

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Lucas Cardoso Pereira Carneiro

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLUÇÕES DE REFORÇO EM
ELEMENTOS DE MADEIRA NA CONSTRUÇÃO**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICA DE SISTEMAS
COMPÓSITOS DE FRP**

Dissertação II do Mestrado em Reabilitação de Edifícios, na área de Especialização de Reabilitação Não Estrutural, orientada pelo Professor Doutor Carlos Eduardo de Jesus Martins e pela Professora Doutora Sandra Raquel de Sousa Monteiro e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021

AGRADECIMENTOS

Registo e expesso meu imenso reconhecimento e gratidão:

Aos meus orientadores Professor Doutor Carlos Eduardo Jesus Martins e Professora Doutora Sandra Raquel de Sousa Monteiro por todo o apoio que sempre ofereceram e pelo conhecimento transmitido durante a realização deste trabalho.

À S&P Clever Reinforcement Ibérica, na pessoa da Eng.^a Joana Pereira e Eng. Filipe Dourado, pela disponibilidade na colaboração através do fornecimento dos FRP's necessários e o acompanhamento na aplicação dos mesmos.

Ao SerQ – Centro de Inovação e Competência da Floresta – por propiciar as condições para execução do trabalho experimental e por conceder os provetes de madeira utilizados no estudo.

Aos meus pais, Francisco Augusto e Wandete Fátima e meu irmão, Thiago Cardoso, por serem a estrutura familiar necessária para que todos os meus sonhos sejam realizados.

Ao meu avô, Ausier Mattos Cardoso, que ainda faz-se presente em minha vida por ser uma das minhas maiores inspirações.

A todos os amigos do SerQ pelo companheirismo e colaboração em todos os âmbitos, em especial: André Dias, André Marques, Fabiana Moritani, Felipe Alcides e Suzana Arleno.

Aos meus amigos: Marco Antonio Santux e Vitor Pulcherio, por todo o incentivo transmitido a mim, tornando todo o processo de formação mais valioso.

À minha namorada Amanda Costa Machado, a pessoa que esteve ao meu lado durante toda essa jornada, oferecendo apoio e incentivo incondicional tornando este trabalho possível.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal a análise experimental das propriedades mecânicas de vigas de madeira de Criptoméria (*Cryptomeria japonica* D. Don) reforçadas com materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra. Mais especificamente, concentrou-se em analisar a rigidez e o momento resistente e desenvolver as análises teóricas para a previsão da rigidez à flexão. Para além disso, verificar o estado limite de serviço de vigas de madeira reforçadas com materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra (Fiber Reinforced Polymers, FRP) em pavimentos. Por fim, desenvolver o estudo para avaliação do custo dos materiais do sistema de reforço e de execução, com base nos resultados da análise teórica das lajes.

Este trabalho dividiu-se em duas principais campanhas, teórica e experimental. Para a campanha teórica foi feita a análise para três tipos de fibra e dois sistemas de reforço FRP, visando avaliar os ganhos expectáveis de rigidez à flexão em vigas de Criptoméria. Os materiais considerados para o reforço de FRP foram de aramida, carbono e vidro, no âmbito das mantas, e de carbono para os laminados. Considerou-se, também, a avaliação da rigidez à flexão em função da variação do número de camadas para os reforços com manta. Para tal, foi adotada uma variação de uma a cinco camadas.

Ao que tange a campanha experimental, utilizou-se a espécie Criptoméria, primeiramente sem reforço para caracterizar a matéria-prima ao nível de rigidez. Após a aplicação de reforço com FRP (manta ou laminado), foram avaliados os mesmos provetes para perceção dos ganhos ao nível de rigidez de flexão e momento resistente. Foram considerados seis grupos de provetes, cujas variáveis foram: i) comprimento de reforço, ii) sistema FRP e iii) número de camadas. Considerou-se uma técnica de colagem para todas as tipologias, sendo esta a EBR, com a utilização de duas resinas epóxis.

Ainda, a nível teórico, foram avaliadas lajes de madeira de criptoméria com e sem reforço à luz do EC 5 (EN 1995-1-1, 2004). Utilizaram-se, nesta análise, os resultados de rigidez obtidos na campanha experimental para a Criptoméria reforçada com FRP. Com os resultados obtidos, analisou-se o custo de cada pavimento, tendo uma comparação entre o não reforçado e os reforçados.

Palavras-chave: Reforço estrutural; Estruturas de madeira; Polímeros reforçados com fibras; Avaliação experimental; Avaliação analítica;

ABSTRACT

The present work has as main objective an experimental analysis of the mechanical properties of wooden beams reinforced with composite materials of polymeric matrix reinforced with fiber. More specifically, focus on analyzing stiffness and flexural strength and develop theoretical analyzes for predicting flexural stiffness. In addition, check the service and ultimate limit states of FRP reinforced wooden beams. Finally, develop the study to evaluate the usual materials of the reinforcement system based on the results of the theoretical analysis of the slabs.

This work, then, was divided into two main campaigns, theoretical and experimental. For a theoretical campaign, an analysis was carried out for three types of fiber and two FRP reinforcement systems, to assess the expected gains in flexural stiffness in cryptomeria beams. The materials considered for reinforcing FRP were aramid, carbon and glass, within the blankets, and carbon for laminates. It was also considered an evaluation of the flexural stiffness it was used as a function of the variation in the number of layers for reinforcements with blanket. For that, it uses the variation of one to five layers.

For experimental campaign, the Cryptomeria species was used, primarily without reinforcement, to characterize the raw material in terms of stiffness. After the application of reinforcement with FRP (sheet or laminate), the same specimens were evaluated for the perception of gains in terms of bending stiffness and resistance moment. Six groups of specimens were considered, whose variables were: i) reinforcement length, ii) FRP system and iii) number of layers. A bonding technique was considered for all types, this being the EBR, with the use of two epoxy resins.

Also, at the theoretical level, cryptomeria wood slabs with and without reinforcement were evaluated according to EC 5 (EN 1995-1-1, 2004). The stiffness results obtained in the experimental campaign for, Cryptomeria reinforced with FRP were used in this analysis. With the results, obtained, the cost of each floor was analyzed, having a comparison between the unreinforced and the reinforced ones.

Keywords: Structural reinforcement; Timber structures; Fibre reinforced polymer; Experimental assessment; Analytical assessment.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Considerações introdutórias	1
1.2.	Objetivos da dissertação	2
1.3.	Estrutura da dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	Introdução	4
2.2.	Madeira.....	4
2.2.1.	Propriedades físicas e mecânicas da madeira	6
2.3.	Fibras reforçadas com polímeros.....	7
2.3.1.	Fibras	8
2.3.2.	Resinas	8
2.3.3.	Sistemas de FRP	11
2.3.4.	Métodos de aplicação.....	12
2.4.	Vigas de madeira reforçadas com FRP.....	14
2.4.1.	Incremento da rigidez	15
2.4.2.	Incremento da capacidade de carga	17
2.4.3.	Ligação entre a madeira e o FRP	20
2.4.4.	Tipos de rotura	22
3	ANÁLISES TEÓRICAS DE VIGAS DE MADEIRA REFORÇADAS COM FRP.....	25
3.1.	Enquadramento	25
3.2.	Previsão da rigidez à flexão ($EI_{teo,r}$)	25
3.2.1.	Método de previsão da rigidez à flexão	25
3.2.2.	Propriedades dos materiais para previsão da rigidez à flexão	26
3.2.3.	Resultados e análises:	27
4	CAMPANHA EXPERIMENTAL DE VIGAS MACIÇAS DE MADEIRA	36
4.1.	Introdução	36
4.2.	Matéria-prima	36
4.2.1.	Procedimento de seleção da amostra	36
4.2.2.	Caracterização não destrutiva da amostra.....	37
4.2.3.	Ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático	38
4.3.	FRP's	40
4.3.1.	Caracterização dos produtos de reforço	40

4.3.2. Procedimento de aplicação do reforço.....	40
4.3.3. Caracterização mecânica dos provetes reforçados.....	43
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES.....	45
5.1. Introdução.....	45
5.2. Resultados experimentais.....	45
5.3. Análises dos resultados de rigidez à flexão.....	50
5.4. Análises dos resultados de momento resistente.....	55
5.5. Análises dos resultados de tensão.....	57
6 AVALIAÇÃO TEÓRICA DE PAVIMENTOS DE MADEIRA REFORÇADOS COM FRP.....	61
6.1. Introdução.....	61
6.2. Métodos e materiais.....	61
6.3. Resultados.....	62
7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	64
7.1. Principais conclusões sobre a campanha experimental.....	64
7.2. Principais conclusões sobre as análises teóricas das lajes.....	64
7.3. Propostas de novos estudos.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXO A – Resultados dos ensaios a flexão dos provetes reforçados.....	71
ANEXO B – Resultados da análise do ELS para os pavimentos de madeira e detalhes da composição dos preços de mão de obra.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características do MLC comparada com a da madeira maciça (André, 2006 apud Carling 2001).....	6
Figura 2 - Sistemas de FRP (Juvandes, 2011).....	12
Figura 3 – Exemplo de secção transversal de uma secção de madeira reforçada com o método EBR e NSM (Adaptado de Wang et al., 2020).....	13
Figura 4 – Utilização do método MF-FRP em vigas de madeira (Schorer et al., 2008).	14
Figura 5 – Secção transversal das vigas com indicação de cada grupo e posições dos reforços (Jankowski et al, 2010).....	19
Figura 6 – Orientação das colagens do FRP na secção de madeira (Adaptado de Wan et al., 2010).....	20
Figura 7 - Modos de rotura de elementos de madeira reforçados com FRP (Balseiro, 2007, apud Martín et al., 2000).	23
Figura 8 – Detalhe dos modos de rotura de elementos de madeira com FRP (Adaptado de Wang et al, 2020).....	24
Figura 9 – Gráfico do ganho de rigidez à flexão por camada adicionada de reforço.....	31
Figura 10 - Gráfico da EI_{teor} vs ρ e os valores mínimos de rigidez para as classes de resistência (secção 100 x 200 mm ² e E=5918 MPa).	32
Figura 11 – Ensaio dinâmico com a utilização do Timber Grader MTG.....	37
Figura 12 – Layout de ensaio para avaliação do módulo de elasticidade local e global.	38
Figura 13 - Procedimentos de aplicação do sistema de laminados de FRP.....	42
Figura 14 – Procedimentos de aplicação do sistema de mantas de FRP.....	43
Figura 15 – Detalhe da posição dos extensómetros na secção transversal dos provetes.....	44
Figura 16 - Gráfico força vs deslocamento das vigas reforçadas.....	46
Figura 17 – Rotura da ligação adesivo/FRP (grupo 1).	47
Figura 18 – Rotura da madeira (a) e detalhe da rotura logo após o FRP (b) (grupo 2).....	47
Figura 19 – Rotura do FRP próximo ao ponto de carga (a) e detalhe da rotura do FRP (b) (grupo 3).	48
Figura 20 – Rotura logo após o reforço de FRP (a) e detalhe da rotura (b) (grupo 4).	48
Figura 21 – Rotura a meio vão do FRP (a) e o detalhe da rotura (b) (grupo 5).	49
Figura 22 – Análise da rigidez à flexão dos provetes não reforçados em comparação com os valores calculados de rigidez para as classes de resistência C18 e C24 da EN 338 (CEN, 2003).....	54
Figura 23 – Rigidez dos provetes reforçados em relação a rigidez mínima das classes de resistência da EN 338 (CEN, 2003).	55
Figura 24 – Comparação dos momentos resistentes dos provetes reforçados com os valores mínimos, médios e máximos pelo SerQ (2019).	56
Figura 25 – Gráfico força vs extensão do provete 68.....	59
Figura 26 - Gráfico força vs extensão do provete 40.	59
Figura 27 - Gráfico da distribuição das tensões pela espessura da secção em diferentes percentagens de carga (proвете 44 – grupo 1).....	60
Figura 28 - Gráfico da distribuição das tensões pela espessura da secção em diferentes percentagens de carga (proвете 32).	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados comparativos da tensão resistente e o peso volúmico de materiais (Adaptado de Duarte, 2004).	4
Tabela 2 - Valores médios e característicos das propriedades mecânicas da madeira de Pinheiro Bravo (Adaptado de NP 4544 e Balseiro, 2007 apud, Albino, 1996).....	7
Tabela 3 – Propriedades de sistemas de FRP unidirecionais (Adaptado do ACI, 2008).	8
Tabela 4 – Propriedades das resinas termoendurecíveis (Adaptado de Newhook e Svecova, 2007).	9
Tabela 5 - Propriedades das resinas termoplásticas (Adaptado de André, 2006).....	9
Tabela 6 - Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural esperado em níveis variáveis de exposição ambiental (Adaptado de Vick, 1999).....	10
Tabela 7 - Materiais constituintes dos Sistemas de FRP (Adaptado de Juvandes, 2011).	12
Tabela 8 – Dimensões das vigas e número de provetes não reforçados (Adaptado de Borri et al., 2017).....	16
Tabela 9 - Dimensões das vigas, número de provetes, percentagem de reforço e tipo de reforço aplicado (Adaptado de Borri et al., 2017).....	16
Tabela 10- Especificações, propriedades e dimensões dos reforços da S&P.....	27
Tabela 11 - Especificações, propriedades e dimensões dos reforços da Sika.	27
Tabela 12 - Resultados para módulo de elasticidade 5918 MPa de secção transversal de 100 x 200 mm ² reforçada com mantas e laminados.	28
Tabela 13 - Resultados de rigidez de flexão para elementos de madeira com módulo de elasticidade de 5918 MPa e secção transversal de 100 x 200 mm ² reforçados com mantas de fibra de vidro, aramida, carbono e laminados de carbono.....	29
Tabela 14 – Rigidez calculadas para as classes de resistência C18 e C24 para uma secção transversal 100 x 200 mm ²	31
Tabela 15 – Relação entre a rigidez calculada para as classes de resistência C18 e C24 e a dos elementos de madeira reforçados.	33
Tabela 16 – Variação da rigidez em relação ao módulo de elasticidade da madeira com elementos reforçados com C-sheet 640.	34
Tabela 17 – Características e propriedades da matéria-prima selecionada.	39
Tabela 18 -Principais propriedades e dimensões dos materiais do sistema de reforço com FRP utilizado.	40
Tabela 19 – Características e propriedades de cada grupo de provetes reforçado.	41
Tabela 20 – Resultados da campanha experimental dos provetes reforçados.....	45
Tabela 21 – Valores mínimos, médios e máximos das propriedades e dimensões dos provetes da campanha experimental do SerQ (2019).	50
Tabela 22 – Variação da rigidez à flexão experimental entre os provetes reforçados e não reforçados.	50
Tabela 23 – Análises da rigidez à flexão teórica dos provetes reforçados e experimentais dos provetes reforçados e não reforçados.	52
Tabela 24 – Média da rigidez à flexão teórica reforçada, experimental não reforçada e experimental reforçada.	52
Tabela 25 – Comparação da rigidez à flexão entre reforços com laminados e mantas.	53
Tabela 26 – Análise da variação de comprimento e número de camadas de reforço no momento resistente.	57

Tabela 27 – Tensões calculadas nos provetes avaliados.	58
Tabela 28 – Limites de deformação de vigas EC 5 (1995-1-1, 2004).....	61
Tabela 29 – Dimensões e propriedades das vigas de Criptoméria para a análise teórica dos pavimentos de madeira.	62
Tabela 30 – Análise das deformações e espaçamentos entre vigas para os pavimentos de criptoméria.....	63
Tabela 31 – Análise do número de vigas e custo do material de reforço com sistema FRP....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

$(F_2 - F_1)$	Diferença entre as forças aplicadas
$(w_2 - w_1)$	Diferença entre as deformações medidas
A	Área da secção transversal
a	Distância entre o ponto de carga e o apoio mais próximo
b	Largura da secção transversal
b_w	Largura do provete de madeira
b_{frp}	Largura do FRP
c_w	Comprimento do provete de madeira
c_{frp}	Comprimento do FRP
E	Módulo de elasticidade
E_{dyn}	Módulo de elasticidade dinâmico
E_{frp}	Módulo de elasticidade do FRP
EI	Rigidez à flexão
$EI_{exp,nr}$	Rigidez à flexão experimental de provetes não reforçados
$EI_{exp,r}$	Rigidez à flexão experimental de provetes reforçados
EI_{min}	Rigidez à flexão mínima
$EI_{teo,nr}$	Rigidez à flexão teórica de provetes não reforçados
$EI_{teo,r}$	Rigidez à flexão teórica de provetes reforçados
$E_{m,g}$	Módulo de elasticidade global
$E_{m,l}$	Módulo de elasticidade local
$E_{méd}$	Módulo de elasticidade médio
F	Força aplicada
f	Tensão resistente
f_m	Resistência à flexão
$F_{máx}$	Força máxima aplicada pelo atuador
f_r	Frequência de vibração
G	Módulo de distorção
h	Altura da secção transversal

h_w	Altura da secção transversal do provete de madeira
h_{frp}	Espessura do FRP
I	Momento de inércia
k_{def}	Coefficiente para deformações das cargas de longa duração
l	Comprimento total do vão
$M_{r,nr}$	Momento resistente dos provetes reforçados
$M_{r,r}$	Momento resistente
n	Fator de transformação da secção transversal
s	Espaçamento entre vigas
S	Espaçamento entre os eixos das vigas
u_c	Deformação por contra flecha
u_{creep}	Deformação por fluência
$u_{fin,G}$	Deformação instantânea para as ações permanentes
$u_{fin,Q}$	Deformação instantânea para as ações para as ações variáveis principais
$u_{net,fin}$	Deformação obtida com o somatório da deformação instantânea e a de fluência
W_{fin}	Limite para deformação final
W_{inst}	Limite para deformação instantânea
$W_{net,fin}$	Limite para deformação final sem acréscimo da contra flecha
y	Distância entre o centro geométrico do material e o seu contorno
α	Porcentagem de reforço da secção transversal
$\Delta_{m\acute{a}x}$	Deformação máxima
λ	Relação entre o comprimento do FRP e o vão de ensaio
ρ	Massa volúmica
ρ_k	Massa volúmica característica
ψ_2	Coefficiente para o valor de combinação das ações quase permanentes

1 INTRODUÇÃO

1.1. Considerações introdutórias

A madeira apresentou-se como uma solução construtiva de protagonismo nas edificações portuguesas até o início dos anos 30 do século XX, sofrendo um decréscimo no seu uso devido ao surgimento de novos materiais como por exemplo o betão armado. Vicente (2008), na avaliação do edificado antigo da Baixa de Coimbra, destaca a presença de elementos de madeira nas estruturas de suporte de coberturas (60%) e nos suportes dos pavimentos elevados (mais de 70%). Seguindo nesta avaliação das edificações antigas, Sousa (2016) descreve que as estruturas das coberturas são exclusivamente concebidas com elementos de madeira e, ao nível dos pavimentos, há dois tipos construtivos presentes, o pavimento de madeira, sendo estrutura e revestimento deste material, e estrutura de alvenaria de pedra ou tijolo.

Ocorre que no âmbito das estruturas antigas, o envelhecimento natural, carga excessiva, ataques biológicos, entre outros fatores, geram a necessidade de reabilitação dos elementos de madeira. Porém, o Decreto-Lei n.º 95/2019 prevê, em um dos seus princípios, a preservação do preexistente, objetivando a preservação histórica dos edifícios. Desta forma, muitas soluções de reforço ficam à margem desta previsão legal, por conta do fator estético e arquitetónico.

No tocante as novas estruturas, a utilização deste material justifica-se também nos dias de hoje, mesmo com o surgimento de novos materiais. Com isso, a própria madeira reinventou-se com o advento de novos processos de fabricação e novos produtos. Neste sentido, Wiemann (2008) apresenta características únicas da madeira, como elevada relação resistência/peso, reduzido consumo energético para a sua produção e a sua abundância tornaram-na um material de fonte natural servindo para residências e outras estruturas. Para além destas, destaca-se também a reparação de fácil execução e possibilidade de combinação com outros tipos de estruturas.

Buscando a introdução da espécie *Criptoméria* (*Criptoméria japónica* D. Don) como um produto para a construção de novas estruturas, o Diretório Geral de Recursos da Floresta (DRRF, 2020), afirma que o Governo Regional dos Açores possui um sistema de gestão das florestas, o que ajuda a promover, incentivar e modernizar o setor de base florestal. Porém, algumas condicionantes limitam esta introdução, mais especificamente ao nível das propriedades mecânicas e massa volúmica.

Para o reforço de estruturas de madeira alguns materiais já possuem notoriedade, como os varões de aço, chapas de aço e resinas. Porém, estas técnicas muitas vezes resultam em um impacto visual, pelo acréscimo de um novo elemento, mais especificamente no caso do edificado antigo. Neste contexto, os FRP's apresentam-se como uma potencial solução, visto que este possui elevado módulo de elasticidade, resistência à corrosão e reduzido impacto visual, quando comparado com outras soluções. Esta última característica faz com que este material se destaque como uma possível solução para as estruturas antigas.

O reforço com FRP é uma solução já consagrada no âmbito das estruturas de betão, o que não ocorre nas estruturas de madeira. Neste seguimento, o histórico de reforço com estruturas de madeira ainda é escasso.

1.2. Objetivos da dissertação

Este trabalho de investigação tem como objetivo a valorização da espécie *Criptoméria* no mercado da construção através do reforço com FRP. Com isso, potencializar o uso desta espécie ao nível das novas construções e, alternativamente, as construções antigas, abrangendo o mercado da reabilitação. Para tal, é feita a análise das propriedades mecânicas de vigas de *Criptoméria* reforçadas com FRP com a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), especificamente a rigidez à flexão e momento resistente.

Para tal, realizou-se, previamente, uma análise teórica para a previsão da rigidez a flexão com 15 produtos comercialmente disponíveis FRP, que contemplaram o recurso a laminados e a manta de fibra de carbono. Esta análise tem como objetivo a verificação da eficiência desta técnica de reforço e a verificação das soluções mais eficientes. Logo após, definiu-se os materiais para a campanha experimental, que consiste na realização de ensaio de flexão estática para determinação das propriedades supracitadas. Na sequência, utilizou-se dos resultados experimentais para a avaliação teórica do estado limite de serviço (ELS) de pavimentos de madeira. Por fim, avaliou-se o custo destas soluções frente a um pavimento de madeira sem reforço.

Desta forma, apresenta-se a seguir o detalhamento dos objetivos em cada fase realizada no trabalho:

- i. Análise teórica para previsão da rigidez à flexão:
 - a) Avaliação da rigidez teórica dos provetes não reforçados;
 - b) Avaliação do potencial de acréscimo de rigidez à flexão dos provetes com reforço;
 - c) Mensuração do potencial acréscimo de rigidez com a utilização de múltiplas camadas de reforço;
 - d) Avaliação dos reforços que apresentam melhores resultados.

- ii. Campanha experimental:
 - a) Avaliação da rigidez à flexão dos provetes não reforçados;
 - b) Avaliação da rigidez à flexão e momento resistente para os provetes reforçados;
 - c) Análise da eficiência do modelo de previsão teórico da rigidez a flexão para cada sistema FRP adotado nos provetes reforçados;
 - d) Verificação do comportamento à rotura da *Criptoméria* reforçada com cada sistema FRP adotado nos provetes reforçados;
 - e) Verificação da influência da variação do comprimento e do número de camadas nas propriedades avaliadas.

- iii. Análise teórica de pavimentos de madeira reforçadas com FRP:
 - a) Verificação da eficiência do acréscimo de rigidez à flexão no cálculo do ELS;
 - b) Análise do custo dos materiais e da mão de obra para o reforço FRP em pavimentos de *Criptoméria*.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação divide-se em 6 capítulos, conforme a distribuição abaixo:

No capítulo 1 descreve-se a temática da dissertação em conjunto com os objetivos e estrutura do trabalho.

No capítulo 2 expõem-se informações sobre os materiais que são de interesse na campanha experimental da presente dissertação. São apresentadas as principais propriedades de algumas espécies de madeira, das principais fibras utilizadas nos FRP's e resinas do sistema de reforço FRP, assim como as técnicas de reforço. Apresenta-se também alguns estudos sobre vigas de madeira reforçadas com FRP.

No capítulo 3 apresenta-se o modelo teórico para a previsão da rigidez à flexão de provetes de madeira reforçados com FRP. Para tal, descreve-se a metodologia, os materiais e suas principais características utilizadas. Por fim, são apresentados os resultados obtidos com estes parâmetros.

No capítulo 4 descreve-se a campanha experimental das vigas de madeira maciça reforçadas com FRP. Desta forma, é descrita a metodologia adotada para a realização dos ensaios à flexão para a caracterização dos provetes, reforçados e não reforçados, para obtenção da rigidez e momento resistente. Expõem-se também, a metodologia utilizada para a avaliação da rigidez, as propriedades dos materiais utilizados, as técnicas de colagem dos FRP e as roturas ocorridas nos provetes. Assim, conclui-se este capítulo com a apresentação dos resultados de momento resistente e rigidez à flexão dos provetes.

