

VIGAS DE MADEIRA REFORÇADAS À FLEXÃO COM SISTEMAS DE FRP

RENATA DANIELA CARNEIRO MOREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes

JUNHO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@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

✉ 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 em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Avós

Success is not the key to happiness.

Happiness is the key to success.

If you love what you are doing,

You will be successful.

-Albert Schweitzer

AGRADECIMENTOS

Agradeço nestes próximos parágrafos a todos os que fizeram parte desta longa jornada. Foram 5 anos repletos de desafios e aprendizagens.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes, dirijo todos os meus agradecimentos, por ao longo deste semestre me ter apoiado em todos os momentos necessários, pela disponibilidade, por todas as ideias e conceitos transmitidos, e pela orientação excelente que foi essencial para a elaboração desta dissertação.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor João Paulo Miranda Guedes, que foi imprescindível para a realização deste trabalho.

Aos meus pais que caminharam comigo, nesta jornada. Que me apoiaram em todas as decisões ao longo de todo o percurso académico e que me moldaram para ser o que sou hoje. Uma palavra de apreço em especial ao meu irmão, por ser uma inspiração.

Ao meu avô, de quem tanto me orgulho, foi e será para sempre um exemplo para mim. Por tudo o que passou ao longo da vida, pela sua forma de viver, sereno, com boa disposição e sempre pronto para fazer rir todos os que o rodeavam.

À minha avó, que me apoiou em todos os momentos, acalmando-me e fazendo perceber que o fim do mundo ainda está por vir e não vai ser amanhã.

Aos meus amigos, os que cresceram comigo e os que surgiram na faculdade, agradeço profundamente todo o apoio inalcançável. Certamente vibram comigo o término desta fase que me é tão importante. Cresci a prendi muito convosco.

RESUMO

A crise climática é o desafio mais importante do nosso tempo, uma vez que os últimos cinco anos foram os mais quentes desde que há registros. Assim, é necessário tomarmos medidas que permitam preservar a saúde e bem-estar da população mundial. No que toca ao papel da construção civil, existem medidas ao nível da sustentabilidade que possam ser tomadas, como a utilização da madeira enquanto elemento estrutural.

A madeira é um material orgânico e no que toca às construções, um bom isolante térmico, promovendo soluções construtivas eficientes energeticamente. A madeira consegue absorver e armazenar dióxido de carbono que apenas é libertado para a atmosfera quando é queimada. Apesar disso, a madeira surge associada a alguns défices de performance, devido às suas propriedades mecânicas e por vezes devido à sua fragilidade e suscetibilidade para determinadas condições e exposições ambientais. Como tal, e com a finalidade de conservar o património, aparece o reforço e reabilitação associado às estruturas de madeira.

Este trabalho surge nesse contexto, com a finalidade de perceber qual é a possibilidade de reabilitação e reforço associada às estruturas de madeira, dos vários tipos, às diferentes técnicas de aplicação, e em particular a utilização de compósitos de FRP para esse fim. Os FRP têm uma longa história enquanto reforço de estruturas de betão, para verificar se a teoria associada ao betão poderia ser equacionada às estruturas de madeira, desenvolveu-se um programa de estudo com uma análise de simulação numérica de vigas de madeira reforçadas à flexão com sistemas de FRP.

Para enquadrar a madeira e o compósito de FRP e sistematização dos critérios de resistência nessa área, foi considerado o Eurocódigo 5, as normas NP EN 338-2016 e NP EN 14080-2019 e proposta Italiana CNR-DT 201/2005 [57], com recomendações para “Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Timber Structures”.

O programa de estudo teve como principal propósito avaliar o desempenho máximo do comportamento de vigas de madeira correntes reforçadas com sistemas de FRP disponíveis no mercado da construção de modo a concluírem-se sugestões para projeto. Para tal, os principais pontos avaliados foram os seguintes: (i) Análise de dois tipos correntes de madeira (maciça MM e lamelada colada MLC); (ii) Análise do desempenho de dois sistemas de CFRP comerciais, pré-fabricados (laminados) e curados *in-situ* (mantas unidireccionais), associados a cada técnica de reforço (NSM e EBR, respetivamente); (iii) Análise da melhor geometria de instalação do reforço, incluído hipótese de reforço à compressão e tração ou só tração; (iv) Análise do rendimento no incremento de resistência da secção reforçada em relação à secção de referência só em madeira, em termos de percentagens de reforço e de rigidez axial; (v) Análise do rendimento (%) máximo do FRP em ELU admitindo a perfeita aderência dos materiais; (vi) Ter uma ideia da melhor geometria e da percentagem do reforço para se atingir incrementos de 50% de resistência à flexão. Foi desenvolvido uma “folha de cálculo” em Excel para processar o cálculo de todos os modelos, organizar os resultados e elaborar gráficos de processamento dos resultados para posterior análise dos mesmos.

De uma forma geral, conclui-se que é viável reforçar estruturas de madeira com FRP, obtendo-se melhor desempenho com a técnica EBR do que a NSM, sobretudo quando se reforça à compressão e tração, até percentagens razoáveis do compósito (número máximo de camadas), com um aproveitamento máximo até cerca 22% da extensão do FRP recomendada para comportamento à flexão.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira Maciça (MM), Madeira Lamelada Colada (MLC), Técnicas de Reforço, Sistemas de FRP, Técnicas NSM e EBR.

ABSTRACT

Considering that the climate crisis is the most important challenge of our time, it is relevant to refer to the fact that the last five years have been the hottest on record. Therefore, it is necessary to take measures to preserve the health and well-being of the world's population. Regarding the role of civil construction, it is possible to implement measures that can be helpful for the goal of a more sustainable world, such as using wood as a structural element.

Wood is an organic material and, as far as buildings are concerned, a good thermal insulator promoting energy-efficient construction solutions. Wood can absorb and store carbon dioxide which is only released into the atmosphere when burned. Despite this, wood is related to some performance deficits, due to its mechanical properties and sometimes its fragility and susceptibility to specific types of exposures and environmental conditions. Therefore, to preserve heritage, the strengthening and rehabilitation associated with timber structures appear.

This work arises from the previous idea, which includes understanding the possibilities of rehabilitation and strengthening associated with timber structures, the various types, the different application techniques, and the use of FRP composites, which already have a long history as reinforcement of concrete structures. Intending to verify if the theory associated with concrete could be equated to timber structures, a study program was developed using numerical simulation analysis of a timber beam flexural strengthened with FRP systems.

To frame the wood and FRP composite and systematization of the resistance criteria in this area, it was considered the Eurocode 5, the NP EN 338-2016 and NP EN 14080-2019 standards and Italian proposal CNR-DT 201/2005 [57], with recommendations for "Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures - Timber Structures".

The main purpose of the study program was to evaluate the maximum performance of current wooden beams reinforced with FRP systems available in the construction market in order to conclude suggestions for design. Thus, the main points evaluated are the following: (i) Analysis of two current types of timber (solid MM and glued laminated MLC); (ii) Analysis of the performance of two commercial CFRP systems, prefabricated (laminated) and cured in-situ (unidirectional sheets), associated to each strengthening technique (NSM and EBR, respectively); (iii) Analysis of the best geometry of the strengthening installation, included hypothesis of strengthening to compression and traction or only traction; (iv) Analysis of the performance in the increment of resistance of the reinforced section in relation to the reference section only in wood, in terms of reinforcement percentages and axial stiffness; (v) Analysis of the maximum performance (%) of the FRP in ELU assuming perfect adhesion between the materials; (vi) Getting an idea of the best geometry and percentage of reinforcement to achieve 50% increments in flexural strength. A "calculation sheet" was developed in Excel to process the calculation of all the models, organize the results and prepare the graphics for processing the results for later analysis.

In general, it is concluded that it is feasible to reinforce wooden structures with FRP, obtaining better performance with the EBR technique than with NSM, especially when reinforcing in compression and tension, up to reasonable percentages of the composite (maximum number of layers), with a maximum use of up to about 22% of the FRP strain recommended for bending behaviour.

KEYWORDS: Solid Wood (MM), Glued Laminated Timber (MLC), Strengthening Technique, FRP Systems, NSM and EBR Techniques.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	5
2.1. MADEIRA	5
2.1.1. SUSTENTABILIDADE.....	5
2.1.2. MADEIRA E PROPRIEDADES.....	7
2.1.2.1. Madeira Maciça	7
2.1.2.1. Madeira Lamelada Colada	11
2.1.3. ESTRUTURAS DE MADEIRA CORRENTE	12
2.2. CONSTRUÇÕES NO PASSADO, PRESENTE E FUTURO.....	13
2.3. TÉCNICAS DE REFORÇO.....	16
2.3.1. TÉCNICAS.....	17
2.3.2. CASOS PRÁTICOS	19
2.4. REFORÇO COM FRP	21
2.4.1. SISTEMAS E PROPRIEDADES.....	21
2.4.2. TÉCNICAS DE REFORÇO COM FRP	24
2.4.3. PROJETOS DE REFORÇO COM FRP	26
2.4.4. COMPATIBILIDADE FRP/MADEIRA	27
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	29
3. ESTUDO DE MODELOS REFORÇADOS À FLEXÃO COM SISTEMAS FRP	33
3.1. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA	33
3.1.1. MADEIRA SEGUNDO O EC5	35

3.1.2. SISTEMAS DE FRP	38
3.1.3. CRITÉRIOS A UTILIZAR.....	39
3.2. PROGRAMA DE ESTUDO	41
3.2.1. OBJETIVOS	41
3.2.2. MODELOS DE ESTUDO.....	42
3.2.2.1. Materiais	42
3.2.2.2. Técnicas e Geometria de Reforço	44
3.3. CÁLCULOS E RESULTADOS.....	47
3.3.1. FOLHA DE CÁLCULO	47
3.3.2. RESULTADOS	48
3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS	50
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
4. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	63
4.1. CONCLUSÕES RELEVANTES	63
4.2. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
ANEXO 1: FOLHA DE CÁLCULO	A1
ANEXO 2: RESULTADOS.....	A9

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Níveis de certificação [7].	7
Figura 2.2 - Orientação da secção transversal [8].	7
Figura 2.3 - Secção transversal da carbonização da madeira [10].	8
Figura 2.4 - Esquema representativo da secção transversal a ter em consideração para o dimensionamento considerando a resistência ao fogo.	8
Figura 2.5 - Curva tensão- extensão para provetes de madeira sem defeitos carregados na direção do fio e na direção perpendicular [13].	9
Figura 2.6 - "Finger-joints" [19].	11
Figura 2.7 - Exemplos de elementos estruturais de madeira.	12
Figura 2.8 - Exemplos de coberturas [25].	13
Figura 2.9 - Exemplos de estruturas de madeira na Finlândia [26].	14
Figura 2.10 - Piscinas de ondas cobertas Zmar Eco Campo Resort (Jular) [27].	14
Figura 2.11 - Elementos estruturais do edifício Impulso verde building [28].	14
Figura 2.12 - Exemplos de estruturas de madeira adaptadas para espaços de convívios [29].	15
Figura 2.13 - Exemplos de pontes de MLC.	15
Figura 2.14 - Arena desportiva [29].	15
Figura 2.15 - Treetop Walk, Serralves, 2019 [32].	16
Figura 2.16 - Tensões normais na secção transversal de uma viga de madeira sujeita à flexão (adaptado da dissertação do Rui Barbosa, 2008 [18]).	17
Figura 2.17 - Casos de empalmes [38].	18
Figura 2.18 - Junção de perfis metálicos [39].	18
Figura 2.19 - Reforço com chapas de aço no interior do elemento de madeira e argamassas epoxídicas [26].	19
Figura 2.20 - Exemplos de reforços com a utilização de fixadores metálicos.	20
Figura 2.21 - Exemplos de reforços utilizando perfis metálico.	20
Figura 2.22 - Exemplos de reforços com substituição de madeira.	20
Figura 2.23 - Exemplos de próteses de madeira.	21
Figura 2.24 - Exemplos de diferentes reforços para situações idênticas e espaçados no tempo [25].	21
Figura 2.25 - Comparação de propriedades entre o aço, alumínio e o compósito [51].	21
Figura 2.26 - Relação tensão-deformação das fibras, matriz e FRP, (adaptado de Juvandes,2022 [53]).	22
Figura 2.27 - Exemplificação de FRP com os materiais mais correntes [43].	22
Figura 2.28 - Diagrama tensão- deformação de fibras e metais [45].	23

Figura 2.29 - Variação aproximada da resistência à tração e da resistência da ligação com o aumento da temperatura (adaptado de Zigler, R and Pokomy, M, [62]).	24
Figura 2.30 - Elementos de proteção ao fogo para algumas técnicas de reforço com FRP [62].	24
Figura 2.31 - Os sistemas compósitos de FRP mais correntes [46].	25
Figura 2.32 - Utilização de CFRP no reforço estrutural [47].	26
Figura 2.33 - Técnicas de utilização de FRP.	26
Figura 2.34 - Reforço dos pilares da Ponte Vasco da Gama com mantas de CFRP (S&P Clever Reinforcement Ibérica, 2017 [48]).	27
Figura 2.35 - Reforço estrutural do edifício Associação Recreativa e Cultural das carpintarias de São Lázaro com laminados de carbono (S&P Clever Reinforcement Ibérica, 2016 [49]).	27
Figura 3.1 - Diagrama tensões normais vs extensões (adaptado de Corradi, M. et al., [55]).	34
Figura 3.2 - Critérios de análise da secção transversal genérica de madeira reforçada com FRP (inspirado em Schober et al., [56]).	40
Figura 3.3 - Exemplos de reforços à flexão [25],[57].	42
Figura 3.4 - Geometria do compósito FRP.	45
Figura 3.5 - Incrementos de resistência em função da geometria e percentagem do reforço das séries NSM-V e EBR- H para os dois grupos de madeira (MM e MLC).	54
Figura 3.6 - Incrementos de resistência por ordem crescente da importância das técnicas em função da geometria e das percentagens de reforço e de rigidez axial (Grupo MM).	55
Figura 3.7 - Incrementos de resistência por ordem crescente da importância das técnicas em função da geometria e das percentagens de reforço e de rigidez axial. (Grupo MLC).	56
Figura 3.8 - Áreas de desempenho dos grupos de madeira MM e MLC em função da geometria e das percentagens de reforço e de rigidez axial.	58
Figura A1.1 - Módulo de dados para o grupo MLC.	A.3
Figura A1.2 - Módulo de cálculo da série NSM-V, com geometria C+T, para o grupo MLC.	A.4
Figura A1.3 - Módulo de cálculo da série NSM-V, com geometria T, para o grupo MLC.	A.5
Figura A1.4 - Módulo de resultados e curvas de desempenho “C+T” e “T” dos 34 modelos do grupo MLC.	A.6
Figura A1.5 - Módulo de resultados das curvas ordenadas por desempenho das 4 técnicas do grupo MLC.	A.7
Figura A1.6 - Módulo de resultados das áreas de desempenho dos 2 grupos MM e MLC.	A.8
Figura A2.1 - Incremento de resistência à flexão em função da geometria e da percentagem do reforço para as 4 séries do grupo MM.	A.13
Figura A2.2 - Incremento de resistência à flexão em função da geometria e da percentagem do reforço para as 4 séries do grupo MLC.	A.14

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 2.1 - Classes de risco segundo o Eurocódigo 5 [14]	10
Tabela 2.2 - Propriedades típicas do aço, de fibras de vidro, carbono e aramida [45].	23
Tabela 2.3 - Extensões máximas no FRP colados à madeira (trabalhos de Barbosa e Cruz).	29
Tabela 3.1 - Classes de duração de carga segundo o EC5 [14].	35
Tabela 3.2 - Exemplos de cargas correspondentes às classes de duração segundo o EC5 [14].	35
Tabela 3.3 - Valores característicos da madeira maciça (adaptado da norma EN338-2016) [15].	36
Tabela 3.4 - Valores característicos da madeira lamelada colada homogénea (adaptado da norma NP EN 14080:2019) [16].	37
Tabela 3.5 - Valores característicos da madeira lamelada colada combinada (adaptado da norma NP EN 14080:2019) [16].	37
Tabela 3.6 - Coeficiente parcial de segurança para ELU de FRP.	39
Tabela 3.7 - Valores para a extensão limite.	39
Tabela 3.8 - Propriedades das Madeiras utilizadas segundo as respetivas normas.	43
Tabela 3.9 - Geometria e propriedades dos sistemas CFRP.	43
Tabela 3.10 - Esquemas dos modelos segundo a técnica e a geometria do reforço para as madeiras MM e MLC.	44
Tabela 3.11 (A) - Modelos do grupo MM: geometria e cotas “hf” do FRP.	45
Tabela 3.12 (A) - Modelos do grupo MLC: geometria e cotas “hf” do FRP.	46
Tabela 3.13 - Valores dos resultados para o grupo MM e técnica NSM-V (Laminado)	49
Tabela 3.14 - Valores dos resultados para o grupo MM e técnica EBR-H (Mantas).	49
Tabela 3.15 - Valores dos resultados para o grupo MLC e técnica NSM-V (Laminado).	50
Tabela 3.16 - Valores dos resultados para o grupo MLC e técnica EBR-H (Mantas).	50
Tabela 3.17 - Resultados das extensões máximas nos materiais do grupo MM.	51
Tabela 3.18 - Resultados das extensões máximas nos materiais do grupo MLC.	51
Tabela 3.19 - Resumo dos melhores resultados em função dos modelos estudados e exequibilidade do reforço.	52
Tabela A2.1 - Dados e resultados dos 38 modelos do grupo MM.	A.11
Tabela A2.2 - Dados e resultados dos 38 modelos do grupo MLC.	A.12

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

H - Altura da secção da madeira [m]

B - Base da secção da madeira [m]

x - Distância da base da secção ao eixo neutro [m]

A_w - Área da secção da madeira [m²]

E_{wm} - Módulo de elasticidade médio da madeira [GPa]

E_w - Módulo de elasticidade da madeira [GPa]

f_{wck} - Resistência à compressão característica da madeira [MPa]

f_{wtk} - Resistência à tração característica da madeira [MPa]

f_{wbk} - Resistência à flexão característica da madeira [MPa]

γ_m - Coeficiente parcial de segurança

k_{mod} - fator de modificação da resistência

ψ_2 - Parâmetro de combinação

k_{def} - Coeficiente de correção que considera os efeitos de fluência e a classe de serviço da estrutura

f_{wbd} - Resistência à flexão de cálculo da madeira [MPa]

E_{wd} - Módulo de elasticidade da madeira, valor de cálculo [MPa]

ϵ_{wbd} - Extensão de flexão da madeira, valor de cálculo [MPa]

t - Espessura do FRP [m]

b - Largura do FRP [m]

n - Número de camadas do FRP

A_f - Área de compósito [m²]

E_f - Módulo de elasticidade do FRP [GPa]

A_{frp} - Área de reforço total [m²]

ϵ_{fk} - Extensão de flexão do FRP [MPa]

E_{fd} - Módulo de elasticidade do FRP, valor de cálculo [GPa]

ϵ_{fd} - Extensão de flexão do FRP, valor de cálculo [MPa]

ϵ_{flim} - Extensão limite de deformação do FRP

ϵ_1 - Extensão nas fibras superiores da madeira

ϵ_2 - Extensão nas fibras inferiores da madeira

ϵ_{f1} - Extensão nas fibras superiores no FRP

ϵ_{f2} - Extensão nas fibras inferiores no FRP

F_{wc} - Força de compressão da madeira [kN]

F_{wt} - Força de tração da madeira [kN]

F_{f1} - Força do FRP da zona superior [kN]
 F_{f2} - Força do FRP da zona inferior [kN]
 $M_{rd,w}$ - Momentos resistente da madeira [kN.m]
 $M_{rd,r}$ - Momentos resistente da secção reforçada [kN.m]
 $\epsilon_w^{máx}$ - Extensão máxima da madeira
 $\epsilon_f^{máx}$ - Extensão máxima do FRP
 ϵ - Diagrama das extensões
 σ - Diagrama das tensões

ABREVIATURAS

MM - Madeira Maciça
MLC - Madeira Lamelada Colada
FRP - Fiber Reinforced Polymers
CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymers
AFRP - Aramid Fiber Reinforced Polymers
GFRP - Glass Fiber Reinforced Poly
NSM - Técnica de reforço por inserção em ranhuras (Near Surface Mounted)
EBR - Técnica de reforço por colagem exterior (External Bounded Reinforcement)
VNSM - Vertical Near Surface Mounted
HNSM - Horizontal Near Surface Mounted
VEBR - Vertical External Bounded Reinforcement
HEBR - Horizontal External Bounded Reinforcement
C - Zona Comprimida
T - Zona Tractionada
Ref - Referência
Ext - Extra
NSM-V – Especificação da técnica de reforço NSM, distinguindo a orientação vertical das ranhuras
NSM-H - Especificação da técnica de reforço NSM, distinguindo a orientação horizontal das ranhuras
EBR-V - Especificação da técnica de reforço EBR, distinguindo a orientação vertical da colagem exterior
EBR -H - Especificação da técnica de reforço EBR, distinguindo a orientação horizontal da colagem exterior

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A madeira tem sido um dos materiais da construção civil mais amplamente empregues desde os primórdios da civilização. Tal primazia deve-se à sua robustez, leveza, maleabilidade e pela sua estética. No entanto, a madeira apresenta certas limitações que exigem soluções adequadas. Algumas das restrições à sua aplicação residem na dificuldade de encontrar árvores na natureza com dimensões desejáveis ou na presença de defeitos localizados, tais como nós e bolsas de resina, que comprometem significativamente a resistência global do elemento. Parte destas questões foram superadas mediante o desenvolvimento de produtos derivados de madeira, obtidos a partir da união de peças de menor dimensão, como é o caso da madeira lamelada colada (MLC). Esta tecnologia possibilita a fabricação de elementos de madeira nos quais os defeitos estão dispersos, assegurando um produto final com propriedades mais homogêneas e com dimensões teoricamente ilimitadas.

Os materiais tradicionais de construção apresentam degradação ao decorrer do tempo, devido às situações a que são expostos, gerando perda das suas propriedades mecânicas. Estes materiais, nomeadamente a madeira, podem sofrer deterioração em resultado da exposição ambiental, acidentes, nomeadamente incêndios ou sismos, conceção ou execução menos controladas, aumento de solicitação, comportamento ineficiente em serviço, entre outros. Por consequência destes processos, são estudados métodos de reforço estrutural para reabilitar estruturas deterioradas.

As técnicas correntes de reforço dos elementos de madeira recorrem aos materiais clássicos da construção civil, sobretudo o aço porque apresenta um módulo de elasticidade e uma resistência última superior à da madeira, podendo colmatar algumas das suas fragilidades.

No entanto, estes materiais também se encontravam sujeitos aos mesmos processos de deterioração, além de influenciarem negativamente a estética arquitetónica. Tal circunstância desencadeou uma busca por novos materiais que viabilizassem sistemas de reforço mais longevos e resilientes, com mínima interferência visual, além de serem de fácil aplicação.

Em meados dos anos 80, deram início às primeiras pesquisas acerca da utilização de materiais compósitos reforçados com fibras (FRP, do termo “Fiber Reinforced Polymers”) para fins de reforço estrutural. Estes materiais, eram inicialmente empregues em aplicações marítimas, automobilísticas e aeroespaciais. São compostos por fibras de carbono, aramida ou vidro e incorporadas em matrizes poliméricas. Comparativamente a outros materiais de reforço, como o aço, os FRPs apresentam notável resistência à tração, corrosão e fadiga, além de possuírem baixa massa volumica, o que facilita o transporte e aplicação. As principais desvantagens da utilização dos compósitos são a fragilidade da matriz a elevadas temperaturas, a sensibilidade à exposição das radiações UV e a necessita de pessoal qualificado para a sua aplicação. Contudo, os FRPs têm sido cada vez mais adotados pela indústria da construção, o que tem motivado pesquisas mais aprofundadas acerca do seu comportamento.

Um dos principais obstáculos à aplicação dos compósitos de FRP para o reforço estrutural é o seu custo inicial elevado (não se inclui o efeito a longo prazo) e às suas características mecânicas peculiares como ser um material de rotura frágil. O reforço estrutural proporcionado por estes materiais emerge na transferência de esforços da estrutura para as fibras do compósito, através da solitação conferida pela matriz polimérica. O seu comportamento é diretamente influenciado pela temperatura, que implica uma redução de propriedades mecânicas e a perda de resistência do sistema de reforço. Em situações de exposição ao fogo, o material pode entrar em combustão gerando gases, fumos e resíduos tóxicos. Contudo, atualmente há estudos que apontam soluções para minimizar estes aspetos através de sistemas de proteção térmica e/ou fogo [63].

1.2. OBJETIVO E MOTIVAÇÃO

A ideia da sustentabilidade tem vindo a preconizar mudanças, e na construção civil é necessário tomar consciência que essas mudanças têm também de acontecer. Como tal, uma dessas estratégias passa pela utilização de materiais mais sustentáveis, como a madeira.

De modo a colmatar desvantagens associadas à madeira, surge o reforço estrutural, sob várias formas e técnicas possíveis. Nesse sentido aparecem os compósitos de FRP com um importante papel na engenharia civil, principalmente ao serem utilizados para reforço e reabilitação de estruturas. Além disso, ainda possibilitam diferentes soluções para preservação do património.

A incorporação dos FRPs em vigas de madeira tem como potencial solucionar tanto as limitações enfrentadas pelas estruturas novas, com secções transversais de dimensões restritas, quanto os desafios enfrentados pelas estruturas existentes que serão restauradas para acomodar usos mais exigentes ou que sofreram deformações excessivas em determinados elementos estruturais, requerendo incrementos de rigidez maiores. Nos dois cenários a utilização de FRPs é promissora.

Destacada a motivação, foram estabelecidos os aspetos fundamentais a serem abordados no presente trabalho, focando-se nos relevantes para a avaliação da capacidade resistente em ELU relativamente a vários modelos de vigas de madeira reforçadas à flexão por diferentes técnicas, geometrias ajustadas aos sistemas de FRP e variação da percentagem de reforço. Pode-se resumir os principais objetivos deste estudo nos seguintes pontos:

- Comparar duas categorias de madeira, com secções retangulares convencionais: Madeira Maciça (MM) e Madeira Lamelada Colada (MLC);
- Avaliar o desempenho de dois tipos comerciais de sistemas de CFRP (fibras de carbono), o pré-fabricado (Laminados pultrudidos) e o curado *in-situ* (Mantas uniaxiais secas). A cada um fez-se associar uma técnica de reforço (modo de aplicação), aos primeiros a técnica NSM (Técnica de reforço por inserção em ranhuras “Near Surface Mounted”) e aos segundos a técnica EBR (Técnica de reforço por colagem exterior “External Bounded Reinforcement”);
- Estudar a melhor configuração geométrica para a instalação do reforço em flexão com FRP, considerando duas possibilidades: reforço simétrico em ambas as faces da viga (compressão e tração) ou reforço em apenas uma das faces (tração);
- Avaliar o aumento percentual na resistência da secção reforçada em relação à secção de referência em madeira, levando em conta a variabilidade dos parâmetros em estudo. Análise relativa e normalizada em termos de percentagens de reforço e de rigidez axial dos casos com aplicação das técnicas NSM e EBR;

- Estudar a melhor técnica, configuração geométrica e percentagem de reforço com FRP para alcançar um incremento de 50% de resistência à flexão em comparação com a secção de referência da madeira não reforçada;
- Avaliar o rendimento máximo do FRP em ELU admitindo a perfeita aderência entre os materiais;
- Se possível, apontar recomendações para projeto de reforço à flexão de vigas de madeira com sistemas de FRP.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente documento encontra-se organizado em 4 capítulos, e as respetivas referências e anexos.

No capítulo 1 é introduzida, uma visão geral abrangente do tema em foco, apresentando os objetivos e as motivações do trabalho em questão, juntamente com a descrição da metodologia empregada para alcançá-los.

No capítulo 2, aborda-se diversos tópicos relacionados com o uso da madeira e as suas propriedades no contexto estrutural. São apresentados diferentes tipos de reforço associados às estruturas de madeira, com foco principal para o reforço com FRP. Para este caso explora-se as suas propriedades e os seus benefícios em termos de desempenho estrutural e durabilidade. Este capítulo fornecerá uma base sólida de conhecimento sobre a madeira, a madeira lamelada colada, os diferentes tipos de reforço associados a ela e o papel fundamental do FRP como material.

O capítulo 3 foca-se no estudo do reforço à flexão de vigas de madeira com sistemas de FRP, sobretudo no seu comportamento em estado limite último. Primeiro, resumem-se os critérios fundamentais para avaliar o comportamento de seções mistas de madeira com FRP, em termos de capacidade resistente última, com perfeita aderência entre os materiais, segundo o Eurocódigo 5 e propostas normativas Italianas. De seguida, expõem-se os resultados e respetiva análise do estudo realizado para avaliar a capacidade máxima à flexão de 68 modelos com dois sistemas de FRP, duas técnicas de reforço, com geometrias e percentagens de reforço diferentes.

No 4º e último capítulo, são apresentadas conclusões relevantes obtidas com base no estudo feito. Estas conclusões abrangerão os principais resultados. Além disso, serão fornecidas indicações e recomendações para futuros desenvolvimentos na área. Indicações que visão direcionar pesquisas futuras e possíveis ações a serem tomadas com base nos resultados obtidos. Serão exploradas possibilidades de aprimoramento, aspetos que não foram abordados ou que requerem mais investigação, bem como sugestões para a aplicação prática dos resultados alcançados.

2

MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira desde sempre esteve associada à construção civil, devido às suas excelentes propriedades. Com a evolução dos tempos e das necessidades do Homem, foram desenvolvidos produtos derivados da madeira, com propriedades melhoradas e com resposta a novas aplicações e desafios. Contudo, em determinadas situações é possível recorrer a outros materiais de modo a corrigir algumas limitações, isto é, através do reforço e reabilitação. Este capítulo procura expor a madeira enquanto material estrutural, as suas vantagens e desvantagens, a sua aplicação na construção quer como madeira maciça (MM) quer como madeira lamelada colada MLC). São apresentados vários tipos de reforço de estruturas de madeira, com particular referência ao recurso dos sistemas compósitos de FRP (polímeros reforçados com fibras contínuas), expondo as suas principais propriedades, as técnicas de instalação e o comportamento na interface madeira-FRP.

2.1. MADEIRA

2.1.1. SUSTENTABILIDADE

A preocupação com questões ambientais tem vindo a aumentar significativamente com o avanço das gerações. Assim, problemas como a poluição, usos excessivos de recursos naturais, entre outros, criaram uma maior sensibilidade na sociedade e a necessidade consequente de um desenvolvimento mais sustentável.

O desenvolvimento sustentável, depende das condicionantes impostas pelos climas e pelos recursos disponíveis. Desta forma, o seu gasto excessivo requer que se repense a sua utilização. No caso específico da construção civil, pode-se adotar medidas de construção mais sustentáveis baseadas em três fatores:

- Utilização otimizada dos recursos naturais, isto é, não exceder a utilização de recursos e preferir materiais provenientes de fontes renováveis.
- Respeitar o meio envolvente, tendo em conta os princípios ambientais.
- Adequar a localização e o posicionamento dos estaleiros, garantindo uma menor necessidade de consumo energético.

Dos materiais empregues na construção, a madeira, ao longo dos tempos, tem sido um material comumente utilizado, uma vez que é uma matéria-prima com boas características mecânicas, natural, renovável e que promove a reciclagem. Desta forma, tornou-se um excelente material, principalmente quando utilizado em alternativa ao cimento, visto que a produção do cimento é o maior emissor industrial de carbono do mundo [1].

A União Europeia tem como objetivo a implementação da economia circular, que consiste em reduzir a produção de resíduos, reintegrando-os na cadeia de valor, ao invés da tradicional economia linear. O abastecimento de madeira na União Europeia (EU) baseia-se em princípios de gestão florestal sustentável e, por essa razão, a construção em madeira não está, de todo, relacionada com a desflorestação global. Aliás, a madeira nunca irá faltar, devido a medidas que combinam numa estratégia da UE para as florestas. Por exemplo, quando se abate uma árvore é necessário, de acordo com os princípios de gestão da floresta, que se plantem quatro. Contudo, é necessário também garantir que quando se constrói em madeira, se utilize madeira de origem classificada [2].

