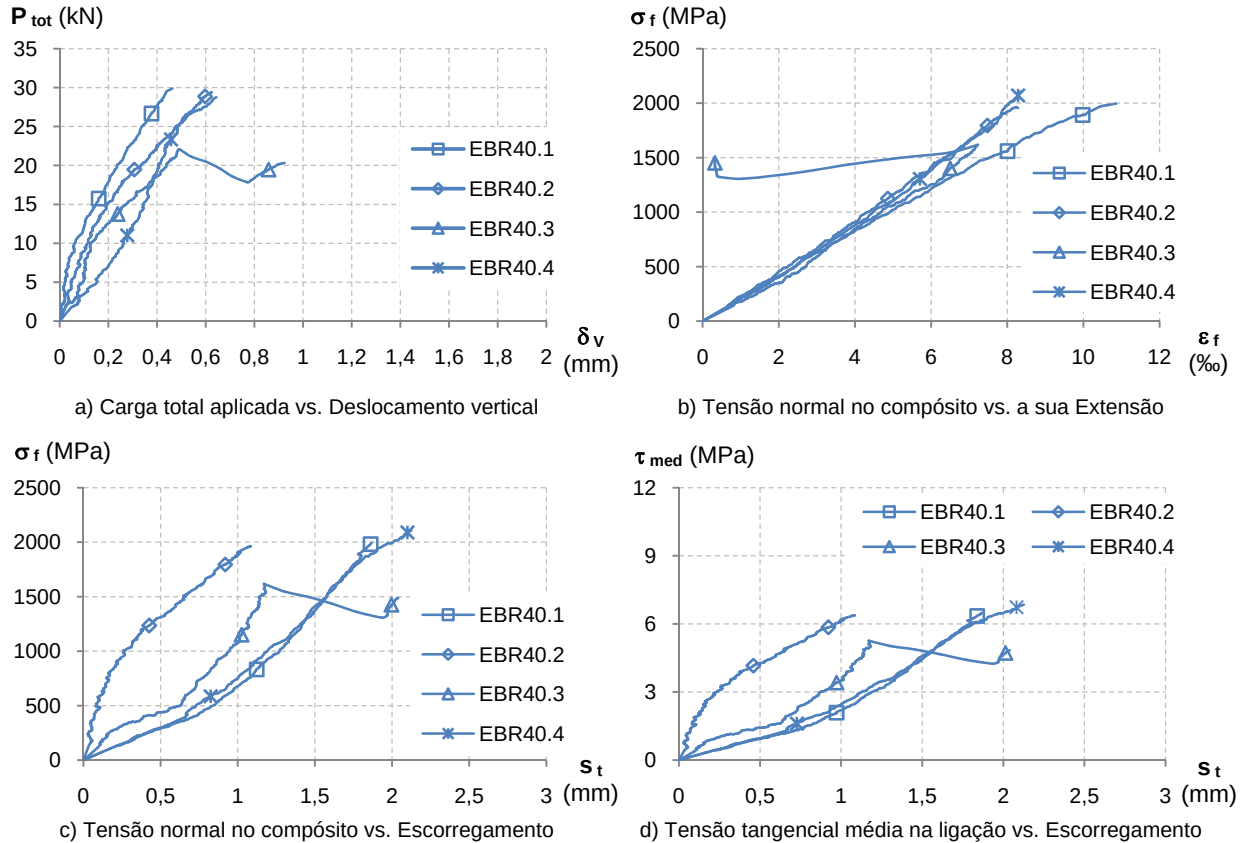


Figura A1.2 – Ensaio de aderência em flexão EBR 40mm.