No capítulo 5 realiza-se a análise teórica de pavimentos de madeira. Para tal, apresenta-se a metodologia para a avaliação do ELS e os parâmetros normativos para esta análise, baseados no EC 5 (EN 1995-1-1, 2004). Demonstra-se as propriedades e os materiais utilizados para tais avaliações, para por fim, expor os resultados obtidos. Concluiu-se o capítulo com a exposição dos resultados para pavimentos de madeira maciça e a análise de custo dos materiais e de mão de obra para execução destas.

No capítulo 6 são elencadas as principais conclusões sobre o trabalho e apresentadas algumas propostas de trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Pretende-se neste capítulo, no âmbito das madeiras, apresentar algumas vantagens do material estrutural, frente ao betão armado e ao aço, apresentando alguns derivados da madeira e propriedades mecânicas de espécies de madeiras de destaque em Portugal. Relativo aos FRP's, apresenta-se alguns exemplos de fibras e algumas de suas propriedades mecânicas, assim como é feito para as resinas. Além disto, demonstram-se alguns dos sistemas de FRP e os métodos de aplicação destes. Por fim, são apresentados alguns breves resumos de estudos sobre vigas de madeira reforçadas com FRP, onde são apresentadas avaliações sobre a rigidez à flexão, variações na capacidade de carga, fatores que influenciam a ligação FRP-madeira e os modos de rotura deste reforço.

2.2. Madeira

A madeira é um material notoriamente reconhecido na construção civil. A sua utilização teve diminuição desde o surgimento de outras soluções, como o aço e o betão armado. Porém, a madeira quando comparada com outros materiais com utilização estrutural na construção civil, tais como o aço e o betão, a madeira destaca-se de forma positiva. Duarte (2004), destaca como principal vantagem a relação entre propriedades de resistência (f) e massa volúmica do material (ρ), para demonstrar a razão entre as duas propriedades (f/ρ). Esta razão define-se como resistência específica e, em conjunto com as propriedades supracitadas, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados comparativos da tensão resistente e o peso volúmico de materiais (Adaptado de Duarte, 2004).

Material	Consumo energético	ρ	f	f/ρ
	(MJ/m ³)	(kN/m ³)	(MPa)	
Betão (C20)	1920	24,0	20	0,83
Aço A400	234000	78,0	400	5,13
Madeiras resinosas (C24)	600	4,2	24	5,71
Madeiras folhosas (D50)	600	7,8	50	6,41

Para além dessas vantagens, Falk (2010), analisou sobre a ótica da sustentabilidade. Descrevendo que ao contrário de materiais e produtos à base de combustíveis fósseis, a floresta é um recurso renovável e, com gestão, um fluxo de produtos de madeira pode ser mantido indefinidamente.

Todas essas características da madeira fazem com que ela seja um material apto ao uso estrutural, porém a heterogeneidade do material e os defeitos naturais como os nós, exigem que estes sejam analisados quanto as propriedades físicas e mecânicas para uma melhor utilização e eficaz.

Com o desenvolvimento tecnológico, a madeira passou a ter novos produtos, ampliando a gama de soluções disponíveis no mercado. Estes produtos surgem da necessidade de redução da heterogeneidade e dos defeitos naturais da madeira para poder aumentar e otimizar o seu uso na construção. Alguns exemplos destes produtos derivados de madeira são:

- i. Madeira lamelada colada (MLC);
- ii. Madeira lamelada cruzada (*cross laminated timber*, CLT);
- iii. Placas de OSB (*oriented strand board/rimboard*);
- iv. Vigas pré-fabricadas I (*I-joist*).

Balseiro (2007) afirma que esta tecnologia gera um material com menor variabilidade e torna-o menos vulnerável às descontinuidades resultantes do crescimento natural, como os nós. Martins (2018) também destaca esta vantagem em relação à madeira maciça, acrescentando que os defeitos como descaios e empenos podem ser eliminados no processo de fabrico, resultando em lamelas de maior homogeneidade. Para além disso, a MLC possui potencial para acréscimo na qualidade estética, visto que podem ser produzidas peças curvas.

André (2006) explica que na comparação de uma madeira maciça com uma secção transversal igual a MLC, a MLC suportaria cargas maiores. Logo, necessita-se menos material para a obtenção de uma capacidade de carga semelhante à de uma secção maciça. Este fato é exemplificado pela Figura 1, demonstrando que a madeira maciça (imagem indicada como número 2 na Figura 1) tem menor valor característico da resistência, em comparação ao MLC (imagem indicada como número 1 na Figura 1), quando usadas as mesmas seções transversais, em alguns casos.

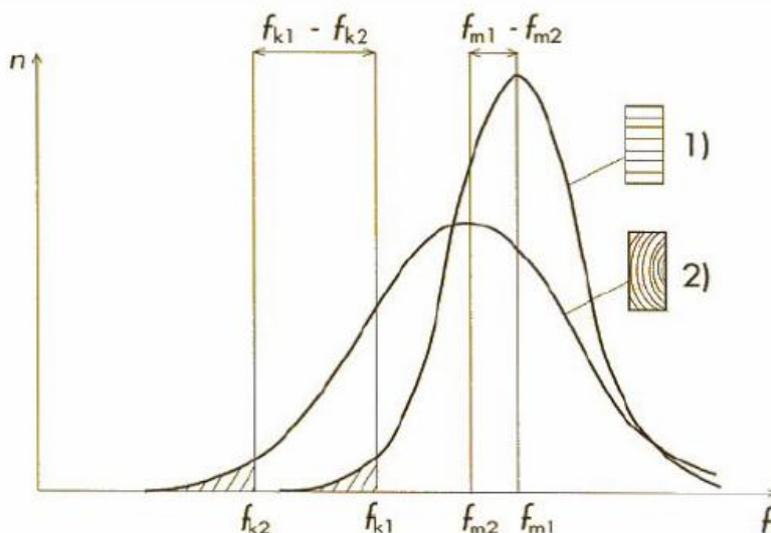


Figura 1 – Características do MLC comparada com a da madeira maciça (André, 2006 apud Carling 2001).

2.2.1. Propriedades físicas e mecânicas da madeira

O conhecimento das propriedades da madeira é essencial para a sua utilização, visto que a madeira possui diversas espécies com propriedades diferentes e dentro de uma própria espécie pode haver variações de propriedades.

Um dos fatores relevantes a ter em consideração é o teor de água, pois este tem influência direta nas propriedades mecânicas, bem como esta relacionado com as variações dimensionais dos elementos (estabilidade dimensional). O ganho ou a perda de água pode gerar uma variação do volume das paredes celulares, como descreve Zelinka e Glass (2010). O resultado deste processo pode ser o empeno e/ou fissuração, que gera diminuição na performance mecânica do material. Logsdon (1998) apud Bodig e Jayne (1992) apresenta os incrementos médios nas propriedades mecânicas para um decréscimo de 1% no teor de água abaixo do ponto de saturação das fibras. Dentre as variações apresentadas, o módulo de elasticidade varia em 2% e resistência à flexão em 4%. Para além da higroscopicidade da madeira, existem outros fatores que têm influência nas propriedades da madeira, por exemplo:

- i. Secção da árvore (onde é recolhida a peça);
- ii. Presença ou não de medula;
- iii. Presença de defeitos como nós;
- iv. Fendas, fibras torcidas, entre outros.

Um dos fatores que influencia as propriedades da madeira é a sua espécie botânica, logo, para uma classificação inicial as madeiras são divididas em dois grupos, o das resinosas e das

folhosas. Wiedenhoeft (2010), descreve que as resinosas (gimnospermas) são árvores perenes com folhas agudas como Pinheiros (*Pinus*) e Abeto (*Picea*). As folhosas (angiospermas) são as de folhas largas e árvores que perdem a folha em alguma época do ano como Bordo (*Acer*), Bétula (*Betula*) e Carvalho (*Quercus*). Para além destas diferenças, Coutinho (1999) afirma que cada espécie tem uma constituição própria do tecido lenhoso e estrutura anatómica, que são os principais responsáveis pelo comportamento físico-mecânico do material.

No âmbito das estruturas antigas da região de Coimbra, Vicente (2008) destaca, para estas estruturas de madeira, uma frequência da presença do Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.), Carvalho português (*Quercus faginea* Lam.) e Castanho (*Castanea sativa* M.). Em menor frequência indica-se Casquinha (*Pinus silvestres* L.), Choupo (*Populus*) e Eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.). A presença destas espécies varia consoante a localidade, visto que à época era comum utilizar espécies da própria região. Assim, Andrade (2011) indica para a região de Lisboa a maior presença, ao nível dos pavimentos, do Castanho de origem nacional e com menor frequência o Choupo, Cedro (*Cedrus*) e Carvalho. No âmbito das estruturas novas, pode-se destacar o Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster* Ait.) por ser a espécie resinosa com maior abundância, e apresenta-se também a Criptoméria por ser uma espécie de destaque na floresta do Arquipélago dos Açores. As principais propriedades destas espécies são expostas na Tabela 2, onde Balseiro, 2007 apud, Albino, 1996 apresenta valores obtidos em ensaios em madeira limpa e NP 4544 valores característicos associados às classes de resistência para elementos estruturais.

Tabela 2 - Valores médios e característicos das propriedades mecânicas da madeira de Pinheiro Bravo (Adaptado de NP 4544 e Balseiro, 2007 apud, Albino, 1996).

Referência	Designação comercial	Resistência à flexão	Módulo de elasticidade
		(f_{mk})	($E_{méd}$)
		MPa	GPa
Balseiro, 2007	Castanho	97	10,0
	Carvalho	122	11,0
	Eucalipto	137	12,0
	Choupo branco	80	11,0
	Pinheiro bravo	18	12,0
NP 4544	Criptoméria - CYI	19	7,0
	Criptoméria - CYII	12	5,8

2.3. Fibras reforçadas com polímeros

Para o ACI (*American Concrete Institute*, 2008), FRP é um termo geral para um material compósito, que compreende uma matriz de polímero reforçada com fibra, seja ela na forma de tecido, esteira, fios ou outra forma de fibra. Compósito é definido como material produzido por

dois ou mais materiais constituintes que permanecem distintos, mas com propriedades que não possuem individualmente. No caso do FRP, a adesão é realizada entre a fibra e a resina.

O desempenho de qualquer material compósito, como é o caso do FRP, depende dos materiais que compõem o conjunto e da interação entre eles. Logo, segundo o ACI (2002), os fatores que afetam o desempenho físico e mecânico do FRP são:

- i. Propriedades mecânicas da fibra;
- ii. Orientação, comprimento, forma e composição da fibra;
- iii. Propriedades mecânicas da resina;
- iv. Adesão entre as fibras e a matriz.

2.3.1. Fibras

As fibras podem ser de diversas origens, sendo as mais comuns para reforço, segundo o ACI (2008), as fibras de carbono (*carbon fiber-reinforced polymer*, CFRP), vidro (*glass fiber-reinforced polymer*, GFRP) e aramida (*aramid fiber-reinforced polymer*, AFRP), possuindo estas diferentes propriedades físicas e mecânicas, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades de sistemas de FRP unidirecionais (Adaptado do ACI, 2008).

Tipo de fibra	Módulo de elasticidade	Resistência à tração	Deformação de rotura, mínimo
	GPa	MPa	%
Carbono			
Uso geral	220 a 240	2050 a 3790	1,2
Alta resistência	220 a 240	3790 a 4820	1,4
Ultra alta resistência	220 a 240	4820 a 6200	1,5
Alto módulo	340 a 520	1720 a 3100	0,5
Ultra alto módulo	520 a 690	1380 a 2400	0,2
Vidro			
E-glass	69 a 72	1860 a 2680	4,5
S-glass	86 a 90	3440 a 4140	5,4
Aramida			
Uso geral	69 a 83	3440 a 4140	2,5
Alta performance	110 a 124	3440 a 4140	1,6

2.3.2. Resinas

As resinas são usadas em uma ampla gama nos sistemas de FRP, incluindo primários, argamassas de nivelamento, saturantes e adesivos, segundo ACI (2008). O mesmo autor indica o uso destas resinas no sistema FRP. O primário é usado para melhorar a ligação entre o adesivo ou resina saturante ao substrato. A argamassa de nivelamento tem o objetivo de preencher vazios no substrato. As resinas saturantes são utilizadas na impregnação das fibras de reforço, tendo como objetivo uma melhor transferência de carga efetiva entre as fibras, e como adesivo

para sistemas curados *in-situ*. Os adesivos são usados para colar sistemas de FRP ao substrato e também serve de adesivo entre camadas FRP.

André (2006) afirma que as resinas, quando são escolhidas para produzir o FRP, possuem três características essenciais:

- i. Boas propriedades mecânicas – Alta resistência à tração, rigidez e deformação - evitando uma rotura frágil do FRP;
- ii. Boas propriedades adesivas – Propriedades adesivas que proporcionem eficiente transferência de carga entre fibra e a matriz - evitando descolamento ou fissuração;
- iii. Boa resistência à degradação ambiental – Garantia de proteção das fibras contra ataques ambientais e outras substâncias agressivas.

Newhook e Svecova (2007) afirma que as resinas termoendurecíveis são mais frequentemente utilizadas por causa das suas propriedades químicas e mecânicas. As propriedades das resinas são exemplificadas na Tabela 4 e Tabela 5 para termoendurecíveis e termoplásticas, respetivamente.

Tabela 4 – Propriedades das resinas termoendurecíveis (Adaptado de Newhook e Svecova, 2007).

Resina	Massa volúmica mg/m ³	Resistência a Tração MPa	Módulo de Elasticidade GPa	Retração por cura %
Epóxi	1,20-1,30	55,00-130,00	2,75-4,10	1,00-5,00
Poliéster	1,10-1,40	34,50-103,50	2,10-3,45	5,00-12,00
Vinil Ester	1,12-1,32	73,00-81,00	3,00-3,35	5,40-10,30

Tabela 5 - Propriedades das resinas termoplásticas (Adaptado de André, 2006).

Resina	Peso Específico mg/m ³	Resistência a Tração MPa	Módulo de Elasticidade GPa	Retração por cura %
Polipropileno	0,9	20 - 40	1,0 - 1,4	-
Poliéter-éter-cetona	1,3	170	3,6	-
Poliamida	1,14	60 - 70	1,4 - 2,8	-

Como já supracitado, as resinas são formuladas para realizar diversas funções e dentre estas está a de ligação, ou seja, a função de um adesivo. Os adesivos devem possuir a capacidade de transferir carga entre os membros colados e manter essa característica nas condições de serviço a que estão expostas.

Em relação a capacidade de manter as características em serviço, Vick (1999) indica que os adesivos estão sujeitos a grande influência no seu desempenho em serviço por terem resinas termoendurecíveis ou termoplásticas na composição. Este mesmo autor acrescenta que as

termoplásticas são aquelas que se alteram quimicamente quando aquecidas, possuindo menor resistência ao calor, a humidade e a carga estática de longa duração, quando comparada com a termoendurecível. Já as termoendurecíveis têm alta resistência à umidade e a outros produtos químicos, são rígidas o suficiente para suportar altas cargas estáticas e suportam estas por um longo prazo. Além disto, as termoendurecíveis sofrem mudança química irreversível após o aquecimento, ou seja, após o primeiro aquecimento ocorrerá o endurecimento e elas não voltarão a amolecer.

Avaliando a capacidade de transferir carga e mantê-las em serviço, Vick (1999) classifica em estrutural, semi-estrutural e não estrutural, os tipos de adesivos. Dentro do grupo das estruturais o autor subdivide os adesivos em relação ao ambiente de serviço (Exterior, Limitadamente exterior e Interior). Esta subdivisão indica à capacidade de manter suas propriedades sob a mais severa saturação cíclica de água e secagem. Desta forma, a Tabela 6 demonstra exemplos de adesivos classificados em relação a exposição ambiental.

Tabela 6 - Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural esperado em níveis variáveis de exposição ambiental (Adaptado de Vick, 1999).

Integridade estrutural	Ambiente em serviço	Tipo de adesivos
Estrutural	Exterior	Fenol-formaldeído
		Resorcinol-formaldeído
		Fenol-resorcinol-formaldeído
		Emulsão polímero-isocianato
		Melamina-formaldeído
	Limitadamente exterior	Melamina-ureia-formaldeído
		Isocianato
		Epoxi
	Interior	Ureia-formaldeído
		Caseína

Ainda no âmbito da capacidade de transferência de carga em serviço, Raftery et al. (2009), indicam que o epóxi, em alguns casos, excede a resistência ao cisalhamento da própria madeira, sendo então importante o estudo em relação à durabilidade da ligação do adesivo com a madeira. Sendo assim, estes autores avaliaram o efeito de ciclos de umidade na ligação FRP e madeira. Utilizaram três tipos de reforço em laminados de GFRP, a espécie de madeira Sitka Spruce e cinco tipos de adesivos. Os adesivos utilizados foram, dois fenol resorcinol formaldeídos (PRFs), um melamina ureia formaldeído (MUF), um poliuretano (PU) e um isocianato de polímero em emulsão (EPI). Os resultados foram extremamente favoráveis para todos os adesivos, estando de acordo com o indicado por Vick (1999). Além disto, é descrito que estes resultados indicam alternativas mais económicas ao adesivo epóxi.

No âmbito das propriedades mecânicas, Raftery et al. (2009) estudaram três tipos de adesivos à base de resinas epóxi em colagens de madeira com laminados (pré-fabricados) de FRP. Os adesivos utilizados pelos autores possuem referência comercial de CB10T Slow Set, Timberset e Sikadur 31 e a Sitka Spruce (*Picea sitchensis*) foi a espécie de madeira utilizada. O estudo verifica que linhas finas com alguns adesivos epóxi podem gerar uma ligação entre a madeira e o FRP de qualidade e durável. Uma importante indicação feita no estudo é que a qualidade adesiva do epóxi não depende apenas do adesivo epóxi, mas também do FRP.

Em relação às propriedades adesivas, Vick (1999) diz que se uma ligação de maior integridade estrutural for necessária para ligar a madeira a metais ou plásticos mais pesados e rígidos, apenas adesivo epóxi, poliuretano e à base de isocianato podem ser suficientemente compatíveis. Raftery et al. (2009) fizeram uma avaliação das vantagens e desvantagens do uso de adesivos epóxi na ligação do FRP a madeira. Como principais vantagens foi indicado: as boas características de preenchimento de fendas e requerem baixas pressões de fixação. Para além disto, podem ser utilizadas na ancoragem de varões e reparação de elementos de madeira. Por outro lado, os autores referem que as principais desvantagens são: o custo do produto e a durabilidade das juntas entre os materiais colados.

Avaliando a resistência à degradação ambiental, Custódio et al. (2011) descrevem que o adesivo mais adequado para aplicação *in loco* são os epóxis. Isto porque geralmente são usados em condições de serviço equivalentes às classes de serviço 1 e 2 do EuroCódigo 5 (EN 1995-1-1, 2004). Segundo Vick (1999), o adesivo epóxi pode ser aplicado em ambiente exterior desde que por períodos de curta duração. Os epóxis para reforço e reparo de estruturas de madeira são usados em dois componentes (parte A e parte B). A parte A é composta por grupos funcionais de epóxi sendo altamente reativo, enquanto, a parte B é o endurecedor ou agente de cura. Usualmente, para uma colagem em madeira, os endurecedores devem ser suficientemente reativos, permitindo que o composto cure totalmente em temperatura ambiente, sendo os mais utilizados o trietilenotetramina (TETA) e isoforonodiamina (IPD) (Harte e Dietsch 2015).

2.3.3. Sistemas de FRP

Os sistemas de reforço com FRP podem variar a sua nomenclatura e propriedades consoante a disposição das fibras e o método de fabricação (pré-fabricado ou curados *in situ*). Assim, os sistemas de FRP podem receber as nomenclaturas: mantas, tecidos, laminados e varões.

Segundo Juvandes (2011), os principais tipos de sistema de FRP e os componentes principais de cada um são:

- i. Sistemas FRP (Figura 2):
 - FRP pré-fabricado;
 - FRP curado *in situ*.
- ii. Componentes principais (Tabela 7):
 - Compósito FRP;
 - Adesivo de ligação entre substrato-FRP;
 - Primário e argamassa de regularização (resinas de preparação do substrato).

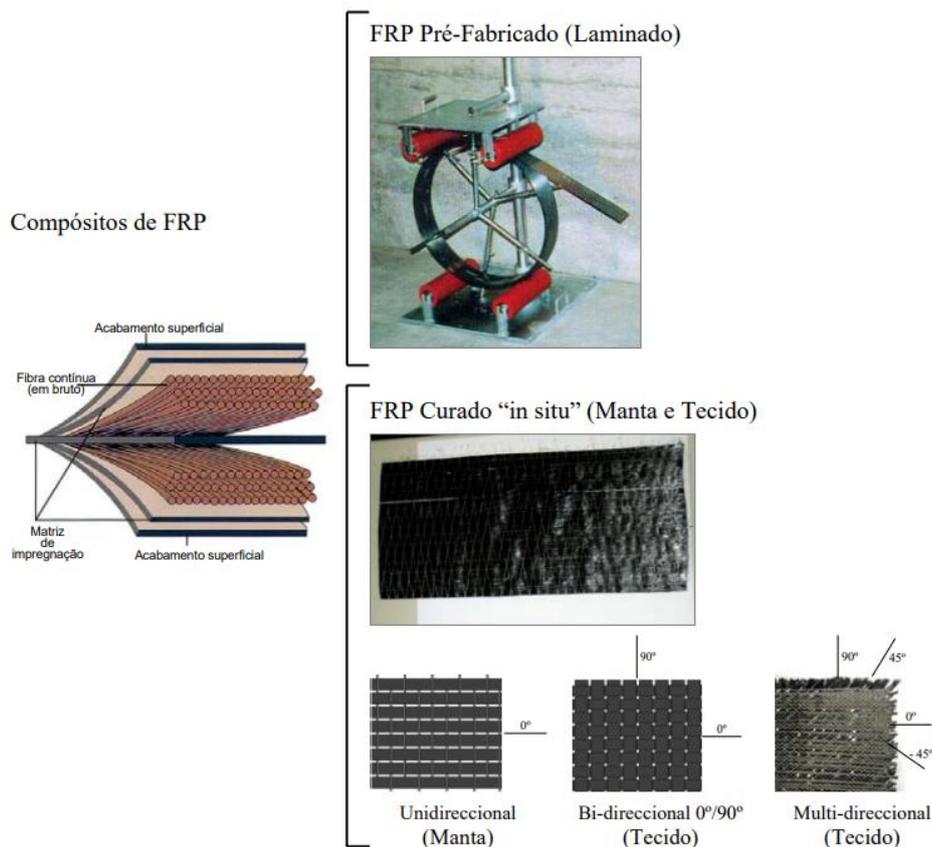


Figura 2 - Sistemas de FRP (Juvandes, 2011).

Tabela 7 - Materiais constituintes dos Sistemas de FRP (Adaptado de Juvandes, 2011).

Sistema comercial	Primário	Argamassa de regularização	Adesivo	Resina de impregnação	Compósito FRP
Pré-fabricado	Opcional	Opcional	Sim	-	Sim
Curado "in situ"	Sim	Opcional	-	Sim	-

Desta forma, o sistema pré-fabricado compreende laminados, varões rugosos ou lisos, fios e cabos, e o sistema curado "in-situ" compreende mantas e tecidos, tal como os laminados que apesar de um processo de pré-fabricação, são aplicados com adesivos curados "in-situ".

2.3.4. Métodos de aplicação

As metodologias de aplicação de reforço com FRP mais comuns são:

- i. Método de reforço colado externamente (*Externally Bonded Reinforcement, EBR*);

- ii. Método de reforço colado com inserção de FRP no elemento (*Near-Surface Mounted*, NSM);
- iii. Método de reforço fixado mecanicamente (*Mechanically Fastened*, MF-FRP).

O método EBR pode ser utilizado tanto para pré-fabricados como para curados *in situ*, mas em ambos os casos o substrato deve ser preparado para receber o reforço. No caso da madeira reforçada com cura *in situ* esta deve, segundo Jorge (2010), ser lixada para remover sujeiras e fibras parcialmente soltas, limpa com compressor de ar e, até em alguns casos, com uso de solventes. Após esta limpeza, a madeira pode receber uma camada de primário, a fim de garantir a melhor aderência possível na largura da área de reforço onde vai ser aplicado o FRP.

No método NSM são realizadas pequenas aberturas longitudinais na madeira para que estas sejam preenchidas com o adesivo e subsequentemente com o FRP. Em detrimento dessa metodologia de aplicação, este método é utilizado apenas com sistemas pré-fabricados.

Alternativamente aos métodos EBR e NSM, o MF-FRP não utiliza ancoragem química, sendo a ligação entre o substrato e o reforço realizada através de pregos e parafusos (fixador). Assim como no NSM, este método é utilizado apenas com sistemas pré-fabricados.

A Figura 3 exemplifica os métodos de reforço EBR e NSM e a Figura 4 o método MF-FRP.