As qualidades da madeira são, no que toca às construções, um bom isolante térmico, promovendo soluções construtivas eficientes energeticamente, sendo que é mais fácil e mais rápido construir em madeira. A madeira ainda absorve e armazena dióxido de carbono que apenas é libertado para a atmosfera quando é queimada. Estudos demonstram que a presença da madeira melhora o bem-estar [3].

A crise climática é o desafio mais importante do nosso tempo, uma vez que os últimos cinco anos foram os mais quentes desde que há registos. Assim, é necessário tomarmos medidas que permitam preservar a saúde e bem-estar da população europeia e mundial [4].

Tornar os edifícios mais eficientes a nível energético é um dos objetivos priorizados a nível europeu até 2030, uma vez que, segundo Úrsula Von der Leyen, Presidente da Comissão Europeia, “Os edifícios geram 40% das nossas emissões de carbono. E precisam de se tornar menos desperdiçadores, menos dispendiosos e mais sustentáveis. Sabemos que o setor da construção pode ser transformado de uma fonte de carbono para um absorvedor de carbono, se materiais da construção orgânicos, como a madeira e tecnologias inteligentes como a Inteligência Artificial forem aplicados” [5].

Com objetivo de reduzir a pobreza energética, a Comissão Europeia (CE) avançou com Diretivas de Desempenho Energético dos Edifícios. A mais recente, no âmbito do “FIT for 55”, consiste em alterar o setor para “alcançar um parque imobiliário com emissão zero até 2050” Algumas das diretrizes criadas de modo a acelerar esta transformação energética são:

- Como indicado na Meta Climática em 2030, é necessário alcançar os objetivos de descarbonização estabelecidos para 2030 e 2050, sendo que todos os edifícios deverão ter emissões zero a partir de 2030;
- Ajustar a reabilitação e renovação de edifícios com estratégias ambientais;
- Introduzir novos padrões mínimos de desempenho energético;
- Garantir um papel reforçado na certificação energética [5].

Para que as empresas executem as suas funções sem causar grandes impactos pejorativos ao ambiente, existem certificações ambientais, como o Sustainable Forestry Initiative (SFI), que enquanto organização, se dedica à gestão florestal sustentável, à proteção da biodiversidade e espécies ameaçadas e à inspeção da qualidade da água. A madeira com certificado SFI é avaliada segundo a sua norma “Norma SFI 2015-2019” significando que a floresta de onde esta vem é manuseada de forma sustentável para garantir benefícios, como a mitigação das mudanças climáticas [6].

Outro sistema de certificação é o LEED (Leaders in Energy and Environmental Design) um sistema internacional de certificação e guia ambiental para edifícios, sendo o selo de maior reconhecimento internacional e o mais utilizado no mundo. Fornece uma verificação independente de um edifício projetado e construído com recursos a estratégias que promovem uma abordagem sustentável, baseado em cinco fatores de desempenho: desenvolvimento local sustentável, economia de água, eficiência energética, seleção de materiais e qualidade ambiental interna [7].

Mais especificamente, na categoria de “Materiais e Recursos”, as medidas abrangidas estão relacionadas com o impacto do edifício no meio ambiente, incluindo a utilização de materiais com um baixo impacto ambiental, com a otimização, reciclagem e reutilização do mesmo. Os créditos para a avaliação desta categoria baseiam-se em:

- Conteúdo reciclado, isto é, reconhece os edifícios que utilizaram uma elevada percentagem de material reciclado;
- Materiais regionais, identifica edifícios que usam materiais de origem local ou regional, diminuindo o impacto causado pelo transporte dos mesmos;
- Gestão de resíduos na construção, admite os edifícios que implementaram medidas para reduzir resíduos na construção;
- Constituição dos materiais, reconhece créditos a edifícios que utilizem materiais com baixos níveis de produtos químicos ou substâncias nocivas.



Figura 2.1 - Níveis de certificação [7].

2.1.2. MADEIRA E PROPRIEDADES

2.1.2.1. Madeira Maciça

A madeira maciça é um material orgânico, sólido, de composição complexa. Caracterizada pela sua fácil absorção de água (higroscópica), necessitando, por isso, de ser submetida a processos de secagem. Existem dois tipos de processos: a secagem ao ar livre (natural) e a secagem em estufa (artificial). Após o abatimento das árvores, as fibras da madeira ficam com uma percentagem de água de cerca de 30%, mas a secagem da madeira só é finalizada quando atinge o ponto de equilíbrio com a atmosfera envolvente, atingindo uma percentagem de humidade entre 10 e 20%.

Devido à orientação das células da madeira é possível dizer que este é um material anisotrópico, mais propriamente ortotrópico, ou seja, apresenta um comportamento distinto em três direções ortogonais, sendo a direção longitudinal a da orientação das fibras da madeira, como se ilustra na Figura 2.2 representativa de uma secção transversal corrente de uma ripa de madeira [8].

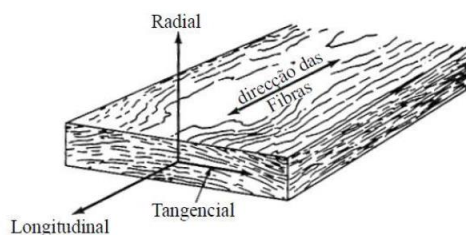


Figura 2.2 - Orientação da secção transversal [8].

Quando exposta ao fogo, dá-se início à combustão da madeira, para temperaturas na ordem dos 300 °C na presença de chama e de 400 °C na ausência dela. Relativamente à combustão, é formada uma camada de carbonização da madeira, que proporciona um efeito de isolamento, preservando a parte interna, sem perda drástica de propriedades, até temperaturas superiores a 1000 °C, Figura 2.3. Apesar disso, a camada carbonizada não protege o suficiente, principalmente quando o incêndio é extinto, e a madeira que se encontra em fase de arrefecimento, o interior permanece muito quente. Estudos demonstram ainda que a carga de serviço pode influenciar a performance da resistência da madeira quando exposta a situações de fogo [9].



Figura 2.3 - Secção transversal da carbonização da madeira [10].

Apesar da sua perda de resistência, o dimensionamento estrutural da madeira, deve ser feito para a zona que permanece sã, uma vez que, a parte carbonizada não possui resistência, como se pode ver na Figura 2.4. Existem soluções possíveis para retardar a integralidade estrutural da madeira sobre condições de incêndio, como a utilização de retardantes de fogo.

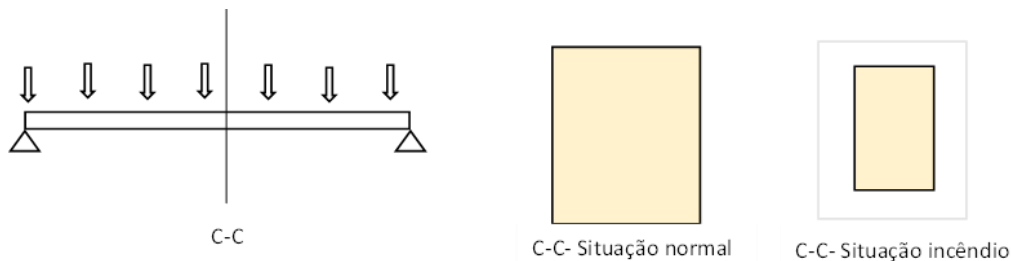


Figura 2.4 - Esquema representativo da secção transversal a ter em consideração para o dimensionamento considerando a resistência ao fogo.

A madeira sendo um material orgânico e natural, como era de esperar, apresenta alguns defeitos que limitam a sua aplicação na construção, principalmente para usos onde a resistência é importante. Os defeitos mais relevantes são, [11]:

- Nós, originados pelo crescimento de ramos do tronco, faz com que as fibras longitudinais sofram desvios de direção, diminuindo a resistência à tração;
- Fendas, que surgem devido à secagem rápida da superfície, provocando aberturas nas extremidades das peças;
- Gretas, são as separações dos anéis anuais de crescimento;
- Descaio, que consiste na redução da área de secção transversal, nas extremidades do tronco.

A durabilidade da madeira é uma das questões importante quando se pensa em termos de utilização estrutural a longo prazo. Contudo, quando analisamos o passado histórico da construção em Portugal,

constatamos que a baixa pombalina de Lisboa está construída sobre estacaria de madeira e as casas reforçadas estruturalmente anti-sismo com a chamada “Gaiola Pombalina” em madeira, estão funcionais até à data. As lajes e telhados dos edifícios mais antigos são de madeira maciça, as paredes interiores em tabique, com madeira na sua constituição. Na Ásia, há templos construídos em madeira e os mais antigos do mundo.

No século XX, houve um maior desuso deste material por passar a ser mais caro comparativamente com o tijolo e o cimento, e também devido aos novos desafios da época. Contudo, segundo Gonçalves [12], a madeira estrutural, quando devidamente dimensionada, terá uma boa durabilidade.

O gráfico da Figura 2.5, descrito no trabalho de Barbosa [18], representa a anisotropia intrínseca a qualquer espécie de madeira, traduzida pela relação entre a tensão normal e a extensão, segundo a direção longitudinal das fibras (a linha contínua), e a direção perpendicular à direção das fibras (a linha interrompida). Constata-se que o comportamento da madeira à tração e à compressão é bastante diferente, quer na resposta na direção perpendicular quer na paralela às fibras. Para carregamentos em tração, a madeira apresenta um comportamento frágil, rompendo abruptamente após atingir o pico de resistência, enquanto para carregamentos em compressão, a rotura é dúctil, com aumentos de extensão em patamar, após atingir o pico de resistência. Conclui-se que a madeira em compressão tem a capacidade de absorver deformações sem perder resistência significativa. Barbosa [18] justifica que, pela própria natureza fibrosa da madeira, na rotura por tração das fibras há o desacoplamento completo e imediato da madeira, não havendo outra forma de transferir cargas. Em contrapartida, 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 com transferência de carga.

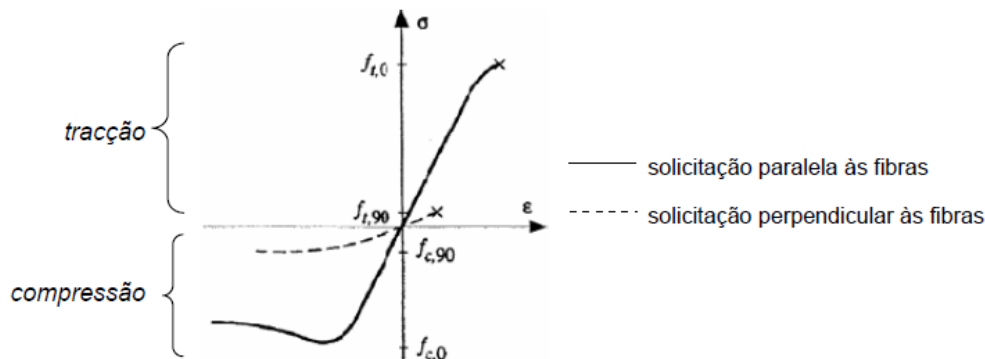


Figura 2.5 - Curva *tensão- extensão* para provetes de madeira sem defeitos carregados na direção do fio e na direção perpendicular [13].

O Eurocódigo 5 (EC5) (EN 1995-1-1, 2004) [14] é, no seguimento das normas europeias, o documento de dimensionamento de estruturas de madeira. A sua última atualização foi aprovada pelo comitê Europeu de Normalização no dia 16 de abril de 2004. Segundo indicação de João Negrão, no Workshop “Construções em Madeira - Desafios e oportunidades (2023)”, “Irà ser publicada uma versão atualizada com previsão de conclusão para 2025”. Esta nova versão introduzirá tópicos relacionados com Reabilitação “Design of timber structures” e ainda um aprofundamento sobre Vibrações, relacionadas com o Estado Limite Último de Utilização (ELS).

O EC5 está dividido em duas partes. A parte 1 subdivide-se em duas: parte 1.1 é mais geral e destina-se ao dimensionamento de estruturas de madeira; a parte 1.2 relaciona-se com o dimensionamento estrutural ao fogo. A parte 2 prende-se mais com assuntos sobre pontes.

Através da norma europeia EN338:2016 [15] é possível classificar as diferentes resistências da madeira, como “softwood” e “hardwood”. No primeiro caso designa-se a famílias de madeiras resinosas, tais como o Pinheiro e o Abeto, já no segundo caso, corresponde a madeiras do tipo folhosas, como o Eucalipto, Sobreiro e Carvalho. Caso seja necessário propor para uma determinada madeira uma classe de resistência, ou um conjunto de valores para as suas propriedades mecânicas, existe a norma EN 338:2016 [15] para as madeiras maciças e a norma NP EN 14080:2019 para as madeiras lameladas coladas [16].

Até ao momento, expõe-se a madeira maciça, com características mecânicas e comportamentais expectáveis de elementos obtidos diretamente de troncos das árvores, sem qualquer adição de colas, ou outros materiais. É fundamental destacar que a madeira maciça utilizada em estruturas precisa de ser classificada de acordo com a sua resistência e qualidade, visto que há o risco serem peças inadequadas para fins estruturais [17].

Na norma NP EN 335:2018 [40] estão presentes classificações de classes de risco que podem ser definidas consoante se expõe na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classes de risco segundo a NP EN 335:2018 [40]

Classes de risco	Situações gerais de serviço	Exemplo de aplicação	Exposição à humidade Teor de água na madeira	Agentes biológicos relevantes
1	Interior seco	Pavimentos, lambris	Seca, 20% no máximo	Carunchos
2	Interior com risco de humedificação	Estruturas de cobertura, estruturas de paredes	Ocasionalmente >20%	Carunchos Térmitas Podridão castanha Fungos Cromogéneos Bolors
3	Exterior, sem contacto com o solo e protegido	Caixilharia e portas exteriores	Frequentemente >20%	Carunchos Térmitas Podridão castanha Podridão branca Fungos Cromogéneos
	Exterior, sem contacto com o solo e não protegido	Decks sem contacto com o solo, pérgulas, painéis de vedação, soletos de madeira		
4	Exterior, junto de/em contacto com o solo e/ou água doce	Deck em contacto com o solo ou juntos de piscinas	Permanentemente >20%	Carunchos Térmitas Fungos Cromogéneos Podridão castanha Podridão branca Podridão mole
	Enterrado no solo e/ou água doce	Fundações em água doce, postes de vedação, postes de transmissão aérea		
5	Na água salgada	Pontões, fundações em água salgada	Permanentemente >20%	Classe de risco 4 + Xilófagos marinhos

É possível classificar a madeira consoante quatro fatores, o primeiro corresponde a situações de serviço a que a madeira está exposta, se a ambientes secos, húmidos ou outros. O segundo prende-se com a finalidade da utilização deste material. O terceiro, relacionado com a exposição da madeira à humidade

e teores de água no próprio material. Por fim, o quarto fator denota se a madeira possui agentes biológicos relevantes.

Contudo, a madeira maciça para fins estruturais, apresenta alguns inconvenientes, principalmente restrições impostas pela dimensão do tronco que é limitado. Como tal, tem-se assistido a uma evolução e avanço tecnológico em termos de materiais disponíveis, incluindo madeiras modificadas para a melhoria de propriedades, como a “Madeira Lamelada Colada”, que procurou de uma forma mais inovadora satisfazer as necessidades dos projetistas, passando a ser possível produzir elementos com secções curvas e até secções e vãos com maiores dimensões.

2.1.2.2 Madeira Lamelada Colada

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é um dos derivados da madeira mais antigo e utilizado na construção estrutural. As estruturas de MLC apresentam uma boa relação resistência-peso, um excelente comportamento a ambientes quimicamente agressivos e elevada resistência ao fogo comparativamente com estruturas de aço e de betão. Por estas vantagens e acrescido o carácter sustentável e estético deste material, os projetistas preferem em muitos casos aplicar madeira lamelada colada ao invés do aço ou do betão [18].

A MLC, é constituída pela união de lamelas de madeira classificada e selecionada, justapostas e orientadas com o fio na direção longitudinal, fortemente ligadas entre si com uma cola apropriada, garantindo melhoria de propriedades no que diz respeito à resistência e à rigidez do material. A interligação das lamelas topo a topo dos elementos realiza-se por *finger-joints* como ilustrado na Figura 2.6, permitindo alcançar maior resistência à flexão. Na técnica de colagem utiliza-se colas de resinas sintéticas como o fenol-resorcina-formaldeído (PDF), pulioremetano (PUR) e melamina [18]. Os processos de fabrico da MLC são diversificados e começam nas árvores provenientes das florestas, seguida da retirada desta a madeira para fim estrutural, secagem da madeira, criação de *finger-joints*, tratamento da madeira, tratamento das lamelas, aplicação do adesivo, prensagem e cura das lamelas com o adesivo, aplainamento e acabamento e por fim o empacotamento.



Figura 2.6 - "Finger-joints" [19].

Podem ser esperados melhores resultados com a utilização de lamelas com menor espessura devido à maior dispersão dos defeitos naturais da madeira pela secção, garantindo uma melhor secagem e um melhor controlo do teor de água, tornando-se vantajoso, a junção das lamelas, a nível técnico e económico, comparativamente com uma secção de madeira maciça. Visto que a resistência à madeira lamelada colada é condicionada pela resistência à tração das madeiras das lamelas, tem-se estudado técnicas de reforço para a zona tracionada [20].

Em termos de durabilidade e segundo a opinião de Barbosa [18], as linhas de cola não constituem barreira a agentes biológicos que atacam a madeira. Contudo, verifica-se que, perante situações de humedificação do elemento de madeira, as grandes dimensões das linhas de cola dificultam a penetração

da água até zonas internas, mantendo-se valores de teores de água abaixo dos 20% necessário para o desenvolvimento de agentes deteriorantes.

2.1.3. ESTRUTURAS DE MADEIRA CORRENTE

Em Portugal, a construção integral em madeira não é muito frequente, nos anos 70, com o aumento da população estudantil, apostou-se na construção de edifícios escolares de madeira, tendo sido inicialmente uma solução de resposta rápida, mas depois uma solução definitiva e que dura até aos dias de hoje. Nos anos 80 e 90, a procura deste tipo de edifícios, de madeira, diminuiu bastante o que obrigou a uma nova estratégia de mercado. Atualmente, com as preocupações crescentes com o ambiente e a sustentabilidade impulsionaram a construção em madeira, também em Portugal. A este tipo de construção associa-se uma ideia de conforto e de comportamento ambiental responsável. Para além do mercado habitacional unifamiliar, a construção em madeira destina-se também ao comércio, turismo, hotelaria, apoios de praia, entre outros.

As estruturas de madeira, como já foi dito anteriormente, são sistemas de elevada eficiência devido à fácil utilização, rapidez de construção, transporte, eficiência energética e um razoável comportamento sísmico, porque são leves (pouca massa) e flexíveis. Os elementos de madeira maciça têm sido usados na construção desde sempre, especialmente nas áreas com abundância de florestas, como na América do Norte, Europa do Norte e Japão [21]

Os elementos estruturais de madeira surgem sob a forma de:

- Pilares, elementos unidireccionais, submetidos essencialmente a compressões. É necessário ter em conta que o pilar não pode ficar em contacto direto com o solo, visto que a secção transversal deste, no caso, as fibras, absorverão qualquer tipo de humidade do solo.
- Vigas, elementos unidireccionais e horizontais, submetidos a momentos flectores. As vigas e pilares são tipicamente constituídas por madeira lamelada- colada (MLC) para se conseguir atingir comprimentos teoricamente infinitos.
- Painéis, utilizados para pavimentos ou paredes, são elementos bidirecional, com uma espessura menor, em comparação com o comprimento e profundidade, são capazes de sustentar cargas no plano e fora dele:
 - Lajes de pisos, Figura 2.7 (a), estruturas horizontais com comportamento à flexão, têm a capacidade de transferir cargas verticais para elementos horizontais, vigas, ou diretamente para elementos verticais, pilares.
 - Paredes, estruturas bidimensionais no plano vertical, geralmente realizadas com painéis de madeira maciça, ou por montagem de elementos verticais e horizontais unidimensionais com madeira. As paredes de tabique (Figura 2.7 (b)) são um exemplo de uma forma tradicional



a) Laje de piso [23]



b) Parede interior de tabique [24]

Figura 2.7 - Exemplos de elementos estruturais de madeira.

de construção de paredes de madeira maciça, generalizada em Portugal na construção pombalina, quase sempre não estruturais, obtidas pela pregagem de um sarrafeado sobre tábuas colocadas em pé na função de montantes, sendo o conjunto revestido em ambas as faces com reboco de argamassa de cal.

2.2. CONSTRUÇÕES NO PASSADO, PRESENTE E FUTURO

A madeira sempre foi dos materiais mais utilizados na construção civil, nas estruturas do estaleiro e grande parte das ferramentas auxiliares, como a cofragem. Isto porque, era o único material, para além do ferro com boa capacidade para resistir à tração e devido ao seu baixo custo [22].

Durante séculos, a madeira apareceu aplicada na construção de telhados e lajes de piso, com vigas principais de troncos de madeira maciça a vencer a totalidade do vão e a descarregar nas largas paredes de alvenaria de pedra. As vigas principais tinham um curto espaçamento entre elas e eram o suporte direto do soalho, tábuas de madeira dispostas na perpendicular ao vigamento principal. Mais tarde tornou-se menos frequente a utilização deste material a nível estrutural, devido ao aparecimento do aço e do betão, apesar disso, a madeira nunca foi esquecida e continuou-se a utilizar no mobiliário, em portas, molduras das janelas, entre outros. Em meados no século XX, a construção evoluiu, e a madeira em específico sofreu um grande avanço com o aparecimento de produtos derivados da madeira.

Serão apresentados exemplos de obras que representam a evolução da madeira enquanto material na construção:

- Uma habitação típica rural, retrata toda a era da construção de habitações entre o século XIV e início XX. É possível encontrar algumas características principais da construção, como as coberturas e lajes de piso de madeira, vigas com troncos inteiros de secção transversal a chegar aos 30cm e capazes de vencer vãos de 8m (Figura 2.8).



a) Teto de uma laje de madeira e viga



b) Cobertura em madeira

Figura 2.8 - Exemplos de coberturas [25].

- A Finlândia, tem um historial de construção em madeira maciça longo, de tal forma que é a técnica de construção mais utilizada como método tradicional de construção residencial à milhares de anos. Os troncos de madeira utilizados eram tradicionalmente esculpados e talhados à mão. O método tradicional mais utilizado era designado por “estrutura em toros” que consiste na utilização de troncos de madeiros dispostos horizontalmente e unidos por juntas de canto especiais. (Figura 2.9 (a) e (b)) Atualmente, todos os edifícios de lazer, como casas de campo, são feitos de madeira, cerca de 90% das casas mais isoladas têm estruturas de madeira, Figura 2.9 (c) [26].



a) Exemplo de uma casa de campo de madeira Finlândia



b) Pormenor das juntas de canto, de uma casa de campo (Lotta Häkkänen)



c) exemplo de uma casa de campo moderna da Finlândia (Lotta Häkkänen)

Figura 2.9 - Exemplos de estruturas de madeira na Finlândia [26]

- Piscinas de ondas - Zmar Eco Campo Resort - Localizada no Alentejo, Portugal, tem como base a sustentabilidade ambiental, possui uma piscina de ondas coberta, com estrutura de madeira e contruída pela Jular (Figura 2.10).



Figura 2.10 -Piscinas de ondas cobertas Zmar Eco Campo Resort (Jular) [27]

- Impulso verde building, localiza-se na Galiza, Espanha e é o primeiro edifício 100% de madeira na localidade. Desenhada pelo arquiteto José Lara Bocanegra e Susana Penedo Souta e desenvolvida e construída pelo Concello de Lugo, em 2022. Este edifício é uma adaptação às mudanças climáticas e tem como principal objetivo demonstrar a adaptabilidade da madeira em elementos estruturais. É um edifício com grande eficiência energética e esteticamente interessante (Figura 2.11) [28].



Figura 2.11 - Elementos estruturais do edifício Impulso verde building [28].

- A criação de espaços urbanos onde se utilizou madeira lamelada colada no exterior (Figura 2.12 (a)) além da beleza da própria madeira possibilitou-se a construção com um vão grande e uma montagem simplificada, visto que os pilares e as vigas chegaram à obra praticamente prontas para a montagem. Na Figura 2.12 (b) é possível ver uma igreja que devido à utilização de madeira lamelada colada, não foi necessário embelezar com outro tipo de ornamentos, como é tão usual.



a) Espaços urbanos



b) Igreja

Figura 2.12 - Exemplos de estruturas de madeira adaptadas para espaços de convívios [29].

- Na construção de pontes, a combinação da madeira com espaços verdes é uma combinação interessante e muitas vezes optada pelos projetistas que devido à excelente capacidade da MLC de construir vãos grandes cultiva a criatividade (Figura 2.13).



a) Ponte de Quebec, Canadá [30]



b) Ponte pedonal, Málaga [31]

Figura 2.13 - Exemplos de pontes de MLC.

- Arenas desportivas, estruturalmente constituídas por madeira lamelada colada. Existem vantagens à utilização deste tipo de material em comparação com os mais usais, como por exemplo o aço, visto que a MLC oferece maior resistência ao fogo devido à sua maior eficiência de condução de calor. Outra vantagem bastante relevante é a qualidade acústica que a utilização de MLC oferece, já que ao contrário deste material, o aço produz eco, e torna desconfortável à prática de desportos (Figura 2.14).

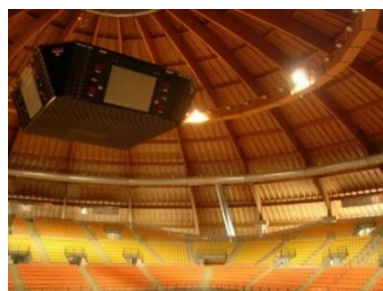


Figura 2.14 - Arena desportiva [29].

- Passadiços ao nível das copas das árvores: Treetop- Walk, concebido pelo Arquiteto Carlos Castanheira em colaboração com o Arquiteto Álvaro Siza Vieira, em 2019. Foi criado um percurso ao nível das copas das árvores, em Serralves, projetado pelo Engenheiro Carlos Castanheira, estrutura da Portilame. Tem um grande impacto a nível ambiental e no que diz respeito à conservação da natureza e do património natural (Figura 2.15) [32].

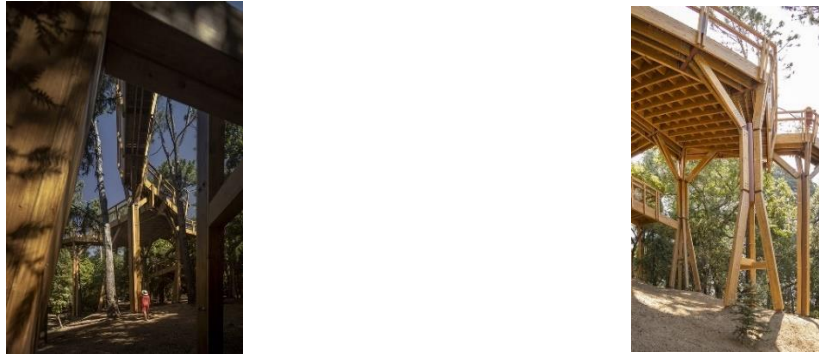


Figura 2.15 -Treetop Walk, Serralves, 2019 [32].

2.3. TÉCNICAS DE REFORÇO

Os desafios das construções de madeira perante estruturas de vãos mais arrojados e o efeito da deterioração do material, impõe encontrar alternativas sendo uma delas a implementação de técnicas de reforço para colmatar as fragilidades da madeira. O reforço pode ocorrer quer no fabrico de elementos estruturais novos, que resulta numa economia da secção transversal, como também na reabilitação de estruturas já existentes para acrescentar rigidez e capacidade de carga [18].

As estruturas de madeira são dimensionadas para os Estados Limites, Último (ELU) e de Utilização (ELS), geralmente admitindo o comportamento linear elástico até à rotura do material. Devido à grande variabilidade da resistência à tração e à probabilidade de existirem defeitos pontuais da madeira, a literatura técnica sugere que em dimensionamento estrutural se limite a resistência à tração na direção das fibras. Embora, existam estudos sobre a análise plástica à compressão, conduzindo a uma ruína dúctil, são escassos os documentos que fundamentam essa teoria.

Mesmo analisando provetes de madeira limpa, quando são impostas forças de tração, exhibe-se um comportamento frágil imprevisível. Em estruturas com dimensões consideráveis, os defeitos da madeira podem afetar consideravelmente a resistência à tração.

Assim, utilizando como reforço de uma viga de madeira, um material com elevado módulo de elasticidade e com alta resistência à tração, pode-se assistir a uma melhoria significativa de resistência, rigidez à flexão e ductilidade, comparativamente a vigas não reforçadas. Sem reforço a viga acaba por ter um comportamento elástico e dependente da secção tracionada do elemento. Com o reforço espera-se acabar com a dependência do elemento à sua resistência à tração, sendo possível atingir a tensão última em compressão para a qual a madeira tem um comportamento elástico-plástico. A Figura 2.16 representa a distribuição de tensões normais numa secção simples e noutra reforçada admitindo um comportamento elástico-plástico [33].

A opção de reforçar a zona tracionada da seção transversal de um elemento à flexão conduz a numa maior transferência de tensões para a zona comprimida. Quando a zona comprimida, por sua vez, excede a sua capacidade máxima, ocorre a rotura por compressão da madeira, normalmente dúctil,

proporcionando maior segurança no Estado Limite Último na estrutura reforçada em comparação com uma estrutura simples de madeira [18].

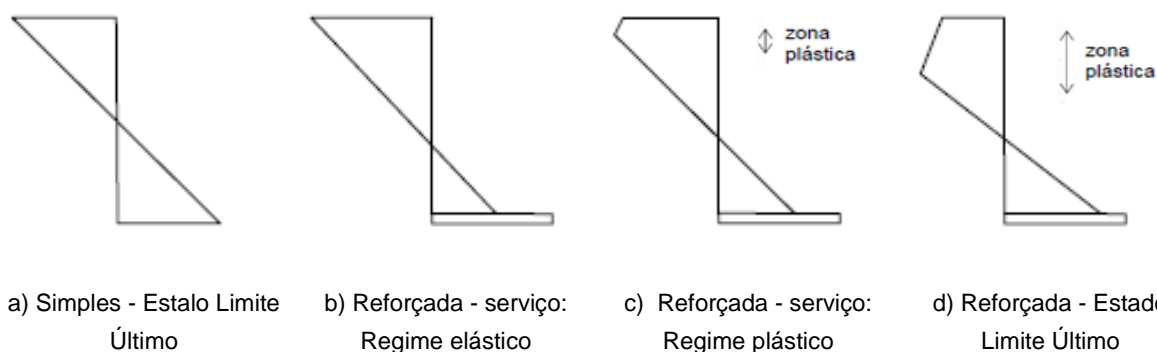


Figura 2.16 -Tensões normais na secção transversal de uma viga de madeira sujeita à flexão (adaptado do documento de Barbosa, 2008 [18]).

As intervenções possíveis visando a conservação do património edificado em madeira centram-se sobretudo na manutenção, na reparação, no restauro, na renovação e na reabilitação. Qualquer tipo de intervenção implica decisões e responsabilidades relacionadas com o património, assim como a fiscalização e a respetiva monitorização [34]. O reforço deve ser concebido para que, se necessário, seja facilmente removido no futuro, sem criar danos e perda de estabilidade da estrutura base.