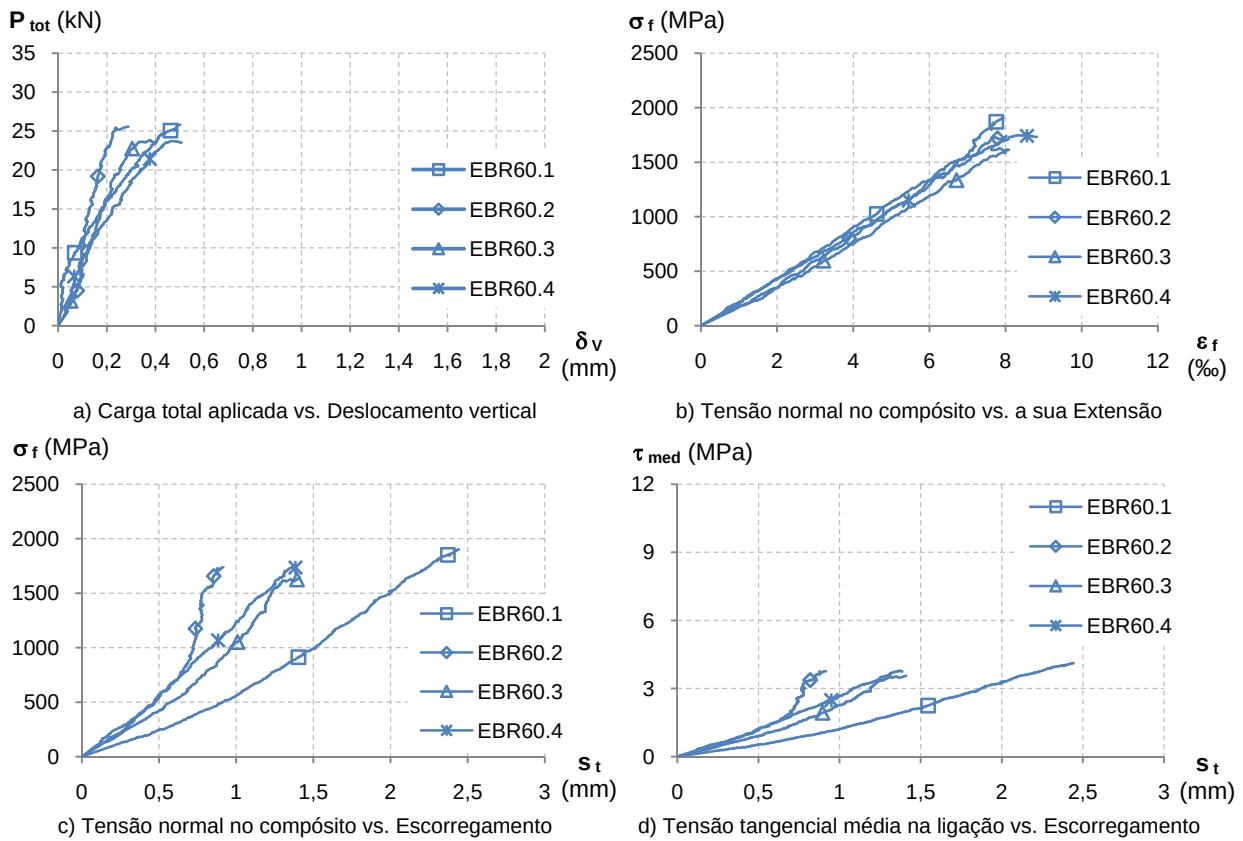


Figura A1.3 – Ensaios de aderência em flexão EBR 60mm.

Quadro A1.2 – Resumo dos principais resultados (valores na ruína): Técnica HNSM.

Parâmetros	Provede n°	Comprimento de colagem											
		$l_t = 20 \text{ mm}$				$l_t = 40 \text{ mm}$				$l_t = 60 \text{ mm}$			
		valor	média	Δ	cv (%)	valor	média	Δ	cv (%)	valor	média	Δ	cv (%)
G _{ral} ^R (N.m)	1	1752				2611				2471			
	2	1549				2519				2704			
	3	1830	331		21	2312	2497	129	5	2505	2619	157	6.0
	4	1093				2545				2798			
F _t ^R (kN)	1	12.084				18.649				17.040			
	2	10.683				17.990				18.645			
	3	13.071	10.911	2.291	21.0	15.946	17.535	1.151	6.6	17.895	18.391	1.249	6.8
	4	7.805				17.554				19.985			
Composto FRP	1	1549.2				2391.0				2184.7			
	2	1369.6				2306.4				2390.4			
	3	1675.7	1398.8	293.7	21.0	2044.3	2248.0	147.6	6.6	2294.1	2357.8	160.1	6.8
	4	1000.6				2250.5				2562.2			
Composto FRP	1	6.323				10.458				9.023			
	2	7.201				8.902				8.361			
	3	6.680	6.624	0.422	6.4	8.838	9.036	1.044	11.5	9.975	9.235	0.702	7.6
	4	6.294				7.947				9.583			
Junta	1	245.017				228.616				242.133			
	2	190.199				259.079				285.899			
	3	250.870	211.265	44.294	21.0	231.301	250.548	25.756	10.3	229.991	256.348	25.110	9.8
	4	158.973				283.196				267.369			
Junta	1	10.070				7.771				4.733			
	2	8.902				7.496				5.179			
	3	10.892	9.092	1.909	21.0	6.644	7.306	0.480	6.6	4.971	5.109	0.347	6.8
	4	6.504				7.314				5.551			
Junta	1	0.480				1.951				1.774			
	2	0.766				1.017				2.078			
	3	1.253	0.772	0.342	44.3	1.983	1.759	0.498	28.3	1.192	1.960	0.667	34.0
	4	0.589				2.085				2.795			
Modo de Ruína (ver descrição detalhada no item 4.6)	1	R3 numa fiada levou a R1 na outra				R3 numa fiada levou a R5 na outra				R3 numa fiada levou a R5 na outra			
	2	R3 numa fiada levou a R1 na outra				R3 nas duas fiadas				R1 numa fiada levou a R5 na outra			
	3	R1 nas duas fiadas				R3 numa fiada levou a R5 na outra				R3 nas duas fiadas			
	4	R1 nas duas fiadas				R3 numa fiada levou a R1 na outra				R3 numa fiada levou a R1 na outra			