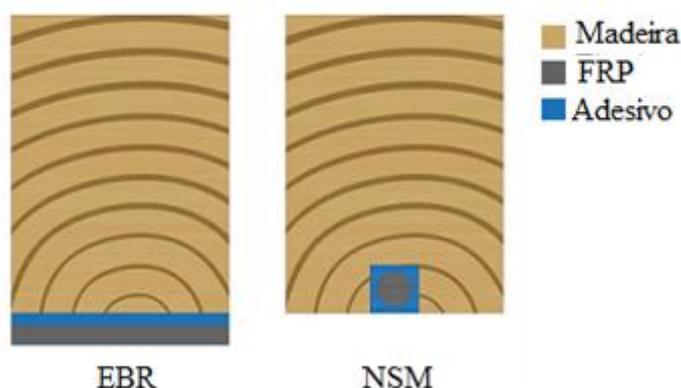


Figura 3 – Exemplo de secção transversal de uma secção de madeira reforçada com o método EBR e NSM (Adaptado de Wang et al., 2020).



Figura 4 – Utilização do método MF-FRP em vigas de madeira (Schorer et al., 2008).

Os FRP's também podem ser utilizados com sistema passivo ou pré-esforçado. Balseiro (2007) indica que o sistema de reforço pré-esforçado tem comportamento muito semelhante ao sistema de reforço passivo, não tendo aumentos significativos em relação ao ganho de resistência e rigidez. Porém, em relação à redução de deformações, o sistema pré-esforçado pode ser uma solução em determinados casos.

Parvin e Shah (2016) fizeram uma revisão de estudos sobre os sistemas EBR e NSM em estruturas de betão. Conclui-se que o reforço com o método NSM é capaz de alcançar deformações superiores, evita descolagens prematuras e pode fornecer uma resistência de ligação até duas vezes maior que o método EBR.

2.4. Vigas de madeira reforçadas com FRP

A utilização de FRP no reforço de vigas de madeira, segundo Miotto e Dias (2006), é promissora. Isto porque o FRP é resistente à corrosão, proporciona um reduzido incremento no peso próprio da estrutura reforçada e amplia a confiabilidade em relação ao modo de rotura.

Balseiro (2007) indica que o reforço em elementos de madeira maciça ou MLC pode apresentar vantagens como:

- i. Aumento das propriedades mecânicas;
- ii. Diminuição da secção dos elementos de madeira e, conseqüentemente, o peso próprio da estrutura;
- iii. O uso de madeira de classe de resistência inferior;
- iv. Diminuição do custo total da estrutura, quando comparada com uma executada exclusivamente com material tradicional sem reforço.

Para a avaliação destas vantagens, apresenta-se de seguida uma revisão de estudos que abordaram análises de propriedades mecânicas para vigas de madeira reforçadas com FRP.

2.4.1. Incremento da rigidez

Nadir et. al (2016) estudaram vigas de MLC de Seringueira (*Havea brasiliensis*) reforçadas com mantas de fibra de vidro e fibra de carbono, buscando avaliar o incremento de rigidez à flexão dos elementos destes diferentes reforços. Adotou-se para ambas as fibras, como primário e adesivo, uma resina de base epóxi, tendo o primário a nomenclatura comercial Nitowrap 30 e o adesivo o nome comercial Nitowrap 410. A secção transversal dos elementos foi de 60 x 40 mm² e 900 mm de comprimento. Os autores consideraram, para ambos os reforços, GFRP e CFRP, a aplicação de uma ou duas camadas, correspondendo a uma percentagem de reforço da secção (α) de 2,5% e 5% e $\rho=1,67\%$ e 3,33%, para GFRP e CFRP respetivamente. O estudo considerou um total de 12 vigas reforçadas, sendo 6 para CFRP e 6 para GFRP, onde 3 possuíam uma camada de reforço e 3 com duas camadas. Considerou-se em todos os elementos um reforço em todo o comprimento da viga. Para as vigas não reforçadas adotaram um total de 10 vigas de MLC. Desta maneira, o estudo apresentou ganhos médios de 36,35% e 64,35% para uma e duas camadas com CFRP, respetivamente, e 26,46% e 46,24% para uma e duas camadas de GFRP, respetivamente.

Hoseinpour (2018) analisou os resultados individuais do estudo de Valluzzi et al (2016) sobre vigas de madeira maciça reforçadas com mantas de FRP. O estudo adotou a espécie Abeto Austríaco (*Picea abies*) para as vigas, com secção transversal 115 x 135 mm², comprimento variando de 2115 à 2420 mm e reforços de mantas de fibra de carbono (CFRP) e linho (FFRP). Os adesivos adotados foram de resina epóxi, para as fibras de linho e carbono, e vinil para a fibra de linho. Um total de 12 vigas foi o adotado no estudo, sendo 2 sem reforço e 2 com reforço CFRP e 8 com reforço de FFRP, sendo 4 com resina epóxi e 4 com resina de vinil (FFRP (V)). O reforço de FFRP recebe 3 ou 5 camadas, tendo duas amostras pra cada configuração, e o CFRP tem suas duas amostras feitas com uma camada de manta. Todos os reforços foram aplicados com 100 mm de largura e com comprimento de 1900 mm. Os autores observaram incrementos máximos na rigidez de 41% para o reforço com CFRP, 18% para FFRP com 3 camadas, 26% e 7% para FFRP (V) com 3 e 5 camadas, respetivamente, quando comparado com os elementos sem reforço. O estudo ainda apresenta o reforço com FFRP com 5 camadas sem incremento quando comparado com os elementos sem reforço.

Borri et al. (2017) estudaram o reforço em vigas de Carvalho branco (*Quercus petraea*) e Abeto branco (*Abies Alba*) de classes de resistência D30 e C16, respetivamente. Estes autores organizaram os provetes em 6 grupos não reforçados, totalizando 95 provetes, sendo 3 grupos para o Carvalho e 3 para o Abeto. Desta forma, adotaram para cada grupo uma secção transversal diferente, conforme indicado na Tabela 8. As vigas reforçadas totalizaram 126 provetes, sendo estas reforçadas com mantas de fibra de carbono ou de fibra vidro. As dimensões, número de provetes, percentagem de reforço (α) e tipo de reforço aplicado é explicitado na Tabela 9. O método de reforço adotado pelos autores foi o EBR, colando os reforços na parte tracionada das vigas e o adesivo aplicado nos provetes foi uma resina epóxi.

Como resultado o estudo apresentou incrementos de rigidez de 13,3%, 15,1% e 11,6%, para a secção transversal 20 x 20 mm² com Abeto reforçado com GFRP e CFRP, e Carvalho reforçado com GFRP, respetivamente. Para a secção transversal de 67 x 67 mm², obteve-se 7,8% e 9,4% com Carvalho reforçado com GFRP e CFRP, respetivamente. Os reforços com GFRP e CFRP em Abeto de secção 100 x 100 mm² obteve 9,1% e 11,2%, respetivamente. Por fim, a secção 200 x 200 mm² para Carvalho reforçado com CFRP e Abeto com reforço GFRP e CFRP, obtiveram incrementos de rigidez de 4,7%, 7,9% e 11,9%, respetivamente.

Tabela 8 – Dimensões das vigas e número de provetes não reforçados (Adaptado de Borri et al., 2017)

Espécie	Secção transversal	Comprimento	Nº de amostras
	(mm ²)	(mm)	(und)
Abeto	20 x 20	380	20
	100 x 100	1950	20
	200 x 200	4000	10
Carvalho	20 x 20	380	20
	67 x 67	1320	20
	200 x 200	4000	5

Tabela 9 - Dimensões das vigas, número de provetes, percentagem de reforço e tipo de reforço aplicado (Adaptado de Borri et al., 2017).

Espécie	Secção transversal	Comprimento	Nº de amostras	Nº de camadas	Largura do reforço	Tipo de reforço	α
	mm ²	mm	und	und	mm	-	%
Abeto	20 x 20	380	20	1	20	GFRP	0,59
			20			CFRP	0,85
	100 x 100	1950	14	2	100	GFRP	0,12
			10			CFRP	0,17
	200 x 200	4000	6	2	100	GFRP	0,06
			6			CFRP	0,08
Carvalho	20 x 20	380	10	1	20	GFRP	0,59
			20			CFRP	0,18
	67 x 67	1320	15	2	67	GFRP	0,25
			15			CFRP	0,25
	200 x 200	4000	5	2	100	CFRP	0,08
			5			CFRP	0,08

Fiorelli (2002) avaliou vigas de madeira maciça reforçadas com mantas de fibras de vidro com o método EBR em relação ao ganho de rigidez. Duas espécies foram utilizadas no estudo, o Pinus (*Pinus caribea* var. *Hondurensis*) e o Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), sendo ambas estudadas com comprimento de um metro. Cada espécie teve 16 elementos

confeccionadas, sendo 8 com secção transversal de 3 x 6 cm² e 8 com 3 x 12 cm². Desta forma, os provetes foram reforçados com duas, quatro e seis camadas, onde os dois provetes restantes não possuem reforço. Os provetes foram submetidos à flexão através do ensaio de quatro pontos para avaliar a rigidez, seguindo os padrões da norma brasileira NBR 7190/97. Todos os provetes receberam reforço na parte tracionada da viga. Desta forma obteve-se incrementos médios de rigidez de 3%, 18% e 31% para Pinus de secção transversal 3 x 6 cm² com duas, quatro e seis camadas de reforço, respetivamente. Para Pinus de secção 6 x 12 cm² o autor indica, em média, 4,2%, 14,13% e 19,78% de incremento de rigidez para reforços com duas, quatro e seis camadas nos provetes, respetivamente. Nos provetes de Eucalipto com duas, quatro e seis camadas de reforço e secção 3 x 6 cm² o estudo apresenta, em média, 3,48%, 9,99% e 21,16% de incremento de rigidez. Por fim, os provetes de Eucalipto de secção 3 x 12 cm² resultaram em incrementos de rigidez em média de 2,18%, 8,84% e 19,17% para duas, quatro e seis camadas de reforço, respetivamente.

2.4.2. Incremento da capacidade de carga

Fiorelli (2002) também avaliou os ganhos de incremento de capacidade de carga, utilizando as configurações supracitadas. Porém, nesta avaliação o estudo adotou a norma ASTM D198/84. Desta forma, o autor obteve resultados de incremento de momento último em média de 16%, 30% e 32,8% para o Pinus de secção 3 x 6 cm² com reforços de duas, quatro e seis camadas. Para a mesma espécie com secção 3 x 12 cm² o estudo apresenta incremento de 10% para reforço de duas camadas, 11% para quatro camadas e 15% para seis camadas. Com o Eucalipto de secção transversal 3 x 6 cm² são apresentados incrementos médios de 40%, 74% e 85% de incremento para duas, quatro e seis camadas de reforço. Com a mesma espécie e secção transversal 3 x 12 cm² foram observados pelo autor incrementos médios de 15% para duas camadas de reforço, 41% para quatro camadas e 19% para seis camadas.

Andor et. al (2015) realizaram um estudo com vigas de madeira maciça de Espruce da Noruega (*Picea abies*) reforçadas com mantas de fibra de carbono, com o objetivo de avaliar os incrementos na capacidade de carga e a influência da largura do reforço neste parâmetro. Desta forma os autores estudaram um total de 40 vigas de secção transversal 95 x 95 mm² nas quais 8 vigas não receberam reforço (Grupo S0). Dentro das 36 vigas restantes, o estudo dividiu em dois grupos, tendo o primeiro 20 vigas reforçadas com uma camada (Grupo S1). O segundo grupo possuía 8 vigas reforçadas com duas camadas (Grupo S2). Para ambos os grupos os reforços contemplavam toda a largura da secção. Das 8 vigas restantes, o reforço foi com uma camada e com 50 mm de largura (Grupo SN). Os autores também adotaram os reforços na zona tracionada da viga e o adesivo utilizado para colagem dos reforços foi de resina epóxi para todos os casos. O estudo adotou testes de flexão de quatro pontos, tendo um vão livre de 1800 mm. Destes ensaios os autores apresentam incrementos de carga última de 31,47%, 33,33% e 18,21% em relação ao grupo S0 para os grupos S1, S2 e SN, respetivamente.

Valluzzi et al (2016) também estudaram os incrementos de propriedades em vigas de madeira maciça reforçadas com FRP com as configurações já supracitadas. Como resultado dos testes de flexão em quatro pontos, os autores indicam que as amostras reforçadas com CFRP tiveram o melhor resultado, com 46% de incremento da carga aplicada. Para os reforços com FFRP em 3 camadas é apresentado um incremento da carga última de cerca de 31% e para o reforço com FFRP (V) incrementos de aproximadamente 17% e 25% para 3 e 5 camadas, respectivamente.

Donadon et al. (2020) avaliaram madeiras de baixa resistência, segunda a norma brasileira NBR 7190, da espécie *Pinus Elliottii* com vigas de MLC reforçadas com mantas de fibra de vidro. As vigas estudadas possuíam secção transversal de 180 x 53 mm² e comprimento 3000 mm, sendo divididas em 5 grupos, nomeados de VEC 1 até VEC 5, com 1,9%, 1,7%, 2,8%, 3,3% e 5,0% de reforço (ρ), respectivamente. Desta forma, foram os autores adotaram 3 provetes sem reforço e um provete reforçado para cada grupo. Para a colagem do reforço o estudo utilizou epóxi de nome comercial Sikadur-32. Para a avaliação da resistência à flexão, utilizando o ensaio de três pontos, onde há dois apoios e um ponto de carga, tendo um vão livre de 2800 mm. Os autores apresentam como resultado um incremento de carga última do ensaio de 15%, 38%, 18%, 40% e 7% para os grupos VEC 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Nadir et al. (2016) analisaram também os incrementos de resistência à flexão com as configurações e materiais já supracitados. Como resultado os autores apresentam ganhos médios da resistência à flexão com o reforço CFRP de 45,8% e 50,62% em relação às amostras não reforçadas para uma e duas camadas de reforço, respectivamente. Para o reforço com GFRP é apresentado um incremento médio de 36,91% e 40% para a resistência a flexão com uma ou duas camadas de reforço, respectivamente, em relação as amostras não reforçadas.

Borri et al. (2017) realizaram um estudo no qual apresentam incrementos na resistência à flexão em todas as vigas estudadas. Para a secção transversal de 20 x 20 mm², o estudo indica 65,4%, 122% e 81,9% de incremento para Abeto reforçado com GFRP e CFRP e Carvalho reforçado com GFRP, respectivamente. Para os reforços feitos nas secções transversais de 100 x 100 mm² também apresentam incrementos na ordem dos 65,6% e 51,1% para o Abeto reforçado com GFRP e CFRP, respectivamente. Nas secções transversais de 67 x 67 mm² de Carvalho, os autores apresentaram 47% e 36,4% de incremento para reforço com GFRP e CFRP, respectivamente. Por fim, o reforço na secção transversal 200 x 200 mm² tem como resultado um incremento de 43,5% com reforço de CFRP.

Jankowski et al. (2010) conduziram um estudo com reforços pré-fabricados de CFRP em vigas de Pinho retiradas de serviço, pertencentes a um pavimento de um edifício de cerca de 100 anos. Um total de 18 vigas foram retiradas do local e divididas em 6 grupos, denominados de “A” a “F”, tendo 3 vigas em cada grupo. Um grupo adicional foi adotado pelos autores também com 3 vigas, porém com vigas novas e denominadas de “G”. As dimensões de todas as vigas eram semelhantes, tendo secção transversal de 120 x 220 mm² e comprimento total de 4000 mm. Para

a colagem dos reforços foi adotado um adesivo epóxi. Os reforços indicados no estudo para os grupos B, C, D, E Sikadur 32 F são para uma secção transversal de 1,2 x 50 mm² com a técnica NSM de reforço, sendo o grupo A o grupo de referência sem reforço. Para os grupos reforçados os autores adotaram reforços em todo o comprimento, com exceção do grupo “F”. Além disto, adotaram para o grupo “B” uma simulação de duas fissurações com secção transversal de 4 x 25 mm², com profundidade assimétrica, e ao longo de todo o comprimento. Para o grupo “C” simulou-se uma substituição de secção de madeira, no grupo “D” os autores produziram cortes simulando uma fissuração, porém com 4 cortes e secção transversal de 3 x 20 mm², dois em cada lado da viga. Estes ainda simularam fissuração no grupo E, porém, com 6 cortes de secção transversal 3 x 20 mm². Para todos estes grupos (grupo “B” a “E”) o estudo indica um reforço vertical e para o grupo “F” indica seis reforços horizontais, sendo três em cada lateral da viga. A Figura 5 ilustra todas as informações expostas para os reforços, seções e cortes de simulação de fissuração.

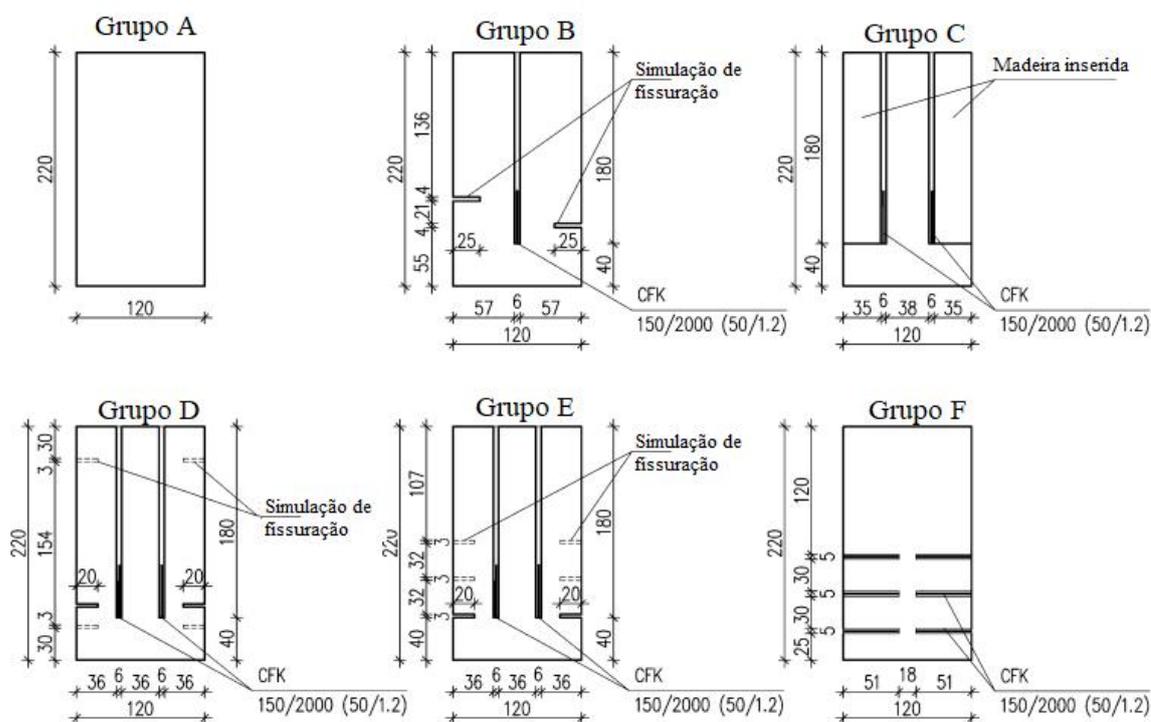


Figura 5 – Secção transversal das vigas com indicação de cada grupo e posições dos reforços (Jankowski et al, 2010).

Como resultado os autores apresentam valores de incrementos médios na força última em relação ao grupo de referência de 42,2%, 70,9%, 79,3%, 59,1% e 21,0% para os grupos B, C, D, E e F, respectivamente.

Balseiro (2007) apresentou o estudo com 20 vigas de MLC de Espruce da Noruega (*Picea Abies*), caracterizadas como GL24h. O estudo utiliza um total de 20 vigas com dimensões de 90 x 110 x 2250 mm³, sendo 16 reforçadas com laminados de FRP. A autora indica que as 16 vigas foram divididas em 4 séries, tendo cada série uma tipologia de reforço. Desta forma a autora dividiu as tipologias de reforço em vigas pré-esforçadas (série 2), vigas intactas com reforço, mas sem pré-esforço (série 3), vigas rompidas da série referência (série 4) e vigas cortadas a meio vão (série 5). A resina utilizada no estudo para o reforço foi epóxi para colagem, de nome comercial Sika CarboDur 30. Desta campanha são apresentados ganhos de capacidade de carga (força última), em relação a série de referência, de 25,85% e 18,74% para a série 2 e 3, respetivamente.

2.4.3. Ligação entre a madeira e o FRP

Como supracitado, para que o reforço seja eficiente faz-se necessário uma ligação de qualidade entre o FRP e a madeira. Wang et al. (2020) afirmam que embora haja um crescimento no número de investigações sobre madeira reforçada com FRP, são ainda poucos os resultados sobre o comportamento da ligação entre estes materiais. Então, apresentam-se a seguir alguns estudos realizados sobre os fatores que influenciam esta ligação.

i. A superfície de ligação da madeira:

Wan et al. (2010) analisando este parâmetro, considerou a aplicação de FRP próximo da medula em que os anéis se encontram dispostos ortogonalmente ao reforço (Figura 6 - a) e colagens de FRP em locais cujos anéis de crescimento se encontravam orientados, predominantemente, na direção tangencial à superfície (Figura 6 - b). Os resultados demonstraram que as ligações feitas como ilustra a Figura 6 - b são mais fracas, ocorrendo descolamento do FRP da madeira nos ensaios.

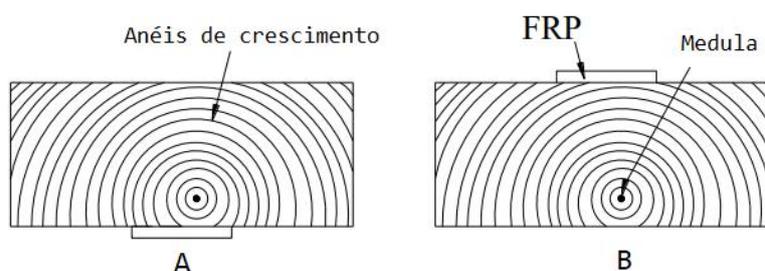


Figura 6 – Orientação das colagens do FRP na secção de madeira (Adaptado de Wan et al., 2010).

ii. Teor de água:

Wang et al. (2020) apud Barbero et al. e Zhou et al. (2020), afirmam que a humidade conduz ao enfraquecimento da interface epóxi-madeira. Lyons et al. (2005) avaliou a resistência da

colagem de FRP em madeira para 4 diferentes ambientes de exposição, todas por uma semana, sendo as condições: laboratório de fabricação dos compósitos; estufa a 46° C por uma semana; imerso em água com temperatura de 23° C; exposição cíclica à água das marés. Adicionalmente, 4 diferentes tipos de preparação do substrato (madeira) foram adotados, sendo: madeira seca e com superfície lisa; madeira molhada durante a noite, seca por 1 hora e com superfície lisa; molhada durante a noite, seca por 1 hora, superfície lisa e com primário; superfície molhada durante a noite, seca por 1 hora e superfície áspera. Para além, foram estudados dois tipos de epóxis diferentes, tendo nome comercial TYFO®S e TYFO®WP. Observa-se que o TYFO®WP é fabricado para aplicação em substratos húmidos. Os resultados mostram que a resistência da ligação, neste caso, é sempre inferior para madeira húmida, com exceção para o caso de madeira exposta à água das marés (ação cíclica). Outro facto observado é que o epóxi formulado para uso em substratos húmidos tem melhores resultados de resistência na ligação de madeira húmida.

iii. Espessura, largura e comprimento do FRP:

Biscaia et al. (2016) define comprimento efetivo como comprimento no qual a carga transmitida para o FRP não aumenta. Assim verificou que o comprimento efetivo da ligação madeira-FRP é influenciado diretamente pela rigidez do FRP, mas o modelo adotado de rotura da ligação tem enorme influência nos resultados.

Vahedian et al. (2018) descreve que a espessura e largura devem ser avaliadas em conjunto com o comprimento efetivo, pois maiores espessuras de reforço necessitam de maior comprimento efetivo. Viegas (2014) descreve que as dimensões do FRP influenciam na rigidez e, consequentemente, no comportamento da ligação. Xu et al. (2015) afirma que com o aumento da largura do FRP a resistência de aderência interfacial aumenta e o deslizamento global é menor.

Vahedian et al. (2018) avaliou a influência da espessura do FRP no reforço em madeira, obtendo resultados de maior resistência da ligação da interface e maior capacidade de carga com o aumento da espessura da ligação. Porém, também foi observado que espessuras mais altas levam a roturas frágeis, logo, caso seja desejado rotura dúctil, deve optar-se por interfaces mais finas.

iv. Preparação da superfície da madeira:

Lyons et al. (2005) verificou a qualidade da ligação com resina epóxi colada em madeira áspera ou lisa. Os resultados indicam que não há diferenças significativas na resistência. Avaliando também o uso de primário hidroxilo-metanol-resorcinol (HMR), verificou que este geralmente melhora a resistência da ligação. Vick (1999) indica que secagem excessiva e superaquecimento deterioram a condição física da superfície da madeira, o que fecha irreversivelmente os micrósporos das paredes celulares. Esta condição pode tornar a superfície da madeira inativadas em relação a adesão de contaminantes.

v. Temperatura:

Custódio et al. (2011) avaliando a influência da temperatura no desempenho e durabilidade de adesivos epóxi, verificou que o aumento da temperatura ocasiona significativa redução na

resistência. Tendo efeito contrário na fase de pós-cura, já que temperaturas mais altas resultaram em melhor desempenho do adesivo.