2.3.1. TÉCNICAS

Das várias técnicas para reforçar elementos estruturais de madeira, podem-se utilizar materiais novos, como camadas de betão, elementos de aço e FRPs, tendo sempre em consideração a compatibilização entre o material que necessita de ser reforçado e o novo que irá reforçar. Serão identificadas técnicas mais específicas de reforço:

(i) *Substituição completa dos elementos degradados*

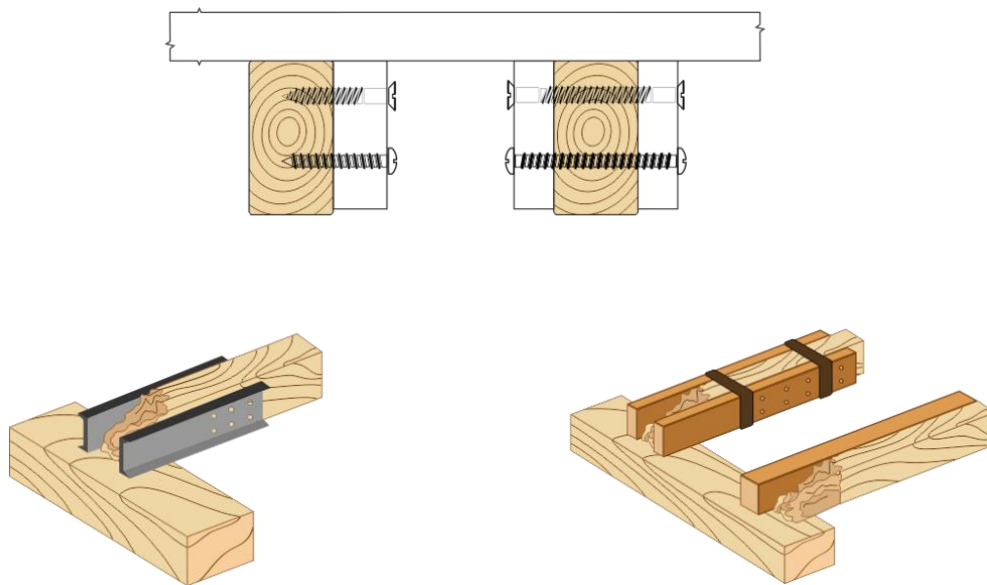
Pode-se proceder à substituição integral de elementos estruturais que estejam danificados e por essa razão tenham diminuído a sua capacidade resistente. Esta substituição pode ser realizada utilizando madeiras maciças ou produtos derivados, mas utilizando o mesmo tipo de madeira nos trabalhos de restauro, isto é, a mesma espécie [35].

(ii) *Cozer as fendas com parafusos*

A utilização de madeiras maciças, por vezes podem surgir fendas de secagem, na direção radial, tendo em conta que o coeficiente de retração tangencial é superior ao radial. Essas fendas surgem, normalmente, no plano médio da secção e tendem a diminuir a capacidade resistente do próprio elemento. É possível reforçar, “cozer” essas fendas com a aplicação de parafusos que consigam impedir o deslocamento relativo os dois lados das fendas [37].

(iii) *Aplicação de novas peças nas vigas de madeira*

Podem ser aplicadas tábuas de madeira, através de uma ligação seca com cavilhas de madeira, como se pode ver na Figura 2.17. Pode-se, ainda, colocar chapas metálicas, quando os elementos estão partidos ou enfraquecidos ou na presença de fendas de grande dimensão, repondo assim as características mecânicas e aumentando a inércia da peça. Ambas as técnicas podem ser utilizadas ao longo de todo o comprimento do elemento ou na secção localizada.



a) Aplicação de empalmes metálicos

b) Aplicação de empalmes de madeira e as respectivas ligações nas laterais da viga

Figura 2.17 - Casos de empalmes [38].

O reforço utilizando novos elementos, é uma das simples e funcionais soluções no que diz respeito ao aumento da capacidade resistente de elementos solicitados à flexão. Apesar de ser uma solução de fácil execução pode se tornar mais complexa quando os elementos apresentam elevadas deformações. Mas de uma forma geral esta solução pode resultar na justaposição de novos elementos a elementos antigos. Na Figura 2.18 apresenta-se o reforço de uma viga de madeira com a utilização de um perfil metálico [37].



Figura 2.18 - Junção de perfis metálicos [39].

(iv) Aplicação de chapas de aço e argamassa epoxídica

Este tipo de reforço é utilizado internamente nos elementos de madeira que possuem enormes defeitos locais ou roturas localizadas. São colocadas chapas, de preferência duas, na face superior da viga, com a argamassa epoxídica de modo a não ficarem visíveis (Figura 2.19) [36].

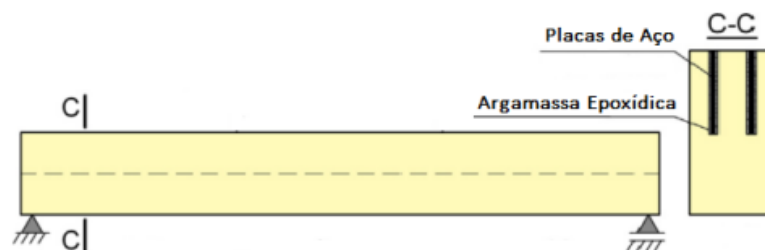


Figura 2.19 - Reforço com chapas de aço no interior do elemento de madeira e argamassas epoxídicas [26].

(v) Utilização de Fiber Reinforced Polymers (FRP)

Esta técnica de reforço é normalmente utilizada em elementos solicitados à flexão. Consiste na utilização do sistema de compósitos de FRP, geralmente constituídos por fibras de carbono, vidro, ou aramida, que têm excelentes capacidades mecânicas e são normalmente utilizados em zonas tracionadas [37]. Existem duas possibilidades de aplicação deste sistema, colando-o apenas com uma resina epoxídica, ou realizando ranhuras e incorporando o material pré-fabricado na viga. Este assunto será tratado com maior ênfase no item 2.4.

2.3.2. CASOS PRÁTICOS

Os maiores desafios estruturais a nível de reforço, para além da complexidade envolvida na escolha de materiais e técnicas de reparação, são os casos onde a necessidade é aumentar a capacidade de carga dos elementos estruturais. Devido às exigências da autoridade de conservação em termos de reversibilidade das intervenções e compatibilidade entre os materiais históricos e os novos, observou-se um aumento de utilização de materiais de reforço não invasivos e de técnicas reversíveis.

A utilização de compósitos de FRP, é uma das técnicas mais utilizadas no reparo e no reforço de estruturas, pelas suas excelentes características. Podem ser utilizados sob várias formas, mas é necessário ter em conta a sua durabilidade a fácil degradação da fibra e a baixa reversibilidade.

Devido ao risco de condensações nos metais, as armaduras de ferro e aço devem estar visíveis e abertas à inspeção, apesar deste problema poder ser colmatado com a utilização de aço inoxidável. O uso de aço inoxidável na construção apareceu inicialmente no século XX sob a forma de ligas e utilizadas em trabalhos de reforço e estabilização, em estruturas de madeira, após a sua degradação devido a ataques bióticos e não bióticos. Utiliza-se em alguns casos perfis de aço inoxidável, devido à sua elevada resistência, à sua boa performance à corrosão e à sua alta compatibilidade entre madeira- aço inoxidável. Geralmente a sua aplicação é feita através de conectores mecânicos (parafusos, cavilhas, fixadores), garantindo uma boa fixação [25].

A utilização de fixadores metálicos para reforçar vigas e asnas de madeira, como se ilustram nas imagens da Figura 2.20, é uma técnica tradicional que consiste na aplicação de um ou mais fixadores metálicos para evitar o deslizamento entre dois elementos de madeira e aumentar a secção resistente em zonas críticas. Uma das causas de falha dos fixadores metálicos é a corrosão destes elementos.

Na Figura 2.21 (a), utilizou-se empalmes de madeira nas treliças no ministério das finanças em Lisboa com objetivo de reforçar a cobertura. Consegue-se perceber ainda que houve substituição da madeira nova das escoras e ainda que se colocou um perfil metálico na “Linha”, secção horizontal da treliça. Na Figura 2.21 (b) criou-se um suporte metálico com intuito de aumentar a capacidade de carga e eliminação das deformações do vigamento de madeira recorrendo a uma estrutura metálica. Um sistema bastante invasivo, mas, reversível e bastante eficaz [38].



a) Pormenor da estrutura do telhado de madeira, Salone dei Cinquecento, Palazzo Vecchio, Florença, Itália [25]



b) Viga principal de amarração, Treliça. [25]

Figura 2.20 - Exemplos de reforços com a utilização de fixadores metálicos.



a) Empalme de treliças (Min. das Finanças, Lisboa [41])



b) Reforço da capacidade de suporte com uma estrutura metálica. [38]

Figura 2.21 - Exemplos de reforços utilizando perfis metálicos.

A Figura 2.22 (a) ilustra a ligação de vigas de madeira antigas (ano 1997) ao pavimento em madeira nova através de parafusos de aço e conectores. Na Figura 2.22 (b) representa a substituição de um dos troncos de uma casa de madeira, na Noruega [35]. Na Figura 2.22 (c) expõe-se a substituição de algumas vigas de cobertura porque as anteriores estavam degradadas ou com defeitos [25].



a) Substituir partes de vigas em estado de rotura, Bryggen, Bergen, Norway, 2008 [25].



b) Reparação da madeira, Tokke, Noruega [35].



c) Igreja de Hørsholm de Copenhaga, Dinamarca [35].

Figura 2.22 - Exemplos de reforços com substituição de madeira.

Para a reparação de vigas ou lintéis de madeira maciça antiga, é comum utilizar próteses de madeira normalmente feita com madeira nova para ligar à viga danificada utilizando varões, conectores ou varões de aço inoxidável lisos ou nervurados (Figura 2.23) [25].

A conversão de um pavimento de vigas num sistema de treliças é um método tradicional introduzido no século XIX para reforçar pavimentos com vigas de madeira deficientes. Na Figura 2.24 (a) ilustra-se uma intervenção realizada em 1920 num pavimento de vigas de madeira, em Itália, e na Figura 2.24 (b) mostra-se uma aplicação mais recente, utilizando varões de aço inoxidável [25].



a) Prótese de madeira reforçada com aço inoxidável [25]



b) Pormenor da prótese de madeira [42]

Figura 2.23 - Exemplos de próteses de madeira.



a) Pavimento de vigas de madeira reforçado em 1920



b) Viga de madeira reforçada, atualmente.

Figura 2.24 - Exemplos de diferentes reforços para situações idênticas e espaçados no tempo [25].

2.4. REFORÇO COM FRP

2.4.1. SISTEMAS E PROPRIEDADES

Os “Fiber Reinforced Polymers” designados por FRP, são compósitos criados a partir da junção de dois ou mais materiais diferentes de modo a alcançar propriedades desejáveis quando combinados com outros materiais, como o aumento de resistência, rigidez e ductilidade. São utilizados como elementos de reforço estrutural, desenvolvidos para colmatar lacunas dos materiais estruturais, ou para projetos de estruturas novas.

Na Engenharia Civil este sistema possui várias vantagens, por ser um material leve e de fácil manuseamento, com elevada resistência à tração e à fadiga comparativamente com o aço e o alumínio, como se pode verificar na Figura 2.25, é resistente à corrosão e ajustável a qualquer projeto [50]. As principais desvantagens da utilização deste polímero são, o seu mau desempenho a elevadas temperaturas, é facilmente afetado pelas radiações UV e necessita de pessoal qualificado para a sua aplicação.

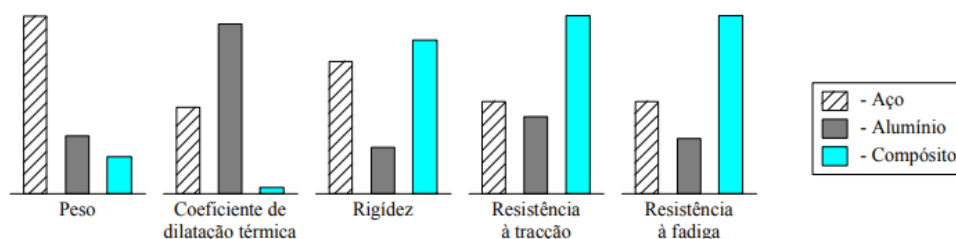


Figura 2.25 - Comparação de propriedades entre o aço, alumínio e o compósito [51].

Das aulas de Reabilitação e Reforço de Estruturas e Fundações, orientadas pelo professor Juvandes [53], retirou-se que, os sistemas compósitos de FRP são constituídos por fibras contínuas, que possuem excelentes propriedades mecânicas. De modo que ocorra uma transmissão uniforme de esforços da estrutura para as fibras, são impregnadas resinas poliméricas denominadas por matrizes, que funcionam como uma cola, com objetivo de que as fibras trabalhem em conjunto, como um só elemento. A resina tem ainda a função de proteger as fibras mecanicamente e de danos ambientais.

As fibras são responsáveis pela resistência e rigidez do compósito, que depende e varia em função do tamanho, grau de concentração e disposição na matriz. Através da Figura 2.26 é possível analisar que o comportamento das fibras isoladamente apresenta uma deformabilidade baixa e uma tensão elevada, enquanto, no caso da matriz isolada apresenta um comportamento oposto. Estes dois materiais combinados em FRP apresentam um comportamento mais controlado. Os compósitos quando solicitados à tração não exibem um patamar de cedência, são caracterizados por possuírem um comportamento linear-elástico até à rotura [18].

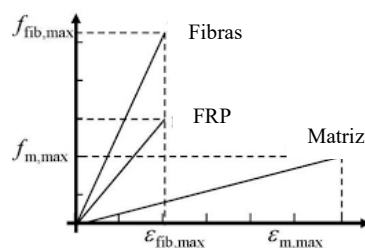


Figura 2.26 - Relação tensão-deformação das fibras, matriz e FRP, (adaptado de Juvandes,2022 [53]).

Geralmente os FRP são constituídos apenas pelas fibras e resinas, contudo, pode-se adicionar outro tipo de material para melhorar as suas características e funções. É possível adicionar aditivos e modificadores, para melhorar a sua resistência ao fogo, controlar a viscosidade e a condutibilidade elétrica. Os compósitos de FRP podem ser encontrados no mercado sob a forma de fibras de carbono (CFRP), aramida (AFRP), e vidro (GFRP), (Figura 2.27). As principais formas de comercialização, admitindo como parâmetros de base a configuração geométrica espacial e a disposição das fibras no produto final, podem ser classificadas em três grandes grupos: unidirecional, bidirecional ou multidirecional [51].



a) CFRP



b) AFRP



c) GFRP

Figura 2.27- Exemplificação de FRP com os materiais mais correntes [43].

A durabilidade das fibras é influenciada pela exposição a ataques químicos, a radiações ultravioletas (UV) e a temperaturas elevadas, levando à perda de resistência e rigidez devido à perda de integridade mecânica da matriz polimérica [56].

No caso da exposição a ataques químicos, as fibras de carbono e aramida têm uma boa performance, ao contrário das fibras de vidro que se deterioram em ambientes alcalinos. Em exposições a raios UV, as fibras de carbono e de vidro possuem uma boa resistência, já as fibras de aramida perdem a cor e a força. Por fim, as temperaturas máximas de exposição a fim de garantir estabilidade mecânica das fibras são,

no caso do vidro, temperaturas de 1000 °C, no caso das fibras de carbono temperaturas de 650 °C e em fibras de aramida temperaturas de 200 °C, como se falou nas aulas de Reabilitação. Na figura 2.18, encontra-se um diagrama *tensão vs deformação (extensão)* representativos do comportamento à tração uniaxial dos seguintes materiais: aço convencional A500, cordões de aço de pré-esforço, fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade (HM), fibras de carbono de elevada resistência (HS), fibras de aramida e fibras de vidro. Na tabela 2.2, são apresentados valores frequentes das propriedades do aço, fibras de carbono, vidro e aramida. Verifica-se que a resistência à tração das fibras é significativamente superior à do aço [44].

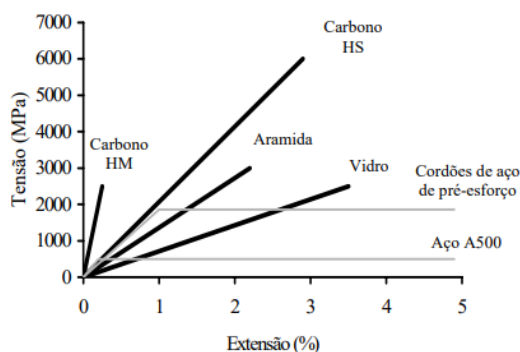
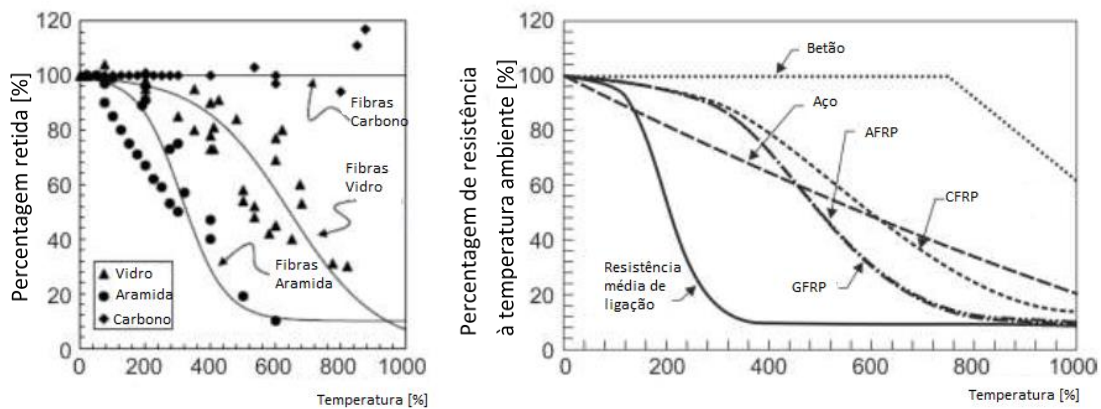


Figura 2.28 - Diagrama tensão- deformação de fibras e metais [45].

Tabela 2.2 - Propriedades típicas do aço, de fibras de vidro, carbono e aramida [45].

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]	Densidade [Kg/m ³]
Aço	200-210	240-690	7800
Fibras de vidro	69-72	1860-2680	1200-2100
Fibras de carbono	200-800	1380-6200	1500-1600
Fibras de aramida	69-124	3440-4140	1200-1500

Das principais desvantagens da utilização de reforço com FRPs, é a resistência ao fogo, como já foi referido, isto acontece devido à baixa temperatura de transição vítrea “ T_g ” das resinas utilizadas. A “ T_g ” é o ponto médio da gama de temperaturas em que a matriz polimérica do FRP sofre alteração de estado, vítreo para o estado viscoso. As matrizes que curam à temperatura normal, tem uma temperatura de transição vítrea que varia dos 50°C a 120°C. Quando os FRP são expostos a temperaturas superiores a 400°C, os compósitos ficam suscetíveis à combustão e a matriz pode mesmo evaporar-se. Na ausência de medidas de proteção contra o fogo, uma matriz polimérica pode ser propensa à combustão, emissão de fumos e à promoção da propagação da chama. Posto isto, quando expostos ao fogo os FRPs podem sofrer carbonização, fusão, delaminação, fissuração e deformação. Através da figura seguinte, Figura 2.29, é perceptível que existem matrizes com melhor performance e com descolagem apenas aos 200°, mostra também que as fibras perdem resistência com o aumento da temperatura, sendo a fibra de carbono a que perde menos resistência [62].



a) Resistência da fibra nua

b) FRP vs. Betão reforçado com aço

Figura 2.29 - Variação aproximada da resistência à tração e da resistência da ligação com o aumento da temperatura (adaptado de Zigler, R and Pokomy, M, [62]).

Como tal, existe a necessidade de proteger adicionalmente o FRP contra o fogo, sendo uma proteção adicional contra incêndios em estruturas de madeira reforçadas ou estabilizadas, especialmente quando o elemento estrutural se encontra na zona de incêndio de um piso utilizável, como elementos visíveis da treliça de um sótão. No entanto se o elemento estrutural estiver num piso não utilizável, por exemplo, um sótão não utilizável, o risco de incêndio não é calculado. Se for necessário a proteção contra incêndio do compósito, serve o simples revestimento com elementos de madeira com espessura suficiente para fornecer a resistência necessária como se ilustra na Figura 2.30.

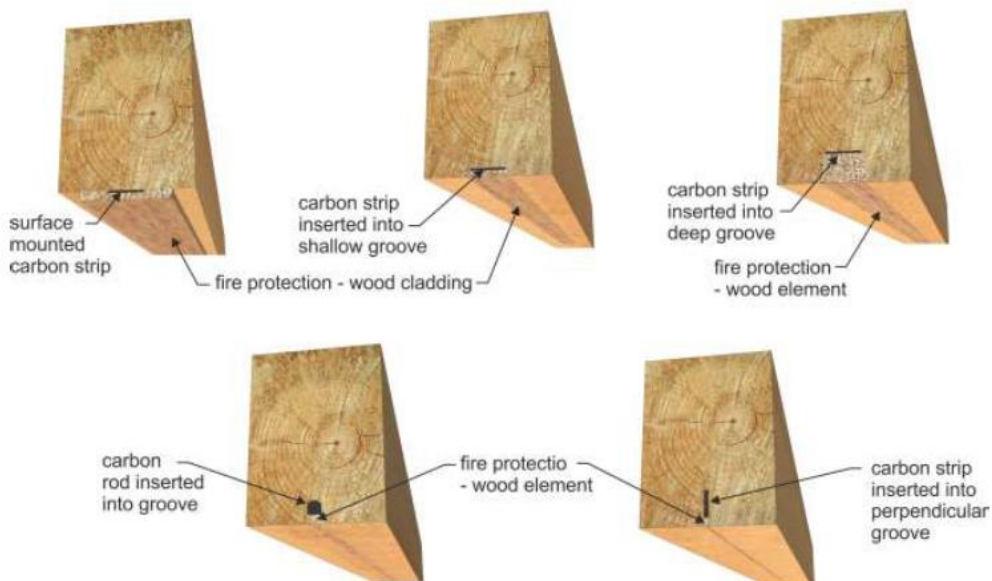


Figura 2.30 - Elementos de proteção ao fogo para algumas técnicas de reforço com FRP [62].

2.4.2. TÉCNICAS DE REFORÇO COM FRP

Segundo Juvandes [52], designa-se de “sistema de FRP” ao conjunto de produtos/materiais que são estritamente necessários para se aplicar o FRP no reforço de estruturas por colagem, isto é, ao conjunto das fibras de reforço, da matriz de polimerização e/ou de colagem ao substrato, do primário e do regularizador na preparação das superfícies dos elementos a reforçar. No mercado da construção civil

estão disponíveis dois grupos, entre outros, de sistemas de FRP [54]: *sistemas curados in situ* (fibra contínua seca) e *sistemas pré-fabricados* (compósito FRP). No primeiro, a resina de saturação e as fibras secas são comercializadas em separado, depois juntas e polimerizadas diretamente sobre o local a reforçar (criação do FRP). A resina funciona como agente de impregnação das fibras e também como adesivo, fixando o FRP à estrutura. Neste caso, a formulação da resina deve ter o cuidado de ser compatível com os materiais envolvidos no reforço. No segundo sistema, são comercializados sob a forma de elementos pultrudidos (laminados, perfis, etc), ou seja, um FRP curado, sendo apenas necessário aplicar uma cola, a resina adesiva, para fixar o reforço à estrutura [51]. Qual quer das formulações dos dois sistemas são misturadas no local da obra e devem ter em atenção às condições hidrotérmicas do substrato a reforçar.

É necessária uma preparação cuidadosa da superfície da madeira para se conseguir uma boa resistência e durabilidade da colagem. As superfícies a colar devem estar secas e isentas de contaminantes, como poeiras, e ter a rugosidade superficial suficiente. A preparação da superfície deve ser efetuada imediatamente antes da colagem, enquanto se prepara a aplicação do adesivo. A operação deve ser realizada por operadores experientes e de acordo com as normas dos fabricantes, sendo implementadas medidas de controlo de qualidade em cada fase do processo [56].

Os *sistemas pré-fabricados* podem incorporar várias formas de FRP pultrudidos, sendo os mais comuns os laminados com largura e espessura variáveis. Os laminados funcionam na direção longitudinal (unidirecionais) correspondente à direção das fibras (Figura 2.31 (a)). No caso dos *sistemas curados in situ*, são disponibilizados no mercado fibras contínuas em modo “seco” ou com pequena “pré-impregnação”, com orientação segundo uma direção (unidirecionais), designadas por mantas, ou com orientação segundo duas direções ortogonais (bidirecionais) com uma percentagem relativa por direção de 10% a 90%, designadas por tecidos (Figura 2.31 (b)).



a) Laminado de CFRP



b) Tecido flexível de CFRP

Figura 2.31 - Os sistemas compósitos de FRP mais correntes [46].

Como já foi referido, a utilização destes sistemas de reforço visa fundamentalmente aumentar a capacidade de carga das estruturas. Contudo, é possível usar esses sistemas de FRP em situações de construções novas, isto é, incorporar elementos de FRP na fase do projeto da nova edificação.

As técnicas de reforço geralmente podem ser ativas ou passivas. A ativa é a que utiliza um material sob a forma de pré-esforço, ao passo que a técnica passiva é quando se ligam os materiais por colagem sem pré-tensão [51]. Na Figura 2.32 expõe-se a técnica de reforço passiva com um sistema curado in situ unidirecional, manta de CFRP.

No caso geral dos compósitos FRP, as técnicas de reforço podem ser aplicadas sob duas formas de colagem possíveis, a colagem NSM “*Near Surface Mounted*” e a colagem EBR “*External Bounded Reinforcement*”. Ambas permitem a opção do pré-esforço do material. A escolha da técnica depende dos objetivos que se pretendam atingir, nomeadamente, que tipo de sistema de FRP usar e que tipo de incremento de resistência aplicar, isto é, à flexão, ao corte ou o confinamento [52].



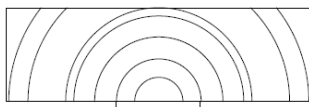
a) Aplicação de manta de CFRP



b) Aspeto geral de reforços à flexão, ao corte e ao confinamento com mantas de CFRP.

Figura 2.32 - Exemplos de técnica passiva no reforço estrutural com mantas de CFRP [47].

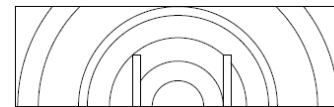
A *técnica EBR* consiste na colagem do material de reforço na superfície externa da estrutura a reforçar (Figura 2.33 (a)) o que obriga a cuidados prévios do substrato como controlo de rugosidade e limpeza, para não comprometer a boa aderência da ligação. A *técnica NSM* é uma réplica do reforço por selagem de varões de aço no betão. Consiste em abrir ranhuras na madeira e inserir o FRP nessas mesmas ranhuras (Figuras 2.33 (b) e (c)). É vantajoso não só a nível estético, uma vez que fica incorporado na secção a reforçar, evitando fenómenos de deslocamento, mas também porque o compósito fica protegido contra as radiações UV, que deterioram a matriz polimérica, assim como contra atos de vandalismos. Na *técnica NSM* há autores que por aplicar-se num rasgo horizontal a designam de HNSM (Figura 3.33 (b)) ou por optar-se pelo rasgo vertical a designam de VNSM (Figura 3.33 (c)) [50].



a) Técnica EBR



b) Técnica HNSM



c) Técnica VNSM

Figura 2.33 - Técnicas de reforço de vigas de madeira com sistemas de FRP.

Para além das abordadas anteriores, há a técnica de reforço (sem designação específica) implementada na fase de produção dos elementos estruturais em madeira lamelada colada, no qual o compósito é colado entre duas lamelas adjacentes, previamente escolhidas. Este processo tem vantagens estéticas e vantagens na proteção do reforço pela madeira [51].

Um reforço à flexão pode ser executado aplicando armaduras adicionais nas zonas tracionada e/ou comprimida da madeira, quer por via EBR quer por via NSM. Contudo, tratando-se de sistemas de FRP não é muito aconselhável aplicar na zona comprimida devido a efeitos de encurvadura ou destacamento, sobretudo na técnica EBR.

2.4.3. PROJETOS DE REFORÇO COM FRP

A aplicabilidade dos compósitos de FRP no reforço estrutural é muito vasta e com resultados satisfatórios. Podem ser utilizados no reforço de vigas, à flexão e ao corte, no caso de lajes utiliza-se à flexão e nos pilares frequentemente no seu confinamento.

Alguns exemplos de aplicação de FRP para o reforço estrutural:

- Reforço de pilares de uma ponte, Viaduto Sul da Ponte Vasco da Gama (Lisboa, Portugal, 2017): foram detetadas anomalias e patologias nos pilares da ponte, como a delaminação, fendilhação e irregularidades no betão de recobrimento. Muitas das patologias localizam-se na transição estaca/pilar. A solução passou pela aplicação de duas camadas de manta de carbono com 30cm de largura, em afastamento de 20cm (Figura 2.34).



Figura 2.34 - Reforço dos pilares da Ponte Vasco da Gama com mantas de CFRP (S&P Clever Reinforcement Ibérica, 2017 [48]).

- Reforço estrutural devido a danos provocados por um incêndio, Centro Cultural- Associação Recreativa e Cultural das Carpintarias de São Lázaro (Lisboa, Portugal, 2016): A Carpintaria de São Lázaro funcionou como carpintaria industrial até aos anos 90, mas sofreu um incêndio que pôs fim à sua atividade. A estrutura sofreu danos devido ao incêndio e foi intervençionada de modo a reconstruir a sua capacidade resistente estrutural. A solução passou pelo reforço de lajes em geral com laminados de carbono nas duas direções e reforço de pilares por confinamento com mantas de fibra de carbono (Figura 2.35).



Figura 2.35 - Reforço estrutural do edifício Associação Recreativa e Cultural das carpintarias de São Lázaro com laminados de carbono (S&P Clever Reinforcement Ibérica, 2016 [49]).

2.4.4. COMPATIBILIDADE FRP/MADEIRA

A combinação de materiais como a madeira com compósitos de FRP oferece inúmeras vantagens devido à sua compatibilidade e complementaridade das suas características. A ligação entre estes dois materiais é efetuada através de um sistema de colagem com recurso a resinas epoxídicas.

Segundo Cruz [64], o uso de compósitos de FRP para reforço de elementos estruturais de madeira é aconselhado para vigas sujeitas a flexão (vigas de pórticos, suporte de soalho ou em treliças) ou elementos sujeitos a ações no plano, como o soalho, contribuindo para a transmissão de cargas às vigas, ou mesmo em juntas entre elementos, como nas treliças. No entanto, este reforço é desaconselhado em elementos sujeitos a esforços de compressão, como é o caso dos pilares muito devido ao facto de o pilar

ter de ser confinado na sua totalidade o que se torna inadequado, devido à expansão e contração da madeira (quando sujeita a variação de temperatura) [18].

De um modo geral, a literatura técnica afirma que o reforço de estruturas de madeira com FRPs apresenta vantagens como a redução de custos quando sistematizado, a capacidade de reparar e reabilitar danos e deteriorações estruturais, a melhoria na durabilidade e na redução da manutenção do material, o aumento da resistência à flexão e da rigidez das peças, a possibilidade de utilizar peças de menor seção transversal com a mesma rigidez e resistência das peças sem reforço e a melhoria das propriedades estruturais de classes de madeiras de menor qualidade [18].

Das características da madeira a mais evidente é o seu baixo peso, que não é afetado quando combinado com FRPs. Além disso, a heterogeneidade mecânica da madeira, que é o seu defeito mais evidente, devido à existência de várias anomalias, pode ser mitigada pela utilização simultânea de materiais estruturalmente eficientes, como os compósitos de FRP.

É importante considerar se os materiais em questão possuem a capacidade de transferir esforços entre si ao reforçar madeira com FRPs. A resistência da interface entre a madeira, o adesivo e o compósito resulta da comparação dos valores de resistência ao corte e à tração na camada superficial da madeira, resistência coesiva do adesivo e resistência interlaminar do compósito. Destes três casos, o fator limitante será o que apresentar menor valor em termos correntes, normalmente a madeira. É essencial determinar o valor da resistência à aderência para compreender os mecanismos de transmissão de forças na junta e, nestas condições, permitir o estabelecimento de modelos experimentais e analíticos para a interpretação de um reforço [51].

Em termos gerais, a literatura técnica [50], [64] indica que a avaliação da aderência entre materiais ligados é possível por via de ensaios experimentais, como o ensaio de “Pull-Off” e os ensaios de corte simples ou duplo, diretos ou em flexão. Com os primeiros avalia-se de modo razoável a resistência da ligação colada por arrancamento perpendicular à direção das fibras da madeira, designada por resistência à tração superficial por arrancamento. Com os segundos tem-se uma ideia da resistência ao corte da interface de ligação, segundo a direção longitudinal das fibras.

Os ensaios de “Pull-Off”, arrancamento por tração devem ser realizados com a norma EN 1542(1999). Na generalidade o ensaio consiste no registo da força de tração necessária para o arrancamento de pastilhas metálicas, de uma secção circular com 50mm de diâmetro, coladas à superfície de madeira. Os modos de ruína podem ocorrer por corte integral ao longo da superfície de madeira, por rotura do adesivo, por destacamento na interface de ligação dos materiais ou, por último, pela conjugação dos três casos.