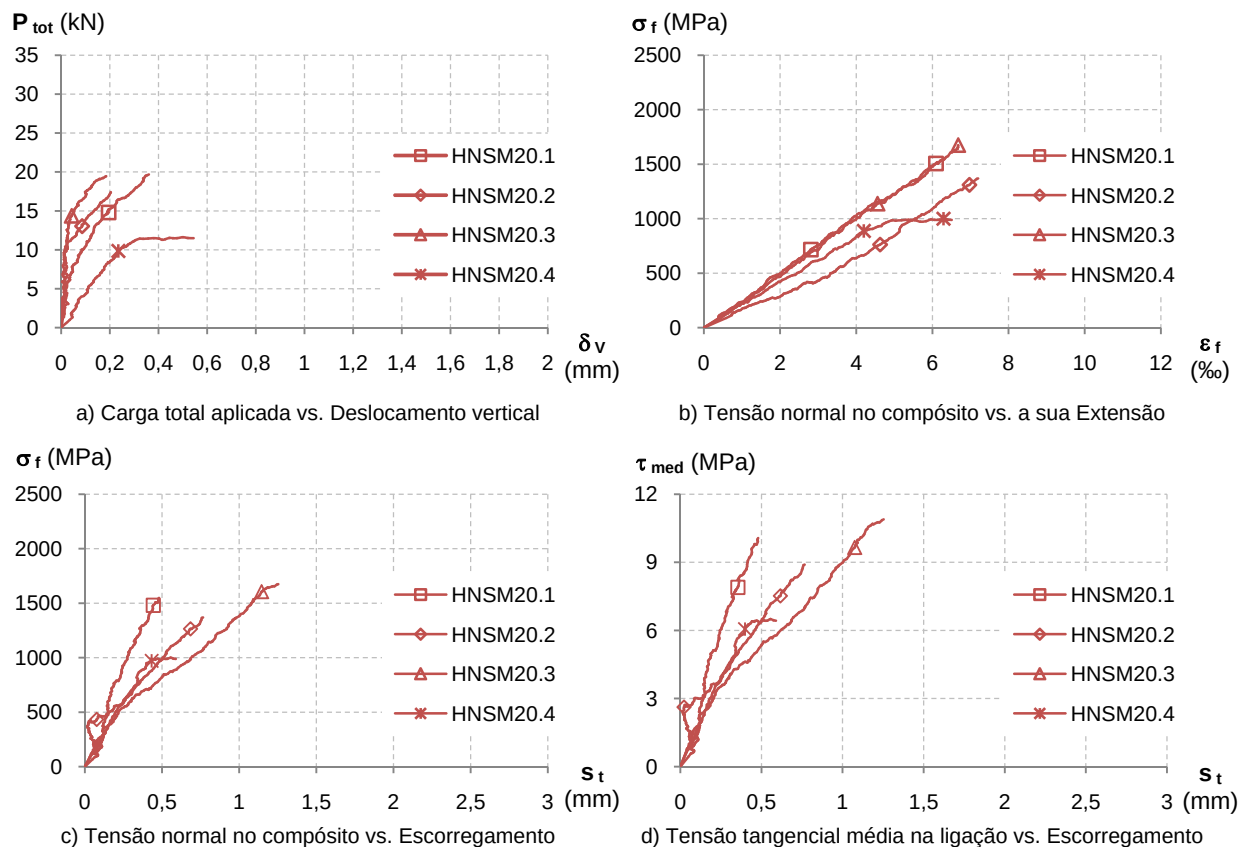


Figura A1.4 – Ensaio de aderência em flexão HNSM 20mm.

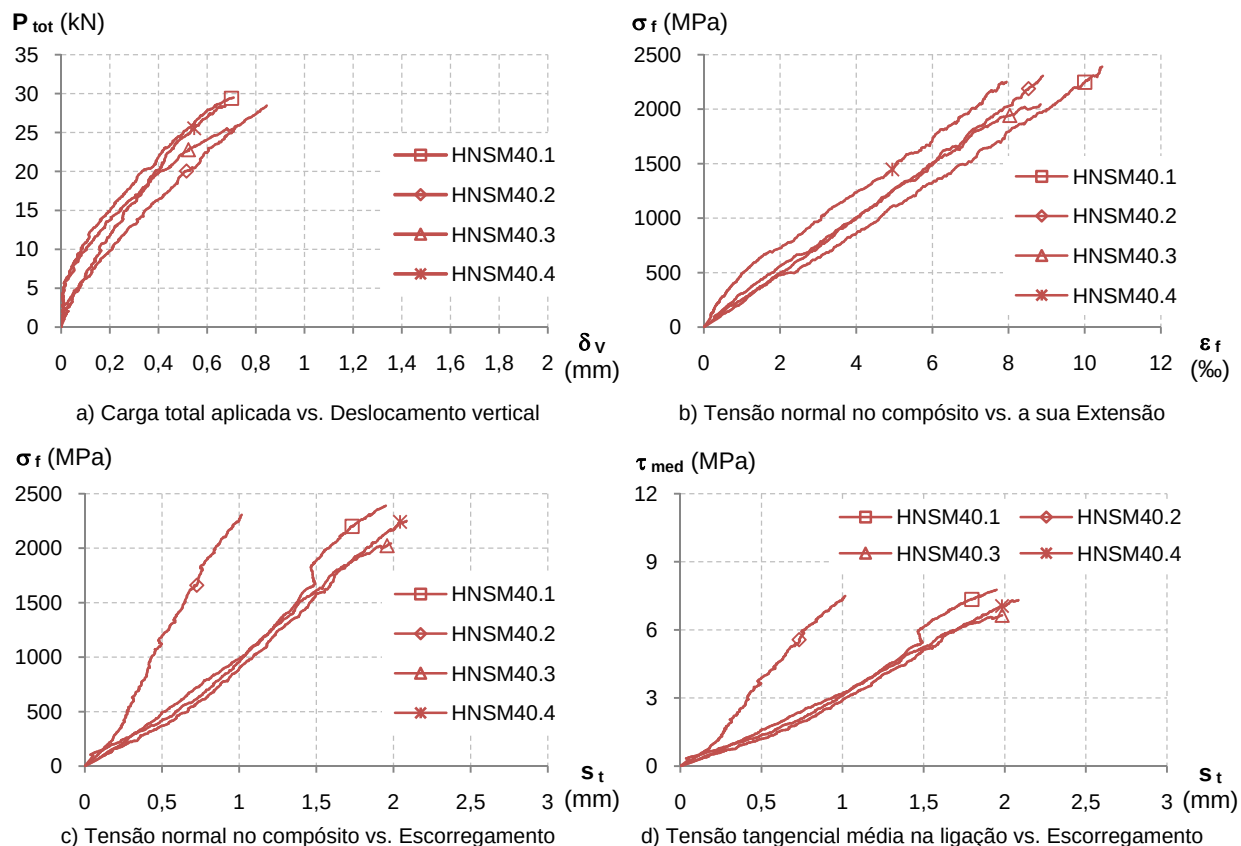


Figura A1.5 – Ensaio de aderência em flexão HNSM 40mm.