Os efeitos de ambientes severos (radiação ultravioleta, temperatura e ciclos de exposição húmido e seco) em reforços com FRP e adesivo epóxi tendem a diminuir as propriedades resistentes ao corte (Davalos et al, 2000).

vi. **Tratamento preservador:**

Tascioglu et al. (2002) realizaram um estudo com objetivo de determinar os efeitos de vários sistemas de preservação da madeira e processos de tratamento (pré e pós-tratamento) na durabilidade e resistência ao cisalhamento do adesivo composto para madeira com FRP. Os autores consideraram no estudo os preservadores CCA (Cromo, Cobre e Arseniato), CDDC (*copper dimethyldithiocarbamate*), Naftenato de cobre (CuN), Pentaclorofenol (PCP) e Creosoto. Como reforço de FRP consideraram uma fibra de vidro e um adesivo de resina PRF. Dos resultados obtidos foi observado que os tratamentos conservantes pré e pós tratamento tiveram resultados significativamente negativos na durabilidade da ligação da madeira e nas linhas de cola da folha de FRP. Também foi observado pelos autores que todos os tratamentos à base de óleo interferem negativamente com a madeira pré tratada e nas interfaces de FRP.

2.4.4. Tipos de rotura

Para Balseiro (2007) é essencial, na análise e dimensionamento de elementos reforçados com FRP, a distinção dos tipos possíveis de rotura, apresentando os tipos possíveis de rotura:

- i. Rotura do FRP (Figura 7-a);
- ii. Rotura por compressão da madeira (Figura 7-b);
- iii. Rotura por corte da madeira na zona de ancoragem do FRP (Figura 7-c);
- iv. Descolamento da fibra originado por fendas inclinadas na madeira (Figura 7-d);
- v. Descolamento na interface madeira-FRP devido a fendas de flexão.
 - Em áreas irregulares (Figura 7-e);
 - Em áreas de colagens mal executadas (Figura 7-f).

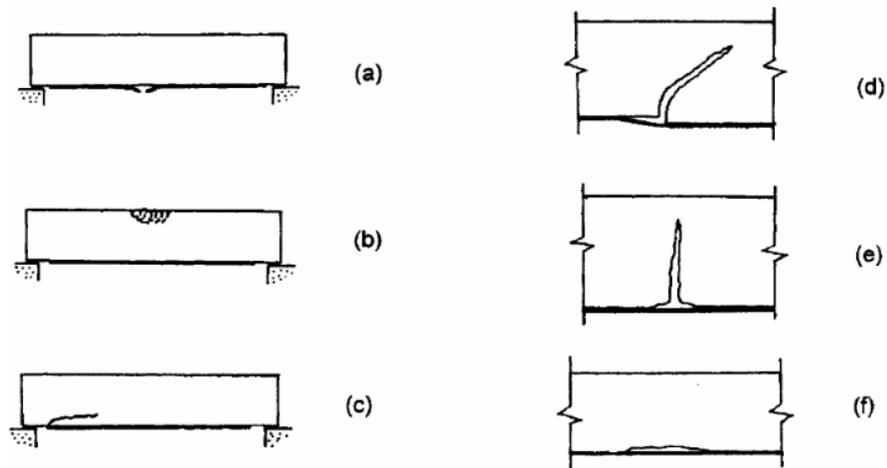


Figura 7 - Modos de rotura de elementos de madeira reforçados com FRP (Balseiro, 2007, apud Martin et al., 2000).

Wang et al. 2020 indicam os possíveis modos de rotura do sistema madeira-FRP:

1. Rotura da madeira;
2. Rotura da ligação madeira-adesivo;
3. Rotura do adesivo;
4. Rotura da ligação adesivo-FRP;
5. Delaminação do FRP (separação entre algumas fibras do FRP e o adesivo);
6. Rotura do FRP.

Esses modos podem ser separados em dois grupos com base na duração da carga atuante no sistema. Caso a carga seja mantida até o limite do sistema (carga final para rotura) os modos de rotura possíveis são 1, 5 ou 6. Caso a carga não seja mantida até o limite do sistema, a rotura prematura poderá ocorrer conforme 2, 3 ou 4. Esta descolagem prematura é chamada de descolagem interfacial. A Figura 8 ilustra a localização de cada um destes modos de rotura.

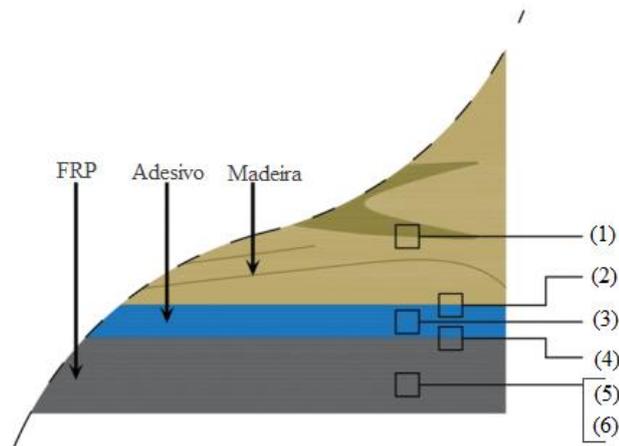


Figura 8 – Detalhe dos modos de rotura de elementos de madeira com FRP (Adaptado de Wang et al, 2020).

Porém, Harte e Dietsch (2015) afirmam que nos últimos 20 anos um grande número de programas de testes foi realizado. Verificou-se que é improvável que ocorra falha no reforço de FRP e, na prática, apenas dois modos de rotura devem ser considerados, sendo esses:

- i. Modo 1: Rotura na zona tracionada da madeira, porém com a zona comprimida em comportamento elástico linear;
- ii. Modo 2: Rotura na zona tracionada da madeira, porém com a zona comprimida após atingir a tensão de cedência ou plastificação.

3 ANÁLISES TEÓRICAS DE VIGAS DE MADEIRA REFORÇADAS COM FRP

3.1. Enquadramento

Buscando a previsão da rigidez à flexão de vigas de madeira maciça reforçadas com FRP, este capítulo apresenta o estudo para tais previsões. Primeiramente é apresentado o método da previsão da rigidez flexão, indicando as dimensões da madeira e dos FRP's, as principais propriedades destes materiais e a espécie da madeira. São feitas análises sobre i) variação da rigidez em comparação as vigas não reforçadas, ii) influencia do número de camadas da variação da rigidez, iii) comparação dos valores de rigidez obtidos com valores calculados de rigidez para as classes C18 e C24 da EN 338 e iv) a influencia do módulo de elasticidade da madeira na rigidez a flexão das vigas reforçadas. A seguir apresentam-se os resultados obtidos nestas análises e no estudo paramétrico.

3.2. Previsão da rigidez à flexão ($EI_{teo,r}$)

3.2.1. Método de previsão da rigidez à flexão

O método de previsão da rigidez de uma secção composta (madeira com FRP) necessita primeiramente de uma homogeneização da secção, como por exemplo por via do método da secção transformada (Hibbeler (2009)). O método consiste na criação de um número adimensional denominado de fator de transformação (n) (Equação 3.1). Com isto, a secção de um dos materiais é homogeneizada, conforme a Equação 3.2. Onde b'_1 é a largura transformada do material 1 e b_1 a largura original do material 1.

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad (3.1)$$

$$b'_1 = b_1 \cdot n \quad (3.2)$$

Sendo E_1 e E_2 os módulos de elasticidade dos materiais que compõem a secção composta. Um modelo teórico utilizado por Nadir (2016) apud Bohnhoff (1990) que consiste na aplicação do Teorema de Steiner, permite a obtenção da rigidez à flexão como descrito pela Equação 3.3.

$$\sum EI = \sum EI = \sum_{n=1}^2 \left(\frac{E_i \cdot b_i \cdot h_i^3}{12} \right) + E_i \cdot b_i \cdot h_i \cdot d_i^2 \quad (3.3)$$

onde E_i é o módulo de elasticidade do material i , d_i é a distância entre o centro de gravidade do material i e o eixo neutro da secção composta; b_i e h_i são, respetivamente, a largura e espessura/altura do material i .

Para a determinação do eixo neutro é utilizada a Equação 3.4.

$$d_i' = \sum \frac{A_i \cdot d_i}{A_i} \quad (3.4)$$

onde A_i é a área do material i .

3.2.2. Propriedades dos materiais para previsão da rigidez à flexão

Para a previsão da rigidez considerou-se para a madeira uma secção transversal de 100 x 200 mm² e a espécie Criptoméria. O módulo de elasticidade adotado para o estudo é baseado nos resultados dos ensaios realizados pelo SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, no Relatório Preliminar – RP/SERQ/190701. O relatório preliminar apresenta a caracterização mecânica de madeira de Criptoméria, onde consta o módulo de elasticidade médio de um lote desta espécie com secção transversal 100 x 200 mm². O relatório apresenta o módulo de elasticidade médio de 5918 MPa.

No âmbito dos reforços de FRP, foram consideradas para análise várias fibras da empresa *S&P Clever Reinforcement Ibérica*, doravante designada de S&P e as fibras de carbono da empresa Sika. As propriedades e dimensões destas fibras baseiam-se nas fichas técnicas da empresa S&P e Sika. As denominações comerciais de cada fibra, o sistema do FRP (manta ou laminado), tipo de material (vidro, aramida e carbono), gramagem das mantas, espessuras e o módulo de elasticidade são expostos na Tabela 10 e Tabela 11. Observa-se que as denominações SM (*Standard modulus*) e HM (*High modulus*) indicadas para os laminados são denominações do fabricante, tendo como referência 150/2000 e 200/2000 nas fichas técnicas, respetivamente.

Sabendo que uma viga com 100 mm pode ter empenos laterais, a aplicação de um laminado de mesma dimensão pode acarretar em um reforço fora da secção da viga. No caso das mantas, por ser um material maleável, é possível a adaptação para uma secção de madeira com empeno lateral, evitando que esta fique fora da secção. Por conta disto, é adotada a largura de 90 mm para laminados e 100 mm para mantas.

Foi considerado para esta análise, os produtos da empresa S&P, visto que há uma maior variedade de produtos para análise, tendo nas mantas um módulo de elasticidade maior e nos laminados a oferta de produtos com 90 mm de largura. Nesta avaliação considerou-se uma variação no número de camadas de reforço, em relação ao limite de camadas, adotando-se um limite de 5 camadas para as mantas e uma camada para os laminados. A limitação para os laminados é seguida pela indicação do fabricante, não sendo indicada colagem de múltiplas camadas. Resumidamente, foi avaliada a rigidez à flexão da Criptoméria para:

- i. Módulo de elasticidade médio da madeira de 5819 MPa e secção transversal da madeira de 100 x 200 mm²:
 - a) Sem reforço;
 - b) Reforço com manta (100 mm) de uma a cinco camadas;
 - c) Reforço com laminado (90 mm) com uma camada.

Tabela 10- Especificações, propriedades e dimensões dos reforços da S&P.

Tipo de fibra – S&P			Gramagem	h_{frp}	E_{frp}
			g/m^2	mm	MPa
Manta	Vidro	G-Sheet E 50_50	350	0,067	73000
	Aramida	A-Sheet 120	320	0,200	120000
		C-Sheet 240	400	0,225	240000
		C-Sheet 240	600	0,337	240000
		C-Sheet 640	400	0,189	640000
Laminado	Carbono	C-laminate SM	-	1,200	170000
		C-laminate HM	-	1,200	205000
		C-laminate SM	-	1,400	170000
		C-laminate HM	-	1,400	205000

Tabela 11 - Especificações, propriedades e dimensões dos reforços da Sika.

Tipo de fibra – Sika			Gramagem	h_{frp}	E_{frp}
			g/m^2	mm	MPa
Tecido		Sikawrap 230 C	235	0,129	225000
Manta		Sikawrap 231 C	235	0,129	225000
	Carbono	Sikawrap 301 C	304	0,167	225000
		Sika Dur S	-	1,400	170000
Laminado			Sika Dur E	-	1,400
		Sika Dur M	-	1,400	210000

3.2.3. Resultados e análises:

Os resultados apresentados a seguir correspondem à rigidez teórica dos provetes reforçados ($EI_{teo,r}$), associando com o tipo de fibra, o número de camadas, a espessura final da do reforço de FRP (h_{frp}) e a percentagem de reforço (α). Os resultados são apresentados na Tabela 12.

O maior valor obtido de $EI_{teo,r}$ reforçado com manta é com a fibra de carbono C-sheet 640 com percentagem de reforço de $\alpha=0,47\%$, apresentando uma $EI_{teo,r} = 7,99E+11$ N.mm². O menor valor de $EI_{teo,r}$ para reforço com manta é com a fibra de vidro G-sheet E 50_50 com $\alpha=0,03\%$ que obteve $EI_{teo,r} = 3,99E+11$ N.mm². Para todas as variações no número de camadas, os

menores valores de rigidez estão para reforço com G-sheet E 50_50 e o os maiores para C-sheet 640.

Tabela 12 - Resultados para módulo de elasticidade 5918 MPa de secção transversal de 100 x 200 mm² reforçada com mantas e laminados.

Tipo de Fibra S&P	Nº de camadas	h _{frp}	EI _{teo,r}	α
	unidade	mm	N.mm ²	%
G-sheet E 50_50	1	0,067	3,99E+11	0,03
	2	0,134	4,04E+11	0,07
	3	0,201	4,09E+11	0,10
	4	0,268	4,14E+11	0,13
	5	0,335	4,19E+11	0,17
A-sheet 120	1	0,200	4,18E+11	0,10
	2	0,400	4,41E+11	0,20
	3	0,600	4,63E+11	0,30
	4	0,800	4,84E+11	0,40
	5	1,000	5,05E+11	0,50
C-sheet 240 400 g/m ²	1	0,225	4,46E+11	0,11
	2	0,450	4,94E+11	0,23
	3	0,675	5,38E+11	0,34
	4	0,900	5,79E+11	0,45
	5	1,125	6,17E+11	0,56
C-sheet 240 600 g/m ²	1	0,337	4,70E+11	0,17
	2	0,674	5,38E+11	0,34
	3	1,011	5,98E+11	0,51
	4	1,348	6,52E+11	0,67
	5	1,685	7,01E+11	0,84
C-sheet 640 600 g/m ²	1	0,189	5,04E+11	0,09
	2	0,378	5,96E+11	0,19
	3	0,567	6,74E+11	0,28
	4	0,756	7,41E+11	0,38
	5	0,945	7,99E+11	0,47
C-laminate (90/1.2) SM	1	1,2	5,55E+11	0,54
C-laminate (90/1.4) SM	1	1,4	5,78E+11	0,63
C-laminate (90/1.2) HM	1	1,2	5,83E+11	0,54
C-laminate (90/1.4) HM	1	1,4	6,10E+11	0,63
			EI_{teo,nr}	
Sem reforço	-	-	3,95E+11	-

O maior valor de EI_{teo,r} com reforço de laminado foi com a fibra de carbono C-laminate 100/1,4 HM com $\alpha=0,63\%$, tendo EI_{teo,r} = 6,10E+11 N.mm², e o menor para C-laminate 100/1.2 SM com EI_{teo,r}=5,55E+11 N.mm² com $\alpha=0,54\%$.

Analisando ganhos proporcionais ($EI_{teo,r} / EI_{teo,nr}$) e ganhos de rigidez com adição de camadas de reforço (Ganho de EI / Camada de reforço), são apresentados os resultados na Tabela 13. Tratando de ganhos de rigidez à flexão teórica com a adição de camadas de reforço (Ganho EI / Camada de reforço), é analisada a diferença entre rigidez à flexão do elemento com uma e duas camadas e entre elementos com duas e três camadas.

Tabela 13 - Resultados de rigidez de flexão para elementos de madeira com módulo de elasticidade de 5918 MPa e secção transversal de 100 x 200 mm² reforçados com mantas de fibra de vidro, aramida, carbono e laminados de carbono.

Tipo de Fibra S&P	Nº de camadas	$EI_{teo,r}$ N.mm ²	$EI_{teo,r} /$ $EI_{teo,nr}$ %	Ganho de EI / Camada de reforço %
	unidade			
G-sheet E 50_50	1	3,99E+11	1,24	-
	2	4,04E+11	2,46	1,21
	3	4,09E+11	3,68	1,19
	4	4,14E+11	4,89	1,17
	5	4,19E+11	6,09	1,15
A-sheet 120	1	4,18E+11	5,97	-
	2	4,41E+11	11,74	5,44
	3	4,63E+11	17,31	4,98
	4	4,84E+11	22,69	4,59
	5	5,05E+11	27,89	4,24
C-sheet 240 400g/m ²	1	4,46E+11	13,12	-
	2	4,94E+11	25,20	10,68
	3	5,38E+11	36,36	8,92
	4	5,79E+11	46,72	7,59
	5	6,17E+11	56,35	6,57
C-sheet 240 600g/m ²	1	4,70E+11	19,25	-
	2	5,38E+11	36,31	14,31
	3	5,98E+11	51,56	11,18
	4	6,52E+11	65,27	9,05
	5	7,01E+11	77,69	7,52
C-sheet 640 600g/m ²	1	5,04E+11	27,87	-
	2	5,96E+11	51,10	18,17
	3	6,74E+11	70,79	13,03
	4	7,41E+11	87,71	9,90
	5	7,99E+11	102,42	7,83
C-laminate (90/1.2) SM	1	5,55E+11	40,77	-
C-laminate (90/1.4) SM	1	5,78E+11	46,62	-
C-laminate (90/1.2) HM	1	5,83E+11	47,84	-
C-laminate (90/1.4) HM	1	6,10E+11	54,50	-

Nos resultados de ganhos proporcionais ($EI_{teo,r} / EI_{teo,nr}$) o maior valor de acréscimo da rigidez foi para o reforço com manta de fibra de carbono C-sheet 640 com incremento de 102,42% ($\alpha=0,47\%$) e o menor incremento para a manta de fibra de vidro G-sheet E 50_50 com incremento de 1,24% ($\alpha=0,03\%$).

Dentre os reforços com laminados, foi observado o maior incremento proporcional de rigidez ($EI_{teo,r} / EI_{teo,nr}$) para o reforço com C-laminate 90/1,4 HM com incremento de 54,50% e o menor incremento para C-laminate 90/1,2 SM com 40,77%.

Com a variação de 35 GPa entre o módulo de elasticidade do laminado HM e SM, é obtido incremento de rigidez de 5,0% superior para o C-laminate 90/1,2 HM. Para o C-laminate 90/1,4 HM o incremento de rigidez atinge um valor de 5,4%, em comparação ao SM.

Comparando os tipos de reforço, os de fibra de vidro apresentaram os menores incrementos de rigidez, seguido do reforço de fibra de aramida e carbono. Os reforços de fibra de vidro apresentam o menor incremento de rigidez por serem o reforço, do grupo analisado, que possui menor módulo de elasticidade e menor área de reforço. Destaca-se que a fibra de vidro e a de aramida possuem módulo de elasticidade aproximadamente 8,7 e 5,3 vezes inferiores, respectivamente, em comparação a manta C-sheet 640. Esta diferença se torna a maior condicionante, por conta da grande diferença entre módulos de elasticidade, para a obtenção de de uma rigidez maior, visto que a espessura da manta de aramida supera a da manta C-sheet 640.

Nos valores obtidos na análise de ganho de rigidez por camada de reforço, observa-se que os ganhos são maiores no intervalo de uma para duas camadas em comparação aos outros intervalos, avaliando até 5 camadas. Este fato se repete para todos os tipos de reforço analisados. Isto demonstra uma potencial diminuição de eficiência no ganho de rigidez pela adição de múltiplas camadas.

Ilustrando este fato, é extrapolado o número de cinco camadas de reforço na análise, apresentando na Figura 9 o gráfico de percentagem de ganho de rigidez por adição unitária de camada de reforço. Para esta análise, é utilizada a manta de fibra de carbono C-sheet 640 e de vidro G-sheet 50_50, por serem os reforços que apresentam o maior e menor ganho, respectivamente. É analisada a diferença entre a rigidez obtida no elemento reforçado com uma e duas camadas, duas e três camadas, até a diferença entre 9 e 10 camadas.

Verifica-se que a adição de camadas de reforço não gera um ganho linear na rigidez. Essa adição de camadas incrementa a rigidez, porém a cada adição de camada de reforço o ganho de rigidez é menor em comparação a adição anterior. Também é observado que quanto maior o incremento de rigidez implementado por um reforço, maior será a diferença de ganho de rigidez com a

adição de uma nova camada. Este fato é demonstrado com maior clareza no gráfico da Figura 9.

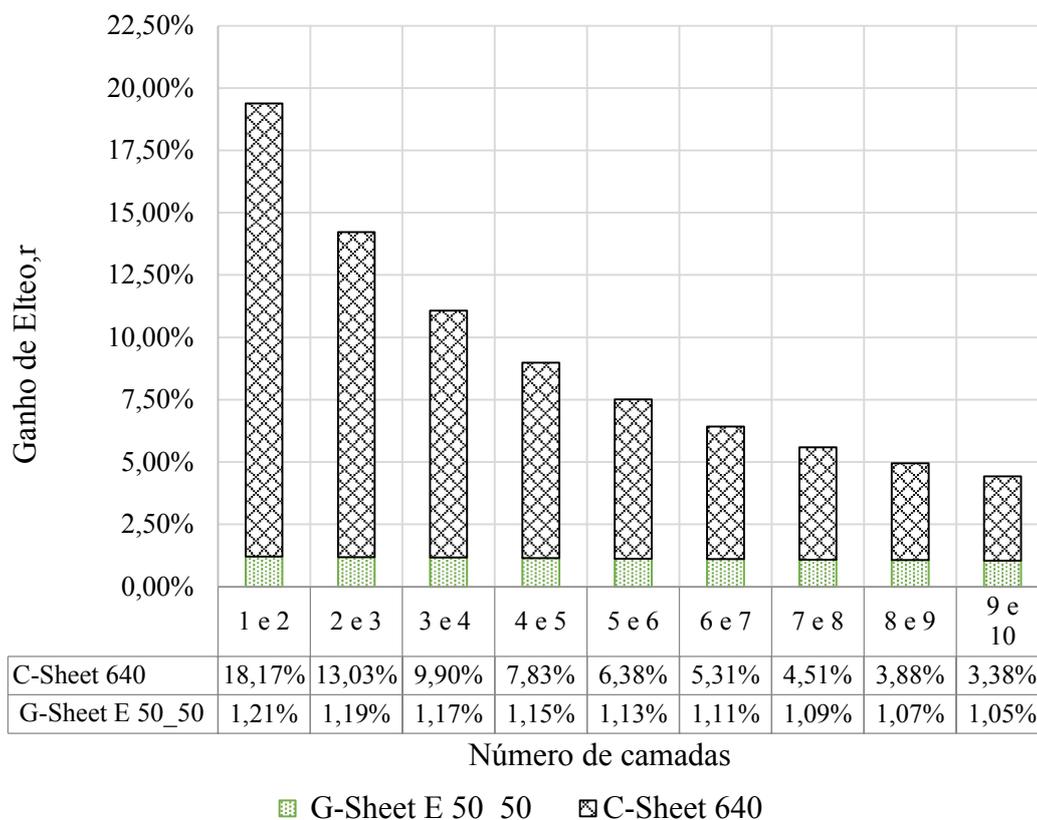


Figura 9 – Gráfico do ganho de rigidez à flexão por camada adicionada de reforço.

Adicionalmente, foram determinados os valores de rigidez à flexão correspondente a uma secção transversal de 100 mm x 200 mm com módulo de elasticidade das classes de resistência C18 e C24 da EN 338 (CEN, 2003). Os valores determinados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Rigidez calculadas para as classes de resistência C18 e C24 para uma secção transversal 100 x 200 mm².

Classe de resistência	Secção transversal		E _{méd} MPa	EI N.mm ²
	mm	mm		
C18	100	200	9000	6,0E+11
C24			11000	7,3E+11

Com valores de rigidez à flexão calculado, é observado que a Criptoméria com o módulo de elasticidade analisado (5918 MPa) possui valor de rigidez inferior a ambos os casos. Para os elementos reforçados é apresentado, no gráfico da Figura 10, a variação da rigidez dos elementos com os diversos tipos de reforço de FRP. Além disto, é indicado com linhas a

tracejado, a rigidez à flexão calculada para a classe de resistência C18 e C24. Desta forma, é comparada a rigidez à flexão obtida para as classes de resistência com a da Criptoméria reforçada com até cinco camadas.