Segundo o estudo de Barbosa [18], no geral, os ensaios de “Pull-Off” são indicados para avaliar a aderência de juntas coladas à superfície do material (no caso da técnica EBR) e sofríveis para o caso de juntas inseridas em rasgos não superficiais do material (técnica NSM).

Os ensaios de corte simples ou duplo, diretos ou em flexão, não estão normalizados, no entanto há alguns autores que procuram ajustar à sua investigação para caracterizar a aderência entre dois materiais colados entre si [18] [64]. Estes ensaios pretendem avaliar, nomeadamente, o comprimento efetivo colado, a força máxima mobilizada na ligação e o valor máximo da extensão no FRP, solicitando o provete apenas a tensões de corte.

Independentemente da técnica de reforço, nos ensaios de corte simples ou duplo observaram 3 tipos de roturas [64]: (i) rotura coesiva na madeira; (ii) rotura no adesivo; (iii) rotura mista entre a madeira e o adesivo.

Como uma indicação do máximo desempenho do FRP na ligação à madeira, na Tabela 2.3 são resumidos os valores máximo da extensão no FRP “ ϵ_f^{max} ” observados nos trabalhos de Barbosa [18] e Cruz [64]. Constatou-se que em ensaios de corte os valores de “ ϵ_f^{max} ” oscilam entre 0.52% a 0.97% e nos ensaios de flexão entre 0.28% a 0.32%, cujo valor é cerca de 66% da capacidade máxima do FRP devido às ruínas prematuras por corte da madeira ou na interface FRP-madeira.

Tabela 2.3 - Extensões máximas no FRP colados à madeira (trabalhos de Barbosa e Cruz).

Autor	Ensaio	Técnica de reforço	ϵ_f^{max} (%)
Barbosa [18]	Corte simples em flexão	EBR	0.85
		HNSM	0.92
		VNSM	0.97
Cruz [64]	Corte simples	EBR	0.52
		NSM	0.68
	Flexão em 4 pontos	EBR	0.28
		EBRA	0.32

Para que a ligação madeira-FRP tenha um bom desempenho, na opinião de Cruz [64], é importante compatibilizar os 3 materiais utilizados, assim como controlar:

- A limitação das tensões em condições de serviço. Durante a fase de projeto é importante que se faça uma correta avaliação de todas as condições;
- A escolha do material de reforço. Existem variadas fibras e variadas resinas, pelo que a escolha tem de ser cuidadosa;
- O correto projeto de ligação entre os materiais. É o ponto mais importante de todo o reforço, uma vez que uma ligação errada faz com que os materiais não atuem em conjunto;
- A proteção do sistema de reforço. Existem variadas técnicas de reforço e sistemas de maneira que o reforço não sofra choques;
- A execução correta do reforço, recorrendo a técnicos adequados para o efeito;
- O planeamento a longo prazo. O reforço não poderá ser sujeito a temperaturas elevadas.

Entre os materiais, tem de se ter em conta:

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

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O reforço e a reabilitação têm vindo a assumir uma posição na construção civil. Numa perspetiva mais sustentável é cada vez mais importante desenvolver técnicas e novos métodos para aumentar as estratégias de reforço e construir de forma sustentável. A madeira tem também um papel bastante importante neste campo, voltando a ser a modernização da construção, o futuro é agora construir em madeira.

A madeira é um material orgânico, caracterizada pela sua fácil absorção de água, necessitando, por isso, de ser submetida a processos de secagem. Devido à orientação das células da madeira é possível dizer que este é um material anisotrópico, ou seja, apresenta um comportamento distinto em três direções ortogonais entre si [8]. Relativamente à sua combustão, forma-se uma camada de carbonização ao seu redor, que proporciona um efeito de isolamento, preservando a parte interna da madeira, sem perda drástica de propriedades.

A madeira sendo um material orgânico e natural, como era de esperar, apresenta alguns defeitos que limitam a sua aplicação na construção, principalmente para usos onde a resistência é importante. Mecanicamente, uma peça de madeira, reage cerca de três vezes melhor a esforços de tração, na direção longitudinal, do que a esforços de compressão, na mesma direção. A tração provoca aproximações das fibras aumentando a aderência entre as mesmas, estas propriedades são afetadas com a presença de nós que faz com que a peça perca resistência, podendo em alguns casos chegar-se a soltar do material que a envolve, mas quando sujeitos a esforços de compressão, eles assumem um comportamento mais estável.

Durante séculos, a madeira apareceu aplicada na construção de telhados e lajes de piso, com vigas principais de troncos de madeira maciça a vencer a totalidade do vão e a descarregar nas largas paredes de alvenaria de pedra. Mais tarde tornou-se menos frequente a utilização deste material a nível estrutural, devido ao aparecimento do aço e do betão, apesar disso, a madeira nunca foi esquecida e continuou-se a utilizar no mobiliário, por exemplo. Em meados no século XX, a construção evoluiu, e a madeira em específico sofreu um grande avanço com o aparecimento de produtos derivados da madeira.

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é um dos derivados da madeira mais antigo e utilizado na construção estrutural. As estruturas de MLC apresentam uma boa relação resistência-peso, um excelente comportamento a ambientes quimicamente agressivos e elevada resistência ao fogo comparativamente com estruturas de aço e de betão. Por estas vantagens e acrescido o carácter sustentável e estético deste material, os projetistas preferem em muitos casos aplicar madeira lamelada colada ao invés do aço ou do betão [18]. Podem ser esperados melhores resultados com a utilização de lamelas com menor espessura devido à dispersão dos defeitos naturais da madeira que ficam mais dispersos pela secção, garantindo uma melhor secagem e um melhor controlo do teor de água, tornando-se vantajoso a nível técnico e económico, comparativamente com uma secção de madeira maciça. Visto que a resistência à madeira lamelada colada é condicionada pela resistência à tração das madeiras das lamelas, tem-se estudado técnicas de reforço para a zona tracionada [20].

Ao longo deste capítulo pretendeu-se reunir informação que fundamenta as vantagens da utilização de madeira na construção, mas também opções que se têm de tomar para a conceção de soluções de reforço à tração de elementos de madeira maciça ou madeira lamelada colada. Foram apresentadas várias formas de reforço e exemplos de casos práticos com vista à conservação do património, as intervenções possíveis de se realizar prendem-se com a manutenção, reparo, restauração, renovação e reabilitação.

Os sistemas de FRP surgem no seguimento dos vários tipos de reforços possíveis. O compósito FRP pode ser utilizado de diferentes modos, dependendo sempre do objetivo final de reforço. Existem dois tipos de colagem possíveis, a colagem NSM “Near Surface Mounted” e a colagem EBR “External Bounded Reinforcement”.

No caso de reforçar a madeira com FRP é importante ter a noção se os materiais têm a capacidade de transferência de esforços entre eles. A interface de ligação entre os materiais é a responsável pela transmissão dos esforços do FRP para a madeira, pelo que a resistência de uma ligação será ditada pelo valor máximo da aderência entre os materiais envolvidos.

No caso de reforçar a madeira com FRP é importante ter a noção se os materiais têm a capacidade de transferência de esforços entre eles. A interface de ligação entre os materiais é a responsável pela transmissão dos esforços do FRP para a madeira, pelo que a resistência de uma ligação será ditada pelo valor máximo da aderência entre os materiais envolvidos, sobretudo, condicionado pela madeira porque tem menor resistência ao corte e apresenta imperfeições naturais no potencial substrato de colagem do FRP [50]. Uma forma de avaliar a aderência da ligação será a realização de ensaios de aderência por “Pull-Off” e ensaios de aderência por corte simples ou duplo, direto ou em flexão, para avaliar nomeadamente, o comprimento efetivo colado, a força máxima mobilizada na ligação e o valor máximo da extensão no FRP (modo de ruína pela madeira).

Constata-se que em ensaios de corte os valores de “ ϵ_f^{max} ” oscilam entre 0.52% a 0.97% e nos ensaios de flexão entre 0.28% a 0.32%, cujo valor é cerca de 66% da capacidade máxima do FRP devido às ruínas prematuras por corte da madeira ou na interface FRP-madeira. Os valores observados em flexão são cerca de metade dos valores máximos recomendados para projeto que envolvam ligação FRP-betão [53] a referir no próximo capítulo 3.

Embora a literatura aponta alguma preocupação a respeito do comportamento de ligações coladas a temperaturas elevadas, nomeadamente ao fogo, na prática, a madeira, poderá ser o ponto fraco no substrato da ligação. Neste capítulo foram apontadas propostas de proteção dos sistemas de FRP a temperaturas elevadas, incluído o fogo.

O reforço de elementos estruturais de madeira com sistemas de FRP é aconselhado para vigas sujeitas a flexão ou elementos sujeitos a ações no plano, como o soalho, contribuindo para a transmissão de cargas às vigas, ou mesmo em juntas entre elementos, como nas treliças. Esse reforço é desaconselhado em elementos sujeitos a esforços de compressão, como é o caso dos pilares.

3

**ESTUDO DE MODELOS
REFORÇADOS À FLEXÃO COM
SISTEMAS FRP**

Este capítulo representa a parte mais importante da dissertação, com objetivo de acrescentar algum contributo à caracterização do reforço de vigas de madeira reforçadas à flexão com sistemas de FRP. Para isso, desenvolveu-se modelos de estudo de secção retangular com a finalidade de perceber as vantagens e desvantagens associadas a este tipo de reforço, em fase de estado limite último, nas condições de perfeita aderência dos materiais e em termos de viabilidade de incrementos de resistência relativamente à ausência de reforço. As variáveis impostas foram, dois tipos de madeira (maciça e lamelada colada), duas técnicas de reforço (NSM e EBR) e geometrias diferentes de distribuição do FRP pela secção transversal dos modelos.

3.1. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA

No âmbito do Reforço e Reabilitação de vigas de madeira, este capítulo tem como objetivo estudar o comportamento de modelos de viga de dois tipos de madeira, uma maciça e outra lamelada colada, reforçadas por dois sistemas de FRP, o pré-fabricado (laminado) e o curado *in-situ* (mantas unidireccionais). O estudo incide na análise do comportamento dos modelos à flexão, em fase de estado limite último (ELU), avaliando-se os incrementos de momento resistente para cada modelo reforçado em relação ao modelo não reforçado de referência.

O reforço de vigas de madeira, como descrito no Capítulo 2, é indicado em situações onde:

- Se pretende aumentar a capacidade de carga porque se mudou o tipo de utilização do edifício;
- Se constatar uma redução da secção resistente da madeira devido a deteriorações como ataques de fungos;
- Se ocorrer aumento excessivo da deformação.

A utilização de sistemas compósitos de FRP evita que seja necessário modificar muito a estrutura, conduzindo a uma conservação e preservação maior de edifícios históricos.

A literatura internacional tem pouca informação sobre este tema, destacando-se a proposta Italiana CNR-DT 201/2005 [57] com recomendações para “Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Timber Structures”. Segundo esse documento italiano a madeira tem uma lei constitutiva (relação tensão normal e extensão) que pode ser descrita por diferentes modelos, mas todos eles baseiam-se em pressupostos comuns. Para o *comportamento à tração*, o modelo corrente sugerido é o do carregamento à tração uniaxial que segue uma linha linear elástica até à rotura, caracterizado por um diagrama *tensão - extensão* retilíneo, com

inclinação constante (módulo de elasticidade elástico). Uma vez que a resistência última à tração é conhecida, consegue-se determinar a deformação correspondente pela Lei de Hooke.

No caso do *comportamento à compressão*, o modelo corrente proposto é o do teste de compressão uniaxial onde geralmente há um tramo inicial com inclinação constante (módulo de elasticidade elástico), fase linear elástica esta semelhante ao ramo em comportamento à tração. Após atingir-se o valor máximo da resistência à compressão, surge a fase de regime plástico, que difere entre os três modelos propostos na literatura, com considerações específicas para cada. O modelo *elástico – plástico perfeito* (i) assume ter um ramo horizontal com resistência à compressão constante (ramo plástico) até atingir a extensão última. O modelo *Bazan-Buchaman* (ii) é o mais complexo porque na fase de plastificação à compressão, admite ter um ramo linear de inclinação negativa até esgotar a extensão máxima de plastificação por compressão. Este declive é designado de amolecimento da resistência (“plasticity softening behaviour”). Por último, o modelo de *O’Halloran* (iii) é o mais próximo do comportamento real da madeira porque contabiliza o efeito não linear do material até esgotar a capacidade à compressão.

No presente trabalho decidiu-se usar um modelo modificado de *Bazan-Buchaman* para a madeira, que consiste em assumir para o *comportamento à tração* um diagrama linear elástico com rotura frágil, representado na Figura 3.1 (a). Como o *comportamento à compressão* na generalidade dos modelos são difíceis de calibrar e a literatura não avança com propostas de valores para os parâmetros da fase plástica decidiu-se ajustar um critério. Apesar da madeira ser um material fibroso, esta apresenta maior resistência real à tração do que à compressão. Por tal e face às sugestões de vários trabalhos experimentais, em termos práticos, para análise ao estado limite último (ELU) decidiu-se considerar a sugestão de Corradi, M. et al. [55]. Esta limita a envolvente do modo de rotura da madeira à capacidade à tração porque os defeitos e imperfeições da madeira condicionam a resistência última à tração (f_{wt}), acabando por não se atingir a capacidade última à compressão (f_{wc}) nem mobilizar a fase plástica, como se ilustra no círculo da Figura 3.1 (b).

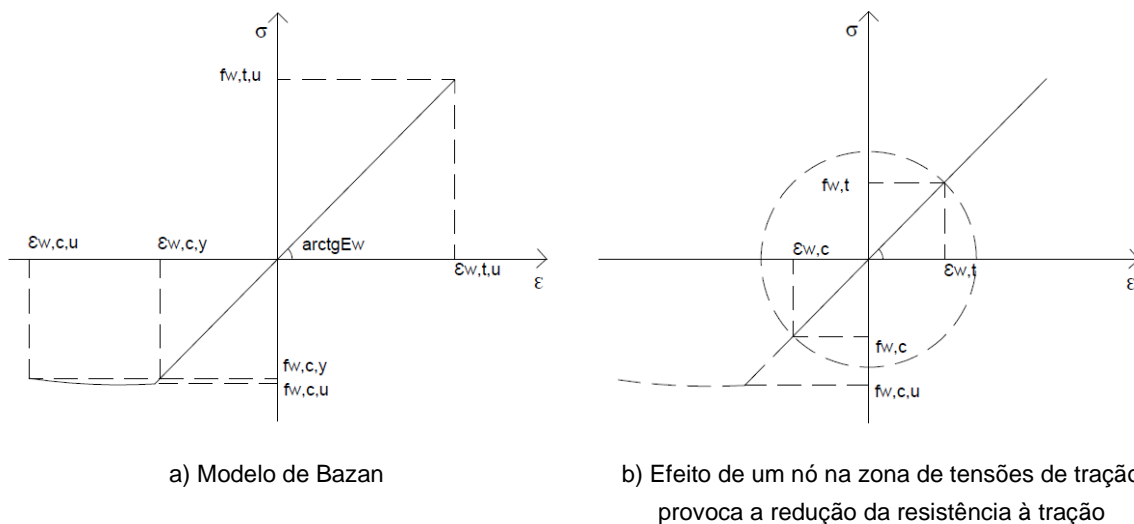


Figura 3.1 - Diagrama tensões normais vs extensões (adaptado de Corradi, M. et al., [55])

3.1.1. MADEIRA SEGUNDO O EC5

Qualquer metodologia de dimensionamento ou verificação estrutural implica conhecimento dos materiais e das suas propriedades, das ações a que a estrutura está sujeita, dos modelos de análise que permitam determinar os esforços atuantes, deformações e vibrações e por fim de modelos de dimensionamento e verificação de segurança aos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS) [13].

Existe uma grande dificuldade em conhecer de forma rigorosa a capacidade resistente de elementos estruturais como a madeira, devido ao seu comportamento anisotrópico. Como tal, utilizam-se coeficientes de segurança bastantes elevados. Por outro lado, devido ao facto da madeira apresentar relações de rigidez e resistência na direção do fio baixas, quando comparada com outros materiais, resultam estruturas mais leves e flexíveis que conseqüentemente são mais deformáveis e com menores frequências de vibração, fazendo com que o dimensionamento e a verificação de segurança das estruturas de madeira sejam frequentemente condicionados pelos ELS.

As ações a considerar sobre as estruturas estão preconizadas no Eurocódigo 1 (EN1991-1-1) [59] tal como pesos próprios, cargas permanentes, sobrecargas entre outros. As ações sísmicas estão definidas no Eurocódigo 8 (EN 1998-1) [60]. Nas estruturas de madeira o efeito de duração das ações influencia o cálculo, e o EC5 preconiza em 5 classes de duração, apresentadas na Tabela 3.1 e exemplos de cargas que se consideram para as várias classes de duração, apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Classes de duração de carga segundo o EC5 [14].

Classes da duração de carga	Tempo de duração da carga característica
Permanente	Mais de 10 anos
Duração longa	6 meses até 10 anos
Duração média	1 mês até 6 meses
Duração curta	Menos de 1 semana
Instantâneas	-

Tabela 3.2 - Exemplos de cargas correspondentes às classes de duração segundo o EC5 [14].

Classes da duração de carga	Exemplos de cargas
Permanente	Peso- próprio
Duração longa	Sobrecarga
Duração média	Cargas impostas pelos pavimentos
Duração curta	Neve, vento
Instantâneas	Cargas acidentais

Para a caracterização das propriedades dos materiais, existem classes de resistência de acordo com as normas EN 338:2016 [15] para o caso de madeiras maciças novas (Tabela 3.3), e NP EN 14080:2019 [16] para as madeiras lameladas coladas, dividindo-se estas em *homogénea* (Tabela 3.4) e *combinada* (Tabela 3.5). Na primeira, a secção transversal apresenta lamelas pertencentes à mesma classe de resistência e à mesma espécie, já na segunda, a secção transversal apresenta lamelas exteriores e interiores pertencentes a classes de resistência e espécies diferente.

Tabela 3.3 - Valores característicos da madeira maciça (adaptado da norma EN338-2016) [15].

	Class	D18	D24	D27	D30	D35	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
Strength properties in N/mm²															
Bending	$f_{m,k}$	18	24	27	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Tension parallel	$f_{t,0,k}$	11	14	16	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Tension perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression parallel	$f_{c,0,k}$	18	21	22	24	25	27	29	30	32	33	35	36	37	38
Compression perpendicular	$f_{c,90,k}$	4,8	4,9	5,1	5,3	5,4	5,5	5,8	6,2	6,6	10,5	11,3	12,0	12,8	13,5
Shear	$f_{v,k}$	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,7	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0
Stiffness properties in kN/mm²															
Mean modulus of elasticity parallel bending	$E_{m,0,mean}$	9,5	10,0	10,5	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	22,0	24,0
5 percentile modulus of elasticity parallel bending	$E_{m,0,k}$	8,0	8,4	8,8	9,2	10,1	10,9	11,3	11,8	13,0	14,3	15,5	16,8	18,5	20,2
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{m,90,mean}$	0,63	0,67	0,70	0,73	0,80	0,87	0,90	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,47	1,60
Mean shear modulus	G_{mean}	0,59	0,63	0,66	0,69	0,75	0,81	0,84	0,88	0,97	1,06	1,16	1,25	1,38	1,50
Density in kg/m³															
5 percentile density	ρ_k	475	485	510	530	540	550	580	620	660	700	750	800	850	900
Mean density	ρ_{mean}	570	580	610	640	650	660	700	740	790	840	900	960	1020	1080
NOTE 1 Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, char. modulus of elasticity in bending, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus, have been calculated using the equations given in EN 384.															
NOTE 2 The tabulated properties are compatible with timber at moisture content consistent with a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 %, which corresponds to a moisture content of 12 % for most species.															
NOTE 3 Characteristic values for shear strength are given for timber without fissures, according to EN 408.															
NOTE 4 The edgewise bending strength may also be used in the case of flatwise bending.															

Tabela 3.4 - Valores característicos da madeira lamelada colada homogénea (adaptado da norma NP EN 14080: 2019) [16].

Propriedade	Símbolo	Classe de resistência de glulam						
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Resistência à flexão	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Resistência à tração	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Resistência à compressão	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Resistência ao corte (corte e torção)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Resistência ao corte rolante	$f_{r,g,k}$	1,2						
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
	$E_{0,g,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
Módulo de distorção ao corte rolante	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Massa volúmica	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

Tabela 3.5 - Valores característicos da madeira lamelada colada combinada (adaptado da norma NP EN 14080:2019) [16].

Propriedade ^{a)}	Símbolo	Classe de resistência de glulam						
		GL 20c	GL 22c	GL 24c	GL 26c	GL 28c	GL 30c	GL 32c
Resistência à flexão	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Resistência à tração	$f_{t,0,g,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Resistência à compressão	$f_{c,0,g,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Resistência ao corte (corte e torção)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Resistência ao corte rolante	$f_{r,g,k}$	1,2						
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	10 400	10 400	11 000	12 000	12 500	13 000	13 500
	$E_{0,g,05}$	8 600	8 600	9 100	10 000	10 400	10 800	11 200
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
Módulo de distorção ao corte rolante	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Massa volúmica ^{b)}	$\rho_{g,k}$	355	355	365	385	390	390	400
	$\rho_{g,mean}$	390	390	400	420	420	430	440

Os modelos de verificação da estabilidade para os diferentes estados limites têm em consideração as propriedades dos materiais, tais como a *resistência* e a *rigidez*, bem como o comportamento diferido do tempo dos materiais, a duração das cargas e, também as condições de exposição climáticas, temperatura e humidade.

Para a análise estrutural devem ser utilizados parâmetros de rigidez médios, que no cálculo de deformações, devem ser corrigidos através de um coeficiente, “ k_{def} ” que tem em conta os efeitos da fluência e da classe de serviço, este parâmetro encontra-se no EC5. As classes de serviço distinguem-se quando a estrutura está exposta a ambientes interiores protegidos, *classe de serviço 1*, ou a ambientes interiores não protegidos, *classe de serviço 2* e ainda o caso de a estrutura estar exposta a ambientes exteriores com contacto frequente com água da chuva, *classe de serviço 3*.

Em ELU, a distribuição dos esforços é influenciada pela rigidez na estrutura, sendo os valores médios finais afetados também por um coeficiente “ ψ_2 ” que está presente no Eurocódigo 0: EN1990:2002 [58] e corresponde à ação que causa maior tensão em relação à resistência. Se a ação em causa for uma ação permanente, este coeficiente deve ser substituído por 1. A equação 3.1 permite determinar o valor de cálculo do módulo de elasticidade da madeira “ E_{wd} ”.

$$E_{wd} = \frac{E_{wm}}{1 + k_{def}} \quad (3.1)$$

O valor de cálculo da resistência à flexão é determinado pelo método dos coeficientes parciais através da equação 3.2:

$$f_{wbd} = k_{mod} * \frac{f_{wbk}}{\gamma_m} \quad (3.2)$$

Sendo que “ f_{wbk} ” é um valor característico da resistência à flexão, o “ γ_m ” é um coeficiente parcial de segurança, o EC5 recomenda o valor de 1.3 para madeiras maciças e de 1.25 para madeiras lameladas coladas. O “ k_{mod} ” é um fator de modificação que tem em conta a duração das cargas e o teor de água na madeira, isto é, a classe de serviço, está presente no EC5.

3.1.2. SISTEMAS DE FRP

Com base na informação dos documentos da unidade curricular “Reforço e Reabilitação de Estruturas e Fundações” disponibilizadas por Juvandes [53], e nas informações das fichas técnicas dos sistemas comerciais de FRP, identificaram-se os valores característicos das propriedades mecânicas dos sistemas de FRP e os critérios sugeridos para a determinação dos respetivos valores de cálculo.

Os compósitos de FRP funcionam à tração e apresentam uma relação tensão-extensão que obedece à Lei de Hooke, até à ruína. Este comportamento é idêntico quer em serviço (ELS) quer em ruína (ELU).

O valor de cálculo da força axial máxima “ F_{fd} ” de um FRP, em ELU, é determinado pela equação 3.3 seguinte:

$$F_{fd} = E_{fd} \times \varepsilon_{fd} \times A_f \quad (3.3)$$

onde:

E_{fd} - Valor de cálculo do módulo de elasticidade longitudinal do FRP.

ε_{fd} - Valor máximo da deformação do FRP dependendo do tipo de reforço (flexão, corte, confinamento).

A_f - Área da secção transversal do FRP.

O módulo de elasticidade de cálculo “ E_{fd} ” é determinado pela equação 3.4, isto é, corrigindo o módulo de elasticidade característico “ E_{fk} ” por um coeficiente parcial de segurança “ γ_m ” que varia em função do tipo de sistema de FRP, o pré-fabricado ou o curado *in-situ* (Tabela 3.6).

$$E_{fd} = \frac{E_{fk}}{\gamma_m} \quad (3.4)$$

Tabela 3.6- Coeficiente parcial de segurança para ELU de FRP.

Sistema FRP	Coeficiente parcial de segurança (γ_m)
Pré-fabricado (Laminado)	1.0
Curado <i>in-situ</i> (Manta uniaxial)	1.1-1.2
Curado <i>in-situ</i> (Tecido bidirecional)	1.4-1.6

Valor de cálculo máximo da deformação do FRP " ϵ_{fd} " resulta de limitar a extensão característica do compósito " ϵ_{fk} " aos valores limites da deformação do FRP " $\epsilon_{f\ lim}$ " para os possíveis modos de ruína obtidos experimentalmente com modelos reforçadas com FRP à flexão, ao corte e ao confinamento. Na Tabela 3.7 resumem-se os valores recomendados pela literatura. Como o FRP tem rigidez e resistência elevada comparada com as da madeira, a condição de controlo da deformação do FRP nunca será alcançada no reforço de vigas de madeira porque ocorrerá primeiro o esgotamento da deformação da madeira à tração.

Tabela 3.7- Valores para a extensão limite.

Tipo de reforço:	$\epsilon_{fd} \leq \epsilon_{f\ lim}$ (%)
À Flexão	0.6 - 0.8
Ao esforço transversal	0.2 - 0.3
Ao Confinamento	0.4 - 0.6

3.1.3. CRITÉRIOS A UTILIZAR

A análise de vigas de madeira reforçadas com FRP, sujeitas à flexão plana, baseia-se numa abordagem clássica de resistência dos materiais. Esta análise tem como base as seguintes hipóteses:

- A secção transversal é simétrica segundo o plano do momento fletor;
- Secções planas permanecem planas após deformação;
- Admite-se a perfeita aderência entre o compósito de FRP e a madeira;
- O compósito de FRP segue uma lei linear elástica até à ruína para trações e compressões (Lei de Hooke);
- A madeira segue também uma lei linear elástica até ao modo de ruína, mas como já foi referido anteriormente considerar-se-á que a tração condiciona as tensões e extensões e como tal nunca irá ocorrer plastificação na zona comprimida [56].

Como o estudo incide sobre vigas de secção retangular expõe-se, seguidamente, os critérios adotados para a análise do equilíbrio ao ELU da secção mais desfavorável à flexão plana. Nas Figuras 3.2 (a), (b) e (c) ilustram-se, respetivamente, a secção transversal genérica "BxH" reforçada com FRP pela técnica NSM, o diagrama da deformação " ϵ " e o diagrama da tensão normal " σ " com a representação das forças de equilíbrio resultantes nas partes tracionada e comprimida dos materiais.

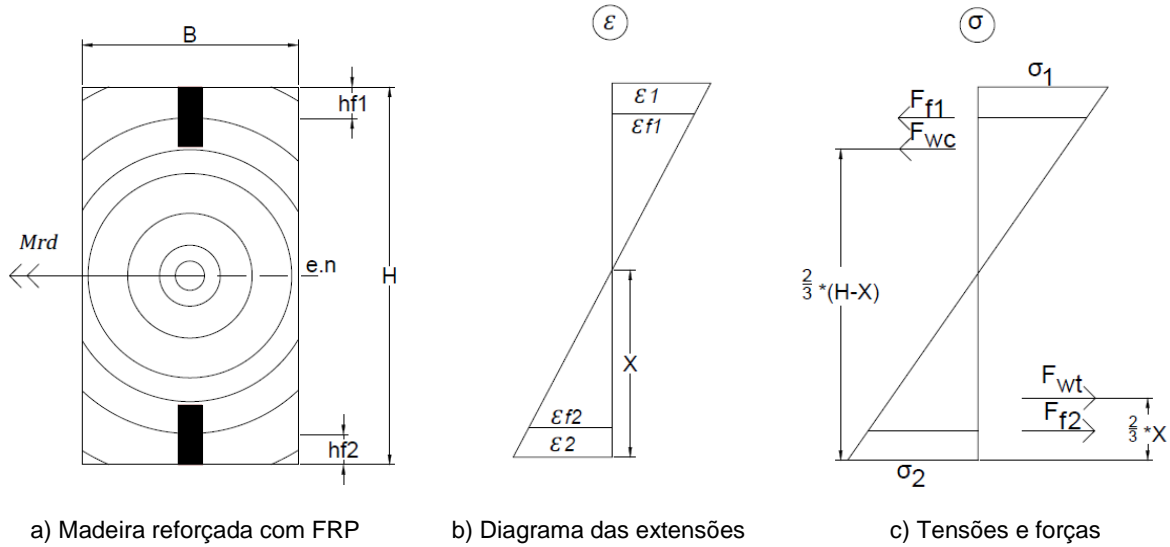


Figura 3.2- Critérios de análise da secção transversal genérica de madeira reforçada com FRP (inspirado em Schober et al., [56])

Como a análise baseia-se na compatibilidade de deformações e equilíbrio de forças nos materiais, resultam as expressões que se descrevem a seguir:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{wc} \leq \varepsilon_{wt} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{wt} \quad (3.6)$$

$$\sigma_1 = f_{wc} \quad (3.7)$$

$$\sigma_2 = f_{wt} \quad (3.8)$$

Para calcular a posição do eixo neutro (e.n.) realizou-se o equilíbrio das forças axiais pela expressão:

$$F_{f1} - F_{f2} + F_{wc} + F_{wt} = 0 \quad (3.9)$$

E através da lei de Hooke dos materiais, sabe-se que:

$$F_{f1} = E_f \times \varepsilon_{f1} \times A_{f1} \quad (3.10)$$

$$F_{f2} = E_f \times \varepsilon_{f2} \times A_{f2} \quad (3.11)$$

$$F_{wc} = \frac{E_w \times \varepsilon_1 \times (H - x)}{2} \times B \quad (3.12)$$

$$F_{wt} = \frac{E_w \times \varepsilon_2 \times x}{2} \times B \quad (3.13)$$

sendo:

- F_{f1} e F_{f2} - forças axiais de compressão e de tração do FRP, respetivamente
- A_{f1} e A_{f2} - área do FRP da zona comprimida e da zona tracionada, respetivamente
- ε_{f1} e ε_{f2} - extensões no FRP correspondes à compressão e tração, respetivamente
- F_{wc} e F_{wt} - forças axiais de compressão e de tração da madeira, respetivamente
- ε_1 e ε_2 - extensões na madeira correspondes à fibra superior (1) e fibra inferior (2), respetivamente
- E_w e E_f - módulos de elasticidade da madeira e do FRP, respetivamente
- H , B , h_{f1} , h_{f2} e x - são dimensões geométricas identificadas na legenda da Figura 3.2

A partir da Figura 3.2 é possível escrever todas as extensões em função do valor “ ϵ_1 ” pelas expressões seguintes:

$$\frac{\epsilon_{f1}}{h - x - h_{f1}} = \frac{\epsilon_1}{h - x} \quad (3.14)$$

$$\frac{\epsilon_{f2}}{x - h_{f2}} = \frac{\epsilon_1}{h - x} \quad (3.15)$$

$$\frac{\epsilon_2}{x} = \frac{\epsilon_1}{h - x} \quad (3.16)$$

A equação de equilíbrio 3.9 passa a assumir a nova forma seguinte:

$$E_f \times A_{f1} \times \frac{h - x - h_{f1}}{h - x} - E_f \times A_{f2} \times \frac{x - h_{f2}}{h - x} + \frac{1}{2} \times E_w \times b \times (h - x) - \frac{1}{2} \times E_w \times b \times \frac{x^2}{h - x} = 0 \quad (3.17)$$

Modificando a área ou o módulo de elasticidade do FRP irá consequentemente mudar a posição do eixo neutro, modificando as extensões do conjunto, madeira e FRP.