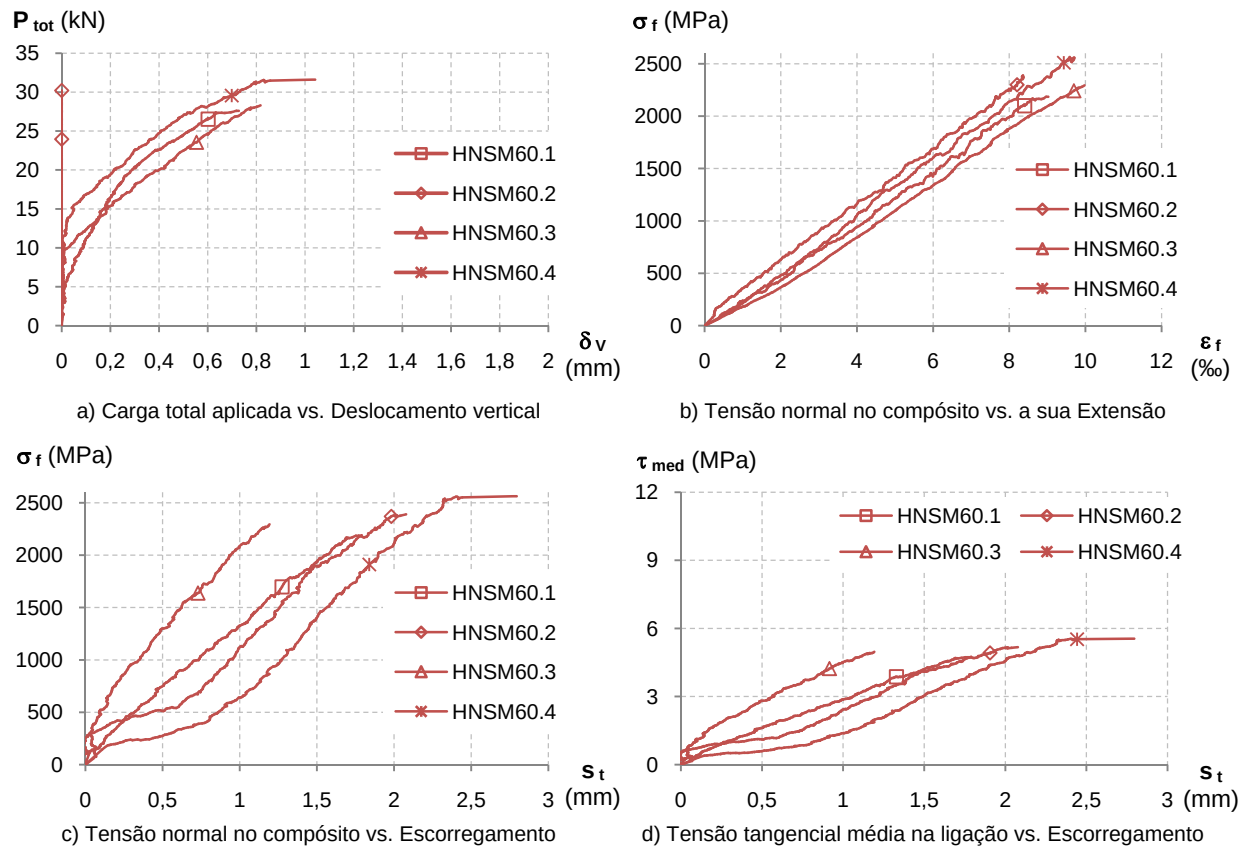


Figura A1.6 – Ensaio de aderência em flexão HNSM 60mm.

Quadro A1.3 – Resumo dos principais resultados (valores na ruína): Técnica VNISM.

Parâmetros	Provete nº	Comprimento de colagem											
		l _t = 20 mm				l _t = 40 mm				l _t = 60 mm			
		valor	média	Δ	cv (%)	valor	média	Δ	cv (%)	valor	média	Δ	cv (%)
Geral	M _{tot} ^R (N.m)	1 2081	1654	359	21.7	2872	2593	454	17.5	2305	2462	341	13.8
		2 1281				3031				2545			
		3 1807				2020				2895			
		4 1449				2451				2102			
	F _t ^R (kN)	1 13.512	10.921	2.337	21.4	19.272	17.161	3.292	19.2	14.971	16.260	2.340	14.4
		2 8.316				20.343				16.526			
		3 12.128				13.115				19.432			
		4 9.727				15.913				14.109			
Compósito FRP	σ _f ^R (MPa)	1 1732.4	1400.1	299.6	21.4	2470.8	2200.1	422.0	19.2	1919.3	2084.5	300.0	14.4
		2 1066.1				2608.0				2118.7			
		3 1554.9				1681.4				2491.3			
		4 1247.1				2040.1				1808.8			
	ε _f ^R (‰)	1 7.335	5.825	1.223	21.0	9.483	9.770	1.497	15.3	7.864	9.588	2.029	21.2
		2 4.471				11.925				11.783			
		3 6.174				8.484				10.846			
		4 5.322				9.186				7.861			
	E _f ^R (GPa)	1 236.186	240.209	7.949	3.3	260.543	224.873	26.019	11.6	244.051	220.920	28.208	12.8
		2 238.468				218.694				179.808			
		3 251.858				198.178				229.707			
		4 234.325				222.076				230.113			
Junta	τ _{med} ^R (MPa)	1 11.260	9.101	1.947	21.4	8.030	7.150	1.372	19.2	4.159	4.517	0.650	14.4
		2 6.930				8.476				4.590			
		3 10.107				5.464				5.398			
		4 8.106				6.630				3.919			
	s _t ^R (mm)	1 0.654	0.743	0.096	13.0	2.299	1.970	0.478	24.3	3.415	2.438	0.754	31.0
		2 0.762				2.280				2.639			
		3 0.685				1.278				1.938			
		4 0.870				2.022				1.758			
Modo de Ruína (ver descrição detalhada no item 4.6)		1	R3 numa fiada levou a R1 na outra			R3 numa fiada levou a R1 na outra	R3 numa fiada levou a R1 na outra			R3 numa fiada levou a R5 na outra			
		2	R3 nas duas fiadas			R3 numa fiada levou a R1 na outra				R3 nas duas fiadas			
		3	R3 numa fiada levou a R1 na outra			R3 numa fiada levou a R1 na outra				R3 numa fiada levou a R5 na outra			
		4	R3 nas duas fiadas			R3 numa fiada levou a R1 na outra				R3 numa fiada levou a R5 na outra			