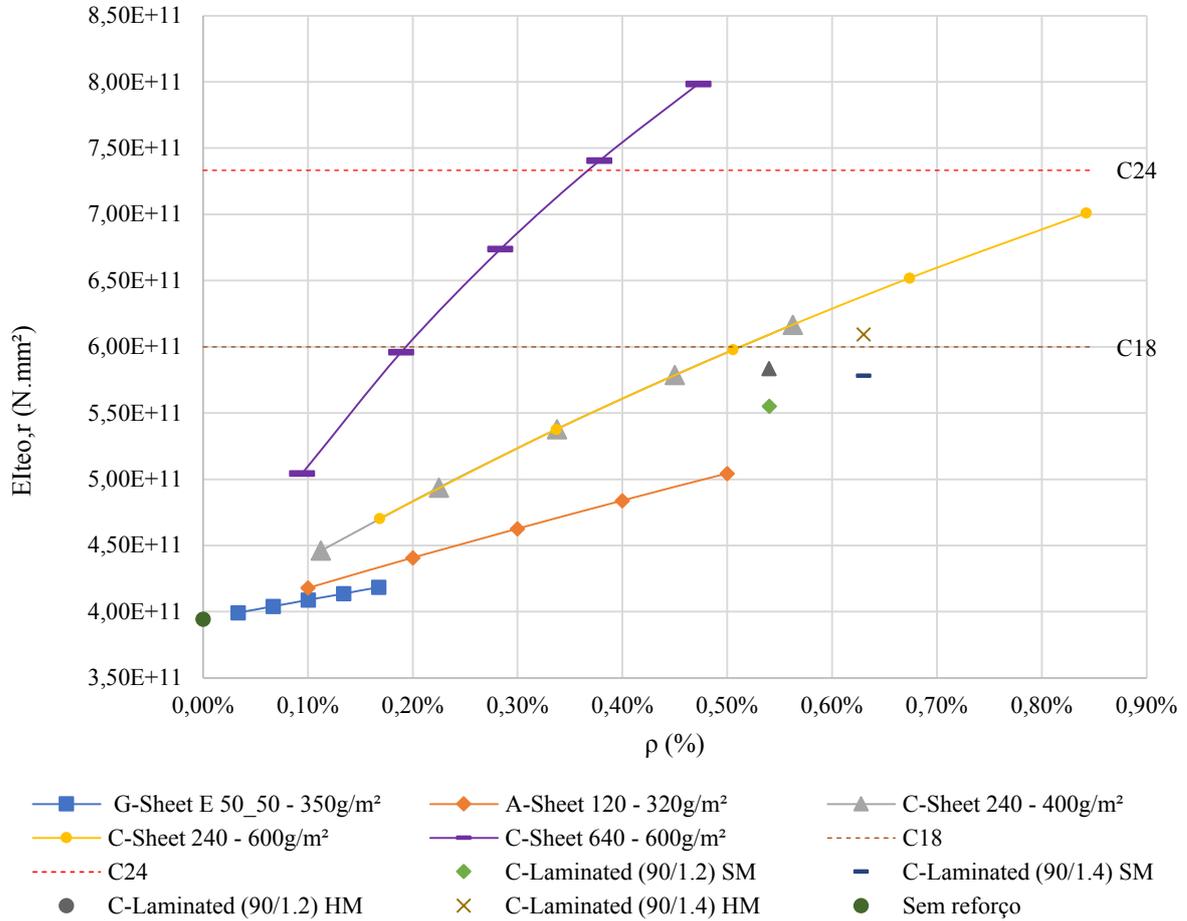


Figura 10 - Gráfico da $El_{teo,r}$ vs ρ e os valores mínimos de rigidez para as classes de resistência (secção 100 x 200 mm² e $E=5918$ MPa).

Como resultado, é observado que dois elementos reforçados obtiveram rigidez à flexão igual ou superior a calculada para a classe de resistência C24. Para a rigidez calculada para a classe C18 sete elementos tiveram rigidez à flexão igual ou superior a este valor.

- i. C-sheet 640 com quatro ou cinco camadas (C24);
- ii. C-sheet 240 – 400 g/m² - com cinco camadas (C18);
- iii. C-sheet 240 – 600 g/m² - com quatro ou cinco camadas (C18);
- iv. C-sheet 640 com três, quatro ou cinco camadas (C18);
- v. C-laminate (90/1,4) HM (C18).

Quantificando a relação entre a rigidez do elemento reforçado e os calculados para essas duas classes de resistência, é apresentado na Tabela 15 a diferença percentual entre estes. Os elementos reforçados que apresentam rigidez superior a classe de resistência C18 são destacados em negrito na tabela em questão.

Tabela 15 – Relação entre a rigidez calculada para as classes de resistência C18 e C24 e a dos elementos de madeira reforçados.

Tipo de fibra S&P	Nº camadas	C18	C24
G-Sheet E 50_50	1	-33,4%	-45,5%
	2	-32,6%	-44,9%
	3	-31,8%	-44,2%
	4	-31,0%	-43,6%
	5	-30,2%	-42,9%
C-Sheet 240 – 400 g/m ²	1	-25,6%	-39,1%
	2	-17,7%	-32,6%
	3	-10,3%	-26,6%
	4	-3,5%	-21,1%
	5	2,8%	-15,9%
C-Sheet 240 – 600 g/m ²	1	-21,6%	-35,8%
	2	-10,4%	-26,7%
	3	-0,3%	-18,5%
	4	8,7%	-11,0%
	5	16,8%	-4,4%
C-Sheet 640 – 600 g/m ²	1	-15,9%	-31,2%
	2	-0,6%	-18,7%
	3	12,3%	-8,1%
	4	23,4%	0,9%
	5	33,1%	8,9%
A-Sheet 120 – 290 g/m ²	1	-30,3%	-43,0%
	2	-26,5%	-39,9%
	3	-22,9%	-36,9%
	4	-19,3%	-33,9%
	5	-15,9%	-31,2%
C-laminate (90/1.2) SM	1	-7,4%	-24,3%
C-laminate (90/1.4) SM	1	-3,6%	-21,1%
C-laminate (90/1.2) HM	1	-2,8%	-20,5%
C-laminate (90/1.4) HM	1	1,6%	-16,9%

Observa-se que algumas soluções de reforço, mesmo que não superando o valor de rigidez calculado para a classe de resistência C18 ou C24, se aproximam destas. Como exemplo, pode ser destacado o reforço com três camadas da manta de carbono C-sheet 240 – 600 g/m² que apresenta rigidez menor que a calculada para a classe de resistência C18 em 0,3%. Em comparação com o valor obtido para a classe de resistência C24, a solução de reforço que mais

se aproxima é com recurso a manta de fibra de carbono C-sheet 640 que ainda assim, apresenta um valor inferior (8,1%).

Para além desta análise, é verificado na Figura 10 que os laminados possuem maiores percentagens de reforço (ρ), em relação a secção transversal, que as mantas C-sheet 640, com duas camadas, e a C-sheet 240 – 600 g/m², com três camadas, mas as mantas superam a rigidez obtida com os laminados C-laminate SM 100/1,2 e 1,4 e HM 1,2. A manta C-sheet 640 com três camadas, com menor percentagem de reforço (0,28%), possui maior rigidez à flexão (6,74E+11 N.mm²) que o laminado C-laminate 100/1,4 HM (6,10E+11 N.mm²), cuja percentagem de reforço é de 0,63%. Então, com os reforços analisados, o acréscimo de percentagem de reforço não traduziu num ganho de rigidez efetiva à flexão capaz de compensar a diferença entre módulos de elasticidade de ambas as soluções consideradas.

Verificando a influência do módulo de elasticidade da madeira no resultado final da rigidez à flexão, é realizada de seguida a análise com três módulos de elasticidade distintos. São utilizados módulos de elasticidade de 9000 MPa, 10000 MPa e 11000 MPa nesta avaliação.

Observa-se nesta análise que os reforços em elementos de madeira com maior módulo de elasticidade apresentam maiores ganhos absolutos de rigidez. Destacando a manta de fibra de carbono C-sheet 640 com três camadas, apresenta-se na Tabela 16 o ganho de rigidez em relação ao elemento não reforçado.

Tabela 16 – Variação da rigidez em relação ao módulo de elasticidade da madeira com elementos reforçados com C-sheet 640.

Tipo de fibra S&P	Nº camadas	E_w MPa	EI_{teo} N.mm ²	$\frac{EI_{teo,r}}{EI_{teo,nr}}$ -	$EI_{teo,r} - EI_{teo,nr}$ N.mm ²
	unidade				
Sem reforço	-	9000	6,00E+11	-	3,04E+11
C-sheet 640	3		9,04E+11	50,62%	
Sem reforço	-	10000	6,67E+11	-	3,09E+11
C-sheet 640	3		9,76E+11	46,33%	
Sem reforço	-	11000	7,33E+11	-	3,13E+11
C-sheet 640	3		1,05E+12	42,72%	

Verificando o ganho absoluto de rigidez em comparação com o elemento não reforçado, o maior ganho é de 3,13E+11 N.mm² com o elemento de 11000 MPa, superando os elementos que possuem 9000 e 10000 MPa.

Com estes resultados, comparam-se a rigidez obtidas com 9000 e 10000 MPa com a calculada para a classe de resistência C24. Não é feita a comparação com a rigidez calculada para a classe de resistência C18 pela rigidez ser alcançada sem reforço, como é o caso do módulo de elasticidade de 11000 MPa para a classe de resistência C24. Desta forma, os resultados são:

- Para madeira com 9000 MPa de módulo de elasticidade:
 - i. Nove reforços geram elementos com rigidez superior à calculada para C24; (C-sheet 240 – 400 g/m² com três camadas C-sheet 240 – 600 g/m² com duas e três camadas, C-sheet 640 com duas e três camadas e todos os laminados.)

- Para madeira com 10 GPa de módulo de elasticidade:
 - i. Treze reforços geram elementos com rigidez superior a calculada para a C24; (A-sheet 120 com três camadas, C-sheet 240 – 400 g/m² com duas e três camadas C-sheet 240 – 600 g/m² com uma, duas e três camadas, C-sheet 640 com uma, duas e três camadas e todos os laminados).

Tendo em conta os resultados obtidos neste capítulo, os reforços de FRP que apresentaram melhor potencial para incrementar a rigidez do elemento, fazendo com que este supere o calculado para as classes de resistência C18, são os reforços de manta de fibra de carbono C-sheet 640 e laminado C-laminate (90/1,4) HM. Logo, esses reforços serão levados em conta na realização da campanha experimental.

4 CAMPANHA EXPERIMENTAL DE VIGAS MACIÇAS DE MADEIRA

4.1. Introdução

Neste capítulo é descrita a campanha experimental realizada, nomeadamente a caracterização de algumas propriedades mecânicas da madeira maciça sem e com reforço de FRP. Para tal caracterização, foram realizados dois ensaios distintos: i) ensaio dinâmico (apenas sem reforço) e ii) ensaio estático de flexão. As principais propriedades registadas foram: i) frequência de vibração (f_r); ii) módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}); iii) módulo de elasticidade local ($E_{m,l}$); iv) módulo de elasticidade estático global ($E_{m,g}$); v) rigidez à flexão (EI) e vi) momento resistente (M_r). Previamente aos ensaios supracitados, foi realizada a medição da secção dos provetes (espessura, largura e comprimento), o teor de água e massa, apresentando também essas características. No caso dos provetes reforçados, são demonstradas as principais propriedades dos materiais utilizados para reforço (FRP e adesivos), com base nas informações do fabricante destes materiais, o procedimento de aplicação de cada tipo de FRP e a configuração de reforço de cada provete. Para cada solução e provete considerado é apresentado o resultado obtido.

4.2. Matéria-prima

As vigas analisadas são de madeira maciça da espécie *Criptoméria* proveniente da Região Autónoma dos Açores, com dimensões nominais de 100 x 200 x 6000 mm³.

4.2.1. Procedimento de seleção da amostra

Foram consideradas para pré-seleção 70 vigas, sendo estas submetidas a ensaio não destrutivo para a avaliação do módulo de elasticidade dinâmico. Como critério de seleção, consideraram-se para posterior análise todas as vigas cujo E_{dyn} se situasse entre 5500 e 7000 MPa. Na pré-seleção foram utilizados valores nominais para as secções transversais e comprimento, buscando uma maior velocidade na escolha dos provetes. O intervalo admitido para aceitação dos provetes baseou-se na relação entre o módulos de elasticidade dinâmico e estático. Assim, seria expectável obter uma amostra cujo valor médio de módulo de elasticidade estático fosse próximo de 5500 MPa.

Em uma segunda fase, considerando os 41 provetes resultantes da pré-seleção, foi realizada a medição das secções dos provetes (espessura, largura e comprimento). Com estes dados foi realizado o ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático. Assim, foram realizados ensaios nos 41 provetes, tendo seguindo para a terceira e última fase a amostra cujos provetes apresentaram módulo de elasticidade estático entre 5200 a 5900 MPa. Ressalta-se que

também foi realizada a avaliação do módulo de elasticidade dinâmico nestes provetes. Após esta última seleção, foi obtido um grupo de 18 provetes.

4.2.2. Caracterização não destrutiva da amostra

O ensaio utilizado para a caracterização não destrutiva dos provetes de madeira, baseou-se no método de vibração longitudinal, tendo-se realizado com recurso ao *Machine Timber Grader* (MTG), que tem como resultado a propriedade indicadora designada de módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}). O método consiste na introdução de uma vibração no provete através de um impacto gerado pelo equipamento em um dos topos do provete. A onda percorre a peça no seu comprimento e regressa ao topo inicial sendo registado o espectro de resposta através do sensor recetor que está incorporado no equipamento MTG. O *software* processa o sinal e, como *output* do ensaio, é obtida a frequência de vibração. Esta frequência é relacionada com as propriedades do provete, determinando o módulo de elasticidade dinâmico.

Na pré-seleção, como supracitado, o ensaio foi realizado com a utilização de medidas nominais para os provetes. Após esta pré-seleção, foi realizada novamente a avaliação do módulo de elasticidade dinâmico nos provetes que obtinham módulo de elasticidade dinâmico dentro do intervalo já descrito. Para esta avaliação foram realizadas medições de teor de água, da massa dos provetes e da espessura e largura dos provetes em três pontos (a 0,6 m de cada topo e na secção correspondente a meio vão), para por fim proceder ao ensaio. O ensaio foi realizado no topo de cada provete, sendo este provete colocado nas condições de viga simplesmente apoiada, colocando lâminas de *neoprene* entre o provete e as chapas metálicas que serviram de suporte, com o objetivo de atenuar o efeito de excitações externas. A realização do ensaio é demonstrada Figura 11.



Figura 11 – Ensaio dinâmico com a utilização do *Timber Grader* MTG.

4.2.3. Ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático

Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão local ($E_{m,l}$) e global ($E_{m,g}$) seguiram-se os procedimentos descritos na EN 408 (CEN, 2003). Seguindo os preceitos normativos, considerou-se um vão livre de 3600 mm (18 h), distância entre um ponto de aplicação de carga e o apoio mais próximo de 1200 mm (6 h) e distância entre pontos de carga de 1200 mm (6 h). Para todos estes ensaios, foi utilizado um atuador hidráulico com capacidade máxima de carga de 100 kN, tendo a aquisição de dados de deslocamentos dos transdutores e da força deste atuador com intervalos de 0,1 segundos.

Na avaliação do módulo de elasticidade, foi feita a instalação de três transdutores de deslocamento de 50 mm e quatro de deslocamento de 20 mm de capacidade máxima para a medição das deformações. Estes transdutores foram posicionados com as seguintes configurações:

- i. Dois transdutores de 50 mm à meia altura da secção do provete e no centro do vão;
- ii. Quatro transdutores de 20 mm à meia altura da secção do provete e 500 mm do centro (dois em cada face);
- iii. Um transdutor de 50 mm posicionado no centro do vão e na metade da largura do provete.

O *layout* de ensaio com a colocação dos transdutores de deslocamento é apresentado na Figura 12.



Figura 12 – Layout de ensaio para avaliação do módulo de elasticidade local e global.

A carga máxima aplicada foi de 40% da carga de rotura estimada, tendo como base ensaios à flexão em provetes de Criptoméria e secção transversal nominal de 100 x 200 mm², realizados previamente ao presente estudo (SerQ, 2019). Esta carga foi aplicada em controlo de deslocamento do atuador hidráulico, tendo velocidade constante de 0,6 mm/s (0,003 h). Para o cálculo do $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$, foram utilizadas as equações 4.1 e 4.2, respetivamente.

$$E_{m,l} = \frac{al^2_1(F_2 - F_1)}{16l(w_2 - w_1)} \quad (4.1)$$

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (4.2)$$

Sendo, a a distância entre pontos de aplicação de carga, l_1 é a distância entre pontos de medição de deformação ($5 h$), l a totalidade de comprimento do vão ($18 h \pm 3h$), I é o momento de inercia do provete, b é a largura do provete, h é a altura do provete, $(F_2 - F_1)$ é a diferença entre as forças aplicadas, $(w_2 - w_1)$ é a diferença entre as deformações medidas e G é o módulo de distorção. No presente estudo, considerou-se G como infinito.

Como resultado da caracterização da matéria-prima, são apresentadas as características, como largura do provete de madeira (b_w), altura do provete de madeira (h_w) e comprimento do provete de madeira (c_w), e propriedades dos provetes selecionados para o reforço com FRP na Tabela 17.

Tabela 17 – Características e propriedades da matéria-prima selecionada.

Referência do provete	b_w	h_w	c_w	Teor de água	$E_{dyn,nr}$	$E_{m,g}$	ρ
	mm	mm	mm	%	MPa	MPa	kg/m ³
1	98,1	196,0	6001	13,2	5981	5364	282,2
3	98,2	198,0	6002	12,1	5967	5577	291,0
13	99,5	197,8	5993	13,9	5704	5525	320,7
15	98,7	198,7	5996	15,0	5984	5361	307,1
18	98,2	196,2	6004	15,3	7119	5935	329,5
31	98,3	196,0	5998	17,6	5954	5525	333,0
32	98,2	196,2	5998	17,2	6094	5517	332,7
36	99,6	196,3	6000	14,7	5707	5752	327,4
37	97,4	197,0	6001	13,2	8611	5903	271,0
38	98,9	196,8	5998	14,6	7045	5893	304,9
39	98,6	198,0	5992	14,9	5973	5805	278,4
40	98,7	196,3	5999	14,3	5512	5228	326,4
44	97,8	198,5	5994	16,8	5764	5424	284,2
52	97,8	199,5	6001	15,0	6150	5333	285,7
63	97,3	199,7	5999	14,0	6184	5497	275,9
67	98,9	199,0	6004	14,0	6014	5594	281,4
68	99,0	197,0	5997	13,8	5832	5687	286,8
69	97,5	198,0	5998	13,3	6404	5351	256,0
Mínimo	97,3	196,0	5992	12,1	5512	5228	256,0
Média	98,4	197,5	5999	14,6	6222	5571	298,6
Máximo	99,6	199,7	6004	17,6	8611	5935	333,0
COV	0,7%	0,6%	0,1%	9,9%	11,7%	3,9%	8,2%

4.3. FRP's

4.3.1. Caracterização dos produtos de reforço

Para o reforço dos provetes foram utilizados dois sistemas de FRP, manta e laminado. Para o reforço com manta foi utilizado o produto comercial C-sheet 640 e para o reforço com laminado foi utilizado o produto comercial C-laminate 90/1,4 - 200/2000 HM. Os dois produtos de reforço em questão foram escolhidos com base nos resultados da análise teórica de rigidez à flexão. Tendo ambos produzido um reforço que gerou um elemento com rigidez à flexão superior a rigidez à flexão calculada para a classe de resistência C18. A manta C - sheet 640 é uma manta de fibra de carbono unilateral de alto módulo de elasticidade, elevada resistência e baixa extensão. O C-laminate 200/2000 HM é um laminado de fibra de carbono de alto módulo de elasticidade.

De modo a assegurar uma ação compósita do reforço com FRP e a viga de madeira, foram utilizadas duas resinas de base epóxi, ambas bi-componentes (S&P Resin 55 HP e S&P Resin 220 HP).

As principais propriedades mecânicas e dimensões dos materiais utilizados no sistema de reforço com FRP são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 -Principais propriedades e dimensões dos materiais do sistema de reforço com FRP utilizado.

Sistema FRP S&P		Espessura	Gramagem	E	Resistência	Extensão
					à tração	na rotura
		mm	g/mm ²	MPa	MPa	
Manta	C-sheet 640	0,189	430	≥ 640000	≥ 2600	0,4%
Laminado	C-laminate 200/2000 HM	1,4	-	≥ 205000	≥ 2800	≥ 1,35%
Resina	Resin 55 HP	-	-	≥ 3200	-	1,7%
	Resin 220 HP	-	-	≥ 7100	-	-

4.3.2. Procedimento de aplicação do reforço

Com os materiais supracitados foram organizados 5 grupos de 3 provetes e um grupo de dois provetes de madeira cada. Os grupos foram organizados de forma que estes possuíssem um módulo de elasticidade médio próximo de 5500 MPa. Com esta organização, cada grupo foi reforçado com uma solução diferente de reforço, variando o número de camadas, o sistema de FRP e o comprimento do reforço.

Outro critério utilizado, em decorrência do tipo de FRP utilizado, foi o empeno em arco de face dos provetes. As peças que possuíam pouco ou nenhum empeno foram escolhidas para receber o reforço com laminado (Grupo 1 e 2).

Utilizando destes critérios, os grupos foram organizados conforme apresentado na Tabela 19. É exposto na tabela o sistema de FRP implementado em cada grupo, a organização dos grupos com as respectivas numerações designadas aos provetes (numeração relativa à primeira fase do processo de seleção), o comprimento de reforço (C_{frp}), o número de camadas de reforço de cada grupo, o módulo de elasticidade do material de reforço (E_{frp}) e dos provetes de madeira (E_w), a percentagem de reforço em relação à secção transversal (α) e a relação entre o comprimento do reforço e o vão livre do provete submetido à flexão (λ).

Tabela 19 – Características e propriedades de cada grupo de provetes reforçado.

Sistema FRP	Grupo	Nº provete	C_{frp} mm	Nº de camadas unidade	E_{frp} MPa	E_w MPa	α %	λ %
Laminado	1	44	4000	1	205000	5424	0,65%	111,1%
		31				5525		95,2%
		68				5687		111,1%
	2	69	2000			5351	0,65%	66,7%
		67				5594		55,6%
		36				5752		
Manta	3	63	4000	1	640000	5497	0,10%	111,1%
		18				5935		111,1%
		15				5361		
	4	1	2000			5364	0,10%	55,6%
		38				5893		
		3				5577		
5	40	4000	3	5228	0,28%	95,2%		
	13			5525		111,1%		
	37			5903				
6	52	2000	2	5333	0,19%	66,7%		
	39			5805		55,6%		

Com esta organização, os provetes foram reforçados seguindo as orientações do fabricante das resinas e dos FRP's. O primeiro passo para o reforço, para todos os grupos, foi a limpeza dos provetes por meio da aplicação de jatos de ar comprimido e aspiração para a retirada de partículas soltas.

Para os grupos que receberam reforço com laminado (grupo 1 e 2), utilizou-se duas resinas, nas proporções 4,2 / 1,8 (componente A e B, respetivamente) para a Resin 55 HP e 2 / 1

(componente A e B, respetivamente) para a Resin 220 HP, ambas em massa. A mistura dos componentes destas resinas foi feita através de equipamento de baixa rotação e com pá misturadora até que o material apresentasse uma mistura homogénea. O comprimento final do laminado foi obtido por corte do mesmo considerando que o laminado foi fornecido sob a forma de rolo. Descreve-se o procedimento para a aplicação do reforço logo abaixo:

- i. Limpeza do laminado com acetona;
- ii. Impregnou-se o provete, na área que receberá o reforço, com Resin 55 HP (434 g/m²);
- iii. Aplicou-se a Resin 220 HP no laminado com o auxílio de um doseador próprio da S&P, garantindo uma espessura uniforme e uma dosagem de 650 g/m;
- iv. Colocou-se o laminado no provete aplicando pressão no laminado contra o provete com auxílio de um rolo de pressão de teflon, removendo o excesso de resina e assegurando uma espessura da resina final entre 1 e 4 mm (valor recomendado pela especificação técnica da resina).

A Figura 13 demonstra os procedimentos para a aplicação dos laminados de FRP, nomeadamente a aplicação da resina no laminado com auxílio do doseador S&P (Figura 12 – (a)) e a aplicação da pressão no laminado contra o provete com o auxílio do rolo de pressão (Figura 12 – (b)).



Figura 13 - Procedimentos de aplicação do sistema de laminados de FRP.

Para os grupos que receberam reforço com manta C-sheet 640 (3, 4, 5 e 6), esta teve de ser cortada no comprimento e na largura (100 mm), dado que é fornecida em rolo com largura de 300 mm. Para a aplicação da manta utilizou-se a Resin 55 com consumo de 1300 g/m². O procedimento de mistura foi o mesmo descrito para os provetes reforçados com laminados. Logo após a mistura foram realizados os seguintes procedimentos:

- i. Impregnou-se a face do provete a receber o reforço com a resina, espalhando-se o material com um rolo de pintura de modo a criar uma camada uniforme (Figura 14-a);
- ii. Impregnou-se a manta com a resina, espalhando-a com um rolo de pintura (Figura 14-b);

- iii. Colocou-se a manta impregnada no provete e, utilizando um rolo de pressão de teflon, aplicou-se pressão (Figura 14-c);
- iv. Impregnou-se novamente a manta, retirou-se o excesso com uma espátula de borracha e, com um rolo de pressão, aplicou-se pressão (Figura 14-d).



Figura 14 – Procedimentos de aplicação do sistema de mantas de FRP.