Sabendo a localização do eixo neutro, é agora possível determinar o momento resistente máximo da secção reforçada:

$$Mu = F_{f1} \times (h - x - h_{f1}) + F_{f2} \times (x - h_{f2}) + \frac{2}{3} \times F_{cw} \times (h - x) + \frac{2}{3} \times F_{tw} \times x \quad (3.18)$$

3.2. PROGRAMA DE ESTUDO

A análise de vigas de madeira reforçadas com FRP, sujeitos à flexão plana, baseia-se numa abordagem clássica de resistência dos materiais. Para tal, o programa de estudo foi definido para os pontos seguintes: objetivos e modelos de análise.

3.2.1. OBJETIVOS

O programa de estudo tem como principal objetivo ter uma ideia do desempenho máximo do comportamento de vigas de madeira correntes reforçadas com sistemas de FRP disponíveis no mercado da construção de modo a concluírem-se sugestões para projeto. Para tal, os principais pontos a avaliarem-se são os seguintes:

- Análise de dois tipos correntes de madeiras no mercado da reabilitação, a Madeira Maciça (MM) e a Madeira Lamelada Colada (MLC), com a forma de secção retangular usual;
- Análise do desempenho dos dois tipos de sistemas de CFRP (fibras de carbono) comerciais, o pré-fabricado (Laminados pultrudidos) e o curado *in-situ* (Mantas uniaxiais secas). A cada um fez-se associar uma técnica de reforço (modo de aplicação), aos primeiros a técnica NSM e aos segundos a técnica EBR;
- Análise da melhor geometria de instalação do reforço à flexão com FRP inspirado nas sugestões da literatura técnica e na viabilidade do mercado potencial da reabilitação do património edificado. Analisar as hipóteses de reforço simétrico nas duas faces do retângulo (compressão e tração) ou reforço somente numa das faces (tração);
- Análise do rendimento (%) do incremento de resistência da secção reforçada em relação à secção de referência só em madeira, que perante a variabilidade dos parâmetros em estudo, importa ser normalizada em termos de percentagem de reforço e percentagem de rigidez axial da técnica de reforço (NSM, EBR);

- Relativamente ao reforço de FRP, ter uma ideia da melhor técnica, da melhor geometria, do rendimento (%) máximo em ELU admitindo a perfeita aderência e da percentagem do reforço para se tentar atingir 50% de incremento de resistência à flexão face à secção de referência em madeira (não reforçada), uma recomendação técnica adequada para reforços colados com materiais compósitos de FRP.

3.2.2. MODELOS DE ESTUDO

Para se atingirem os objetivos indicados anteriormente, foi estabelecido um critério para identificar os vários modelos de vigas de madeira a estudar à flexão simples: tipo de madeiras; técnicas de reforço vs sistemas de FRP; tipo de geometria do FRP; percentagem de armadura de FRP.

Como nota informativa, a geometria de reforço das vigas foi inspirada nas sugestões da literatura técnica internacional sobre estudos de reforço da madeira com chapas metálicas e/ou material FRP [57], sendo algumas dessas sugestões ilustradas na Figura 3.3.

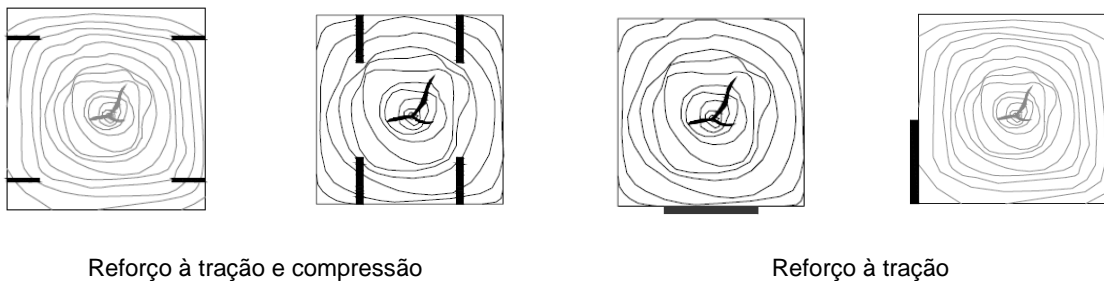


Figura 3.3– Exemplos de reforços à flexão [25],[57].

3.2.2.1. Materiais

(i) Madeira

Escolheram-se vigas de madeira maciça (MM) da classe de resistência D30, segundo a norma europeia EN 338-2016, com secção transversal de altura 21cm (H) e largura de 8cm (B).

Para as vigas de madeira lamelada colada (MLC) foram seleccionadas do tipo homogénea, da classe de resistência GL28h de acordo com a norma europeia EN 14080-2019. Segundo esta norma, faz-se equivaler a resistência da madeira lamelada colada GL28h à madeira de Pinho Nórdico da classe de resistência C30. A secção transversal tem de altura 18cm (H) e de largura 11.5cm (B), sendo as lamelas de altura 4.5cm. Na Tabela 3.8 resumem-se a geometria e as propriedades mais importantes das madeiras utilizadas no estudo, valores característicos e os de cálculo. Seguiu-se a lei de Hooke para calcular a extensão de flexão de cálculo “ ϵ_{wbd} ”, através do parâmetro de resistência à flexão de cálculo “ f_{wbd} ” calculado pela equação 3.2 e o módulo de elasticidade de cálculo “ E_{wd} ” através da equação 3.1.

$$\epsilon_{wbd} = \frac{f_{wbd} \text{ (kPa)}}{E_{wd} \text{ (kPa)}} \quad (3.19)$$

(ii) Sistemas de CFRP

Dentro da gama de sistemas de FRP disponíveis no mercado, para este trabalho seleccionou-se o sistema comercial S&P Clever Reinforcement Company AG. A Tabela 3.9 resume as principais informações (valores característicos e de cálculo) retiradas das fichas técnicas dos sistemas laminados e mantas unidireccionais. Na técnica de colagem NSM utilizou-se laminados de CFRP do tipo pré-fabricado de

designação comercial *S&P Laminates CFK* (laminados de carbono). Para a técnica de colagem EBR utilizou-se o sistema do tipo curado *in situ* (fibras secas), de designação comercial *S&P C-Sheet 240* (mantas unidirecionais de carbono).

Tabela 3.8 - Propriedades das Madeiras utilizadas segundo as respetivas normas.

Propriedades		MM	MLC
		D30	GI28h
<i>GEOMETRIA</i>			
Secção H x B (cm ²)	A_w	21 x 8	18 x 11.5
<i>VALORES CARACTERÍSTICOS</i>			
<i>Propriedades de resistência (MPa):</i>			
Resistência à Flexão	f_{wbk}	30	28
Resistência à Tração Paralela ao fio	f_{wtk}	18	22.3
Resistência à Compressão Paralela ao fio	f_{wck}	24	28
<i>Propriedades de rigidez (GPa):</i>			
Módulo de elasticidade paralela ao fio (valor médio)	E_{wm}	11	12.6
<i>VALORES DE CÁLCULO</i>			
<i>Parâmetros que dependem da classe:</i>			
Coefficiente parcial de segurança	γ_M	1.3	1.25
fator de modificação da resistência	K_{mod}	0.8	0.8
Parâmetro de combinação	Ψ_2	0	0
Coefficiente de correção	k_{def}	0.3	0.6
Resistência à Flexão de cálculo (MPa)	f_{wbd}	18.46	17.92
Módulo de elasticidade médio de cálculo (GPa)	E_{wd}	11	12.6
Extensão de flexão (%)	ϵ_{wbd}	0.1678	0.1422

Tabela 3.9 - Geometria e propriedades dos sistemas CFRP.

Propriedades	Sistema pré-fabricado		Sistema curado <i>in-situ</i>
	Laminados		Mantas unidirecionais
	S&P Laminates CFK (Ref: 150/2000)		S&P C-Sheet 240 (Ref: g/m ² a definir)
	NSM	EBR	
<i>GEOMETRIA E VALORES CARACTERÍSTICOS</i>			
Largura (mm)	b	10	b variável ⁽¹⁾
Espessura (mm)	t	1.4	t equivalente ⁽¹⁾
Módulo de Elasticidade Característico (GPa)	E_{fk}	150	240
Extensão última	ϵ_{fk}	1.33%	1.55%
<i>VALORES DE CÁLCULO</i>			
Coefficiente parcial de segurança	γ_m	1.0	1.2
Módulo de Elasticidade Cálculo (GPa)	E_{fd}	150	200
Extensão limite do FRP em flexão (%) ⁽²⁾	ϵ_{fd}	0.75	0.75

⁽¹⁾ geometria a ajustar para os modelos EBR de forma a terem rigidez axial semelhante aos modelos NSM (tabelas 3.11 e 3.12).

⁽²⁾ segundo recomendação do sistema S&P Laminates CFK.

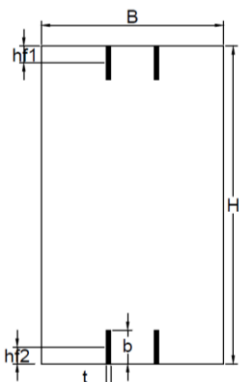
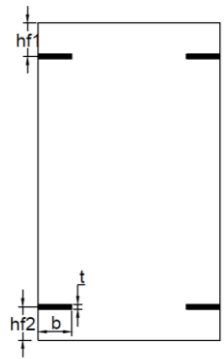
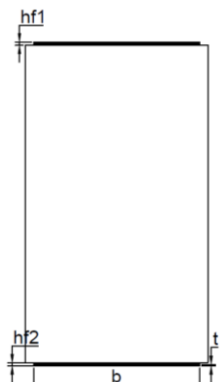
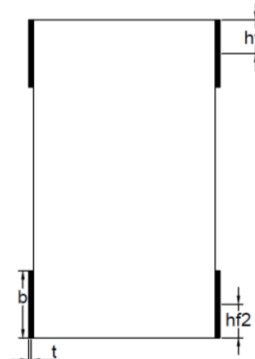
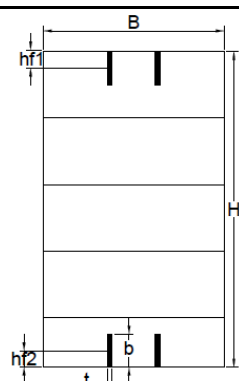
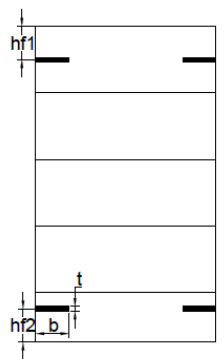
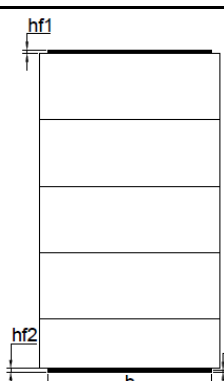
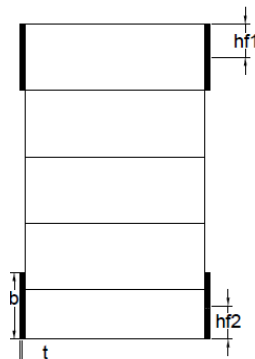
3.2.2.2. Técnica e Geometria de Reforço

Na Tabela 3.10 expõem-se os esquemas dos modelos reforçados com FRP definidos no estudo segundo:

- dois grupos de madeiras, MM e MLC;
- duas técnicas de reforço NSM e EBR, coincidentes com os dois tipos de sistemas de FRP;
- para cada técnica, as duas formas de geometria de reforço, a vertical (V) e a horizontal (H).

Por sua vez, na geometria do reforço decidiu-se estudar duas configurações: (i) o caso do reforço nas fibras à tração (T) e à compressão (C), com designação de geometria (C+T); (ii) o caso do reforço só nas fibras à tração (T), com designação de geometria (T). Ao reforçar a zona tracionada, aumenta-se a capacidade resistente do elemento nessa zona, o que resulta numa maior transferência de tensões para a zona comprimida. Quando a zona comprimida excede a sua capacidade máxima, ocorre a rotura por compressão da madeira. Esta rotura é, como se sabe, uma rotura dúctil que proporciona uma maior segurança no Estado Limite Último, para a estrutura reforçada, em comparação com uma estrutura simples de madeira [18]. Por comodidade e otimização da informação, na Tabela 3.10 não estão representados os esquemas do reforço com geometria (T) porque apresentam a mesma configuração de metade da geometria (C+T).

Tabela 3.10 - Esquemas dos modelos segundo a técnica e a geometria do reforço para as madeiras MM e MLC.

Grupo	Técnica e geometria do reforço			
	NSM		EBR	
	V	H	H	V
MM				
MLC				

A área da secção transversal do FRP, para ambas as técnicas de reforço, é caracterizada pela sua espessura (t), largura (b) e o número de camadas (n) que varia de caso em caso (Figura 3.4). Como o

sistema é formado por mantas unidireccionais e moldado *in-situ* (caso técnica EBR), a sua geometria é escolhida em projeto e ajustada na execução em obra, ao contrário do sistema com laminados pultrudidos de geometria fixa pela ficha do fornecedor. Por esse motivo, procurou-se realizar uma equivalência de áreas baseada na mesma rigidez axial entre os modelos NSM e EBR, para ser possível fazer uma comparação de resistências dos modelos, isto é, igualdade $(A_f \times E_f)^{NSM} = (A_f \times E_f)^{EBR}$.

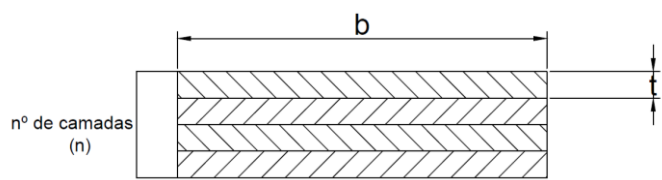


Figura 3.4 - Geometria do compósito FRP

Nas Tabelas 3.11 (A) e (B) reúnem-se os dados dos 34 modelos usados para estudar o grupo de vigas de madeira maciça (MM) segundo as duas técnicas NSM e EBR, a orientação vertical (V) e horizontal (H) e reforço de geometria (C+T) e de geometria (T). As Tabelas 3.12 (A) e (B) apresentam os dados dos 34 modelos usados nas mesmas condições o estudo para o grupo de vigas de madeira lamelada colada (MLC). As cotas do centro de gravidade do FRP (h_{f1} e h_{f2}) estão ilustradas nas figuras da Tabela 3.11. De salientar que, para a técnica EBR- H com geometria (T), nos dois grupos de madeira analisados, procurou-se acrescentar um caso extra (designado por “EXT”) com a percentagem de armadura do FRP que conduz ao acréscimo de rendimento de resistência de cerca de 50%, valor limite para reforços com técnicas de colagem. Este tema será retomado mais adiante na análise de resultados.

Tabela 3.12 (A) - Modelos do grupo MM: geometria e cotas “ h_f ” do FRP.

Técnica	Modelo Referência	Reforço Superior				Reforço Inferior				A_f/A_w (%)	$(EA)_f/(EA)_w$ (%)
		Secção (mm)			Cota (mm)	Secção (mm)			Cota (mm)		
		b	t	n	h_{f1}	b	t	n	h_{f2}		
	MM_Ref	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00
NSM-V	MM_NSM-V_C+T_1	10	1.4	1	5	10	1.4	1	5	0.17	2.27
	MM_NSM-V_C+T_2	10	1.4	2	5	10	1.4	2	5	0.33	4.55
	MM_NSM-V_C+T_3	10	1.4	4	5	10	1.4	4	5	0.67	9.09
	MM_NSM-V_C+T_4	10	1.4	6	5	10	1.4	6	5	1.00	13.64
	MM_NSM-V_T_1	0	0	0	0	10	1.4	2	5	0.17	2.27
	MM_NSM-V_T_2	0	0	0	0	10	1.4	4	5	0.33	4.55
	MM_NSM-V_T_3	0	0	0	0	10	1.4	8	5	0.37	9.09
	MM_NSM-V_T_4	0	0	0	0	10	1.4	12	5	1.00	13.64
NSM-H	MM_NSM-H_C+T_1	10	1.4	1	20	10	1.4	1	20	0.17	2.27
	MM_NSM-H_C+T_2	10	1.4	2	20	10	1.4	2	20	0.33	4.55
	MM_NSM-H_C+T_3	10	1.4	4	20	10	1.4	4	20	0.67	9.09
	MM_NSM-H_C+T_4	10	1.4	6	20	10	1.4	6	20	1.00	13.64
	MM_NSM-H_T_1	0	0	0	0	10	1.4	2	20	0.17	2.27
	MM_NSM-H_T_2	0	0	0	0	10	1.4	4	20	0.33	4.55
	MM_NSM-H_T_3	0	0	0	0	10	1.4	8	20	0.37	9.09
	MM_NSM-H_T_4	0	0	0	0	10	1.4	12	20	1.00	13.64

Tabela 3.11 (B) - Modelos do grupo MM: geometria e cotas "h_f" do FRP.

Técnica	Modelo Referência	Reforço Superior				Reforço Inferior				A _f /A _w (%)	(EA) _f /(EA) _w (%)
		Secção (mm)		Cota (mm)		Secção (mm)		Cota (mm)			
		b	t	n	h _{f1}	b	t	n	h _{f2}		
EBR-H	MM_EBR-V_C+T_1	75	0.14	1	0	7.5	0.14	1	0	0.13	2.27
	MM_EBR-H_C+T_2	75	0.14	2	0	75	0.14	2	0	0.25	4.55
	MM_EBR-H_C+T_3	75	0.28	2	0	75	0.28	2	0	0.50	9.09
	MM_EBR-H_C+T_4	75	0.28	3	0	75	0.28	3	0	0.75	13.64
	MM_EBR-H_T_1	0	0	0	0	75	0.14	2	0	0.13	2.27
	MM_EBR-H_T_2	0	0	0	0	75	0.14	4	0	0.25	4.55
	MM_EBR-H_T_3	0	0	0	0	75	0.28	4	0	0.50	9.09
	MM_EBR-H_T_4	0	0	0	0	75	0.28	6	0	0.75	13.64
MM_EBR-H_T_EXT	0	0	0	0	75	0.28	16	0	2.00	40.91	
EBR-V	MM_EBR-V_C+T_1	45	0.117	2	22.5	45	0.117	2	22.5	0.13	2.27
	MM_EBR-V_C+T_2	45	0.117	4	22.5	45	0.117	4	22.5	0.25	4.55
	MM_EBR-V_C+T_3	45	0.233	4	22.5	45	0.233	4	22.5	0.50	9.09
	MM_EBR-V_C+T_4	45	0.233	6	22.5	45	0.233	6	22.5	0.75	13.64
	MM_EBR-V_T_1	0	0	0	0	45	0.117	4	22.5	0.13	2.27
	MM_EBR-V_T_2	0	0	0	0	45	0.117	8	22.5	0.25	4.55
	MM_EBR-V_T_3	0	0	0	0	45	0.233	8	22.5	0.50	9.09
	MM_EBR-V_T_4	0	0	0	0	45	0.233	12	22.5	0.75	13.64

Tabela 3.13 (A) - Modelos do grupo MLC: geometria e cotas "h_f" do FRP.

Técnica	Modelo Referência	Reforço Superior				Reforço Inferior				A _f /A _w (%)	(EA) _f /(EA) _w (%)
		Secção (mm)		Cota (mm)		Secção (mm)		Cota (mm)			
		b	t	n	h _{f1}	b	t	n	h _{f2}		
	MLC_Ref	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00
NSM-V	MLC_NSM-V_C+T_1	10	1.4	1	5	10	1.4	1	5	0.14	1.61
	MLC_NSM-V_C+T_2	10	1.4	2	5	10	1.4	2	5	0.27	3.22
	MLC_NSM-V_C+T_3	10	1.4	4	5	10	1.4	4	5	0.54	6.44
	MLC_NSM-V_C+T_4	10	1.4	6	5	10	1.4	6	5	0.81	9.66
	MLC_NSM-V_T_1	0	0	0	0	10	1.4	2	5	0.14	1.61
	MLC_NSM-V_T_2	0	0	0	0	10	1.4	4	5	0.27	3.22
	MLC_NSM-V_T_3	0	0	0	0	10	1.4	8	5	0.54	6.44
	MLC_NSM-V_T_4	0	0	0	0	10	1.4	12	5	0.81	9.66

Tabela 3.12 (B) - Modelos do grupo MLC: geometria e cotas "h_r" do FRP.

Técnica	Modelo Referência	Reforço Superior				Reforço Inferior				A _i /A _w (%)	(EA) _i /(EA) _w (%)
		Secção (mm)		Cota (mm)		Secção (mm)		Cota (mm)			
		b	t	n	h _{r1}	b	t	n	h _{r2}		
NSM-H	MLC_NSM-H_C+T_1	10	1.4	1	20	10	1.4	1	20	0.14	1.61
	MLC_NSM-H_C+T_2	10	1.4	2	20	10	1.4	2	20	0.27	3.22
	MLC_NSM-H_C+T_3	10	1.4	4	20	10	1.4	4	20	0.54	6.44
	MLC_NSM-H_C+T_4	10	1.4	6	20	10	1.4	6	20	0.81	9.66
	MLC_NSM-H_T_1	0	0	0	0	10	1.4	2	20	0.14	1.61
	MLC_NSM-H_T_2	0	0	0	0	10	1.4	4	20	0.27	3.22
	MLC_NSM-H_T_3	0	0	0	0	10	1.4	8	20	0.54	6.44
	MLC_NSM-H_T_4	0	0	0	0	10	1.4	12	20	0.81	9.66
EBR-H	MLC_EBR-H_C+T_1	75	0.14	1	0	75	0.14	1	0	0.10	1.61
	MLC_EBR-H_C+T_2	75	0.14	2	0	75	0.14	2	0	0.20	3.22
	MLC_EBR-H_C+T_3	75	0.28	2	0	75	0.28	2	0	0.41	6.44
	MLC_EBR-H_C+T_4	75	0.28	3	0	75	0.28	3	0	0.61	9.66
	MLC_EBR-H_T_1	0	0	0	0	75	0.14	2	0	0.10	1.61
	MLC_EBR-H_T_2	0	0	0	0	75	0.14	4	0	0.20	3.22
	MLC_EBR-H_T_3	0	0	0	0	75	0.28	4	0	0.41	6.44
	MLC_EBR-H_T_4	0	0	0	0	75	0.28	6	0	0.61	9.66
	MLC_EBR-H_T_EXT	0	0	0	0	75	0.28	26	0	2.64	41.87
EBR-V	MLC_EBR-V_C+T_1	45	0.117	2	22.5	45	0.117	2	22.5	0.10	1.61
	MLC_EBR-V_C+T_2	45	0.117	4	22.5	45	0.117	4	22.5	0.20	3.22
	MLC_EBR-V_C+T_3	45	0.233	4	22.5	45	0.233	4	22.5	0.41	6.44
	MLC_EBR-V_C+T_4	45	0.233	6	22.5	45	0.233	6	22.5	0.61	9.66
	MLC_EBR-V_T_1	0	0	0	0	45	0.117	4	22.5	0.10	1.61
	MLC_EBR-V_T_2	0	0	0	0	45	0.117	8	22.5	0.20	3.22
	MLC_EBR-V_T_3	0	0	0	0	45	0.233	8	22.5	0.41	6.44
	MLC_EBR-V_T_4	0	0	0	0	45	0.233	12	22.5	0.61	9.66

3.3. CÁLCULOS E RESULTADOS

Como se referiu no item 3.2.1, sobre os objetivos do programa de estudo, foram definidos modelos de estudo para os quais se pretende determinar o valor de cálculo do momento resistente da secção transversal, em ELU. Para tal, foi desenvolvido uma folha de cálculo base para processar a avaliação do momento resistente dos 68 modelos e seguidamente resumidos os resultados para posterior análise dos mesmos face aos objetivos do estudo.

3.3.1. FOLHA DE CÁLCULO

Foi desenvolvida uma folha de cálculo, em modo Excel porque operacional, no qual para cada modelo com características específicas de geometria e propriedades da madeira, com uma técnica e geometria do reforço FRP e para diferentes percentagens de área de FRP é possível calcular a posição do eixo

neutro, as respectivas extensões e forças de compressão e tração na madeira e no reforço e, conseqüentemente, o momento máximo resistente. A folha foi desenvolvida em três módulos a descrever de seguida.

(i) Módulo de dados

Neste módulo introduzem-se todos os parâmetros geométricos, as propriedades mecânicas dos materiais e os esquemas representativos da seção transversal da viga de madeira, no modo sem reforço e nas várias hipóteses de geometria de reforço (tipo V e tipo H) para cada técnica (NSM e EBR). Um exemplo da imagem deste módulo de dados é ilustrado na parte superior da Figura A1.1 incluída no Anexo 1.

(ii) Módulo de cálculo

No módulo de cálculo base expõem-se as equações de determinação da posição do eixo neutro, das extensões e das forças que resultam na madeira e no reforço (zona comprimida e zona tracionada) e, conseqüentemente, de determinação do momento máximo resistente. Um exemplo da imagem deste módulo de cálculo é ilustrado na parte inferior da mesma Figura A1.1 incluída no Anexo 1.

O cálculo dos 68 modelos é realizado em 4 folhas distintas, por séries de tipo de reforço (NSM-V, NSM-H, EBR-H, EBR-V). Um exemplo da imagem desse módulo de cálculo é o caso da série MLC, com reforço NSM-V, cujos seus 4 casos de geometria (C+T) e 4 casos de geometria (T) são representados nas Figura A1.2 e Figura A1.3, respetivamente, incluídas no Anexo 1.

(iii) Módulo de resultados

A partir do módulo de cálculo (4 folhas descritas antes, quer para o grupo MM quer para o grupo MLC), construiu-se o módulo de resultados de todos os 34 modelos por cada grupo de madeira. Esses resultados são resumidos em Tabelas de Resultados e em Diagramas de Resultados. Um exemplo das imagens desse módulo de resultados e incluídas no Anexo 1 são: a Figura A1.4 com a comparação (C+T) e (T) de toda a série MLC, incluído o caso mais próximo dos 50% de incremento de resistência; a Figura A1.5 com a ordenação crescente a toda a série MLC; a Figura A1.6 com identificação das áreas limites de incremento de resistência (melhor e pior) para os grupos MM e MLC.

3.3.2. RESULTADOS

Este item tem como principal objetivo expor os resultados de 68 modelos, estruturado de modo a serem mais fáceis de interpretar e comparar no próximo item de Análise de Resultados. Para tal as tabelas de resultados foram criadas tendo em atenção os aspetos seguintes:

- comparar modelos reforçados com FRP com o modelo de referência em madeira sem reforço;
- avaliar a importância da percentagem de reforço utilizada, através da divisão de áreas de FRP com a área da madeira, A_f/A_w ;
- introduzir a percentagem de rigidez axial, normalizada por $(EA)_f/(EA)_w$ porque foram usados dois sistemas de FRP com áreas diferentes, mas rigidez axial semelhante;
- ter o valor do momento máximo resistente da secção reforçada ($M_{rd,r}$) e normaliza-lo com o momento resistente suportado só pela madeira, $M_{rd,r}/M_{rdw}$.

Dada a extensão de informação com os dados e resultados deste estudo pela sua importância destes no contexto deste trabalho, reúne-se no Anexo 2, na Tabela A2.1 e Tabela A2.2 a informação completa dos dados e dos resultados dos modelos referentes ao grupo MM e ao grupo MLC, respetivamente.

Como o comportamento dos modelos de cada grupo de madeira apresentam uma certa regularidade, para proporcionar a análise dos resultados no próximo item, decidiu-se apresentar as informações respeitantes aos casos com maior incremento de momento resistente, como são a série de reforço das

técnicas NSM-V (sistema laminado) e EBR-H (sistema manta unidirecional), para os dois grupos de madeira MM e MLC.

Na Tabela 3.13 reúne-se os resultados do momento resistente, da deformação máxima obtida na madeira e no FRP, da percentagem de reforço utilizada, da percentagem de rigidez axial normalizada e da razão entre o momento resistente reforçado e o momento resistente da madeira da técnica NSM-V, do grupo das madeiras maciças (MM). A Tabela 3.14 resume os resultados semelhantes para a técnica EBR-H do mesmo grupo MM.

Tabela 3.14 - Valores dos resultados para o grupo MM e técnica NSM-V (Laminado)

NSM-V	$M_{rd,r}$ [kN.m]	ε_w^{max} (%)	ε_f^{max} (%)	A_i/A_w (%)	$(EA)_i/(EA)_w$ (%)	$M_{rd,r}/M_{rd,w}$
MM_Ref	10.855	0.1678	-	0.00	0.00	1.00
MM_NSM-V_C+T_1	11.527			0.17	2.27	1.062
MM_NSM-V_C+T_2	12.198		0.1598	0.33	4.55	1.124
MM_NSM-V_C+T_3	13.541			0.67	9.09	1.247
MM_NSM-V_C+T_4	14.883			1.00	13.64	1.371
MM_NSM-V_T_1	11.251	0.1678	0.1524	0.17	2.27	1.036
MM_NSM-V_T_2	11.614		0.1456	0.33	4.55	1.070
MM_NSM-V_T_3	12.258		0.1333	0.37	9.09	1.129
MM_NSM-V_T_4	12.812		0.1236	1.00	13.64	1.180

Tabela 3.15 - Valores dos resultados para o grupo MM e técnica EBR-H (Mantas).

EBR-H	$M_{rd,r}$ [kN.m]	ε_w^{max} (%)	ε_f^{max} (%)	A_i/A_w (%)	$(EA)_i/(EA)_w$ (%)	$M_{rd,r}/M_{rd,w}$
MM_Ref	10.855	0.1678	-	0.00	0.00	1.000
MM_EBR-V_C+T_1	11.596			0.13	2.27	1.068
MM_EBR-H_C+T_2	12.336		0.1678	0.25	4.55	1.136
MM_EBR-H_C+T_3	13.816			0.50	9.09	1.273
MM_EBR-H_C+T_4	15.296			0.75	13.64	1.409
MM_EBR-H_T_1	11.304	0.1678	0.1598	0.13	2.27	1.041
MM_EBR-H_T_2	11.714		0.1526	0.25	4.55	1.079
MM_EBR-H_T_3	12.440		0.1399	0.50	9.09	1.146
MM_EBR-H_T_4	13.063		0.1059	0.75	13.64	1.203
MM_EBR-H_T_EXT	15.740	0.1678	0.0923	2.00	40.91	1.450

A Tabela 3.15 e a Tabela 3.16 sintetizam os resultados idênticos para a técnica NSM-V e técnica EBR-H, respetivamente, do grupo de madeiras lameladas coladas (MLC).

Tabela 3.16 - Valores dos resultados para o grupo MLC e técnica NSM-V (Laminado).

NSM-V	$M_{rd,r}$ [kN.m]	ε_w^{max} (%)	ε_f^{max} (%)	A_f/A_w (%)	$(EA)_f/(EA)_w$ (%)	$M_{rd,r}/M_{rd,w}$
MLC_Ref	11.128	0.1422	-	0.00	0.00	1.00
MLC_NSM-V_C+T_1	11.608	0.1422	0.1343	0.14	1.61	1.043
MLC_NSM-V_C+T_2	12.087			0.27	3.22	1.086
MLC_NSM-V_C+T_3	13.046			0.54	6.44	1.172
MLC_NSM-V_C+T_4	14.005			0.81	9.66	1.259
MLC_NSM-V_T_1	11.429		0.1302	0.14	1.61	1.027
MLC_NSM-V_T_2	11.712		0.1264	0.27	3.22	1.052
MLC_NSM-V_T_3	12.231		0.1194	0.54	6.44	1.099
MLC_NSM-V_T_4	12.696		0.1131	0.81	9.66	1.141

Tabela 3.17 - Valores dos resultados para o grupo MLC e técnica EBR-H (Mantas).