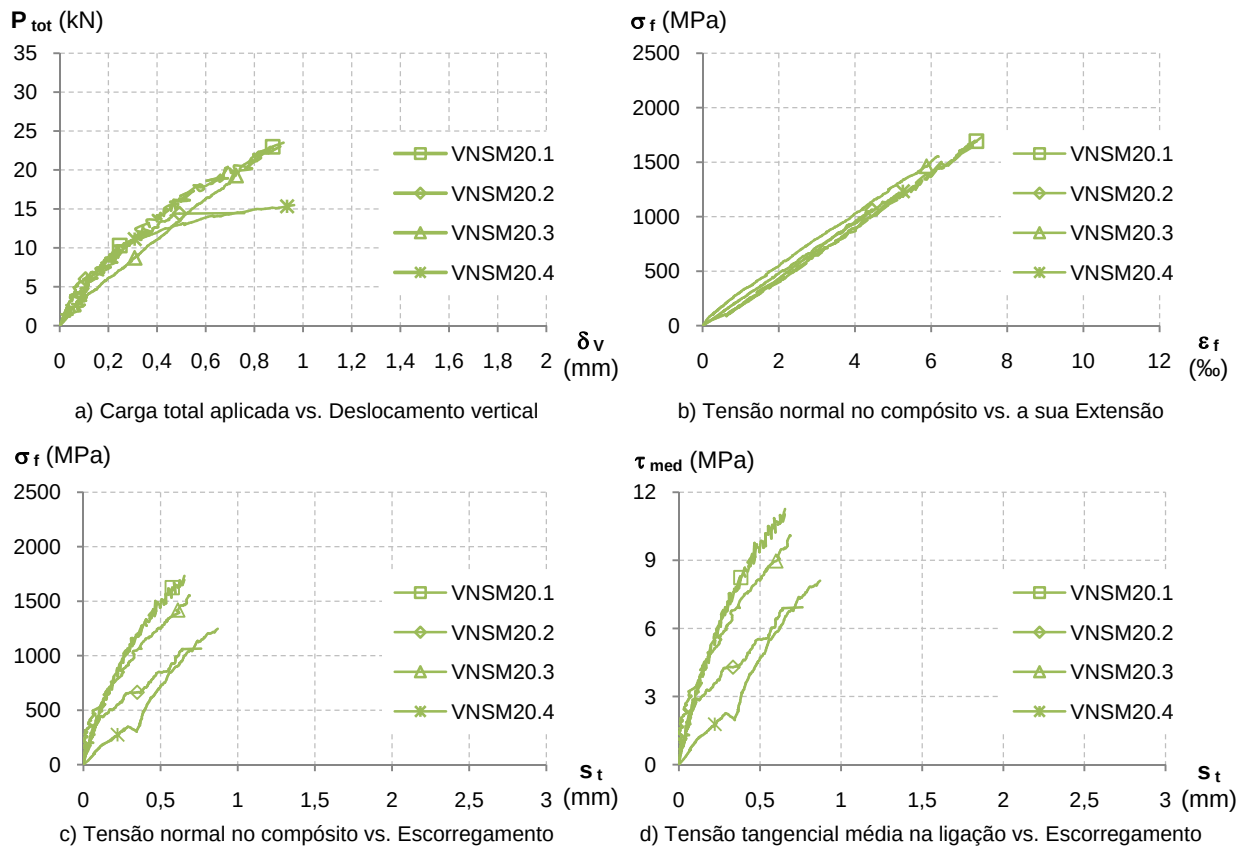


Figura A1.7 – Ensaio de aderência em flexão VNSM 20mm.