No caso dos provetes que receberam múltiplas camadas de reforço, foi adotado o procedimento descrito para a primeira camada, nomeadamente os procedimentos descritos em ii., iii. e iv. aguardando no mínimo 4 horas para a cura da resina entre camadas. O tempo de cura das resinas até a realização dos ensaios foi de no mínimo 7 dias para todos os grupos.

4.3.3. Caracterização mecânica dos provetes reforçados

Os provetes reforçados foram caracterizados por via de ensaios estáticos, tendo como objetivo a avaliação do momento resistente e a rigidez à flexão.

Para a avaliação da rigidez à flexão foi utilizado o mesmo ensaio descrito em 4.2.3 e para determinação da rigidez de flexão, foi utilizada a equação de uma viga simplesmente apoiada com duas cargas concentradas simetricamente distribuídas. A determinação teve como base a Equação 4.3.

$$EI = \frac{Pa}{24\Delta_{m\acute{a}x}} (3l^2 - 4a^2) \quad (4.3)$$

Onde, P é a carga aplicada por ponto de carga, a a distância entre o ponto de carga e o apoio mais próximo, $\Delta_{m\acute{a}x}$ a deformação máxima e l o comprimento total do vão. Os dados de força e deformação são obtidos tal como referido no procedimento para o ensaio de módulo de elasticidade estático global. Do conjunto de dados foi estabelecida o declive da nuvem de pontos ($P/\Delta_{m\acute{a}x}$).

O momento último resistente correspondente à carga de rotura foi avaliado a partir da utilização da mesma configuração de ensaio utilizada para determinação do módulo de elasticidade.

Tendo, portanto, um vão livre de 18h, estando a viga bi-apoiada. Foi alterada a velocidade de carga, sendo adotada velocidade de 0,16 ou 0,18 mm/s, dependendo das propriedades e tipo de reforço aplicado ao provete. Para a determinação do momento de rotura foi utilizada a Equação (4.4).

$$Mr = a \cdot \frac{F_{m\acute{a}x}}{2} \quad (4.4)$$

Sendo a há distância entre o ponto de carga e o apoio mais próximo e $F_{m\acute{a}x}$ a força máxima aplicada pelo atuador.

Também foi considerado, nesta campanha experimental, a medição das extensões ocorridas. Os extensómetros utilizados foram todos de $120 \pm 0,3 \Omega$ e comprimento de 6 mm (modelo FLKB-6-11 da fabricante TML). Quatro extensómetros foram instalados por provete, considerando duas configurações diferentes para a posição dos extensómetros. Em uma configuração foi instalado um extensómetro na superfície superior do provete à meia largura (E_c), dois a 19 cm da superfície superior e na face vertical do provete (E_{t_S1} e E_{t_S2}) e um na superfície inferior à meia largura do provete (E_t). Em outra configuração foi repetida a instalação dos extensómetros E_c , E_{t_S1} e E_t , não tendo o E_{t_S2} . Em substituição, foi introduzido o E_{c_S1} . Os detalhes das configurações são expostos na Figura 15.

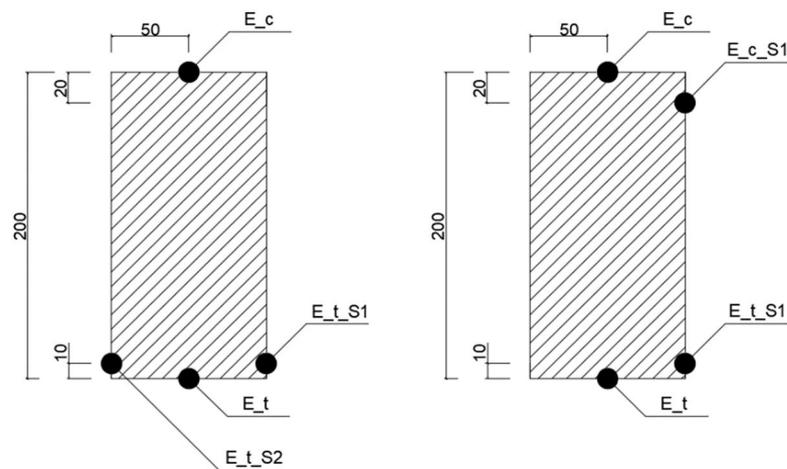


Figura 15 – Detalhe da posição dos extensómetros na secção transversal dos provetes.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados da campanha experimental das vigas de madeira maciça e discussões sobre as análises feitas com estes resultados. Como resultado são expostos os valores de deformação e forças máximas obtidas nos ensaios de rotura, a rigidez dos provetes reforçados e o momento resistente. As discussões são feitas acerca da experiência da aplicação de reforço em vigas de madeira, modos de rotura obtidos e resultados de força vs deslocamento. São feitas análises também sobre a influência das variáveis adotadas (comprimento, tipo e número de camadas de reforço) nos resultados de rigidez à flexão e momento resistente. Por fim, são apresentadas análises sobre os resultados de rigidez à flexão em comparação a valores de rigidez calculados com base na EN 338 e tensões atuantes.

5.2. Resultados experimentais

Os resultados obtidos na campanha experimental com os provetes reforçados são apresentados na Tabela 20, expondo as referências dos provetes, o vão de ensaio (l), a deformação máxima ($\Delta_{m\acute{a}x}$), a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), a rigidez à flexão ($EI_{exp,r}$) e o momento resistente (M_r). O vão de ensaio exposto é referente ao vão utilizado para os ensaios de rotura, sendo o vão de ensaio para a avaliação da rigidez à flexão igual para todos os provetes (3600 mm).

Tabela 20 – Resultados da campanha experimental dos provetes reforçados.

Referências dos provetes	l mm	$\Delta_{m\acute{a}x}$ mm	$F_{m\acute{a}x}$ kN	$EI_{exp,r}$ N.mm ²	$M_{r,r}$ N.mm	
Grupo 1	44	3600	59,9	40,3	5,6E+11	2,4E+07
	31	4200	93,6	34,2	5,4E+11	2,6E+07
	68	3600	75,5	45,4	5,6E+11	2,7E+07
Grupo 2	69	3000	16,1	17,5	4,8E+11	0,8E+07
	67	3600	27,4	16,8	5,1E+11	1,0E+07
	36	3600	29,7	19,6	5,3E+11	1,2E+07
Grupo 3	63	3600	21,8	14,4	4,5E+11	0,8E+07
	18	3600	37,6	21,8	4,8E+11	1,3E+07
	15	3600	30,0	16,4	4,3E+11	0,9E+07
Grupo 4	1	3600	35,2	17,9	4,2E+11	1,1E+07
	38	3600	35,9	19,8	4,5E+11	1,2E+07
	3	3600	30,0	16,2	4,3E+11	0,9E+07
Grupo 5	40	4200	61,9	26,9	5,7E+11	2,0E+07
	13	3600	46,8	33,8	5,6E+11	2,0E+07
	37	3600	39,5	30,4	6,2E+11	1,8E+07
Grupo 6	52	3000	22,2	24,6	4,9E+11	1,1E+07
	39	3600	31,8	19,0	5,1E+11	1,1E+07
Não reforçado	32	3600	53,9	22,2	3,6E+11	1,3E+07
				$EI_{exp,nr}$	$M_{r,nr}$	

Na Figura 16 é apresentado o gráfico da evolução da carga aplicada em função do deslocamento do êmbolo do atuador, ambos a meio vão. É verificado para a maioria dos elementos reforçados, um comportamento elástico-linear até atingir a rotura, como é característica da madeira. A exceção registou-se no grupo 1 (provetes 44, 31 e 68) em que a curva força vs deslocamento dos 3 provetes apresenta um patamar de deformação distinto do linear ao atingir o patamar próximo da rotura dos provetes:

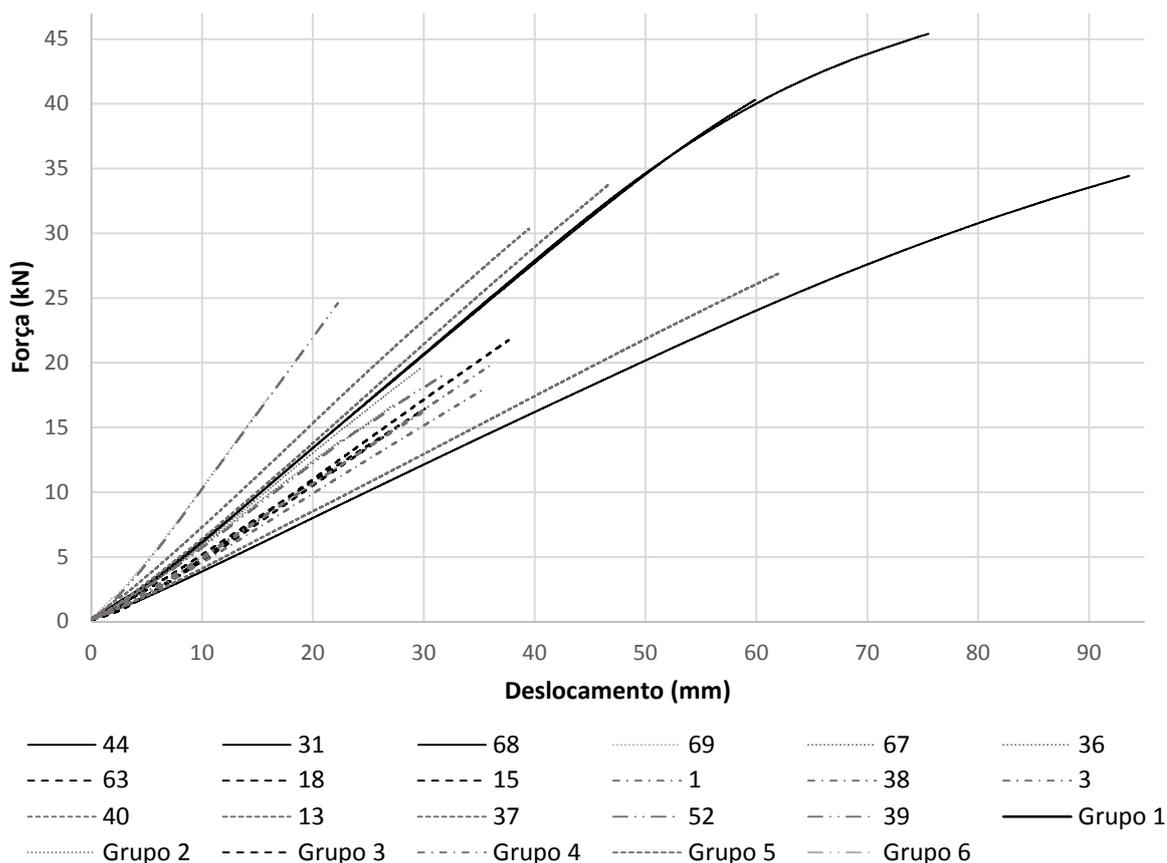


Figura 16 - Gráfico força vs deslocamento das vigas reforçadas.

Ao que tange a aplicação do sistema de reforço, o sistema com laminados é relativamente mais simples, quando comparado com a manta. Houve uma dificuldade na aplicação das mantas, pela necessidade de um maior número de pessoas para tal aplicação, com uma maior dificuldade para as mantas com 4 m. Esse fato pode ser acentuado no caso de aplicação em obra, visto que seria necessário aplicar de baixo para cima.

Em relação ao modo de rotura ocorrido em cada grupo de provetes, é feita uma divisão na apresentação dos mesmos em relação ao grupo no qual estes pertencem, visto que há um padrão de rotura em relação à tipologia de reforço adotada.

O grupo 1 (laminado 4 m) apresentou rotura da ligação adesivo/FRP, a meio vão, para os três provetes, 44, 31 e 68, conforme Figura 17.



Figura 17 – Rotura da ligação adesivo/FRP (grupo 1).

Para o grupo 2 (laminado 2 m), iniciou-se a rotura na madeira na interface de transição entre provete reforçado e não reforçado (1 metro de distância do centro do vão) nos três provetes. A Figura 17 (a) e (b) ilustra uma visão geral de um provete após rotura e o detalhe da rotura, respetivamente.



Figura 18 – Rotura da madeira (a) e detalhe da rotura logo após o FRP (b) (grupo 2).

No grupo 3 (manta 4 m, 1 camada), a rotura ocorreu no FRP, nos três provetes, próximo ao ponto de aplicação de carga. Demonstra-se, na Figura 19 (a) e (b), a visão geral e o detalhe da rotura, respetivamente.

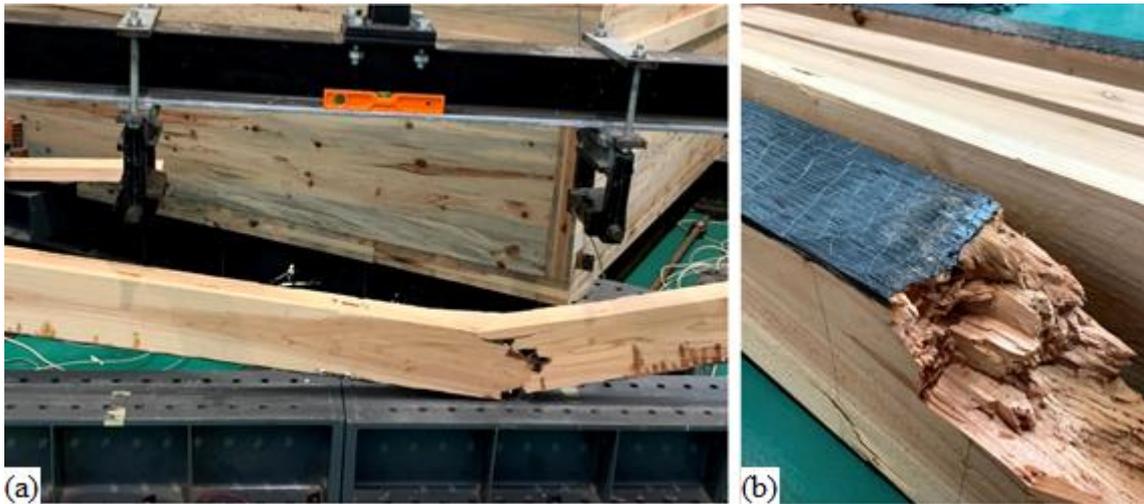


Figura 19 – Rotura do FRP próximo ao ponto de carga (a) e detalhe da rotura do FRP (b) (grupo 3).

Os grupos 4 e 6 (manta 2 m) obtiveram rotura igual ao grupo 2 (laminado 2 m), ou seja, com rotura na secção onde ocorre o fim do reforço e início de secção não reforçada. Tendo na Figura 20 (a) e (b) a visão geral e o detalhe da rotura, respetivamente.



Figura 20 – Rotura logo após o reforço de FRP (a) e detalhe da rotura (b) (grupo 4).

Por fim, observou-se a rotura padrão para o grupo 5 (manta 4 m e 3 camadas) no FRP à meio vão, conforme Figura 21, tendo a visão geral em (a) e o detalhe em (b).

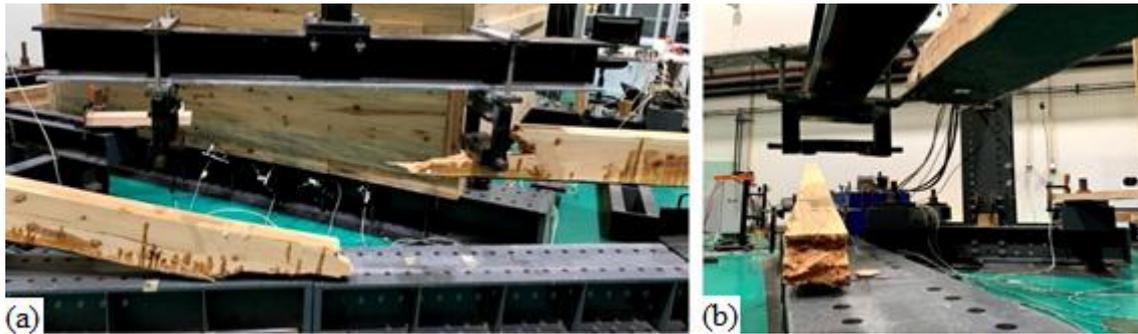


Figura 21 – Rotura a meio vão do FRP (a) e o detalhe da rotura (b) (grupo 5).

Com os valores de momento resistente e rigidez à flexão dos provetes reforçados e não reforçados, calculam-se as variações entre estes para verificar a eficiência dos reforços estudados. Como método para esta análise, utiliza-se a Equação 5.1.

$$\Delta = \left(\left(\frac{Valor_r}{Valor_{nr}} \right) - 1 \right) * 100 \quad (5.1)$$

Onde, Δ indica a variação entre o valor da propriedade avaliada, o valor da propriedade do provete reforçado ($Valor_r$) e o valor da propriedade obtida do provete não reforçado ($Valor_{nr}$).

A análise supracitada é possível para a rigidez à flexão, porém como não foram realizados ensaios destrutivos nos provetes desta série, faz-se necessária, para a análise da variação do momento resistente, utilizar dos ensaios realizados na campanha experimental feita por SerQ (2019). Para esta comparação utiliza-se como referência alguns resultados obtidos nesta campanha experimental previamente realizada. Os resultados selecionados desta campanha foram os que obtinham o módulo de elasticidade global entre 5200 e 5900 MPa. Este intervalo de valores foi escolhido por conta da campanha experimental dos provetes reforçados do presente trabalho possuírem o mesmo intervalo.

Desta forma, exibe-se na Tabela 21 a média de algumas propriedades destes provetes. As propriedades expostas são: dimensões dos provetes (b – largura, e – espessura e l – comprimento), módulos de elasticidade global ($E_{m,g}$), os momentos resistentes ($M_{r,nr}$) e as massas volúmicas (ρ). Desta campanha experimental apresentam-se na Tabela 21 os valores mínimos, médios e máximos das dimensões e propriedades supracitadas.

Tabela 21 – Valores mínimos, médios e máximos das propriedades e dimensões dos provetes da campanha experimental do SerQ (2019).

	b	e	l	E_{m,g}	F_{máx}	M_{r,nr}	ρ
	mm	mm	mm	N/mm ²	kN	N.mm	kg/m ³
mínimo	97,4	194,8	3600	5219	13,8	0,8E+07	249,6
médio	99,4	197,8	3600	5571	20,7	1,2E+07	286,3
máximo	101,0	200,3	3600	5856	34,2	2,1E+07	378,0

5.3. Análises dos resultados de rigidez à flexão

Após esta exposição são demonstradas, na Tabela 22, as variações da rigidez à flexão (ΔEI) entre os provetes reforçados (EI_r) e não reforçados (EI_{nr}). Analisando também individualmente cada grupo, visando a melhor compreensão dos resultados de cada tipologia de reforço, é apresentada a variação média da rigidez à flexão para cada grupo ($\Delta EI_{média}$).

Tabela 22 – Variação da rigidez à flexão experimental entre os provetes reforçados e não reforçados.

Referências dos provetes	EI_{exp,r}	EI_{exp,nr}	ΔEI	ΔEI_{média}
	N.mm ²	N.mm ²	%	%
Grupo 1	44	5,6E+11	3,5E+11	60,6
	31	5,4E+11	3,5E+11	55,1
	68	5,6E+11	3,6E+11	54,1
Grupo 2	69	4,8E+11	3,4E+11	42,7
	67	5,1E+11	3,6E+11	40,9
	36	5,3E+11	3,6E+11	48,7
Grupo 3	63	4,5E+11	3,5E+11	28,2
	18	4,8E+11	3,7E+11	28,7
	15	4,3E+11	3,4E+11	26,7
Grupo 4	1	4,2E+11	3,3E+11	25,7
	38	4,5E+11	3,7E+11	20,6
	3	4,3E+11	3,5E+11	22,9
Grupo 5	40	5,7E+11	3,4E+11	65,9
	13	5,6E+11	3,6E+11	57,6
	37	6,2E+11	3,9E+11	60,5
Grupo 6	52	4,9E+11	3,6E+11	34,0
	39	5,1E+11	3,7E+11	35,8

Com base no modelo teórico de cálculo da rigidez à flexão e as propriedades já apresentadas dos provetes não reforçados, apresenta-se na Tabela 23 o valor expectável da rigidez à flexão dos provetes reforçados e compara-se estes com os valores obtidos nos provetes reforçados da campanha experimental.

É exibido o valor da rigidez à flexão teórica do provete reforçado ($EI_{teo,r}$), experimental não reforçada ($EI_{exp,nr}$), experimental reforçada ($EI_{exp,r}$), a relação entre a $EI_{teo,r}/EI_{exp,nr}$ e $EI_{exp,r}/EI_{teo,r}$. A relação $EI_{teo,r}/EI_{exp,nr}$ apresenta o ganho expectável de rigidez à flexão após o reforço com FRP e $EI_{exp,r}/EI_{teo,r}$ indica a relação entre o valor expectável (teórico) e o experimental da rigidez à flexão dos provetes reforçados com FRP. Estas relações são calculadas conforme a Equação 5.1 e os valores supracitados apresentados na Tabela 23.

Individualizando os resultados de cada grupo, apresenta-se a média dos valores supracitados na Tabela 24.

É observado que os grupos de provetes reforçados com 4 metros de comprimento de FRP, grupo 1, 3, e 5, apresentam uma diferença menor entre o $EI_{exp,r}$ e a $EI_{teo,r}$ quando comparado com os grupos que possuem 2 metros de reforço, grupo 2, 4 e 6. Este fato se dá pelo modelo de cálculo da rigidez adotado. Neste modelo o comprimento de reforço não é levado em conta. Na comparação entre laminados e mantas, o grupo 1 (laminado 4 m) possui melhor relação em comparação ao grupo 3 (manta com uma camada e 4 m de comprimento). Essa diferença aumenta na comparação do grupo 1 com o grupo 5 (três camadas de manta com 4 m de comprimento).

Também é avaliado que os valores experimentais são inferiores aos teóricos, tendo como única exceção o grupo 1 (laminado com 4 m). Em relação aos valores de incremento de rigidez com a variação no número de camadas, são comparados os grupos:

- i. 3 com o 5, ambos com reforço de 4 metros de comprimento, variando de uma para três camadas, respetivamente;
- ii. 4 com 6, ambos com reforço de 2 metros de comprimento, variando de uma para duas camadas, respetivamente.

Na primeira comparação, grupo 3 com 5, é expectável um ganho médio de 32,6%. Na campanha experimental obteve-se um ganho médio de 28,4% com a adição de duas camadas. É observado uma diferença de 3,7% entre o modelo teórico e os resultados experimentais.

Na segunda comparação, grupo 4 com 6, é expectável um ganho de 19,6% pela adição de uma segunda camada. Na campanha experimental o ganho médio foi de 14,8% por essa adição. Com isso, obteve-se um valor de rigidez 3,3% maior no modelo teórico em comparação com o experimental.

Analisando o ganho de rigidez em relação ao comprimento de reforço, compara-se a rigidez dos provetes reforçados na campanha experimental com 4 e 2 m com uma camada de manta (grupo 3 com grupo 4) e para os laminados o grupo 1 e 2. O resultado é um ganho médio de 4,7% pela adição de dois metros de reforço de manta e um ganho de 7,8% pela adição de 2 m de laminado.

Tabela 23 – Análises da rigidez à flexão teórica dos provetes reforçados e experimentais dos provetes reforçados e não reforçados.

Referência do proвете		$EI_{teo,r}$	$EI_{exp,nr}$	$EI_{exp,r}$	$EI_{teo,r} / EI_{exp,nr}$	$EI_{exp,r} / EI_{teo,r}$
		N.mm ²	N.mm ²	N.mm ²	%	%
Grupo 1	44	5,5E+11	3,5E+11	5,6E+11	57,1	-1,8
	31	5,4E+11	3,5E+11	5,4E+11	54,3	0,0
	68	5,6E+11	3,6E+11	5,6E+11	55,6	0,0
Grupo 2	69	5,4E+11	3,4E+11	4,8E+11	58,8	12,5
	67	5,7E+11	3,6E+11	5,1E+11	58,3	11,8
	36	5,7E+11	3,6E+11	5,3E+11	58,3	7,5
Grupo 3	63	4,6E+11	3,5E+11	4,5E+11	31,4	2,2
	18	4,7E+11	3,7E+11	4,8E+11	27,0	-2,1
	15	4,5E+11	3,4E+11	4,3E+11	32,4	4,7
Grupo 4	1	4,3E+11	3,3E+11	4,2E+11	30,3	2,4
	38	4,8E+11	3,7E+11	4,5E+11	29,7	6,7
	3	4,6E+11	3,5E+11	4,3E+11	31,4	7,0
Grupo 5	40	5,8E+11	3,4E+11	5,7E+11	70,6	1,8
	13	6,2E+11	3,6E+11	5,6E+11	72,2	10,7
	37	6,3E+11	3,9E+11	6,2E+11	61,5	1,6
Grupo 6	52	5,4E+11	3,6E+11	4,9E+11	50,0	10,2
	39	5,6E+11	3,7E+11	5,1E+11	51,4	9,8

Tabela 24 – Média da rigidez à flexão teórica reforçada, experimental não reforçada e experimental reforçada.