EBR-H	$M_{rd,r}$ [kN.m]	ε_w^{max} (%)	ε_f^{max} (%)	A_f/A_w (%)	$(EA)_f/(EA)_w$ (%)	$M_{rd,r}/M_{rd,w}$
MLC_Ref	11.128	0.1422	-	0.00	0.00	1.00
MLC_EBR-H_C+T_1	11.666	0.1442	0.1422	0.10	1.61	1.048
MLC_EBR-H_C+T_2	12.204			0.20	3.22	1.097
MLC_EBR-H_C+T_3	13.279			0.41	6.44	1.193
MLC_EBR-H_C+T_4	14.354			0.61	9.66	1.290
MLC_EBR-H_T_1	11.476		0.1378	0.10	1.61	1.031
MLC_EBR-H_T_2	11.802		0.1336	0.20	3.22	1.061
MLC_EBR-H_T_3	12.398		0.1260	0.41	6.44	1.114
MLC_EBR-H_T_4	12.930		0.1192	0.61	9.66	1.162
MLC_EBR-H_I_EXT	16.200	0.1442	0.0774	2.64	41.87	1.456

3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A discussão dos resultados deste estudo pressupõe os critérios de cálculo admitidos e focado nas metas estabelecidas para este trabalho. Como estão em causa duas técnicas de reforço associadas a dois sistemas de FRP cuja operacionalidade de execução é diferente e com propriedades mecânicas diferentes, a análise teve em atenção comparar modelos com base na normalização de parâmetros referidos no item 3.3.2, como a percentagem de reforço “ A_f/A_w ” e a percentagem de rigidez axial “ $(EA)_f/(EA)_w$ ”.

Dada a extensão de dados/resultados do trabalho, optou-se por colocar em Anexo 2 o tratamento de todos os resultados sob a forma de figuras de comparação do desempenho dos modelos incluídos nos grupos de madeira MM e MLC. Desses, optou-se por analisar neste item os gráficos com a comparação

dos modelos mais relevantes desses grupos (técnicas NSM-V e EBR-H) porque os restantes seguem linhas de comportamento semelhantes, mas com menor rácio de incremento de resistência da secção transversal da viga sujeita à flexão. Desse modo, no Anexo 2 incluem-se as figuras com a ilustração da variação do incremento de resistência à flexão face à geometria tipo “C+T” e “T” e à percentagem de reforço para os grupos MM e MLC (Figura A.2.1 e Figura A.2.2, respetivamente).

A análise será exposta inicialmente na perspetiva de uma *visão global* dos resultados (baseada nas tabelas do item 3.3.2) e seguida de uma *análise baseada em gráficos* de comparação do desempenho dos modelos em função dos parâmetros em análise.

(i) *Visão global*

O modo de ruína condicionante no comportamento ao ELU, como se interpreta das Tabela 3.17 e Tabela 3.18 com os resumos dos valores máximos das extensões nos 68 modelos (grupo MM e grupo MLC respetivamente), foi sempre limitado pelo valor de cálculo da extensão máxima à flexão da madeira “ ϵ_{wbd} ” (fibra tracionada no caso “C+T” e fibra tracionada no caso “T”). Refira-se, como observação, que uma rotura por compressão da madeira é dúctil, ao contrário da rotura por tração que é frágil. Em contrapartida, os valores máximos das extensões nas armaduras de FRP, independentemente do tipo de sistemas, da técnica e da geometria do reforço, nunca atingiram o valor de cálculo recomendado “ ϵ_{fd} ” à flexão pela ficha do sistema comercial. O aproveitamento do FRP “ $\epsilon_f^{max}/\epsilon_{fd}$ ” ficou entre 20% a 22% e entre 17% a 19% nos modelos do grupo MM e MLC, respetivamente. Recordase que os valores máximos recomendados para os materiais são: grupo MM $\epsilon_w^{max} \leq \epsilon_{wbd} = 0,1678\%$; grupo MLC $\epsilon_w^{max} \leq \epsilon_{wbd} = 0,1422\%$ e FRP $\epsilon_f^{max} \leq \epsilon_{fd} = 0,75\%$. Por outro lado, a menos de defeitos pontuais da madeira ou deficiente execução do reforço, porque os valores máximos das extensões do FRP são inferiores aos valores observados pelos estudos de Barbosa [18] e Cruz [64] nos ensaios de flexão, ϵ_f^{max} entre 0.28% a 0.32% (ver capítulo 2), é viável ter-se admitido perfeita aderência entres os materiais nos critérios de cálculo porque não ocorrem ruínas do FRP identificadas por [18] e [64].

Tabela 3.18- Resultados das extensões máximas nos materiais do grupo MM.

Geometria	ϵ_w^{max}		ϵ_f^{max}		$\epsilon_f^{max}/\epsilon_{fd}$ (%)
	Modelo	ϵ_1 (%)	Modelo	ϵ_{f2} (%)	
C+T	Todos	0.1678	NSM-V (Todos)	0.1598	21.3
			EBR-H (Todos)	0.1678	22.4
T	Todos	0.1678	NSM-V (1)	0.1524	20.3
			EBR-H (1)	0.1598	21.3

Tabela 3.19- Resultados das extensões máximas nos materiais do grupo MLC.

Geometria	ϵ_w^{max}		ϵ_f^{max}		$\epsilon_f^{max}/\epsilon_{fd}$ (%)
	Modelo	ϵ_1 (%)	Modelo	ϵ_{f2} (%)	
C+T	Todos	0.1422	NSM-V (Todos)	0.1343	17.9
			EBR-H (Todos)	0.1422	19.0
T	Todos	0.1422	NSM-V (1)	0.1302	17.4
			EBR-H (1)	0.1378	18.4

Realça-se que, apesar das propriedades mecânicas da madeira MM serem superiores à da madeira MLC, o momento resistente de referência do grupo MLC, com 11,128kN.m, é superior ao do grupo MM, com 10,855kN.m (ver Tabelas 3.13 e 3.15), porque as propriedades geométricas dos dois grupos serem diferentes. Este facto vai interferir nos valores da razão $M_{rd,r}/M_{rd,w}$ entre os dois grupos de madeira MM e MLC, menos favorável para os segundo.

A partir da análise da Tabela 3.10, sobre a geometria do FRP, e dos resultados expostos nas Tabelas 3.13 a 3.16, podem extraírem-se algumas conclusões/observações resumidas na Tabela 3.19 a respeito dos valores da percentagem de reforço e da percentagem “ A_f/A_w ” de incremento de resistência “ $\Delta M_{rd,r}/M_{rd,w}$ ” para as duas técnicas que apresentam o melhor desempenho nos dois grupos de madeira.

Tabela 3.20 - Resumo dos melhores resultados em função dos modelos estudados e exequibilidade do reforço.

Madeira	Geometria (caso 4)	Técnica	A_f/A_w (%)	$\Delta M_{rd,r}/M_{rd,w}$ (%)	Exequibilidade do reforço FRP	
					n ⁽¹⁾	Observações
MM	C + T	EBR-H	0.75	41	3	Viável
		NSM-V	1.00	37	6	Difícil realizar
	T	EBR-H	0.75	20	6	
		NSM-V	1.00	18	12	Não recomendado
		EBR-H_Extra ⁽²⁾	2.25	45	18	
MLC	C + T	EBR-H	0.61	29	3	Viável
		NSM-V	0.81	26	6	Difícil realizar
	T	EBR-H	0.61	16	6	
		NSM-V	0.81	14	12	Não recomendado
		EBR-H_Extra ⁽²⁾	2.64	46	26	

⁽¹⁾ Número de camadas da seção transversal do FRP (ver item 3.2.2.2).

⁽²⁾ Modelo com acréscimo de rendimento de resistência de cerca de 50% (ver item 3.2.2.2).

O caso com melhor incremento de resistência (41%) é a técnica EBR-H, com reforço “C+T” do grupo de madeira MM, mobilizado apenas 0.75% de percentagem de reforço (A_f/A_w) e viável ser concretizado com 3 camadas de mantas unidireccionais. Embora igualmente viável para o grupo de madeira MLC, esta técnica apenas obtém um incremento de resistência de cerca 29%, mobilizando 0.61% de percentagem de reforço (A_f/A_w) através da aplicação de 3 camadas de mantas. Segue-se, com incremento de resistência (37%), a técnica NSM-V, com reforço “C+T” do grupo de madeira MM, mobilizando 1.00% de percentagem de reforço, mas difícil de executar porque obriga a ter 6 camadas de laminado por ranhura da secção da madeira.

Segundo as recomendações dos atuais documentos de referência na área do reforço com sistemas de FRP ([57] e [51]), são recomendadas colagens de FRP até 5 camadas, sendo difícil de concretizar até 10 camadas com mantas unidireccionais (obriga a controlo de qualidade apertado em obra) e não são recomendadas acima deste número para reforço com FRP (rigidez que promove o destacamento prematuro do compósito). Deste modo, os resultados obtidos para os restantes casos da Tabela 3.19 são difíceis de executar (com 6 camadas) e não recomendadas (com mais de 10 camadas).

Sublinha-se que, dos resultados com a geometria de reforço “T”, aplicar o FRP na zona tracionada, só se obtém cerca metade do incremento de resistência da geometria “C+T”, a sua exequibilidade é difícil na técnica EBR-H e não recomendada na técnica NSM-V.

A tentativa de simular a hipótese de reforço para um incremento de resistência de cerca 50% da secção não reforçada nestas duas técnicas melhores, segundo recomendação de Juvandes [51] como o máximo para o reforço de estruturas de betão, conclui-se ser não recomendada face à elevada percentagem de reforço e elevado número de camadas de FRP a mobilizar.

(ii) Análise por grupos de madeira para as melhores técnicas de reforço (Figura 3.5)

A Figura 3.5 expõe a variação dos incrementos de resistência ($M_{rd,r}/M_{rd,w}$) em função da geometria (“C+T” e “T”) e percentagem do reforço (A_F/A_w) das séries NSM-V e EBR-H para os dois grupos de madeira (MM e MLC). No caso das séries EBR-V, com geometria “T”, as curvas representadas na Figura 3.5 são uma função polinomial porque a variação da posição do eixo neutro não é linear.

De uma forma geral, conclui-se que o incremento de resistência é maior quando se reforça à compressão e à tração, “C+T”, do que quando se opta somente por reforçar a zona tracionada, “T”, para iguais percentagens de reforço (A_F/A_w) e para ambas as madeiras, maciça e lamelada colada. Dessa forma tira-se mais aproveitamento do comportamento da madeira à tração e à compressão. Contudo, na geometria “C+T” é difícil mobilizar o comportamento do FRP à compressão por não ter rigidez suficiente como armadura, sobretudo na colagem via EBR-H (com mantas), embora possa ser viável na técnica NSM-V por ser com laminados e estes estarem selados na secção da madeira.

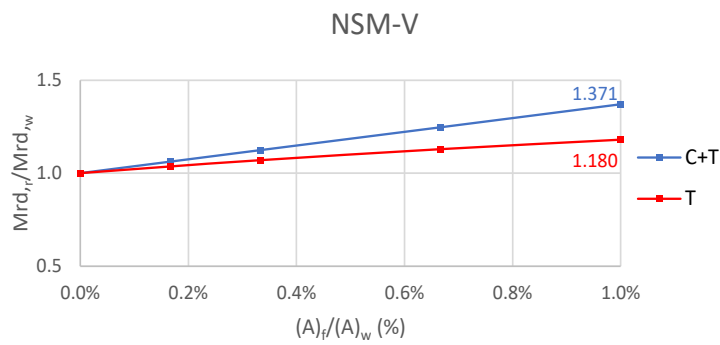
A geometria de reforço “C+T” conduz a uma variação linear na relação incremento de resistência vs percentagem de reforço e a geometria “T” leva a uma variação não linear para a mesma relação. Este facto é justificado porque a primeira conduz à posição do eixo neutro constante e no meio da secção, ao contrário da segunda que varia, reduzindo a parcela da zona tracionada com redução do contributo do FRP no reforço.

Mais uma vez se confirma que o comportamento geral da técnica EBR-H (formado por manatas unidireccionais) tem o melhor desempenho de entre as duas técnicas em análise, quer na vertente de geometria “C+T” quer na geometria “T”. Nesse sentido e porque quando se pensa reforçar uma viga à flexão será adicionar reforço na face tracionada, isto é geometria “T”, se pretender simular qual é o valor do reforço para tirar partido do máximo incremento de resistência recomendado para técnicas de colagem em reabilitação e reforço de estruturas (cerca 50% segundo Juvandes [51], com uma função polinomial, conclui-se ser necessário, na melhor hipótese (técnica EBR-H aplicada a madeira maciça, MM), ter uma percentagem de reforço de cerca de 2,25%, isto é, aplicar-se 18 camadas de manta na madeira maciça (ver Tabela 3.19). Conclui-se ser não recomendada face ao elevado número de camadas de FRP como foi referido na análise anterior (i).

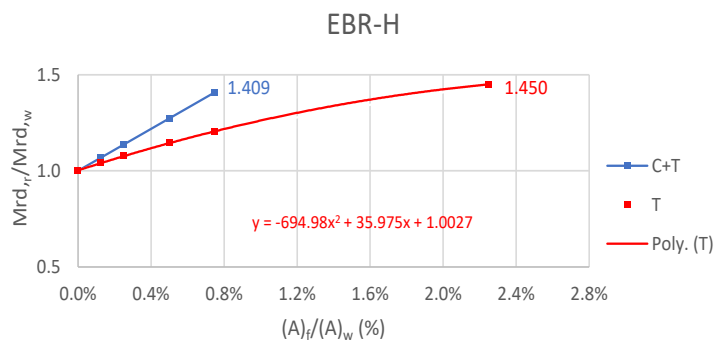
(iii) Análise global dos modelos em relação às percentagens de reforço e de rigidez axial (Figura 3.6 e Figura 3.7)

Nas Figura 3.6 e Figura 3.7 avaliam-se o comportamento relativo de todos os modelos nas 4 hipóteses de técnicas de reforço em função da geometria “C+T” ou “T”, da percentagem de reforço (A_F/A_w) e da percentagem de rigidez axial ($(EA)_f/(EA)_w$) para a madeira maciça (MM) e madeira lamelada colada (MLC), respetivamente.

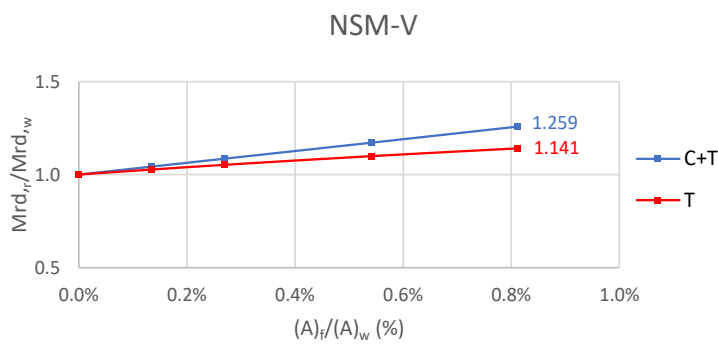
Com estas curvas prova-se que a técnica com melhor desempenho é sempre a EBR-H (com mantas) para os dois grupos de madeira MM e MLC, quer em geometria “C+T” quer em geometria “T”, e para menores percentagens de reforço do que as técnicas NSM (com laminados).



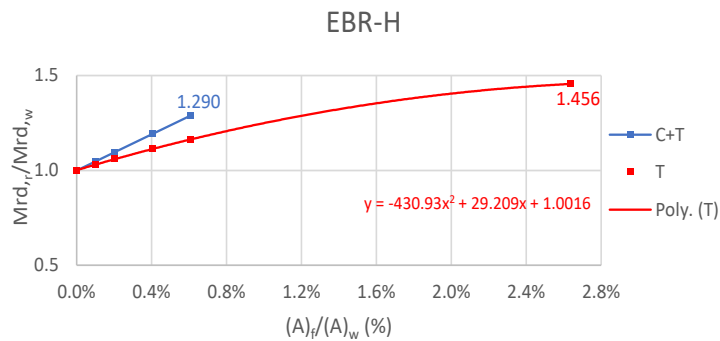
a) Grupo MM: série NSM- V



b) Grupo MM: série EBR- H

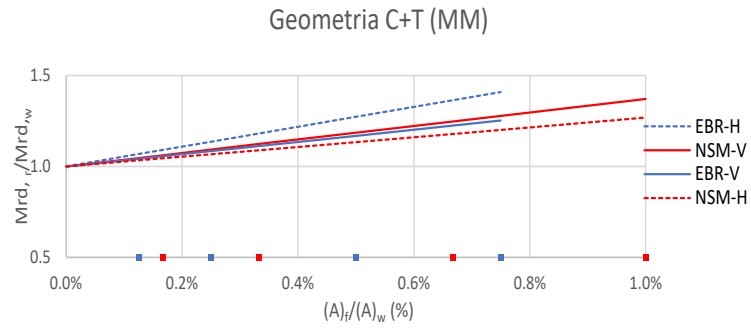


c) Grupo MLC: série NSM- V

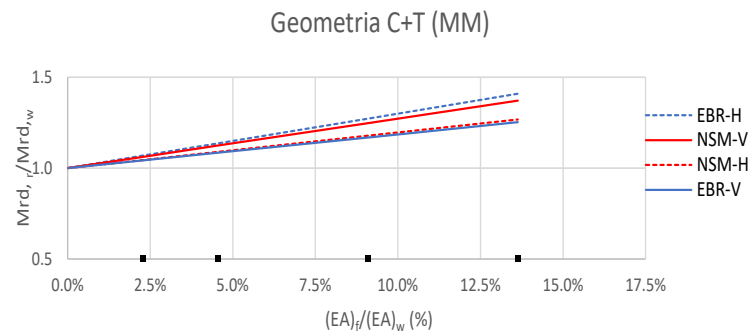


d) Grupo MLC: série EBR- H

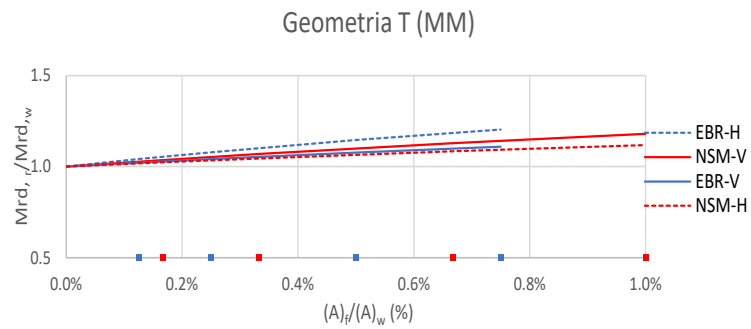
Figura 3.5 - Incrementos de resistência em função da geometria e percentagem do reforço das séries NSM-V e EBR- H para os dois grupos de madeira (MM e MLC).



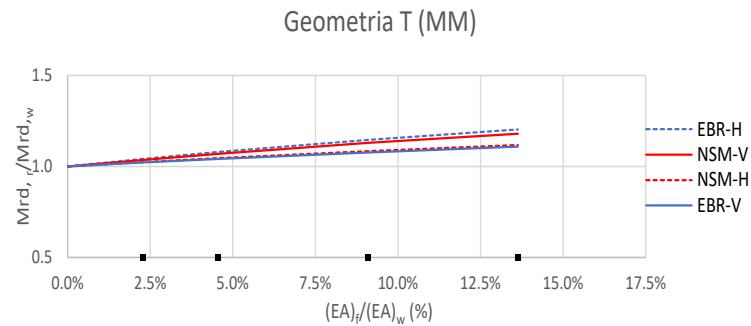
a) Análise com percentagem de reforço



b) Análise com percentagem rigidez axial

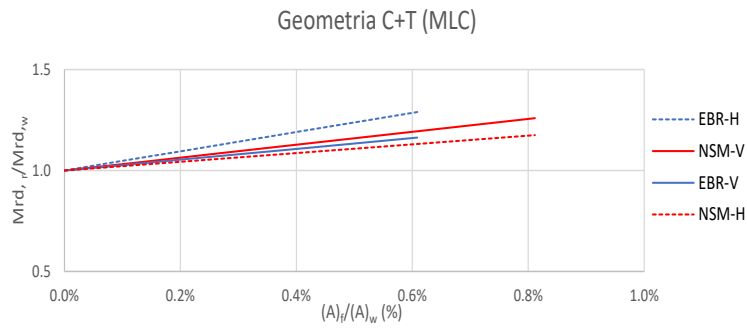


c) Análise com percentagem de reforço

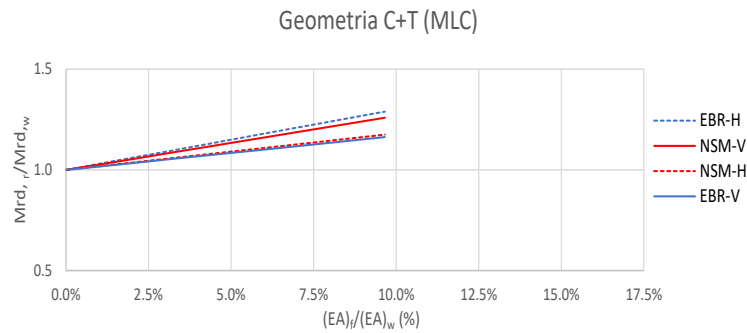


d) Análise com percentagem rigidez axial

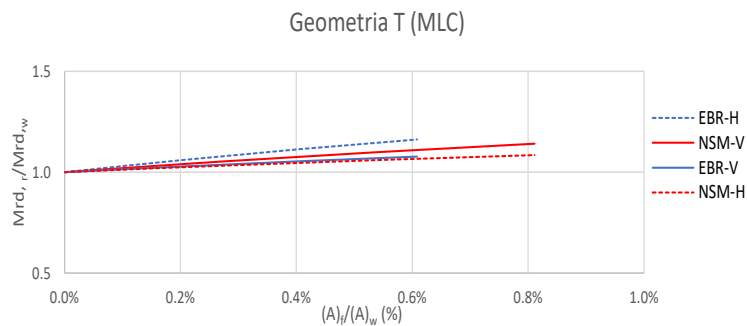
Figura 3.6 - Incrementos de resistência por ordem crescente da importância das técnicas em função da geometria e das percentagens de reforço e de rigidez axial (Grupo MM).



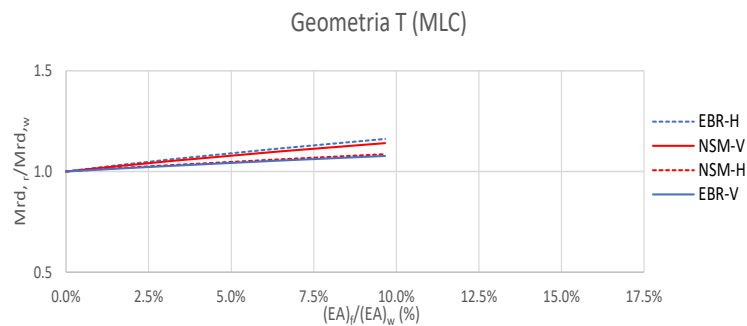
a) Análise com percentagem de reforço



b) Análise com percentagem rigidez axial



c) Análise com percentagem de reforço



d) Análise com percentagem rigidez axial

Figura 3.7 - Incrementos de resistência por ordem crescente da importância das técnicas em função da geometria e das percentagens de reforço e de rigidez axial. (Grupo MLC).

Uma análise do declive das curvas de relação incremento de resistência ($M_{rd,r}/M_{rd,w}$) vs percentagem de reforço (A_F/A_w), independentemente da geometria, conduz á ordenação seguinte por ordem decrescente de desempenho: primeiro EBR-H seguida da NSM-V, EBR-V e NSM-H. Mas, quando se comparam as curvas em função da percentagem de rigidez axial ($(EA)_f/(EA)_w$), há uma inversão das curvas nas últimas duas, passando a ser NSM-H e EBR-V.

Neste ponto discute-se a variação do incremento de resistência em função da percentagem de reforço e também em função da percentagem de rigidez axial. A primeira, porque é importante para efeitos de critérios de projeto, por exemplo, identificar valores máximos viáveis para a área do FRP. A segunda interessa porque, existindo no mercado dois sistemas de FRP (Laminado pultrudidos e Mantas secas) com módulo de elasticidade e áreas transversais diferentes, para se pensar em equivalência de sistemas a trabalhar essencialmente na direção uniaxial, os sistemas de FRP devem-se mobilizar rigidez axial equivalente (critério usado na conceção das áreas dos FRPs dos modelos estudados com laminados vs com mantas). Esta condição conduz a que nas curvas da Figura 3.6 (b) e (d) e equivalente Figura 3.7 (b) e (d) a análise é feita para rigidez semelhantes o que teve efeito na inversão da ordem das duas últimas séries face ao encontrado na análise feita por percentagem de reforço.

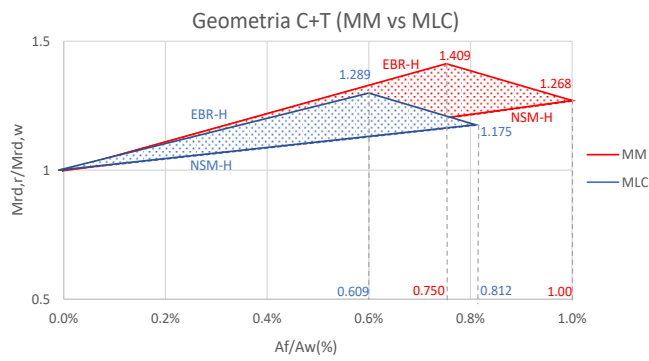
(iv) Análise global por áreas de desempenho das madeiras MM e MLC (Figura 3.8)

No seguimento das informações recolhidas nos pontos anteriores, nomeadamente as técnicas mais e menos eficientes, foi possível construir áreas de desempenho das 4 técnicas estudadas, por tipo de madeira. Desse modo, essas áreas podem dar uma ideia dos incrementos de resistências expectáveis para projeto de reforço à flexão de vigas de madeira.

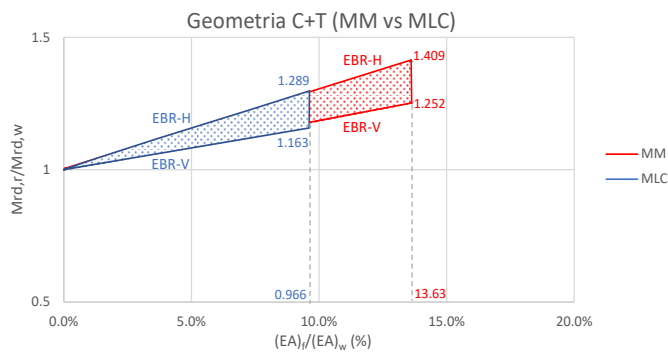
Na Figura 3.8 expõem-se as áreas de desempenho (limites máximo e mínimo) para cada tipo de madeira MM e MLC e nas duas vertentes de geometria “C+T” e “T”, umas, função da variação da percentagem de reforço (casos (a) e (c)) e outras, função da variação da percentagem de rigidez axial (casos (b) e (d)). O grupo de madeira maciça (MM) está representada pela área a “vermelho” e o grupo de madeira lamelada colada (MLC) está ilustrada pela área a “azul”.

Em termos gerais, as áreas a “vermelho” (várias técnicas aplicadas na madeira maciça “MM”) apresentam maior amplitude, quer na direção do eixo das abcissas (em termos de percentagem de reforço ou percentagem de rigidez axial) quer na direção do eixo das ordenadas (em termos de incremento de resistência) do que as áreas a “azul” (várias técnicas aplicadas na madeira lamelada colada MLC), independentemente da geometria do reforço. Pode-se afirmar que, dentro dos critérios base usados neste estudo, há mais hipótese de soluções de reforço para a madeira MM do que para a madeira MLC.

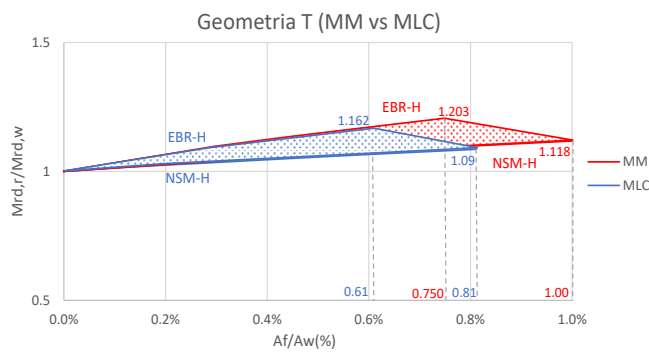
Na geometria “C+T”, no que toca a percentagens de reforço, existe para a madeira MM uma maior margem de percentagens de reforço possíveis para determinadas resistências, comparativamente com a MLC, na gama das técnicas de reforço estudadas. Ainda com “C+T”, no que diz respeito aos incrementos de resistências, os modelos de madeira MM apresentam uma maior margem de amplitude de incrementos de resistências possíveis para dada percentagem de reforço, comparativamente com a MLC.



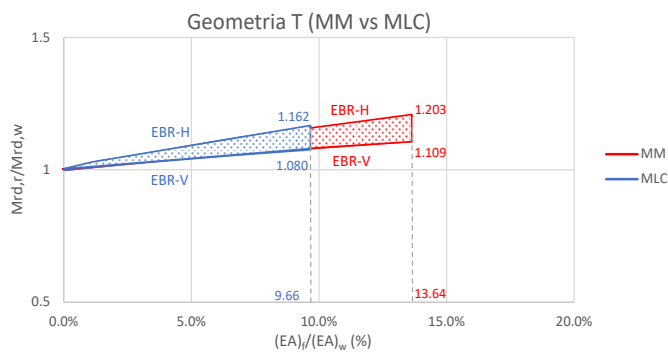
a) Análise com percentagem de reforço



b) Análise com percentagem rigidez axial



c) Análise com percentagem de reforço



d) Análise com percentagem rigidez axial

Figura 3.8 - Áreas de desempenho dos grupos de madeira MM e MLC em função da geometria e das percentagens de reforço e de rigidez axial.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo incidiu sobre o tema do reforço e reabilitação de vigas de madeira sujeitas à flexão, nomeadamente sobre dois tipos de madeira, uma maciça e outra lamelada colada, reforçadas por dois sistemas de FRP, o pré-fabricado (laminado) e o curado *in-situ* (mantas unidireccionais).

Para tal, primeiro fez-se uma pesquisa e sistematização dos critérios de resistência nessa área, demarcando-se, de entre poucas referências técnicas encontradas, a proposta Italiana CNR-DT 201/2005 [57], com recomendações para “Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Timber Structures”.

Conclui-se que, para a madeira, de entre vários modelos de comportamento identificados na literatura técnica, decidiu-se usar um modelo modificado de *Bazan-Buchaman* que consiste em assumir para o *comportamento à tração* um diagrama linear elástico, com rotura frágil, e para o *comportamento à compressão* decidiu-se considerar a sugestão de Corradi, M. et al. [55]. Este limita a envolvente do modo de rotura da madeira à capacidade à tração porque os defeitos e imperfeições da madeira condicionam a resistência última à tração (f_{wt}), acabando por não se atingir a capacidade última à compressão (f_{wc}) nem mobilizar a fase plástica. Para critérios de verificação de segurança aos estados limites das vigas de madeira foram usados as indicações do Eurocódigo 5 e as informações das propriedades dos materiais de acordo com a norma NP EN 338-2016 [15], para as madeiras maciças MM e a norma NP EN 14080-2019 [16] para as madeiras lameladas coladas MLC.

Relativamente aos sistemas de FRP, foram seguidas as recomendações de Juvandes [53] e as indicações do sistema comercial S&P Clever Reinforcement Company AG para as propriedades mecânicas de cálculo, coeficientes parciais de segurança, geometria e boas práticas de construção do FRP que possam influenciar o projeto com laminados (sistema pré-fabricado) ou com mantas unidireccionais (sistema curado *in-situ*).

Para estudar vigas de madeira reforçadas com FRP, sujeitos à flexão plana, assumiram-se as hipóteses clássicas de resistência dos materiais e as equações de equilíbrio da secção transversal, salientando-se, que a madeira e o FRP seguem uma lei linear elástica até à ruína, para trações e compressões, e que há a perfeita aderência entre os dois materiais até à ruína, sem destacamentos prematuros.

Retomando o objetivo do capítulo, após a recolha da informação técnica anterior, definiu-se um programa de estudo focado em obter informação sobre o desempenho máximo do comportamento de vigas de madeira correntes reforçadas com sistemas de FRP disponíveis no mercado da construção de modo a concluírem-se sugestões para projeto. O estudo procurou centrar-se nos pontos seguintes: (i) estudar dois tipos de madeiras do mercado da reabilitação, a Madeira Maciça (MM) e a Madeira Lamelada Colada (MLC) com a forma de secção retangular; (ii) avaliar o desempenho dos dois tipos de sistemas de CFRP (fibras de carbono), o pré-fabricado (Laminados pultrudidos) e o curado *in-situ* (Mantas uniaxiais secas) e a cada um, fez-se associar uma técnica de reforço, aos primeiros a técnica NSM e aos segundos a técnica EBR; (iii) identificar a melhor técnica e geometria de instalação do reforço à flexão com FRP, inspirado nas sugestões da literatura técnica, como o reforçar à compressão e tração “C+T” ou reforçar só à tração “T”; (iv) analisar o incremento de resistência da secção reforçada em relação à secção de referencia, sem reforço, para diferentes técnicas de reforço (NSM, EBR), diferentes percentagens de reforço e de rigidez axial; (v) para a melhor técnica e geometria, avaliar a percentagem do reforço para se tentar atingir 50% de incremento de resistência à flexão face à secção de referência; (vi) avaliar o rendimento (%) máximo do FRP em ELU admitindo a perfeita aderência entre os materiais e, por último, (vii) tentar sugerir algumas recomendações para projeto de reforços colados com FRP.