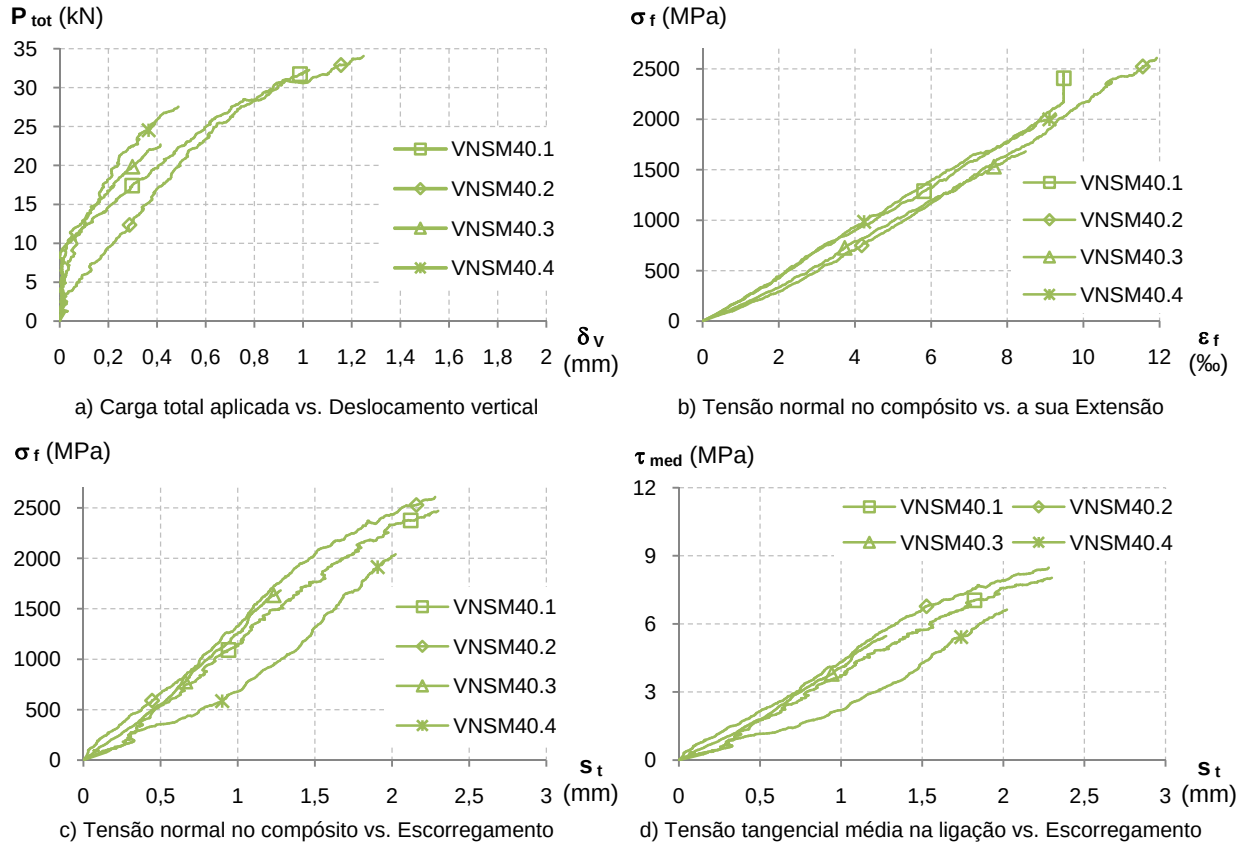
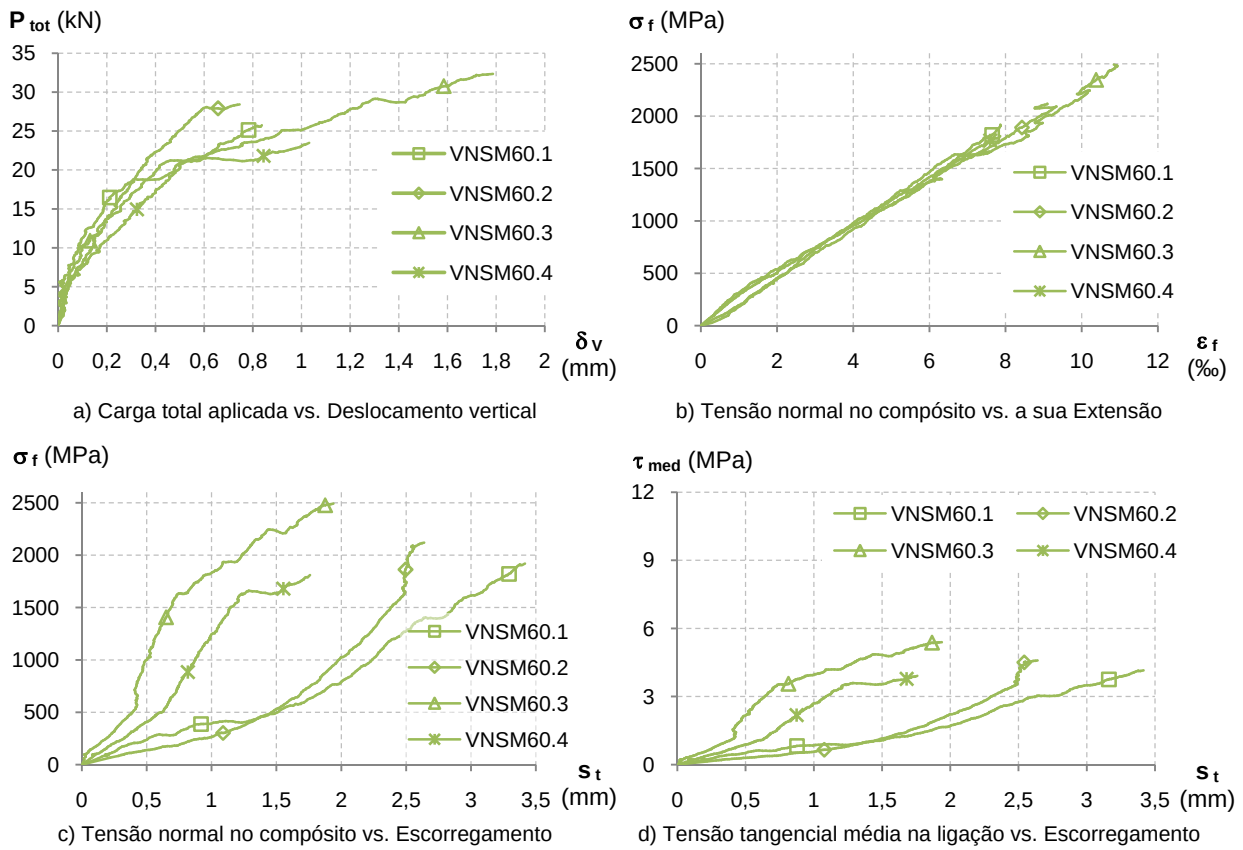


Figura A1.8 – Ensaio de aderência em flexão VNSM 40mm.