Referência do proвете	$EI_{teo,r}$	$EI_{exp,nr}$	$EI_{exp,r}$	$EI_{teo,r} / EI_{exp,nr}$	$EI_{exp,r} / EI_{teo,r}$
	N.mm ²	N.mm ²	MPa	%	%
Grupo 1	5,5E+11	3,5E+11	5,5E+11	57,1	0,0
Grupo 2	5,6E+11	3,5E+11	5,1E+11	60,0	-8,9
Grupo 3	4,6E+11	3,5E+11	4,5E+11	31,4	-2,2
Grupo 4	4,6E+11	3,5E+11	4,3E+11	31,4	-6,5
Grupo 5	6,1E+11	3,6E+11	5,8E+11	69,4	-4,9
Grupo 6	5,5E+11	3,7E+11	5,0E+11	48,6	-9,1

Verificando o incremento de rigidez de cada tipo de reforço, compara-se os laminados e mantas, utilizando os grupos que possuem mesmo comprimento de reforço. As comparações são feitas

entre o grupo 1 e 3, grupo 2 e 4, grupo 1 e 5 e grupo 2 e 6. Os resultados são expostos na Tabela 25.

Tabela 25 – Comparação da rigidez à flexão entre reforços com laminados e mantas.

		Manta			
		Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
		1 camada 4 m	1 camada 2 m	3 camadas 4 m	2 camadas 2 m
Laminado	Grupo 1 4 m	22,1%	-	-5,1%	-
	Grupo 2 2 m	-	16,9%	-	1,3%

Como resultado, é observado que os laminados têm maior eficiência no incremento de rigidez para 2 e 4 m, com exceção do grupo 5.

Analisando os resultados experimentais, empregando-se a metodologia feita no subcapítulo 3.2, a qual visa comparar os resultados da rigidez à flexão em relação aos valores mínimos, desta propriedade, das classes de resistência da EN 338 (CEN, 2003), apresenta-se na Figura 22:

- i. Os valores de rigidez à flexão de cada provete, em colunas;
- ii. O número de referência dos provetes, abaixo das colunas;
- iii. A indicação dos valores médios de rigidez da EN 338 (CEN, 2003), a tracejado.

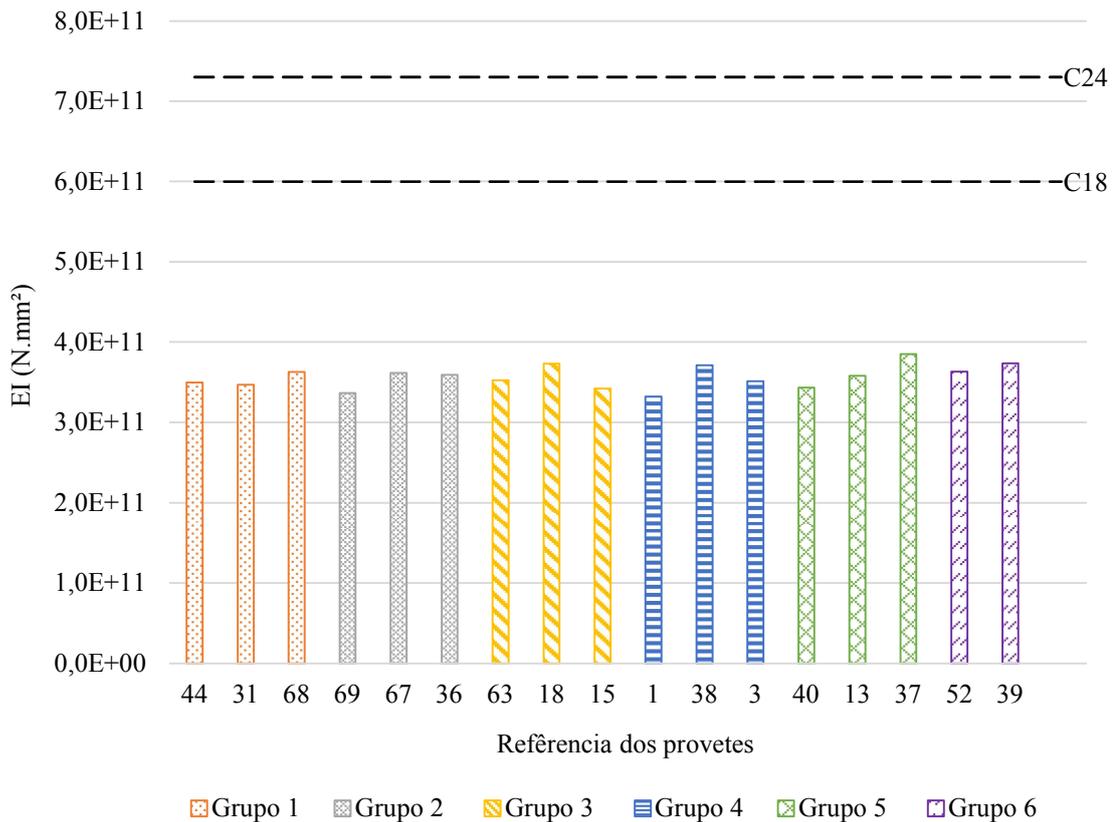


Figura 22 – Análise da rigidez à flexão dos provetes não reforçados em comparação com os valores calculados de rigidez para as classes de resistência C18 e C24 da EN 338 (CEN, 2003).

É apresentada a seguir a rigidez de cada provete reforçado e a rigidez calculada para as classes de resistência C18 e C24 da EN 338 (CEN, 2003). Observa-se pela Figura 22 que os valores de EI_{exp_nr} (com base nos E da Tabela 19) não atingem o valor de rigidez calculado de nenhuma classe de resistência aqui avaliada. Sendo assim, o gráfico da Figura 23 expõe a rigidez dos provetes reforçados da campanha experimental, distinguindo cada grupo com um preenchimento específico e indicando, em linhas pontilhadas, os valores de rigidez calculados para cada classe de resistência da EN 338 (CEN, 2003).

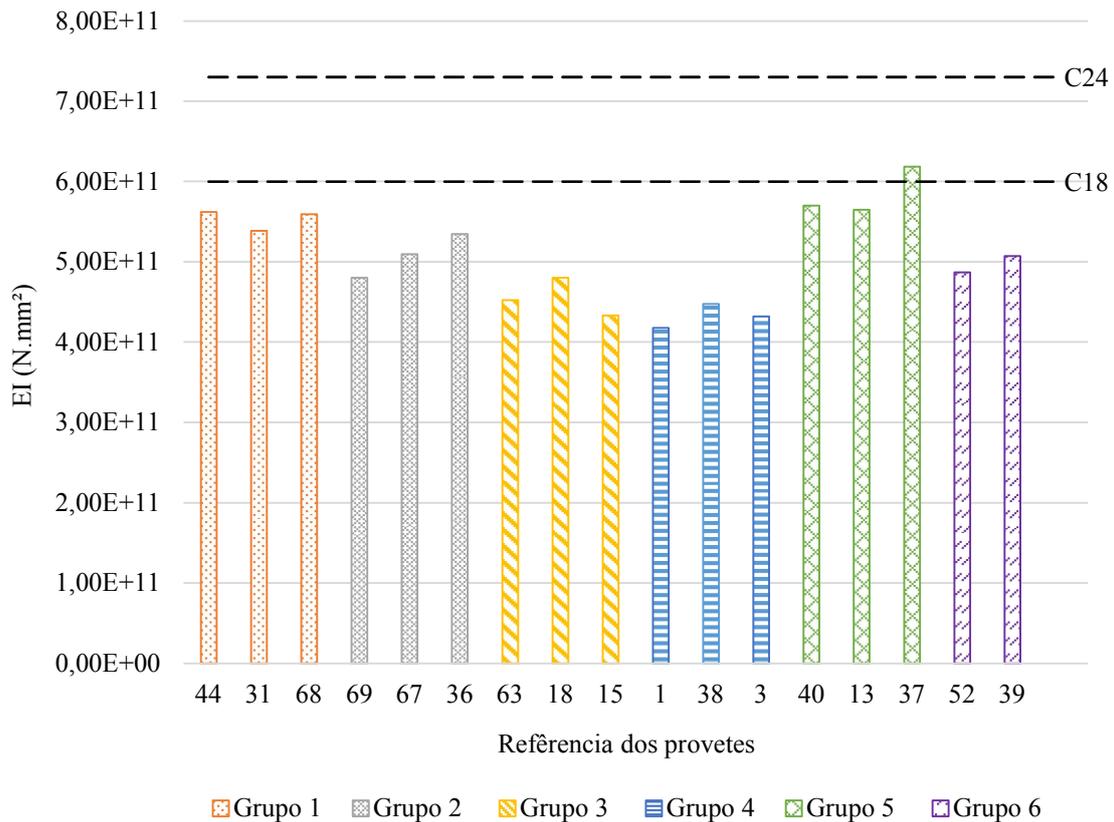


Figura 23 – Rigidez dos provetes reforçados em relação a rigidez mínima das classes de resistência da EN 338 (CEN, 2003).

Retomando aos resultados das análises teóricas de rigidez ($EI_{teo,r}$), comparando os resultados com até 3 camadas de manta e os laminados, expostas na Figura 10 verifica-se:

- 2 provetes com valor de rigidez acima da classe de resistência C18 (C-sheet 640 com 3 camadas e C-laminate HM);
- 0 provetes com valor de rigidez acima da classe de resistência C24.

No âmbito dos resultados da campanha experimental verifica-se:

- 1 provete com valor de rigidez acima da classe de resistência C18 (proвете 37 – C-sheet 3 camadas com 4 m);
- 0 provetes com valor de rigidez acima da classe de resistência C24.

5.4. Análises dos resultados de momento resistente

Retomando aos valores de momento resistente, é feita a avaliação entre os valores obtidos na campanha experimental e os valores mínimos, médios e máximos dos provetes não reforçados de SerQ (2019) com módulo de elasticidade de 5200 à 5900 MPa. É apresentado na Figura 24

o gráfico com a comparação dos momentos últimos resistentes mínimos (mín), médios (méd) e máximos (máx) dos provetes não reforçados, em linha tracejada, com os valores dos provetes reforçados em colunas, apresentado a referência de cada provete.

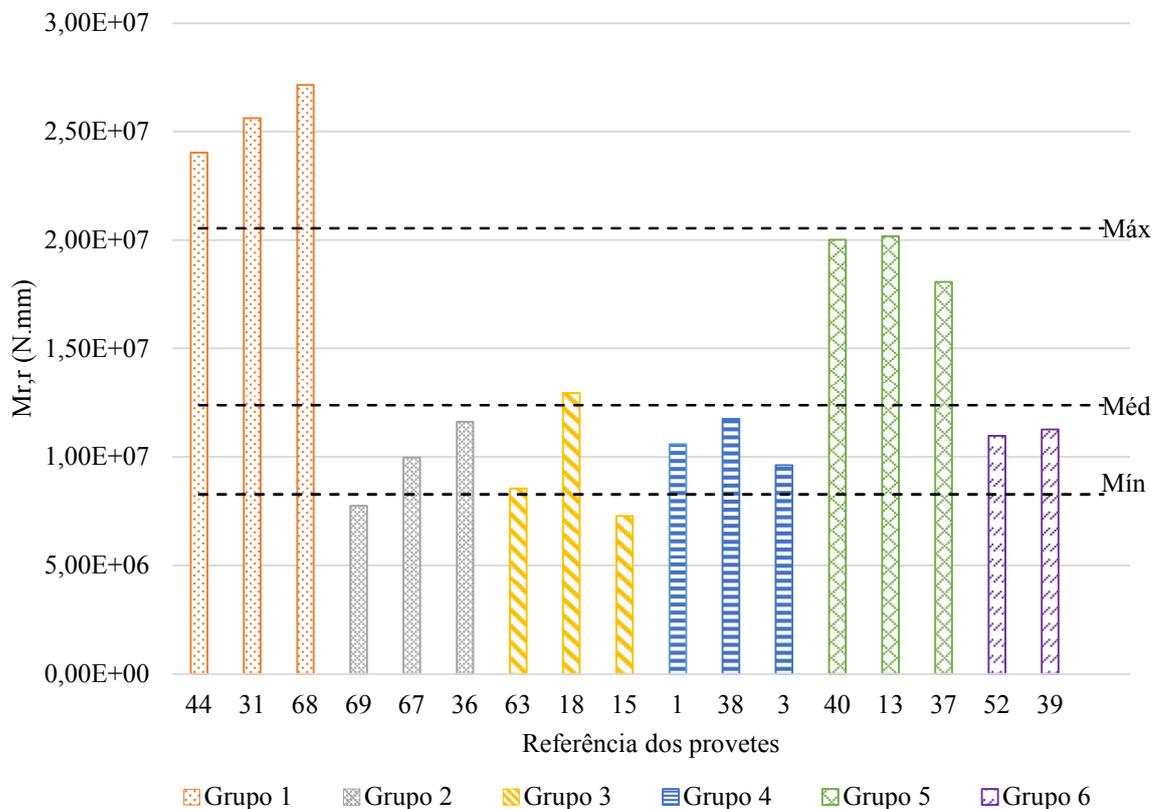


Figura 24 – Comparação dos momentos resistentes dos provetes reforçados com os valores mínimos, médios e máximos pelo SerQ (2019).

Como resultado é observado 88% dos provetes reforçados com momento resistente acima do momento resistente mínimo dos provetes não reforçados, 41% acima da média e 18% acima do momento máximo. Os 18% que apresentam momento resistente acima do momento resistente máximo dos provetes não reforçados são resultado apenas do grupo 1 (laminado com 4 m).

A análise do momento resistente em relação a variação do número de camadas de reforço, comprimento de reforço e tipo de reforço, é exposto na Tabela 26. A comparação é feita entre o momento resistente último médio de cada grupo.

Com esses resultados, os acréscimos de comprimento de reforço e no número de camadas gera um acréscimo no momento resistente. Como exceção, a manta de fibra de carbono com 4 m teve um momento resistente menor que os provetes reforçados com 2 m.

Tabela 26 – Análise da variação de comprimento e número de camadas de reforço no momento resistente.

	Laminado	Manta 1 camada	Manta com 4 m	Manta 2 m
	4 vs 2 m	4 vs 2 m	3 vs 1 camada	2 vs 1 camada
ΔM_r	161,7%	-10,0%	102,5%	15,0%

No âmbito das roturas ocorridas na campanha experimental, observou-se que as maiores recorrências de rotura ocorreram no FRP e por corte na zona de ancoragem do FRP. A ocorrência da rotura do FRP se deu para os provetes que possuem maiores comprimentos de reforço (grupo 1, 3 e 5) e por corte nos provetes com menor comprimento de reforço (grupo 2, 4 e 6). Verificou-se também o destacamento do FRP nos laminados de 4 m (grupo 1), porém, como a rotura se deu de forma frágil, não se faz possível afirmar se este ocorreu antes ou depois da rotura do FRP. Observa-se que este destacamento se deu na interface entre a resina e o provete de madeira.

5.5. Análises dos resultados de tensão

Os resultados das tensões obtidas através dos resultados dos extensômetros são expostos na Tabela 27. Com os valores de deformação e módulos de elasticidade dos materiais (provetes de madeira e FRP's) foram calculadas as tensões atuantes em cada ponto monitorado para a carga máxima aplicada durante o ensaio de flexão. O cálculo foi feito seguindo a Lei Hooke, logo admitindo um regime elástico-linear até à rotura. As deformações obtidas nos pontos E_c , $E_c S1$, $E_t S1$, $E_t S2$ e E_t , são relativas as tensões de compressão na madeira (E_c) e tração (E_t).

Analisando a influência do comprimento de reforço nas tensões resistentes, é verificado entre os grupos 1 e 2 (laminados com 4 m e 2 m de comprimento) maiores tensões atuantes para os provetes com 4 m de comprimento. As diferenças médias estão na ordem de 188% para a tensão atuante de tração no FRP, 166% para a tensão de tração na face lateral da madeira, 103% na tensão de compressão na face lateral da madeira e 145% para a tensão na superfície superior da madeira.

Para os grupos 3 e 4 (mantas com 4 e 2 m de comprimento com uma camada) já é observada uma menor diferença entre as tensões atuantes dos grupos.

Na verificação da influência do número de camadas de reforço nas tensões atuantes, são verificadas tensões superiores nos provetes reforçados com três camadas (grupo 5) em comparação com os reforçados com uma camada (grupo 3). Este aumento ocorre tanto para as tensões de tração como para as tensões de compressão. No caso das tensões de compressão, as

tensões são superiores na ordem dos 37% e 31% para a superfície superior e face lateral, respetivamente.

Tabela 27 – Tensões calculadas nos provetes avaliados.

Referência dos provetes		σ_t	σ_{t_S1}	σ_{t_S2}	σ_{c_S1}	σ_c
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Grupo 1	44	703,8	15,3	-	-22,5	-23,9
	31	846,0	17,8	-	-16,4	-36,2
	68	870,3	20,0	19,1	-	-14,8
Grupo 2	69	222,8	4,6	-	-8,4	-9,0
	67	281,6	6,2	-	-11,8	-12,2
	36	335,4	9,1	-	-8,5	-9,3
Grupo 3	63	1020,2	7,2	-	-	-10,1
	18	1547,7	10,7	-	-15,0	-15,1
Grupo 4	1	973,2	10,8	8,9	-	-12,7
	38	1454,6	10,9	-	-13,7	-15,6
Grupo 5	40	1734,8	11,8	-	-18,2	-21,2
	13	1338,8	11,0	-	-20,7	-20,8
	37	1425,9	9,0	-	-26,9	-18,3
Grupo 6	39	983,2	8,8	-	-10,7	-12,2
Sem reforço	32	20,4	17,2	12,8	-	-23,4

Como indicado na análise da força vs deformação, gráfico da Figura 16, os provetes do grupo 1 apresentavam uma ligeira curvatura quando próximos a rotura. Analisando este mesmo grupo de provetes em um gráfico força vs extensão, verifica-se um acréscimo de força sem linearidade no acréscimo de extensão. Este fato indica deformações fora do comportamento elástico linear. É exposto, como exemplo deste comportamento, na Figura 25, o gráfico do provete 68 (grupo 1).

Observa-se na Figura 25, que entre os 35 kN e 40 kN a curva para o E_c tem maior verticalidade, indicando um acréscimo de força, mas não de deformação. Enquanto as curvas que indicam os extensómetros da zona tracionada tem maior horizontalidade. Ao final deste patamar, ocorre um alongamento mais acentuado de todos os extensómetros, tanto o comprimido (E_c) quanto os tracionados (E_t , E_{t_S1} , E_{t_S2}) no intervalo de 40 kN a 45 kN.

Em comparação com este comportamento, a Figura 26 expõe o gráfico de força vs extensão para o provete 40 (grupo 5), onde é verificado um comportamento linear até a rotura.

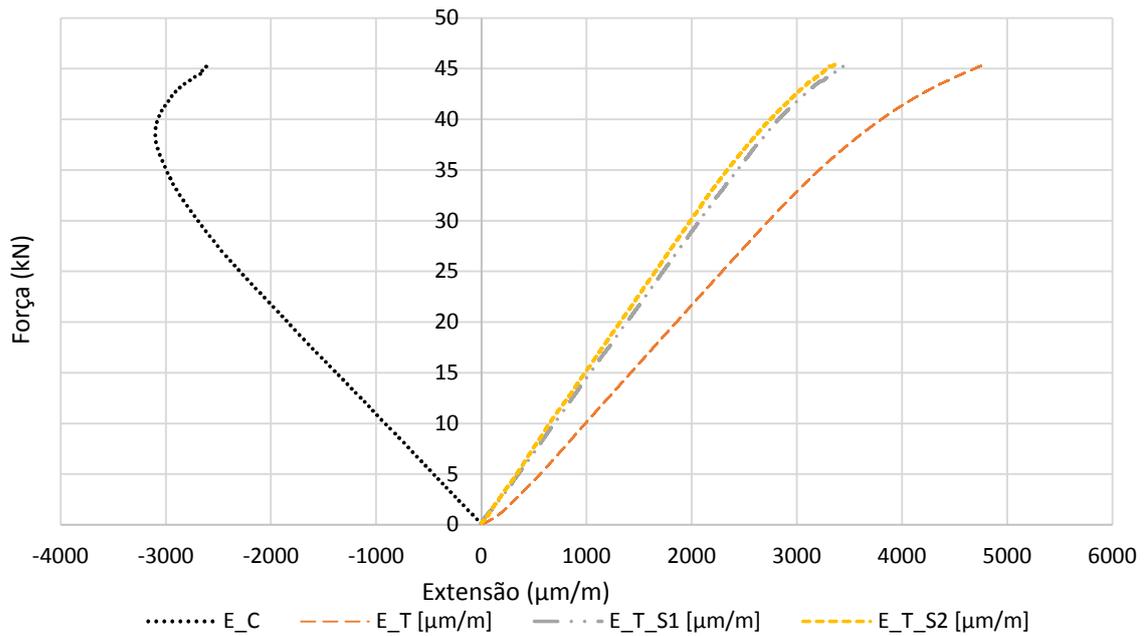


Figura 25 – Gráfico força vs extensão do provete 68.

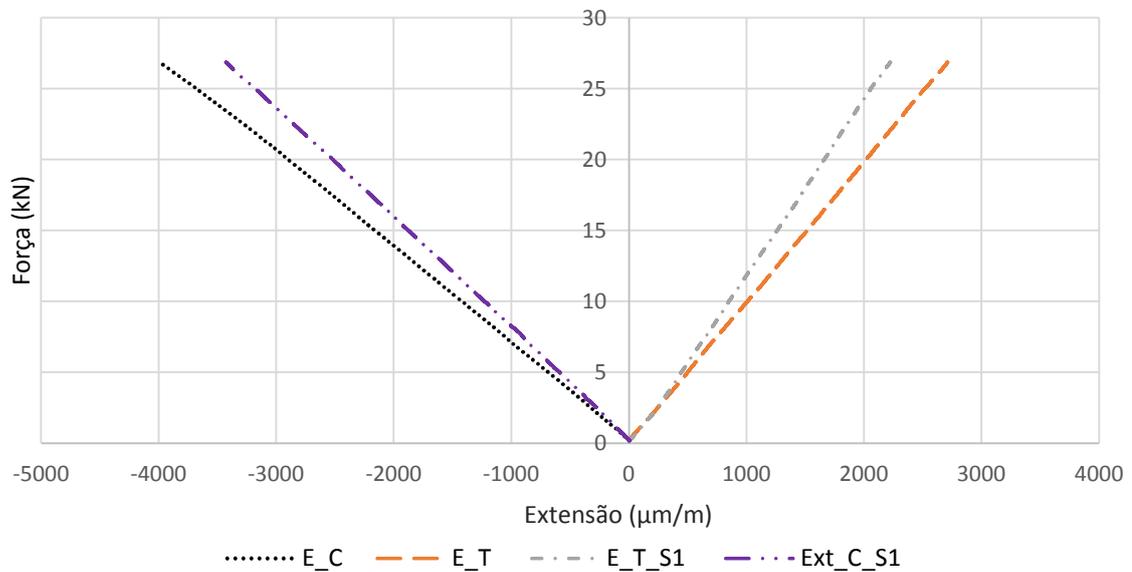


Figura 26 - Gráfico força vs extensão do provete 40.

Com os valores expostos na Tabela 27, é avaliada a distribuição das tensões pela secção transversal da viga. Com isto, verifica-se, através da elaboração de um gráfico, uma mudança da linha neutra na secção transversal, mais especificamente com uma linha neutra abaixo do centro da secção. Este fato é observado quando é avaliada a distribuições de tensões na secção

transversal para 10, 50, 70, 90 e 100% da carga de rotura para os provetes reforçados e o não reforçado (32). Este fato é verificado na Figura 27 e Figura 28.

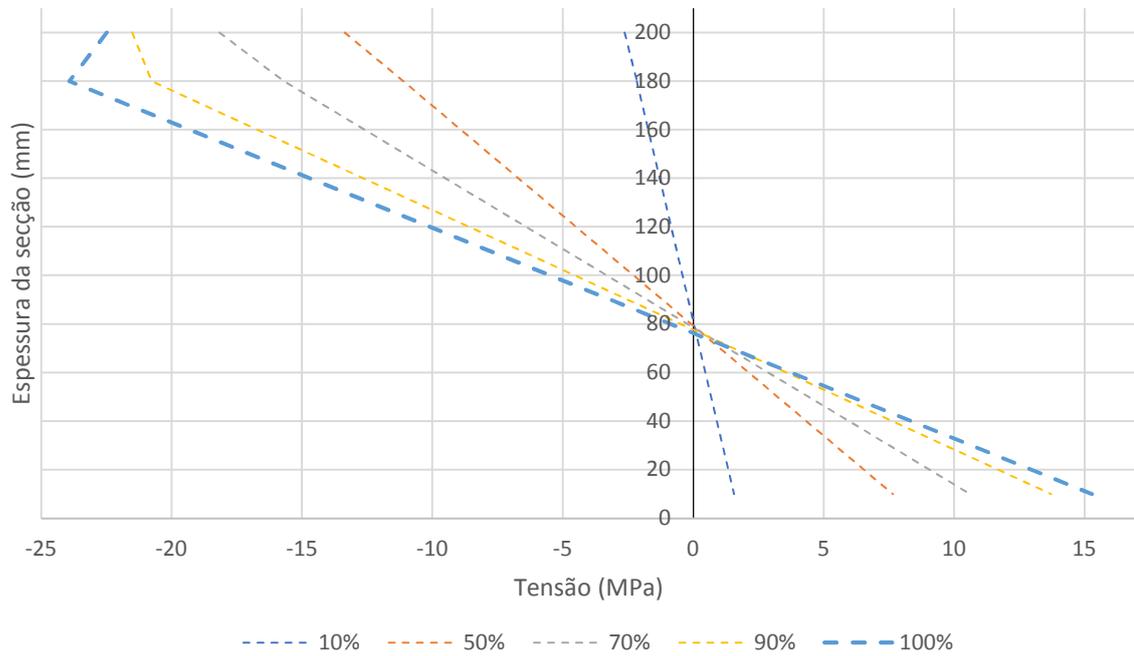


Figura 27 - Gráfico da distribuição das tensões pela espessura da secção em diferentes percentagens de carga (provetes 44 – grupo 1).