Foi estabelecido um programa de estudo com 68 modelos para a determinação do momento resistente de cálculo, em ELU, de vigas de madeira retangulares reforçadas com sistemas de FRP, organizado segundo os parâmetros seguintes; (i) dois grupos de madeiras, MM e MLC (com 34 modelos cada); (ii) duas técnicas de reforço NSM e EBR, coincidentes com os dois tipos de sistemas de FRP; (iii) para cada técnica, duas formas de geometria de reforço, a vertical (V) e a horizontal (H), estas com duas configurações possíveis, reforço à compressão e tração “C+T” e reforço só à tração “T”.

O estudo realizado pressupõe as propriedades dos materiais selecionados seguintes: madeira maciça da classe D30; madeira lamelada colada da classe GL28h, equivalente à madeira de Pinho Nórdico da classe C30; laminados de CFRP do sistema S&P Laminates CFK, referência 150/2000 e Mantas unidirecionais do sistema S&P C-Sheet 240 de gramagem (g/m^2) a ajustar ao estudo g/m^2 .

Foi desenvolvido uma “folha de cálculo” em Excel para processar o cálculo de todos os modelos, organizar os resultados e elaborar gráficos de processamento dos resultados para posterior análise dos mesmos.

Do extenso processo de análise de dados e resultados, tiram-se várias conclusões e que se resumem as principais de seguida, tendo em mente que se reportam aos critérios do programa específico de análise ao ELU desta dissertação.

Na perspetiva de uma *visão global* dos resultados para análise em estado ELU, realça-se que:

- (i) o modo de ruína condicionante foi sempre limitado pelo valor de cálculo da extensão máxima à flexão da madeira. As armaduras de FRP, independentemente do tipo de sistemas, da técnica e da geometria do reforço, nunca atingiram o valor de cálculo máximo recomendado à flexão pela ficha do sistema comercial, nem os valores observados nos ensaios de Barbosa [18] e Cruz [64]. O aproveitamento máximo do FRP, relativamente ao valor recomendado “ $\epsilon_f^{max}/\epsilon_{fd}$ ”, foi de cerca de 22% e para o grupo MM. Sublinha-se que o modelo de cálculo admitiu a perfeita aderência na interface madeira-FRP, não contemplando potenciais destacamentos prematuros do compósito;
- (ii) o caso com melhor incremento de resistência (41%) é a técnica EBR-H, com reforço “C+T” do grupo de madeira MM, mobilizando apenas 0.75% de percentagem de reforço e viável de executar-se porque mobiliza 3 camadas de mantas unidirecionais. Segue-se, com incremento de resistência (37%), a técnica NSM-V, com reforço “C+T” do grupo de madeira MM, mobilizando 1.00% de percentagem de reforço, mas difícil de executar porque obriga a ter 6 camadas de laminados, por ranhura na secção da madeira;
- (iii) a tentativa de simular a percentagem de reforço necessária para um incremento de resistência de cerca 50% da seção não reforçada na melhor técnica, critério máximo de reforço recomendado por Juvandes [51], para estruturas de betão, conclui-se ser não aconselhada face à elevada % de reforço e elevado número de camadas de FRP a mobilizar.

Sob o ponto de vista da análise por grupos de madeira para as melhores técnicas de reforço, conclui-se que:

- (i) foi possível criar figuras para os dois grupos de madeira (MM e MLC) com a ilustração do incremento de resistência ($M_{rd,r}/M_{rd,w}$) em função da geometria (“C+T” e “T”) e das percentagens do reforço (A_f/A_w) para os 4 casos das técnicas NSM-V e EBR-H, destacando-se um caso “extra” da EBR-H a simular cerca 50% de incremento de resistência (Figura 3.5);
- (ii) de uma forma geral, conclui-se que o incremento de resistência é maior quando se reforça à compressão e à tração, “C+T”, do que quando se opta por reforçar só a zona tracionada, “T”. Contudo, essa geometria é difícil de mobilizar o comportamento do FRP à compressão por não ter

rigidez suficiente como armadura, sobretudo na colagem via EBR-H (com mantas), embora possa ser viável na técnica NSN-V por envolver laminados e estes estarem inseridos na secção da madeira;

- (iii) sublinha-se que, os modelos com a geometria de reforço “T”, FRP aplicado na zona tracionada, atingem cerca de metade do incremento de resistência dos equivalentes com geometria “C+T”, agravado do facto da sua exequibilidade ser difícil se com a técnica EBR-H e não recomendada no caso da técnica NSM-V.

Na interpretação da análise global dos modelos em relação às percentagens de reforço e de rigidez axial, pode constata-se que:

- i) foi possível produzir curvas com a ilustração do incremento de resistência ($M_{rd,r}/M_{rd,w}$), por ordem crescente da importância das 4 técnicas de reforço, em função da geometria (“C+T” e “T”) e das percentagens do reforço (A_f/A_w) e da rigidez axial normalizada ($(EA)_f/(EA)_w$), para todos os modelos da madeira maciça (MM) e madeira lamelada colada (MLC) (Figura 3.6 e Figura 3.7);
- (ii) dessas figuras prova-se que a técnica com melhor desempenho é sempre a EBR-H (com mantas unidireccionais) para os dois grupos de madeira MM e MLC, quer em geometria “C+T” quer em geometria “T”, e para menores percentagens de reforço do que as técnicas NSM (com laminados);
- (iii) por análise dos declives das curvas de relação incremento de resistência vs percentagem de reforço, independentemente da geometria, conduz á ordenação seguinte por ordem decrescente de desempenho: primeiro EBR-H seguida da NSM-V, EBR-V e NSM-H. Mas, quando se comparam as curvas em função da percentagem de rigidez axial, há uma inversão das curvas nas últimas duas, passando a ser NSM-H e EBR-V;
- (iv) estudou-se a variação do incremento de resistência vs percentagem de reforço porque é importante para efeitos de critérios de projeto, por exemplo, identificar valores máximos viáveis para a área do FRP. Estudou-se, também, a variação do incremento de resistência vs percentagem de rigidez axial pelo facto de, existindo no mercado dois sistemas de FRP (Laminados pultrudidos e Mantas secas) com módulo de elasticidade e áreas transversais diferentes, para se pensar em equivalência estrutural de sistemas a trabalhar essencialmente na direção uniaxial, os FRP devem mobilizar rigidez axial equivalente (critério usado na conceção das áreas dos FRPs dos modelos estudados com laminados vs com mantas). Esta condição explica a inversão da ordem das duas últimas séries do ponto anterior (iii).

Na perspetiva de uma análise global por áreas de desempenho das madeiras MM e MLC, pode apurar-se que:

- (i) com base na identificação das técnicas mais e menos eficientes, foi possível construir-se áreas de desempenho das 4 técnicas estudadas, por tipo de madeira MM (a vermelho) e madeira MLC (a azul) (Figura 3.8). Essas áreas dão um panorama dos incrementos de resistências expectáveis para projeto de reforço à flexão das vigas de madeira;
- (ii) as áreas a “vermelho” (madeira maciça “MM”) apresentam maior amplitude, quer na direção do eixo das abcissas (em termos de percentagem de reforço ou percentagem de rigidez axial) quer na direção do eixo das ordenadas (em termos de incremento de resistência) do que as áreas a “azul” (madeira lamelada colada MLC), independentemente da geometria do reforço. Nos pressupostos deste estudo, há mais hipótese de soluções de reforço para a madeira MM do que para a madeira MLC.

(iii) Na geometria “C+T”, no que toca a percentagens de reforço, existe para a madeira MM uma maior margem de percentagens de reforço possíveis para determinadas resistências, comparativamente com a MLC, na gama das técnicas de reforço estudadas. Ainda com “C+T”, no que diz respeito aos incrementos de resistências, os modelos de madeira MM apresentam uma maior margem de amplitude de incrementos de resistências possíveis para dada percentagem de reforço, comparativamente com a MLC.

Por último, sublinha-se que não se indicam conclusões sobre a deformação das vigas de madeira porque, infelizmente por limitação de tempo, não foi estudado o comportamento em serviço dos grupos de madeira MM e MLC, que pela experiência de vários autores, geralmente, é condicionante no dimensionamento das estruturas de madeira, com ou sem reforço. Este tema sugere-se para futuros desenvolvimentos da análise destes grupos de madeiras, assim como, o alargamento para outras classes de resistência.

4

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

4.1. CONCLUSÕES RELEVANTES

A ideia da sustentabilidade tem vindo a preconizar mudanças, e na construção civil é necessário tomar consciência que essas mudanças têm também de acontecer. Como tal, uma dessas estratégias passa pela utilização de materiais mais sustentáveis, como a madeira.

Dos materiais empregues na construção, a madeira, ao longo dos tempos, tem sido um material comumente utilizado, uma vez que é uma matéria-prima com boas características mecânicas, natural, renovável e que promove a reciclagem. Desta forma, tornou-se um excelente material, principalmente quando utilizado em alternativa ao cimento, visto que a produção do cimento é o maior emissor industrial de carbono do mundo

O conhecimento generalizado da comunidade civil aponta ser fundamental a utilização da madeira na construção, mas também é imprescindível apontar para opções que se têm de tomar para a conceção de soluções de reforço à tração de elementos de madeira maciça ou madeira lamelada colada. Foram reunidas várias técnicas e formas de realizar o reforço e identificados exemplos com casos práticos de obras de reforço.

O reforço e a reabilitação têm vindo a assumir uma posição na construção civil. Numa perspetiva mais sustentável é cada vez mais importante desenvolver técnicas e novos métodos para aumentar as estratégias de reforço e construir de forma sustentável. A madeira tem também um papel bastante importante neste campo, voltando a ser a modernização da construção, o futuro é agora construir em madeira.

Os sistemas de FRP surgem no seguimento dos vários tipos de reforços possíveis. No caso de reforçar a madeira com FRP é importante ter a noção se os materiais têm a capacidade de transferência de esforços entre eles. A interface de ligação entre os materiais é a responsável pela transmissão dos esforços do FRP para a madeira, pelo que a resistência de uma ligação será ditada pelo valor máximo da aderência entre os materiais envolvidos.

Para tal, primeiro fez-se uma pesquisa e sistematização dos critérios de resistência nessa área, demarcando-se, de entre poucas referências técnicas encontradas, a proposta Italiana CNR-DT 201/2005 [57], com recomendações para “Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Timber Structures”.

Conclui-se que, para a madeira, de entre vários modelos de comportamento identificados na literatura técnica, decidiu-se usar um modelo modificado de Bazan-Buchanan que consiste em assumir para o comportamento à tração um diagrama linear elástico, com rotura frágil, e para o comportamento à compressão decidiu-se considerar a sugestão de Corradi, M. et al. [55]. Para critérios de verificação de segurança aos estados limites das vigas de madeira foram usados as indicações do Eurocódigo 5 e as

informações das propriedades dos materiais de acordo com a norma NP EN 338-2016 [15] para as madeiras maciças MM e a norma NP EN 14080-2019 [16], para as madeiras lameladas coladas MLC.

Relativamente aos sistemas de FRP, foram seguidas as recomendações de Juvandes [53] e as indicações do sistema comercial S&P Clever Reinforcement Company AG para as propriedades mecânicas de cálculo, coeficientes parciais de segurança, geometria e boas práticas de construção do FRP que possam influenciar o projeto com laminados (sistema pré-fabricado) ou com mantas unidirecionais (sistema curado *in-situ*).

Para estudar vigas de madeira reforçadas com FRP, sujeitos à flexão plana, assumiram-se as hipóteses clássicas de resistência dos materiais e as equações de equilíbrio da secção transversal, salientando-se, que a madeira e o FRP seguem uma lei linear elástica até à ruína, para trações e compressões, e que há a perfeita aderência entre os dois materiais até à ruína, sem destacamentos prematuros.

Foi realizado um programa de estudo com 68 modelos para a determinação do momento resistente de cálculo, em ELU, de vigas de madeira retangulares reforçadas com sistemas de FRP, organizado por dois grupos de madeiras, MM e MLC, com duas técnicas de reforço NSM e EBR, admitindo-se o vertical (V) e o horizontal (H) e assumindo as hipóteses de reforço à compressão e tração “C+T” ou o reforço só à tração “T”.

O estudo realizado pressupõe as propriedades dos materiais selecionados seguintes: madeira maciça da classe D30; madeira lamelada colada da classe GL28h, equivalente à madeira de Pinho Nórdico da classe C30; laminados de CFRP do sistema S&P Laminates CFK, referência 150/2000 e Mantas unidirecionais do sistema S&P C-Sheet 240 de gramagem (g/m²) a ajustar ao estudo g/m².

Foi desenvolvido uma “folha de cálculo” em Excel fundamental para processar o cálculo de todos os modelos, organizar os resultados e elaborar gráficos de processamento dos resultados para posterior análise dos mesmos.

Do extenso processo de análise de dados e resultados, sobre o comportamento das vigas em estado limite último (ELU), tiram-se várias conclusões e que se resumem as em dois grupos, numa perspetiva de (i) visão global e visando (ii) indicações para projeto.

(i) *Na perspetiva de uma visão global em ELU:*

O modelo com melhor incremento de resistência (41%) tem a técnica EBR-H, com reforço “C+T” do grupo de madeira MM, mobilizando apenas 0.75% de percentagem de reforço e viável de executar-se porque mobiliza 3 camadas de mantas unidirecionais. Segue-se, com incremento de resistência de (37%), o modelo com a técnica NSM-V, com reforço “C+T” do grupo de madeira MM, mobilizando 1.00% de percentagem de reforço, mas difícil de executar-se porque obriga a ter 6 camadas de laminados, por ranhura na secção da madeira.

O incremento de resistência é maior quando se reforça à compressão e à tração, “C+T”, do que quando se opta por reforçar só a zona tracionada, “T”. Contudo, essa geometria é difícil de mobilizar o comportamento do FRP à compressão por não ter rigidez suficiente como armadura, sobretudo na colagem via EBR-H (com mantas), embora possa ser viável na técnica NSM-V por envolver laminados e estes estarem inseridos na secção da madeira. Sublinha-se que, os modelos com a geometria de reforço “T”, FRP aplicado na zona tracionada, atingem cerca de metade do incremento de resistência dos equivalentes com geometria “C+T”, agravado do facto da sua exequibilidade ser difícil se com a técnica EBR-H e não recomendada no caso da técnica NSM-V.

Salienta-se que, ao reforçar a zona tracionada (T), aumenta-se a capacidade resistente do elemento nessa zona, o que resulta numa maior transferência de tensões para a zona comprimida (C). Quando a zona

comprimida excede a sua capacidade máxima, ocorre a rotura por compressão da madeira. Esta rotura é uma rotura dúctil que proporciona uma maior segurança no Estado Limite Último da estrutura reforçada, em comparação com uma estrutura simples de madeira.

A técnica com melhor desempenho é sempre a EBR-H (com mantas unidireccionais) para os dois grupos de madeira MM e MLC, quer em geometria “C+T” quer em geometria “T”, e para menores percentagens de reforço do que as técnicas NSM (com laminados).

Por análise dos declives das curvas de relação incremento de resistência vs percentagem de reforço, independentemente da geometria, conduz á ordenação seguinte por ordem decrescente de desempenho: primeiro EBR-H seguida da NSM-V, EBR-V e NSM-H. Mas, quando se comparam as curvas em função da percentagem de rigidez axial, há uma inversão das curvas nas últimas duas, passando a ser NSM-H e EBR-V.

(ii) *Na perspectiva de indicações para projeto:*

O modo de ruína condicionante foi sempre limitado pelo valor de cálculo da extensão máxima à flexão da madeira. As armaduras de FRP, independentemente do tipo de sistemas, da técnica e da geometria do reforço, nunca atingiram o valor de cálculo máximo recomendado à flexão pela ficha do sistema comercial, nem os valores observados nos ensaios de Barbosa [18] e Cruz [64]. O aproveitamento máximo do FRP, relativamente ao valor recomendado “ $\varepsilon_f^{máx} / \varepsilon_{fd}$ ”, foi de cerca de 22% e para o grupo MM.

Conclui-se que, para a melhor opção de reforço estudado (EBR-H), a percentagem de reforço necessária para um incremento de resistência de cerca 50% da seção não reforçada, recomendado por Juvandes [51] para o reforço de estruturas de betão, não é aconselhada para projeto com madeira maciça da classe D30 nem madeira lamelada colada da classe GL28h, porque conduziu a uma percentagem de reforço elevada (cerca de 2,25%) e a mobilizar um número elevado de camadas de FRP (cerca de 18).

Estudou-se a variação do incremento de resistência vs percentagem de reforço porque é importante para efeitos de critérios de projeto, por exemplo, identificar valores máximos viáveis para a área do FRP. Estudou-se, também, a variação do incremento de resistência vs percentagem de rigidez axial pelo facto de, existindo no mercado dois sistemas de FRP (Laminados pultrudidos e Mantas secas) com módulo de elasticidade e áreas transversais diferentes, para se pensar em equivalência estrutural de sistemas a trabalhar essencialmente na direção uniaxial, os FRP devem mobilizar rigidez axial equivalente (critério usado na conceção das áreas dos FRPs dos modelos estudados com laminados vs com mantas). Esta condição explica a inversão da ordem das duas últimas séries referidas anteriormente.

Com base na identificação das técnicas mais e menos eficientes, foi possível construir-se áreas de desempenho das 4 técnicas estudadas, por tipo de madeira MM (a vermelho) e madeira MLC (a azul). Essas áreas dão um panorama dos incrementos de resistências expectáveis para projeto de reforço à flexão das vigas de madeira. As áreas a “vermelho” (madeira maciça “MM”) apresentam maior amplitude, quer na direção do eixo das abcissas (em termos de percentagem de reforço ou percentagem de rigidez axial para igual incremento de resistência) quer na direção do eixo das ordenas (em termos de incremento de resistência para igual percentagem de reforço ou rigidez axial) do que as áreas a “azul” (madeira lamelada colada MLC), independentemente da geometria do reforço. Nos pressupostos deste estudo, há mais hipótese de soluções de reforço para a madeira MM do que para a madeira MLC.

Como observações finais:

Sublinha-se que não se indicam conclusões sobre a deformação das vigas de madeira porque, infelizmente por limitação de tempo, não foi estudado o comportamento em serviço dos grupos de madeira MM e MLC, que pela experiência técnica, geralmente, é condicionante no dimensionamento

das estruturas de madeira, com ou sem reforço. Além disso, recorda-se que não foi possível integrar neste estudo as imperfeições da madeira, com repercussão no modelo constitutivo da madeira (plastificação da zona comprimida) e no efeito do desempenho da interface colada madeira-FRP (modelos de controlo da tensão da aderência madeira-FRP). Estes últimos, importantes, no sentido de detetarem-se possíveis destacamentos prematuros do compósito, o que poderão conduzir a módulos de ruína diferentes dos admitidos neste estudo. Estes temas sugerem-se para futuros estudos de análise destes grupos de madeiras, assim como o alargamento para outras classes de resistência.

4.2. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

O reforço de madeiras com sistemas de FRP, dentro das técnicas viáveis de reforço de estruturas e com vários sistemas comerciais disponíveis no mercado, apresentam algumas incertezas que, para além das que foram tentadas esclarecer neste trabalho, merecem ter uma atenção acrescida ou serem investigadas com mais profundidade.

Neste contexto, apresentam-se algumas sugestões para futuros estudos:

- A análise dos modelos foi feita através de uma folha de excel simples, admitindo um modelo de comportamento linear elástico, o que não admitiu efeito do comportamento não linear dos materiais. Importa realizar estudos com programas mais eficientes que contemplam leis constitutivas não lineares dos materiais;
- Admitiu-se o modelo modificado de Bazan-Buchaman para a madeira. Sugere-se estudar outros modelos não lineares para a madeira que permitam a plastificação da zona comprimida;
- Sugere-se o estudo de um modelo de comportamento da interface madeira-FRP que possibilite detectar os destacamentos prematuros do compósito;
- As conclusões do estudo realização são para classes específicas de resistências da madeira. Interessa alargar o estudo a outras madeiras com outras classes de resistência;
- Aprofundar o conhecimento acerca do comportamento da madeira reforçada com FRP em serviço, para controlo da deformabilidade, aspeto não contemplado na presente dissertação por falta de tempo e importante para dimensionamento de estruturas de madeira;
- Sugere-se a realização de estudos do comportamento das estruturas de madeira reforçadas à flexão composta e ao corte;
- Devem ser realizados estudos experimentais que permitam caracterizar o comportamento de vigas de madeira reforçadas à flexão com sistemas de FRP para diferentes técnicas de reforço, diferentes geometrias de aplicação e diferentes percentagens de reforço de modo a calibrar os estudos numéricos desenvolvidos com modelos aproximados de comportamento dos materiais;
- Otimizar o reforço da madeira para uma técnica e uma geometria eficientes na sequência dos estudos de simulação realizados neste trabalho com as hipóteses EBR-H e EBR-V ou NSM-H e NSM-V;
- Procurar sistematizar critérios de dimensionamento adequados para melhorar os poucos documentos com recomendações para projecto;
- Avaliar as implicações no dimensionamento de um projeto de reforço se utilizar uma secção transversal de geometria não retangular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pedro, Renan Moreno - *Alternativas para a substituição do cimento na construção civil*. (2023).
- [2] Europeia, Comissão “*Pacto Ecológico Europeu: Comissão propõe nova estratégia para proteger e regenerar florestas da EU*”, Bruxelas: 16 julho 2021.
- [3] WhyWood - *Sustentabilidade e eficiência da construção em madeira*. 2022. Disponível em WWW: <https://why-wood.com/construcao-em-madeira/sustentabilidade-e-eficiencia-da-construcao-de-madeira/>
- [4] EuropeDirectMinho - Estado da União: *Perguntas e respostas sobre o Plano de meta climática para 2030*. 2021.
- [5] EUR-Lex.europa – *Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho- relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)*. 2021.
- [6] Moore, Susan E.; Cabbage, Frederick; Eicheldinger, Celia - *Impacts of Forest Stewardship Council (FSC) and Sustainable Forestry Initiative (SFI) Forest Certification in North America*. Journal of Forestry. Vol. 110. n.º 2 (2012). p. 79-88. Consult. em 3/15/2023. Disponível em WWW: <<https://doi.org/10.5849/jof.10-050>>. ISSN: 0022-1201
- [7] Council, US Green Building - *LEED: Leadership in energy and environmental design*. Washington, DC: US Green Building Council. Website accessed April. Vol. 6. (2005). p. 2005.
- [8] Torres, Eduardo Vieira - *Ligações estruturais de madeira segundo o novo Eurocódigo 5*. 2021.
- [9] Qin, Renyuan; Zhou, Ao; Chow, Cheuk Lun; Lau, Denvid - *Structural performance and charring of loaded wood under fire*. Engineering Structures. Vol. 228. (2021). p. 111491. ISSN: 0141-0296
- [10] Anastácio, R. S. A. - *Especificação de protecção fogo para estruturas de madeira*. (2010).
- [11] Kermani, Abdy - *Structural timber design*. Blackwell Science Ltd, 1999. ISBN: 063205098
- [12] Gonçalves, Frederico - “*Madeira e tecnologia: o casamento que vai revolucionar a construção*.” idealista/news.<https://www.idealista.pt/news/imobiliario/construcao/2022/01/25/50653-madeira-e-tecnologia-o-casamento-que-vai-revolucionar-a-construcao>
- [13] Guedes, João Miranda - *Estruturas de Madeira: Conceção estrutural e dimensionamento*. Aulas de Estruturas de Alvenaria e Madeira, 2023.
- [14] NP EN 1995-1-1:2004: *Eurocódigo 5- Projeto de estruturas de madeira- Parte 1-1 Regras gerais comuns e regras para edifícios*.
- [15] EN 338:2016. *Structural timber- Strength classes*.
- [16] NP EN 14080:2019. *Estruturas de madeira. Madeira lamelada-colada e madeira maciça colada*.
- [17] Luzio, Márcio Alexandre Marques - *Verificação da segurança da estrutura de madeira de uma moradia: estudo de caso*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto (Portugal), (2011).
- [18] Barbosa, R. M. T. - *Estruturas de Madeira Lamelada Colada Reforçada Com Sistemas Compósitos de FRP: análise da aderência entre os materiais*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto (Portugal), 2008.

- [19] <https://www.alamy.com/finger-joint-wood-connection-concept-woodworking-of-zigzag-at-the-end-of-the-pieces-for-splicing-isolated-cutout-on-white-background-3d-illustration-image362850669.html> (22/03/2023)
- [20] Dias, Salvador JE; Branco, Jorge M; Cruz, Paulo JS - *Compósitos de CFRP unidireccionais no reforço de vigas de madeira lamelada-colada*. (2006). ISSN: 1645-5576
- [21] Faggiano B. *et al.* - *The Italian instructions for the design, execution and control of timber constructions (CNR-DT 206 R1/2018)*. Engineering Structures. Vol. 253. (2022). p. 113753. ISSN: 0141-0296
- [22] Teixeira, Joaquim José Lopes - *Salvaguarda e valorização do edificado habitacional da cidade histórica. Metodologia de intervenção no sistema construtivo da casa burguesa do Porto*. (2014). ISSN:
- [23] http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Estruturas/Madeira/Soalhos/EMT020_Soalho_a_vista_para_laje_de_tabuas.html (22/03/2023)
- [24] <https://paginas.fe.up.pt/~icfeup/pic/parede-de-tabique-em-habitacao/> (22/03/2023)
- [25] Corradi, Marco *et al.* - *Repair and Reinforcement of Historic Timber Structures with Stainless Steel—A Review*. 2019. Disponível em WWW: https://informacoeseservicos.lisboa.pt/fileadmin/informacoes_servicos/dossiers/resiliencia_urbana/resist/ReabilitacaoPensaoAmorJoaoAppletonPedroRibeiroEduardoCosta.pdf. ISBN/ISSN: 2075-4701
- [26] E. Ilgin and M. Karjalainen, "Massive Wood Construction in Finland: Past, Present, and Future" Wood Industry-Past, Present and Future Outlook, 2022.
- [27] <https://www.jular.pt/referencias/turismo/zmar-eco-campo-resort> (22/03/2023)
- [28] <https://blogs.upm.es/ETSAMadera/2021/07/29/impulso-verde/> (22/03/2023)
- [29] <http://madeiralaminadacolada.com/aplicacoes.php> (31/05/2023)
- [30] https://www.wikiwand.com/pt/Madeira_laminada_colada (22/05/2023)
- [31] <https://www.publico.pt/2020/10/13/fugas/noticia/ja-possivel-atravesar-maior-ponte-pedonal-madeira-europa-1934887> (22/03/2023)
- [32] https://www.serralves.pt/institucional-serralves/5.8.-ok_-parque---treetop-walk/ (25/03/2023)
- [33] N. Plevris and T. C. Triantafillou, "FRP-reinforced wood as structural material," Journal of materials in Civil Engineering, vol. 4, no. 3, pp. 300-317, 1992.
- [34] Charter, Krakow - *Principles for conservation and restoration of built heritage*, presented at the In Proceedings of the International Conference on Conservation, Poland: 23-24 November, 1998.
- [35] Larsen, Knut Einar; Marstein, Nils - *Conservation of historic timber structures. An ecological approach*. Riksantikvaren, 2016.
- [36] Caetano, Solange Pereira - *Caracterização dinâmica de vigas de madeira recuperadas após ocorrência de danos mecânicos*. Universidade de Coimbra, 2015. ISBN/ISSN
- [37] Feio, Artur O; Machado, José S; Cunha, Vítor M - *Reabilitação estrutural: análise de técnicas de reforço em estruturas de madeira*. CIMAD-2011 Coimbra. Portugal., 2011.

- [38] <https://informacoeseservicos.lisboa.pt/reforco-sismico/guia-de-boas-praticas/pavimentos/repacao-e-reforco> (25/05/2023)
- [39] http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Estruturas/Madeira/Reforços/EMZ210_Reforco_de_laje_de_madeira_pela_fac.html (25/05/2023)
- [40] NP EN 335: 2018- *Durabilidade da madeira e de produtos derivados de madeira*
- [41] <https://www.jular.pt/referencias/reabilitacao/ministerio-das-financas-lisboa> (22/05/2023)
- [42] <https://resine-epossidiche.it/edilizia-conservativa/> (26/05/2023)
- [43] <https://www.castrocompositesshop.com/pt/6-fibras-de-refor%C3%A7o> (28/05/2023)
- [44] Jasim, M, A *et al.*; *Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures- A review*. Volume 43, Part 2, 2021, Pages 1003- 1008
- [45] Barros J.- *Materiais compósitos no reforço de estruturas*. Revista Construção Magazine, Universidade do Minho. ISSN 1645-1767. 22 (2007) 26-35.
- [46] <https://www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/produtos> (28/5/2023)
- [47] <https://www.eboss.co.nz/library/simpson-strong-tie/frp-carbon-fibre-reinforcing-systems> (28/05/2023)
- [48] <https://www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/projectos/reforco-de-pilares-de-ponte-viaduto-sul-da-ponte-vasco-da-gama-lisboa-portugal> (28/05/ 2023)
- [49] <https://www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/projectos/reforco-de-estrutura-devido-incendio-centro-cultural-associacao-recreativa-e-cultural-das> (28/05/2023)
- [50] Juvandes, L.F.P.; Barbosa, R.M.T. - *Estruturas de madeira reforçadas com sistemas FRP análise da aderência entre materiais*. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN. Vol. 1646. p. 7078.
- [51] Juvandes, L.F.P. - *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 400 pp., 1999.
- [52] Juvandes, L.F.P. - *Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas*, Proc. 1as Jornadas de Materiais na Construção, 2011: p. 239-270.
- [53] Juvandes, L.F.P. - *Reabilitação e Reforço com Materiais Compósitos de FRP*, documentos de apoio a “Reforço e Reabilitação de Estruturas e Fundações” dos cursos de mestrado M.EC e MESTEC, FEUP.
- [54] Juvandes, L.F.P.; Marques, N.F.A.A. *Reforço de Estruturas por Colagem Exterior de Sistemas Compósitos de FRP - Manual de Procedimentos e de Controlo de Qualidade para Construção*. LEMC-JUV 004-2007, FEUP Edições, Porto, 354 pp, 2009.
- [55] Corradi, Marco *et al.* - *Local FRP reinforcement of existing timber beams*. Composite Structures. Vol. 258. (2021). p. 113363. ISSN: 0263-8223
- [56] Schober, *et al.* - *FRP reinforcement of timber structures*. Construction and building materials. Vol. 97. (2015). p. 106-118. ISSN: 0950-0618
- [57] 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, Rome, 56p.

- [58] NP EN 1990:2002 *Eurocódigo 0: Bases para o projeto de estruturas*
- [59] NP EN 1991-1-1:2009 *Eurocódigo 1: Ações em estruturas parte 1-1.*
- [60] NP EN 1998-1:2004 *Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos.*
- [61] Leyen, Ursula- *Construção em Madeira o Futuro da União Europeia*, Discurso de Estado da União Europeia, no Parlamento Europeu, Bruxelas, 2020. Disponível em <https://www.norgeshus.pt/discurso-do-parlamento-europeu-sobre-o-futuro-da-construcao/>
- [62] Zigler, Radek; Poloy, Marek- *Fire protection of timber structures strengthened with FRP materials*. Stavebni obzor. Civil Engineering Journal. Vol24 n°4 (2015). ISSN: 1805-2576
- [63] Acioly, D. A. M. -*Sistemas de Proteção dos Compósitos FRP às Exposições Térmicas e Extremas*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto (Portugal), 2022.
- [64] Cruz, D. M. R. - *Reforço de elementos estruturais de madeira com materiais compósitos de matriz polimérica*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. (Portugal), 2015.