A2

ANEXO 2 – INFORMAÇÕES DOCUMENTAIS SOBRE JUNTAS

Neste anexo, apresentam-se em forma de tabela, todos os dados individuais importados dos trabalhos consultados no âmbito da comparação de juntas madeira-CFRP com juntas betão-CFRP apresentada no item 4.7.2 do Capítulo 4. Esses dados foram importados dos trabalhos de Dissertação de Mestrado: Dimande (2003) e Nuno Travassos (2004), e de Dissertação de Doutoramento: Sena-Cruz (2004). Apresenta-se também, na mesma forma de tabela, os resultados em madeira deste trabalho, só por questões de integridade do conjunto deste anexo.

Os ensaios importados referentes a juntas betão-CFRP foram os seguintes:

- Dos ensaios EBR de Dimande (2003), usam-se os dados das séries “M_{MBP}25_50_1”, “M_{MBP}50_25_1”, “M_{MBP}50_50_1”, “M_{MBP}50_75_1”, “M_{MBP}50_100_1”, “M_{MBP}75_50_1” e “M_{MBP}75_75_1”. São séries de ensaios onde só se usou reforço com manta de fibras de carbono curada *in situ* (“M...”), e, só 1 camada de manta para ter a mesma rigidez de compósito de todos os ensaios comparados (“..._1”). As larguras de compósito de 25, 50 ou 75mm usadas (“M_{MBP}25...”) não influenciam os resultados dada a maior largura dos provetes de betão, mas por se usarem vários, as comparações foram feitas em termos de tensões normais (força por unidade de área). Finalmente os comprimentos de colagem 25, 50, 75 e 100mm (“..._50_1”) foram todos os ensaiados pelo autor, já que um dos objectivos foi avaliar o comprimento efectivo de colagem.
- Dos ensaios EBR de Travassos (2004), usam-se os dados das séries “2001”, “2751” e “3501”. Estes foram ensaios de aderência em corte de junta simples, uma metodologia ligeiramente diferente dos ensaios de aderência em flexão, mas com o mesmo princípio físico dos ensaios de aderência em flexão. Nos ensaios destas séries, os 3 primeiros dígitos da designação das séries de ensaio representam o comprimento de colagem em mm, por isso, os ensaios importados para comparação têm 200, 275 e 350mm de comprimento de colagem. A largura de colagem foi de 80mm, igual para todos as séries de ensaios.
- Por fim, dos ensaios NSM de Sena-Cruz (2004), usam-se os dados das séries “fcm35_Lb40_M”, “fcm35_Lb60_M”, “fcm35_Lb80_M”, “fcm45_Lb40_M”, “fcm45_Lb60_M”, “fcm45_Lb80_M”, “fcm70_Lb40_M”, “fcm70_Lb60_M”, “fcm70_Lb80_M”, “fcm40_Lb60_M”, “fcm40_Lb90_M” e “fcm40_Lb120_M”. São séries de ensaios onde se usou várias classes de betão com resistências à compressão de 35, 40, 45 e 70MPa aos 28 dias, mas que pelas conclusões do mesmo trabalho não influenciam significativamente os resultados de aderência de CFRP ao betão, e por isso foram importados os dados de todas estas séries. O parâmetro de análise é então o comprimento de colagem que variou de 40, 60, 80, 90 e 120mm (“...Lb60...”). A letra “...M” da designação simboliza o

carregamento monotónico feito no ensaio, e que se coaduna com os restantes ensaios validando a comparação que se pretende efectuar.

Quadro A2.1 – Características do reforço usado nos trabalhos de aderência em flexão: madeira e betão.

	madeira: Rui Barbosa (2008)	betão: Dimande (2003)	betão: Nuno Travassos (2004)	betão: Sena Cruz (2004)
Sistema comercial	SikaWrap Hex 230C	MBrace Mantas de Fibra CF120	MBrace Mantas de Fibra CF120	S&P Laminates CKF
Tipo de sistema	manta	manta	manta	laminado
Tipo de fibra	carbono	carbono	carbono	carbono
Geometria	$t_{eq}=0.13\text{mm}$	$t_{eq}=0.117\text{mm}$	$t_{eq}=0.117\text{mm}$	$t=1.4\text{mm}$ $b=10\text{mm}$
Peso (g/m^2)	225	200	200	-
Módulo de elasticidade à tracção (GPa)	235	240	240	150
Resistência última à tracção (MPa)	3500	3800	3800	2500
Extensão última (%)	15	15.5	15.5	15

Quadro A2.2 – Ensaio de aderência em flexão em madeira pela técnica EBR (presente trabalho).

Nº. de resultados: 12 ensaios = 3 valores médios						
Nome da série	lt (mm)	σ (MPa)	ϵ_f (%)	τ_{med}^R (MPa)		
EBR20	20	1360	-	8.4	6.82 ⁽¹⁾	10.2
		1660	-	10.8		
		1515	-	9.9		
		1741	-	11.3		
EBR40	40	1996	10.86	6.5	8.67	6.2
		1963	8.24	6.4		
		1618	7.22	5.3		
		2108	8.36	6.9		
EBR60	60	1902	7.93	4.1	7.98	3.8
		1739	8.02	3.8		
		1647	7.66	3.6		
		1747	8.30	3.8		

⁽¹⁾ valor obtido teoricamente pela *Lei de Hooke*

- sem informação no trabalho original

Quadro A2.3 – Ensaio de aderência em flexão em betão pela técnica EBR (Dimande, 2003).