Anexo A1

FOLHA DE CÁLCULO

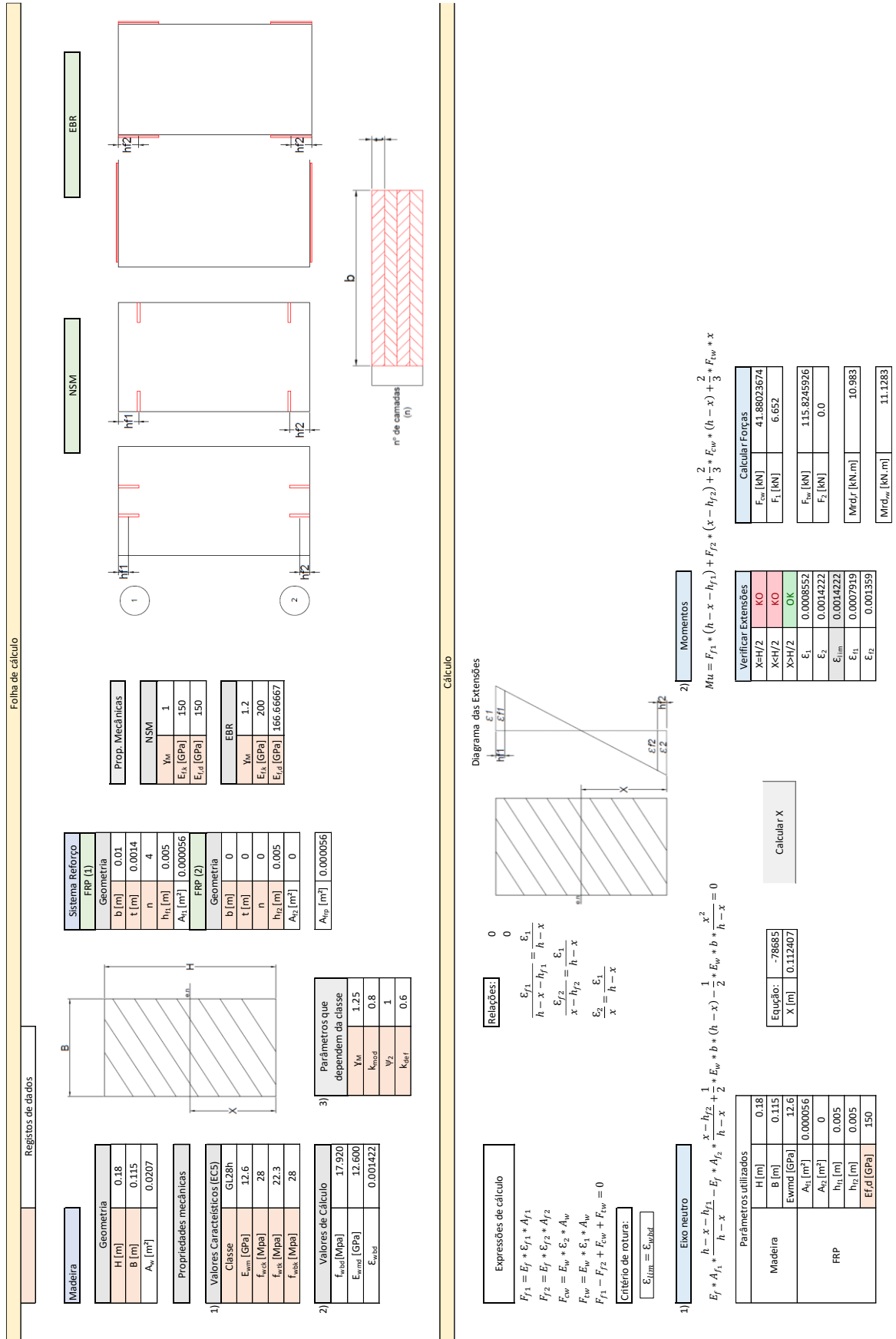


Figura A1.1 - Módulo de dados para o grupo MLC.

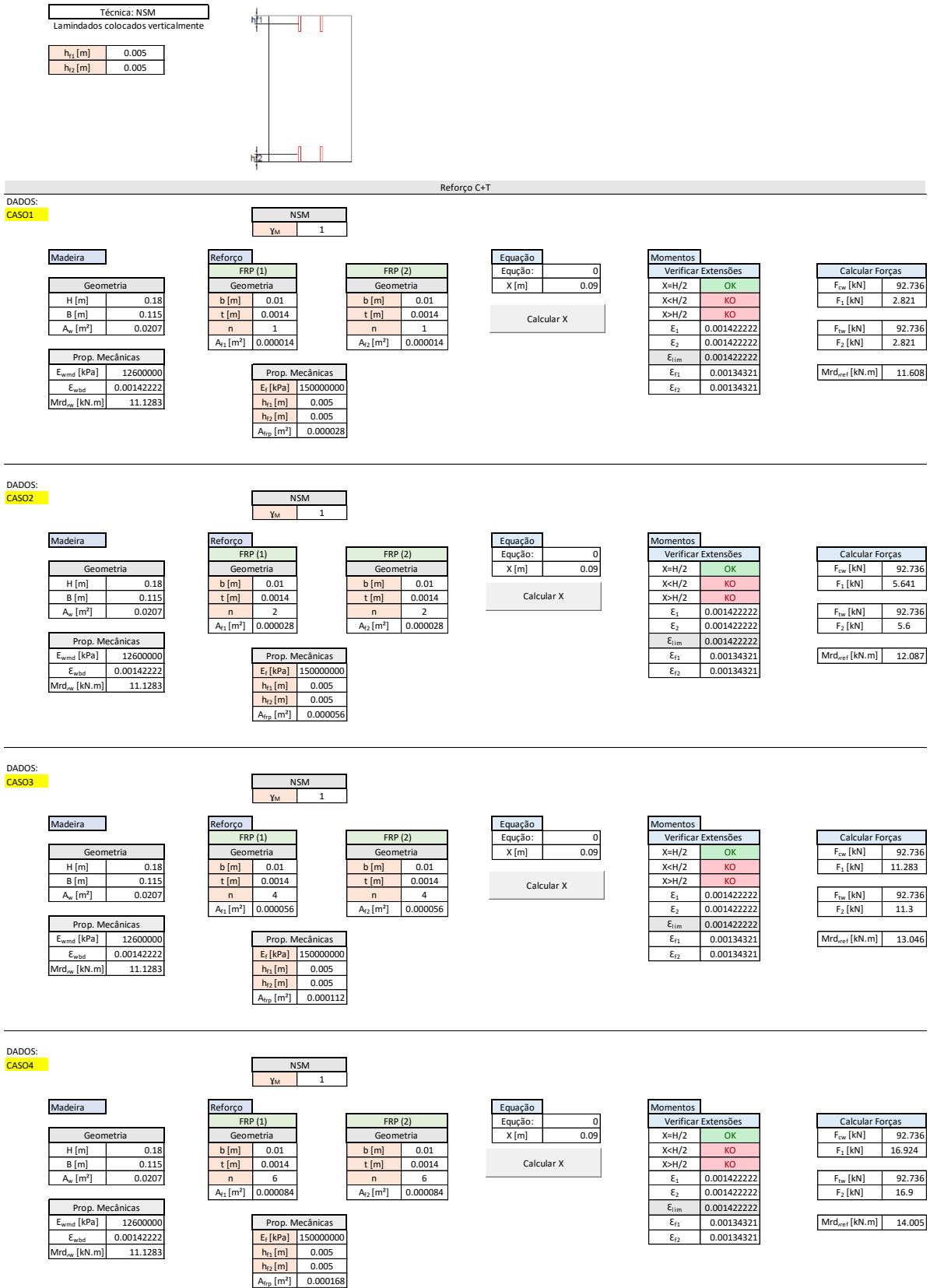


Figura A1.2 - Módulo de cálculo da série NSM-V, com geometria C+T, para o grupo MLC.

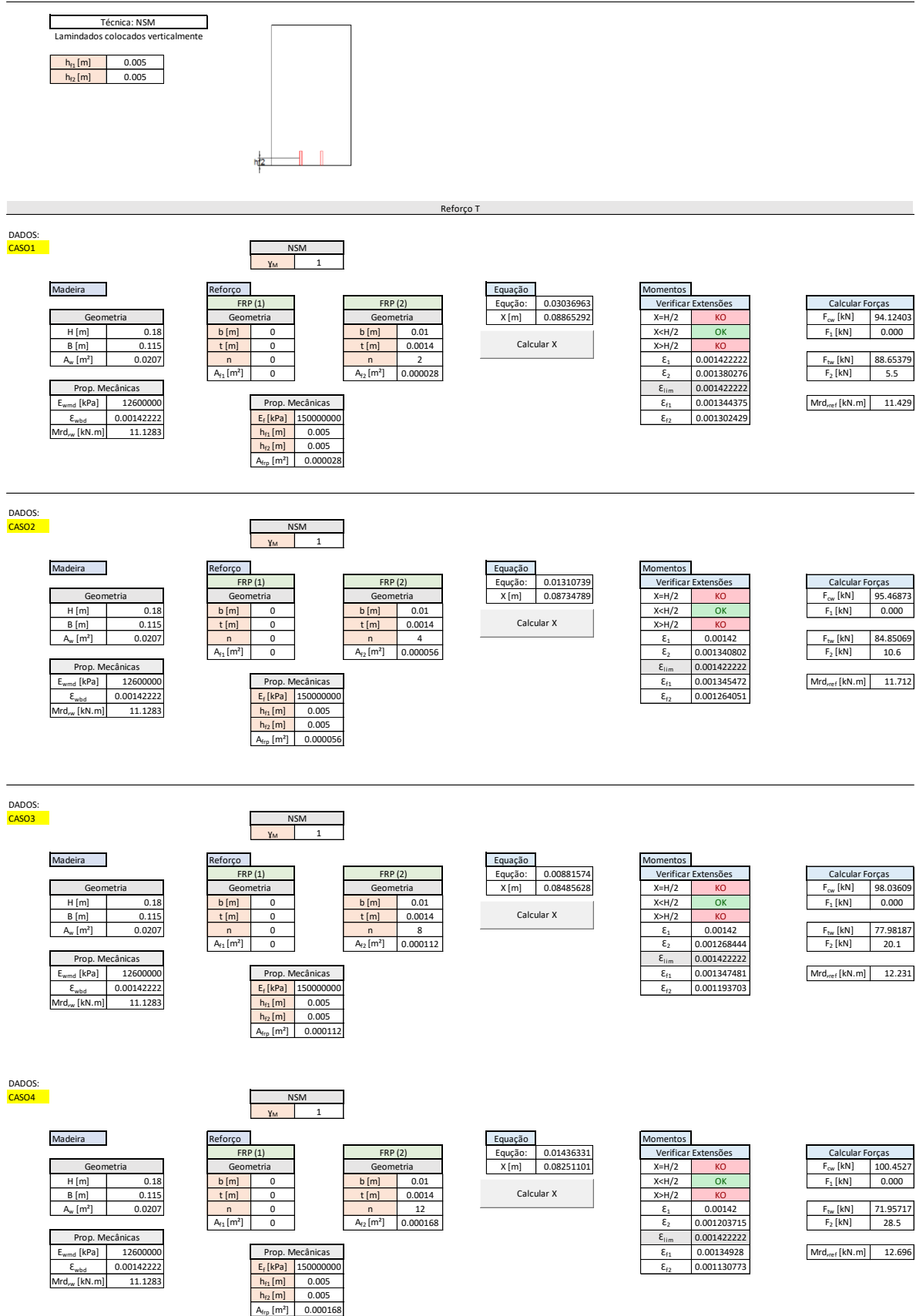


Figura A1.3 - Módulo de cálculo da série NSM-V, com geometria T, para o grupo MLC.

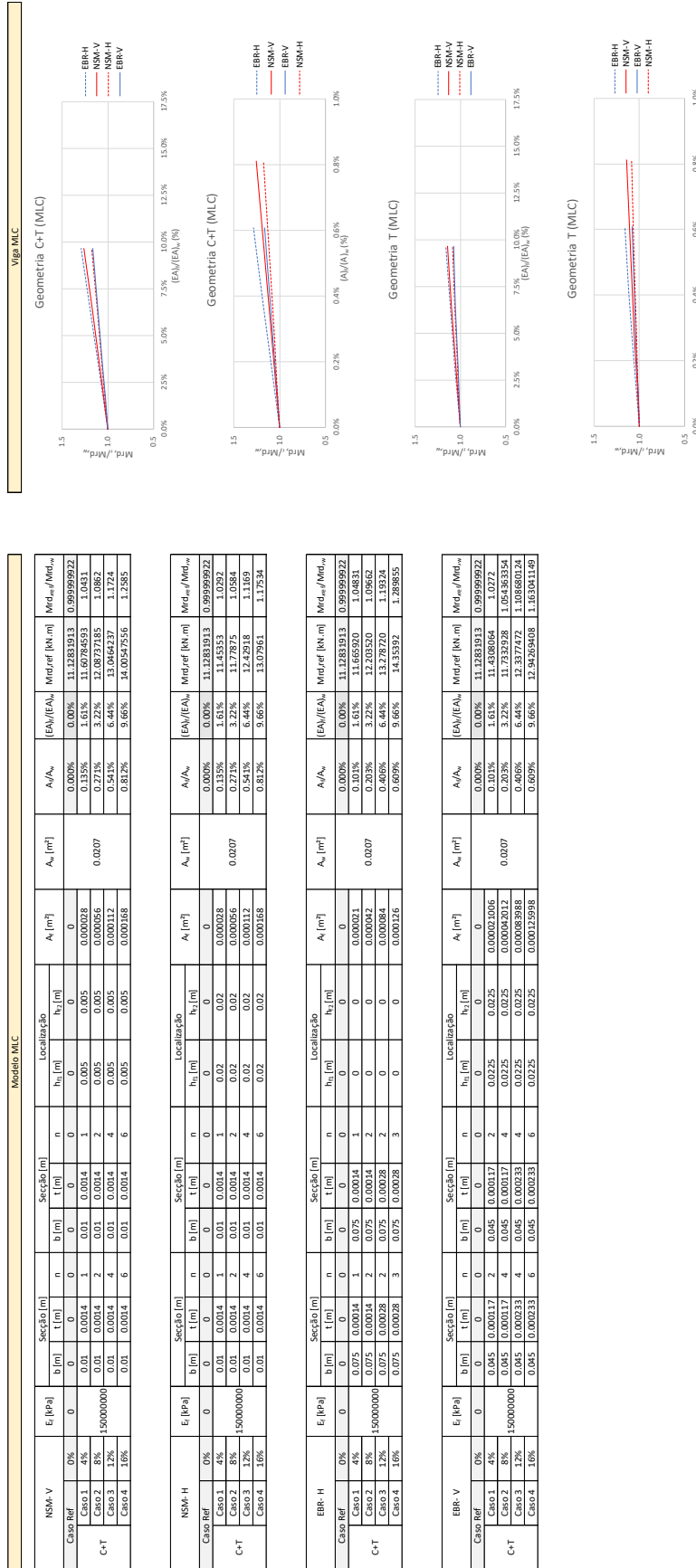


Figura A1.5 - Módulo de resultados das curvas ordenadas por desempenho das 4 técnicas do grupo MLC.

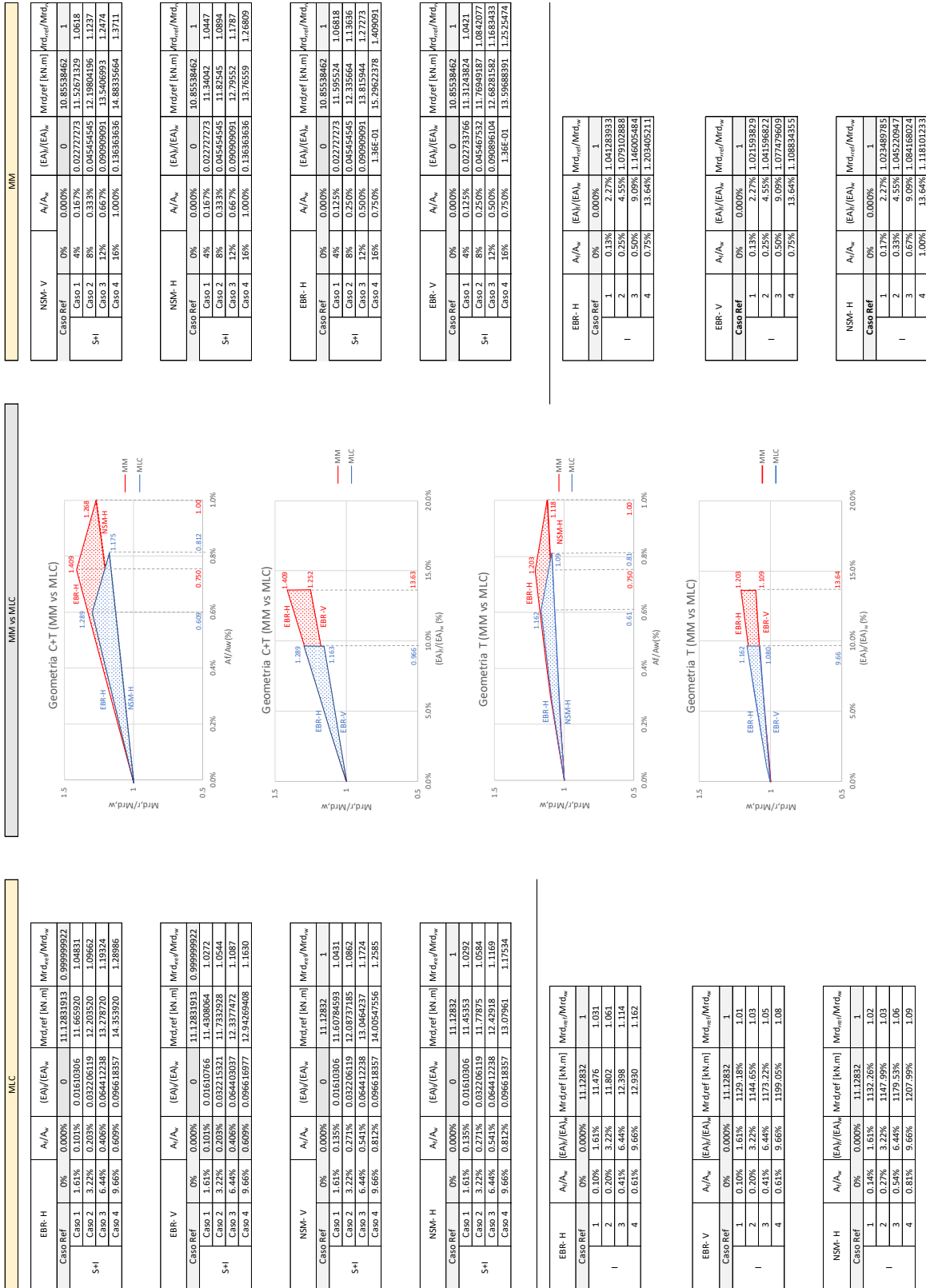


Figura A1.6 - Módulo de resultados das áreas de desempenho dos 2 grupos MM e MLC..

Anexo A2

RESULTADOS

Tabela A2.1 - Dados e resultados dos 38 modelos do grupo MM.

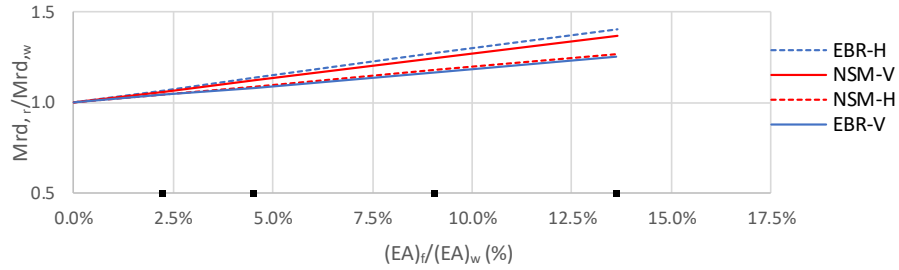
Modelos		Dados												Análise de Resultados									
Séries	NSM-V	Sistemas FRP												Madeira		FRP		Análise de parâmetros					
		Secção [m]			Secção [m]			Localização			Localização			E ₁	E ₂	ε _{t1}	ε _{t2}	A _i /A _w (%)	(EA) _i /(EA) _w (%)	Mrd _r [kN.m]	Mrd _{ref} /Mrd _w		
		b [m]	t [m]	n	b [m]	t [m]	n	h ₁ [m]	h ₂ [m]	h ₁ [m]	h ₂ [m]	A _i [m ²]	A _w [m ²]	ε ₁	ε ₂	ε _{t1}	ε _{t2}	A _i /A _w (%)	(EA) _i /(EA) _w (%)	Mrd _r [kN.m]	Mrd _{ref} /Mrd _w		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%	0.00%	10.855	1.000	
		0.01	0.0014	1	0.01	0.0014	1	0.005	0.005	0.005	0.005	0.00028	0.00028					0.17%	2.27%	11.527	1.062		
		0.01	0.0014	2	0.01	0.0014	2	0.005	0.005	0.005	0.005	0.00056	0.00056					0.33%	4.55%	12.198	1.124		
		0.01	0.0014	4	0.01	0.0014	4	0.005	0.005	0.005	0.005	0.00112	0.00112					0.67%	9.09%	13.541	1.247		
		0.01	0.0014	6	0.01	0.0014	6	0.005	0.005	0.005	0.005	0.00168	0.00168					1.00%	13.64%	14.883	1.371		
	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17%	2.27%	11.251	1.036		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33%	4.55%	11.614	1.070		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.67%	9.09%	12.258	1.129		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00%	13.64%	12.812	1.180		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%	0.00%	10.855	1.000		
		0.01	0.0014	1	0.01	0.0014	1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00028	0.00028					0.17%	2.27%	11.340	1.045		
		0.01	0.0014	2	0.01	0.0014	2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00056	0.00056					0.33%	4.55%	11.825	1.089		
		0.01	0.0014	4	0.01	0.0014	4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00112	0.00112					0.67%	9.09%	12.796	1.179		
		0.01	0.0014	6	0.01	0.0014	6	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00168	0.00168					1.00%	13.64%	13.766	1.268		
	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17%	2.27%	11.110	1.023		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33%	4.55%	11.346	1.045		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.67%	9.09%	11.769	1.084		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00%	13.64%	12.137	1.118		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%	0.00%	10.855	1.000		
		0.075	0.00014	1	0.075	0.00014	1	0	0	0	0	0.00021	0.00021					0.13%	2.27%	11.596	1.068		
		0.075	0.00014	2	0.075	0.00014	2	0	0	0	0	0.00042	0.00042					0.25%	4.55%	12.336	1.136		
		0.075	0.00028	2	0.075	0.00028	2	0	0	0	0	0.00084	0.00084					0.50%	9.09%	13.816	1.273		
		0.075	0.00028	3	0.075	0.00028	3	0	0	0	0	0.00126	0.00126					0.75%	13.64%	15.296	1.409		
	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13%	2.27%	11.304	1.041		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25%	4.55%	11.714	1.079		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50%	9.09%	12.440	1.146		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75%	13.64%	13.063	1.203		
	EXTRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.25%	40.91%	15.740	1.450		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%	0.00%	10.855	1.000		
		0.045	0.00012	2	0.045	0.00017	2	0.0225	0.0225	0.0225	0.0225	0.00021	0.00021					0.13%	2.27%	11.312	1.042		
		0.045	0.00012	4	0.045	0.00017	4	0.0225	0.0225	0.0225	0.0225	0.00042	0.00042					0.25%	4.55%	11.769	1.084		
		0.045	0.00023	4	0.045	0.00023	4	0.0225	0.0225	0.0225	0.0225	0.00084	0.00084					0.50%	9.09%	12.683	1.168		
		0.045	0.00023	6	0.045	0.00023	6	0.0225	0.0225	0.0225	0.0225	0.00126	0.00126					0.75%	13.64%	13.597	1.253		
	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13%	2.27%	11.090	1.022		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25%	4.55%	11.307	1.042		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50%	9.09%	11.696	1.077		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75%	13.64%	12.037	1.109		

Tabela A2.2 - Dados e resultados dos 38 modelos do grupo MLC.

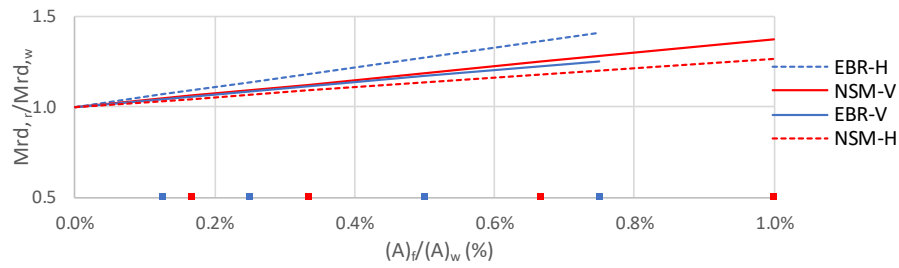
Modelos Sériés										Dados										Análise de Resultados																																																																																																													
NSM-V										Sistemas FRP										Madeira										FRP										Análise de parâmetros																																																																																									
S/Reforço										Seção [m]										Seção FRP										Localização										Localização										Localização										Localização																																																																					
C+T										b [m]										t [m]										n										h _{1p} [m]										h _{1z} [m]										h _{2z} [m]										h _{2z} [m]										h _{2z} [m]										h _{2z} [m]																																							
T										E _t [GPa]										A ₁ [m ²]										A ₂ [m ²]										A ₁ [m ²]										A ₂ [m ²]										A ₁ [m ²]										A ₂ [m ²]										A ₁ [m ²]										A ₂ [m ²]																																							
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0																													
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0																			
2										0.01										0.0014										1										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005																													
3										0.01										0.0014										2										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005																													
4										0.01										0.0014										4										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005										0.005																			
1										150										0										0										0										0										0										0										0										0										0																													
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0																			
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0																			
1										200										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0																			
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0																			
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
1										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
2										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
3										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
4										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									
EXTRA										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0										0									

Grupo MM

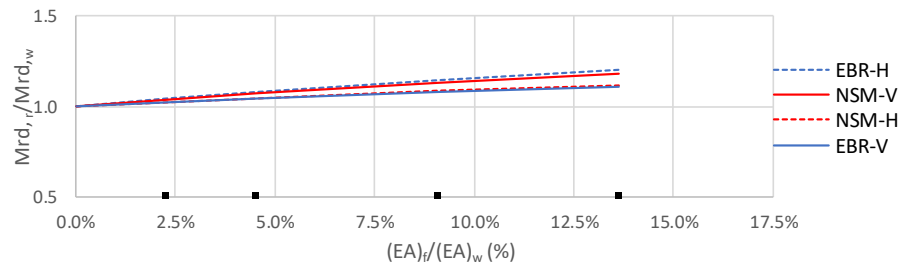
Geometria C+T (MM)



Geometria C+T (MM)



Geometria T (MM)



Geometria T (MM)

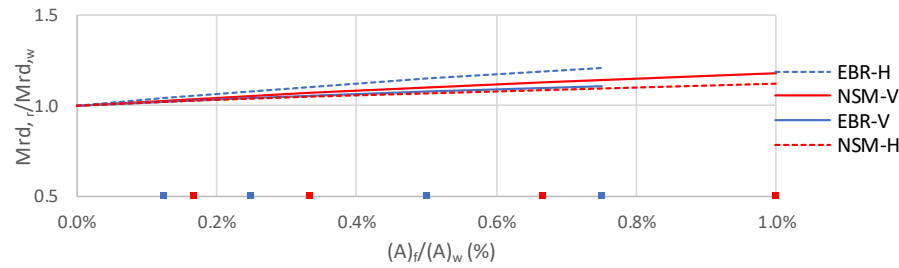


Figura A2.1 - Incremento de resistência à flexão em função da geometria e da percentagem do reforço para as 4 séries do grupo MM.

Viga MLC

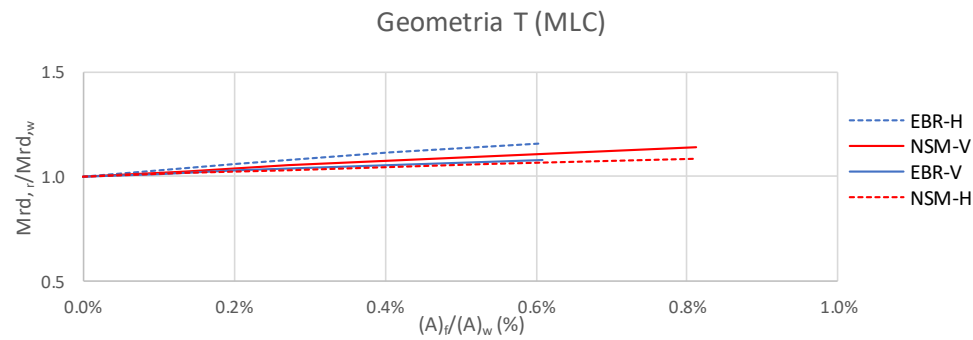
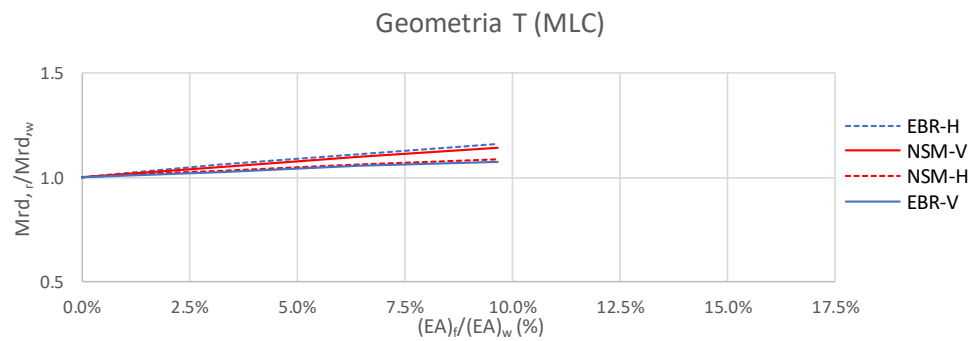
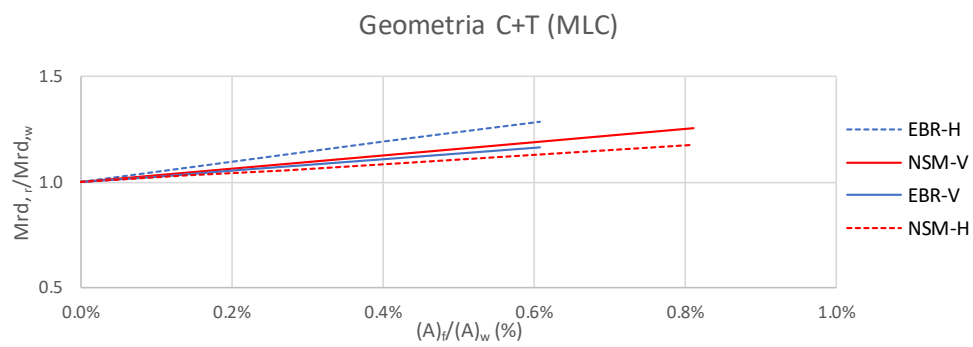
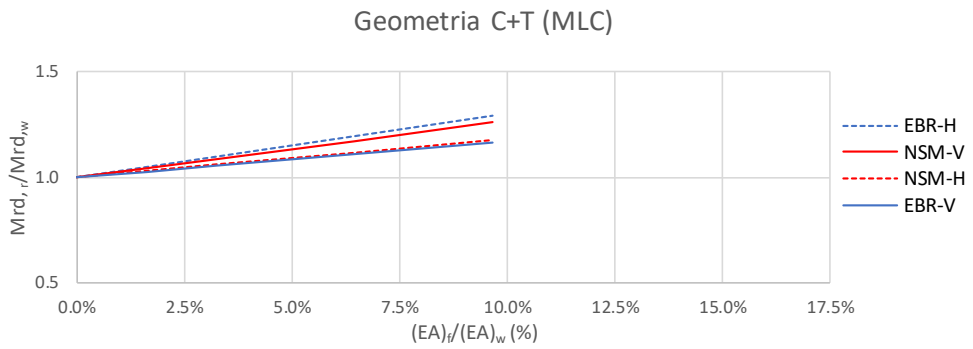


Figura A2.2 - Incremento de resistência à flexão em função da geometria e da percentagem do reforço para as 4 séries do grupo MLC.