Nº. de resultados: 28 ensaios = 7 valores médios							
Nome da série	lt (mm)	σ (MPa)		ε_f (‰)		τ_{med}^R (MPa)	
M _{MBP} 25_50_1	50	2238	2058	-	8.58 ⁽¹⁾	5.2	4.8
		1968		-		4.6	
		1968		-		4.6	
M _{MBP} 50_25_1	25	1310	1416	7.80	6.00	6.1	7.1
		1548		-		7.2	
		1452		4.43		6.8	
		1452		5.77		6.8	
		1976 ⁽²⁾		-		9.2	
		1317		-		6.2	
M _{MBP} 50_50_1	50	1889	1933	6.44	7.10	4.4	4.5
		2000		7.98		4.7	
		2317		1.29 ⁽²⁾		5.4	
		1651		0.99 ⁽²⁾		3.9	
		1810		6.87		4.2	
M _{MBP} 50_75_1	75	2214	2086	9.98	11.12	3.5	3.3
		2127		12.27		3.3	
		1786		-		2.8	
		2563		-		4.0	
		1738		-		2.7	
M _{MBP} 50_100_1	100	1730	2175	6.19	7.98	2.0	2.5
		2627		10.83		3.1	
		1810		7.01		2.1	
		2373		7.29		2.8	
		2333		8.56		2.7	
M _{MBP} 75_50_1	50	1513	1619	8.14	8.18	3.5	3.8
		1725		8.21		4.0	
M _{MBP} 75_75_1	75	2069	1836	10.96	8.90	3.2	2.9
		1603		10.40		2.5	

⁽¹⁾ valor obtido teoricamente pela *Lei de Hooke*⁽²⁾ valor rejeitado na análise, por se afastar muito da média

- sem informação no trabalho original

Quadro A2.4 – Ensaio de aderência em flexão em betão pela técnica EBR (Travassos, 2004).

Nº. de resultados: 6 ensaios = 3 valores médios							
Nome da série	lt (mm)	σ (MPa)		ϵ_f (‰)		τ_{med}^R (MPa)	
2001	200	1891	2121	8.01	9.50	1.1	1.2
		2412		11.49		1.4	
		2060		9.04		1.2	
2751	275	2430	2434	12.62	11.68	1.0	1.0
		2438		10.71		1.0	
3501	350	2340	2340	10.55	10.55	0.78	0.78

Quadro A2.5 – Ensaio de aderência em flexão em madeira pela técnica NSM (presente trabalho).

Nº. de resultados: 24 ensaios = 6 valores médios							
Nome da série	lt (mm)	σ (MPa)		ϵ_f (‰)		τ_{med}^R (MPa)	
HNSM20	20	1549	1399	6.32	6.62	10.1	9.1
		1370		7.20		8.9	
		1676		6.68		10.9	
		1001		6.29		6.5	
VNSM20	20	1732	1400	7.33	5.83	11.3	9.1
		1066		4.47		6.9	
		1555		6.17		10.1	
		1247		5.32		8.1	
HNSM40	40	2391	2248	10.46	9.04	7.8	7.3
		2306		8.90		7.5	
		2044		8.84		6.6	
		2250		7.95		7.3	
VNSM40	40	2471	2200	9.48	9.77	8.0	7.2
		2608		11.93		8.5	
		1681		8.48		5.5	
		2040		9.19		6.6	
HNSM60	60	2185	2358	9.02	9.24	4.7	5.1
		2390		8.36		5.2	
		2294		9.97 ⁽¹⁾		5.0	
		2562		9.58		5.6	
VNSM60	60	1919	2085	7.86	9.59	4.5	4.5
		2119		11.78		4.6	
		2491		10.85		5.4	
		1809		7.86		3.9	

⁽¹⁾ valor obtido teoricamente pela *Lei de Hooke*

Quadro A2.6 – Ensaio de aderência em flexão em betão pela técnica NSM (Sena-Cruz, 2004).

Nº. de resultados: 36 ensaios = 12 valores médios							
Nome da série	lt (mm)	σ (MPa)		ϵ_f (‰)		τ_{med}^R (MPa)	
fcm35_Lb40_M	40	-	1071 (5.8%)	-	7.1 ⁽¹⁾	-	17.5
fcm45_Lb40_M	40	-	1107 (2.0%)	-	7.4 ⁽¹⁾	-	18.1
fcm70_Lb40_M	40	-	1121 (8.8%)	-	7.5 ⁽¹⁾	-	18.3
fcm35_Lb60_M	60	-	1629 (8.7%)	-	10.9 ⁽¹⁾	-	17.7
fcm45_Lb60_M	60	-	1421 (3.7%)	-	9.5 ⁽¹⁾	-	15.5
fcm70_Lb60_M	60	-	1350 (5.8%)	-	9.0 ⁽¹⁾	-	14.7
fcm40_Lb60_M	60	-	1336 (5.1%)	-	8.9 ⁽¹⁾	-	13.6
fcm35_Lb80_M	80	-	1600 (5.0%)	-	10.7 ⁽¹⁾	-	13.0
fcm45_Lb80_M	80	-	1886 (4.2%)	-	12.6 ⁽¹⁾	-	15.4
fcm70_Lb80_M	80	-	1829 (6.2%)	-	12.2 ⁽¹⁾	-	14.9
fcm40_Lb90_M	90	-	1707 (4.1%)	-	11.4 ⁽¹⁾	-	11.6
fcm40_Lb120_M	120	-	1979 (2.8%)	-	13.2 ⁽¹⁾	-	10.1

⁽¹⁾ valor obtido teoricamente pela *Lei de Hooke*

- sem informação no trabalho original

Nota: os valores entre parêntesis são os coeficientes de variação