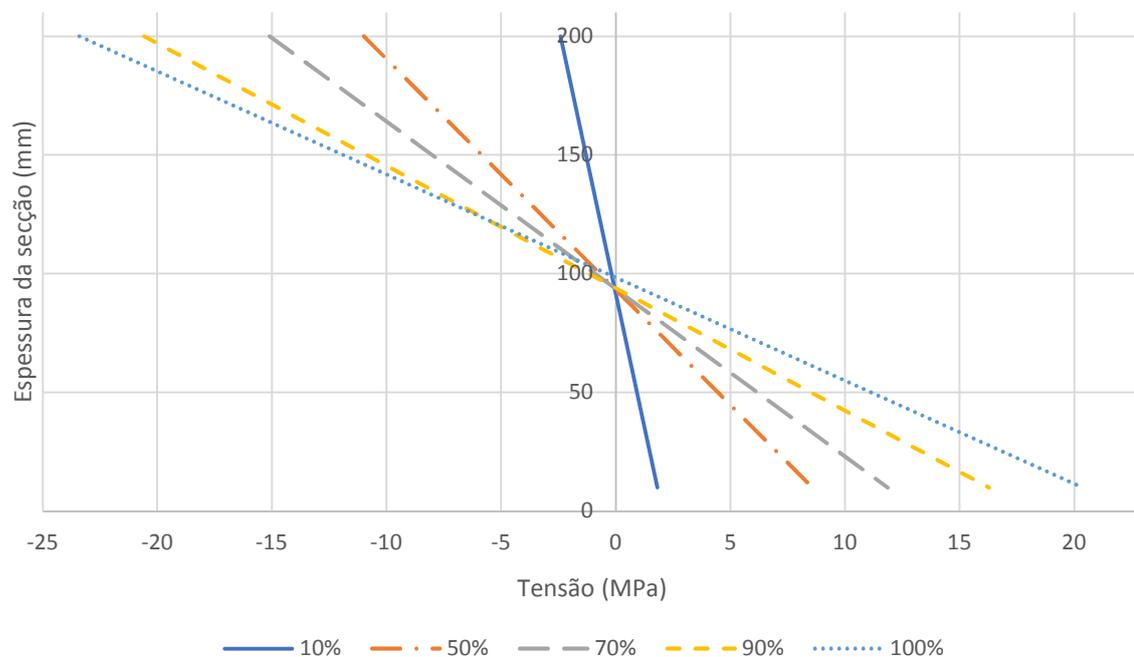


Figura 28 - Gráfico da distribuição das tensões pela espessura da secção em diferentes percentagens de carga (provetes 32).

6 AVALIAÇÃO TEÓRICA DE PAVIMENTOS DE MADEIRA REFORÇADOS COM FRP

6.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se um estudo teórico que avalia o comportamento de pavimentos em madeira ao nível das deformações. Foi adotado como propriedade dos materiais os resultados obtidos na campanha experimental deste trabalho para os provetes reforçados e não reforçados. Para a análise das deformações foram adotados os parâmetros descritos para a avaliação do estado limite de serviço da EC 5 (1995-1-1, 2004). Ao fim do capítulo é apresentado um estudo sobre o custo da execução de uma laje com e sem reforço.

6.2. Métodos e materiais

O método adotado para analisar as deformações dos pavimentos são os parâmetros normativos descritos para o estado limite de serviço (ELS) descrito na EC 5 (1995-1-1, 2004). Nesta norma são especificados os limites de deformação, sendo esses limites descritos na Tabela 28. Para o cálculo das deformações são utilizadas as Equações 6.1 a 6.5.

Tabela 28 – Limites de deformação de vigas EC 5 (1995-1-1, 2004).

	W_{inst}	$W_{net,fin}$	W_{fin}
Viga simplesmente apoiada	$l/300$ a $l/500$	$l/250$ a $l/350$	$l/150$ a $l/300$

$$u_{net,fin} = u_{inst} + u_{creep} - u_c = u_{fin} - u_c \quad (6.1)$$

$$u_{inst} = \frac{5}{384} \times \frac{qL^4}{EI} \quad (6.2)$$

$$u_{fin} = u_{fin,g} + u_{fin,Q1} + \sum u_{fin,Qi} \quad (6.3)$$

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} (1 + k_{def}) \quad (6.4)$$

$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} (1 + \psi_2 \times k_{def}) \quad (6.5)$$

Onde w_{inst} é o limite para a deformação instantânea, w_{fin} é o limite para a deformação final e $w_{net,fin}$ é o limite de deformação para o somatório da deformação de fluência e instantânea. O $u_{fin,G}$ é a deformação instantânea para as ações permanentes (G), $u_{fin,Q}$ a deformação instantânea para as ações para as ações variáveis principais (Q), u_c a deformação por contra flecha, u_{creep} a deformação por fluência e $u_{net,fin}$ a deformação obtida com o somatório da deformação instantânea e a de fluência. O parâmetro ψ_2 é um coeficiente para o valor de combinação das ações variáveis descrito na NP EN 1990 (2009) e k_{def} o coeficiente relacionado com as deformações das cargas de longa duração, descrito no EC 5 (EN 1995-1-1, 2004). Por fim, q é

o carregamento atuante, l o vão da viga, $E_{méd}$ o módulo de elasticidade médio e I o momento de inércia da secção.

Adotou-se para a análise uma laje de $4 \times 6 \text{ m}^2$ (dimensões em planta), com vigas de suporte do pavimento em Criptoméria (reforçada e não reforçada) de secção $100 \times 200 \text{ mm}^2$ e assoalho de $0,022 \text{ m}$ de altura. Foi admitida uma massa volúmica para as vigas de suporte de 300 kg/m^3 e 650 kg/m^3 para o assoalho.

Os valores parâmetros utilizados são $k_{def} = 0,8$ e $\psi_2 = 0,2$, relativo à classe de serviço 2 da EC 5 (1995-1-1 2004/A1, 2008) e a categoria A descrita na NP EN 1990 (2009), respetivamente. Para as cargas foi adotado $0,43 \text{ kN/m}^2$ para as permanentes e $2,0 \text{ kN/m}^2$ para as variáveis, baseando-se esta última no NP 1991-1 (IPQ, 2009) para pavimentos de categoria A. Com estes parâmetros, são determinados o espaçamento máximo entre vigas analisando espaçamentos de $0,3 \text{ m}$ a $0,95 \text{ m}$, variando entre $0,05 \text{ m}$.

Para as vigas de suporte do pavimento foram utilizados os resultados médios de rigidez de dois grupos de provetes reforçados e dos provetes não reforçados da campanha experimental deste trabalho. Os grupos de provetes selecionados foram os que possuíam maior rigidez dentre os demais, tendo todas as vigas as dimensões transversais de $100 \times 200 \text{ mm}^2$. A Tabela 29 apresenta a referência de cada grupo selecionado, a secção transversal das vigas, sua inércia e rigidez à flexão média. Na análise de custo dos materiais foram considerados os valores informados pelo fornecedor.

Tabela 29 – Dimensões e propriedades das vigas de Criptoméria para a análise teórica dos pavimentos de madeira.

Referência	Sistema FRP		Secção transversal	I	EI _{méd}
			mm ²	mm ⁴	N.mm ²
Sem reforço	-	-			3,6E+11
Grupo 1	1 camada de laminado	C-laminate 200/2000 HM	100 x 200	6,7E-05	5,5E+11
Grupo 5	3 camadas de manta	C-sheet 640			5,8E+11

6.3. Resultados

Na Tabela 30 são apresentados os espaçamentos mínimos verificados para os três casos analisados. A totalidade dos resultados, em relação a todos os espaçamentos analisados, em conjunto com os valores de todas as deformações é apresentado no Anexo B.

Avaliando a redução no número de vigas por conta do aumento no espaçamento proporcionado pela rigidez imposta pelo reforço, a laje sem reforço necessitaria de 11 vigas e as reforçadas necessitariam de 7 vigas, em ambos os casos.

Tabela 30 – Análise das deformações e espaçamentos entre vigas para os pavimentos de criptoméria.

Tipo de reforço	Espaçamento	U_{inst}	U_{fin}	W_{inst}	W_{fin}
	m	mm	mm	mm	mm
Sem reforço	0,55	12,40	16,61		
C-Laminate 200/2000 HM	0,9	13,20	17,68	13,3	26,67
C- sheet 640	0,9	12,64	16,99		

Com estes resultados foi calculado o custo de cada solução, tendo como base os valores fornecidos pela empresa S&P para os reforços e para o custo de mão de obra o banco de dados da CYPE Ingenieros (2021). Para a Criptoméria foi adotado um valor conservador de 150 €/m³. Os resultados obtidos são expostos na Tabela 31. Os detalhes da composição dos preços, obtidos no site do Gerador de preço (2021), são expostos no Anexo B na Tabela B - 4, Tabela B - 5 e Tabela B - 6.

Em relação ao custo, a manta de fibra de carbono apresenta o maior custo, tendo um acréscimo em relação ao pavimento sem reforço de 77,7% (acrécimo de € 470,4). A laje reforçada com a laminado de fibra de carbono apresenta um acréscimo de 58,0% (acrécimo de € 351,4).

Analisando os custos, verifica-se que o maior custo do sistema está na mão de obra, sendo estes valores na ordem dos 78,2%, 79,0% e 83,8% para os pavimentos sem reforço, reforçado com laminado e reforçado com manta, respetivamente.

Tabela 31 – Análise do número de vigas e custo do material de reforço com sistema FRP.

Referência	Custo dos materiais	Custo da mão de obra	Custo total	Acrécimo de custo
	€	€	€	
Sem reforço	132,0	473,5	605,5	-
C-Laminate 200/2000 HM	201,2	755,8	956,9	58,0%
C- sheet 640	174,2	901,7	1075,9	77,7%

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresenta-se as conclusões de maior relevância obtidas nas análises do trabalho desenvolvido. No seguimento, apresentam-se ainda aspetos relevantes no tema para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Este trabalho desenvolveu-se, com foco, nos ensaios de flexão estática de vigas de Criptoméria, a fim de perceber a influência de sistemas de FRP no momento resistente e na rigidez à flexão. Utilizaram-se dois sistemas de reforço FRP, sendo o laminado e a manta, ambos aplicados com a técnica de colagem EBR.

7.1. Principais conclusões sobre a campanha experimental

- Quanto aos tipos de rotura ocorridos, verifica-se que a rotura por corte ocorre quando não há o reforço no comprimento total do vão (4 m), não resultando em um aumento de capacidade de carga. Porém, a rigidez à flexão, mesmo com reforço parcial do vão, esta propriedade é acrescida.

- O modelo teórico se mostrou eficiente para os reforços com 4 m, visto que a maior diferença foi de -4,9% em relação aos resultados da campanha experimental. O reforço que apresentou o resultado mais fiel ao modelo teórico foi o laminado de fibra de carbono com 4 m (Grupo 1).

- Os resultados de momento resistente demonstram uma variação em relação ao tipo reforço adotado, tendo o melhor resultado para o laminado de fibra de carbono com 4 m (Grupo 1).

- O incremento de rigidez à flexão foi observado em todos os provetes reforçados, variando em relação ao tipo de reforço aplicado. Os melhores resultados foram obtidos para o reforço com três camadas de manta de fibra de carbono (Grupo 5), onde se obteve um incremento médio de 61,4%.

- O aumento no comprimento de reforço gerou incrementos, variando em relação ao tipo de reforço, sendo o maior incremento para os grupos reforçados com laminados. Para a rigidez o ganho é de 7,8% e 161% em relação ao momento último.

- O aumento no número de camadas de reforço de manta acarreta um incremento tanto de momento resistente quanto de rigidez, tendo um incremento de até 102,5%.

- Para os laminados o aumento de 2 m de reforço conduziu a um incremento de 161,7% no momento resistente.

- Os provetes apresentaram comportamento elástico-linear com exceção dos laminados de 4 m (grupo 1), onde é observado patamar com deformações não correspondentes à linearidade tipicamente associada a elementos de madeira submetidos à flexão.

7.2. Principais conclusões sobre as análises teóricas das lajes

- Os reforços geraram um aumento no espaçamento entre vigas e conseqüentemente uma diminuição no número de vigas no pavimento.

- A redução no número de vigas não ocasionou uma diminuição no custo total do pavimento, cujo menor valor corresponde à laje não reforçada.
- O menor custo obtido para o pavimento reforçado é para o laminado, que possui um custo total com acréscimo de 58,0% em relação ao pavimento não reforçado.
- O pavimento reforçado com manta de fibra de carbono gerou um acréscimo de custo total de 77,7% em relação ao pavimento não reforçado.

7.3. Propostas de novos estudos

Baseando-se nos resultados do presente trabalho, recomenda-se como trabalhos futuros os descritos de seguida:

- Estudo de Criptoméria reforçada com laminado utilizando a técnica de reforço NSM;
- Estudo com a aplicação de manta em outras faces da viga com a técnica EBR;
- Avaliação da qualidade da colagem resina/madeira, mais especificamente analisando a resistência ao arranque da Criptoméria, influência hidrotérmica e do comprimento de colagem;
- Caracterização mecânica de lajes de Criptoméria reforçadas com FRP com diferentes técnicas de colagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute (ACI). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Report ACI 440.2R-08 by ACI Committee 440, 2008, Farmington Hills, USA, 80 pp.
- American Society for Testing (ASTM) - D198 (1984). “Methods of static test of timbers in structural sizes”. Philadelphia, PA.
- Andor, K., Lengyel, A., Polgár, R., Fodor, T., Karácsonyi, Z. (2015). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*. **99**: 200-207.
- Andrade, H. (2011). *Caracterização de edifícios antigos. Edifícios “gaioleiros”*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 144pp.
- André, A. (2006). *Fibres for Strengthening of Timber Structures*. Luleå: Department of Civil and Environmental Engineering. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Divisão de Engenharia Estrutural. Universidade Técnica de Luleå, Luleå. 106pp.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 7190 (1997). “Projeto de estruturas de madeira”. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.
- Balseiro, A. (2007). *Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados de FRP*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, Porto. 144pp.
- Biscaia, H., Cruz, D., Chastre, C. (2016). Analysis of the debonding process of CFRP-to-timber interfaces. *Construction and Building Materials*. **113**: 96-112.
- Borri, A., Corradi, M., Righetti, L., Speranzini, E. (2017). Uncertainty analysis of FRP reinforced timber beams. *Composites Part B: Engineering*. **113**: 174-184.
- CEN (2003). EN 338. Structural timber - Strength Classes. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2004). EN 1995-1-1 - Eurocode 5 –Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings – European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2012). EN 408. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels. European Committee for Standardization, Brussels.
- Coutinho, Sousa – Materiais de construção 1: Madeiras. Porto: Universidade do Porto, 1999. 37pp.

- Custódio, J., Broughton, J., Cruz, H. (2011) - Rehabilitation of timber structures – Preparation and environmental service condition effects on the bulk performance of epoxy adhesives. *Construction and Building Materials*. **25**: 3570-3582.
- CYPE Ingenieros (2021), SA. Laje de vigotas e painel estrutural de madeira. Acedido em: 05/07/2021, em: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Estruturas/Madeira/Lajes/EMF020_Laje_de_vigotas_e_painel_estrutural.html
- CYPE Ingenieros (2021), SA. Reforço ao esforço transversal de vigas, com folha de fibra de carbono MasterBrace "Master Builders Solutions. Acedido em: 05/07/2021, em: http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Estruturas/Betao_armado/EHZ_Reforços_com_laminados_e_folha/EHZ110_Reforço_ao_esforço_transverso_de_vigotas.html
- CYPE Ingenieros (2021), SA. Reforço de vigas e vigotas, com laminado de fibra de carbono MasterBrace "Master Builders Solutions. Acedido em: 05/07/2021, em: http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Estruturas/Betao_armado/EHZ_Reforços_com_laminados_e_folha/EHZ100_Reforço_de_vigas_e_vigotas_com_laminado_de_fibra_de_carbono.html
- Davalos, J., Qiao, P. (2010). Fiber-Reinforced Composite and Wood Bonded Interfaces: Part 1. Durability and Shear Strength. *Journal of Composites Technology & Research*. **22**: 224-231.
- DRRF (2020). Ficha técnica - Criptoméria dos Açores - Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores. Secretaria Regional da Agricultura e Florestas – SRAF. Acedido em: 05/07/2020 em http://drdf-sraa.azores.gov.pt/areas/viveiros-florestais/Documents/Panfleto_Tecnico_Criptomeria.pdf.
- Duarte, A. (2004). *Reabilitação de elementos estruturais de madeira com argamassa epoxídica armada*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra. 164pp.
- Falk, R. (2010). Characteristics and Availability of Commercially Important Woods – Chapter 1. Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. Madison, Forest Products Laboratory.
- Fiorelli, J. (2002). *Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira*. Tese de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Carlos, São Carlos. 168pp.
- Hibbeler, R. (2010). Resistência dos materiais. 7ª edição, Pearson Education do Brasil. São Paulo.
- Hoseinpour, H., Valluzzi, M., Garbin, E., Panizza, M. (2018). Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. *Construction and Building Materials*. **191**: 1242-1251.
- IPQ (2009) EN 1990. Bases para o projecto de estruturas – Instituto Português da Qualidade, Portugal.

- IPQ (2009) NP EN 1991-1-1. Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-1 – Acções gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios – Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- IPQ (2015) NP 4544. Madeira serrada de Criptoméria para estruturas – Classificação visual para fins estruturas Instituto Português de Qualidade. Caparica.
- Jankowski, L., Jasieńko, J., Nowak, T., (2010). Experimental assessment of CFRP reinforced wooden beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique. *Materials and Structures* **43**: 141-150.
- Jorge, M. A. P. (2010). *Experimental behavior of glulam-FRP systems*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia - Universidade do Minho, Braga. 247pp.
- Juvandes, L. (2011). Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas. *1ª Jornada de materiais de construção*. Porto.
- Kuklík, P. (2008). “History of Timber Structures – Chapter 1. Wood Handbook – Timber Structures”. 1ª Ed. 2008. Leonardo da Vinci Pilot Projects.
- LNEC – Ficha M2: Pinho bravo para estruturas. Série: Madeira para construção, 1997.
- Logsdon, B. (1998). *Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira*. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Carlos. 174pp.
- Lyons, J., Ahmed, M., (2005). Factors Affecting the Bond Between Polymer Composites and Wood. *Journal of reinforced plastics and composites*. **24**: 405-412.
- Martins, C. (2018). *Avaliação estrutural de elementos de madeira lamelada colada*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra, Coimbra. 262pp.
- Martins, T. (2010). *Dimensionamento de estruturas em madeira – Coberturas e pavimentos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Lisboa. 165pp.
- Miotto, L., Dias, A. (2006). Reforço e recuperação de estruturas de madeira. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*. **27**: 163-174.
- Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., Arif, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*. **112**: 547-555.
- Newhook, J., Svecova, D. Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers - Design Manual n° 3 - 2ª Ed. Manitoba, 2007. 151pp.
- Parvin, A., Shad, T. (2016). Fiber Reinforced Polymer Strengthening of Structures by Near-Surface Mounting Method. *Polymers*. **8**: 298-323.

- Raftery, M., Harte, M., Rodd, Peter D. (2009) - Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy gluelines. *International Journal of Adhesion & Adhesives*.
- Schorer, A. E., Bank, L. C., Oliva, M. G., Wacker, J. P., & Rammer, D. R. (2008). Feasibility of Rehabilitating Timber Bridges Using Mechanically Fastened FRP Strips. *Structures Congress 2008: Crossing the Borders*.
- SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, no Relatório Preliminar – Relatório preliminar - RP/SERQ/190701 – Caracterização mecânica de madeira de criptoméria. SerQ, Sertão.
- Tascioglu, C., Goodell, B., Lopez-Anido, R. (2002). Bond durability characterization of preservative treated wood and E-glass/phenolic composite interfaces. *Composites Science and Technology*. **63**: 979-991.
- Vahedian, A., Shrestha, R., Crews, K. (2018). Experimental Investigation on the Effect of Bond Thickness on the Interface Behaviour of Fibre Reinforced Polymer Sheet Bonded to Timber. *International Journal of Structural and Construction Engineering*. **12**:
- Valluzzi, M., Nardon, F., Garbin, E., Panizza, M. (2016). Multi-scale characterization of moisture and thermal cycle effects on composite-to-timber strengthening. *Construction and Building Materials*. **102**: 1070-1083.
- Vicente, R. (2008). *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana - Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Aveiro, Aveiro. 617pp.
- Vick, B. (1999). Adhesive Bonding of Wood Materials - Chapter 9. *Wood Handbook - Wood as an engineering material*. Madison, Forest Products Laboratory.
- Viegas, A. (2014). *Modelação de ligações adesivas no reforço de estruturas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 154pp.
- Wan, J., Smith, S., Qiao, P., (2010). Experimental Investigation on FRP-to-Timber Bonded Interfaces. *Journal of Composites for Construction*. **18** (3).
- Wang, Z., Li, H., Lorenzo, R., Corbi, H., Corbi, O., Fang, C. (2020). Review on Bond Properties between Wood and Fiber Reinforced Polymer. *Journal of Renewable Materials*. **8**: 993-1018.
- Wiedenhoeft, Alex. (2010). Structure and Function of Wood – Chapter 3. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison, Forest Products Laboratory.
- Wiemann, M. (2010). Characteristics and Availability of Commercially Important Woods – Chapter 2. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison, Forest Products Laboratory.

- Xu, T., He, Z., Tang, C., Zhu, W., Ranjith, P. (2015). Finite element analysis of width effect in interface debonding of FRP plate bonded to concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. **93**: 30-41.
- Zelinka, L., Glass, V. (2010). Moisture Relations and Physical Properties of Wood – Chapter 4. Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. Madison, Forest Products Laboratory.

ANEXO A – Resultados dos ensaios a flexão dos provetes reforçados.

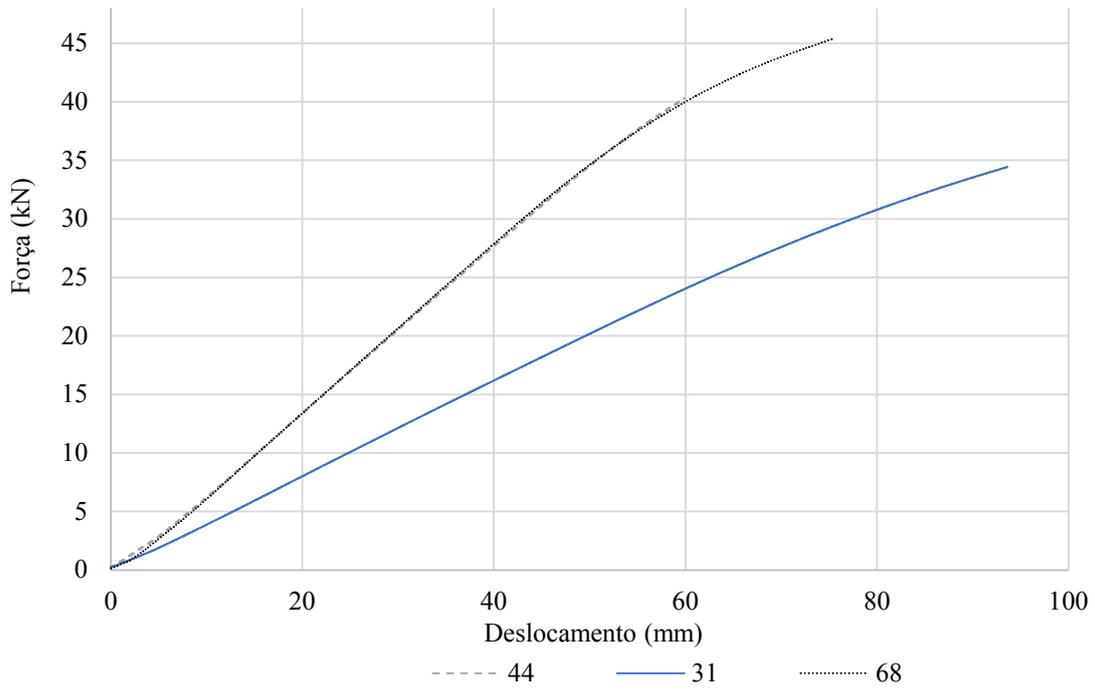


Figura A - 1 – Gráfico Força vs Deslocamento dos provetes do grupo 1.

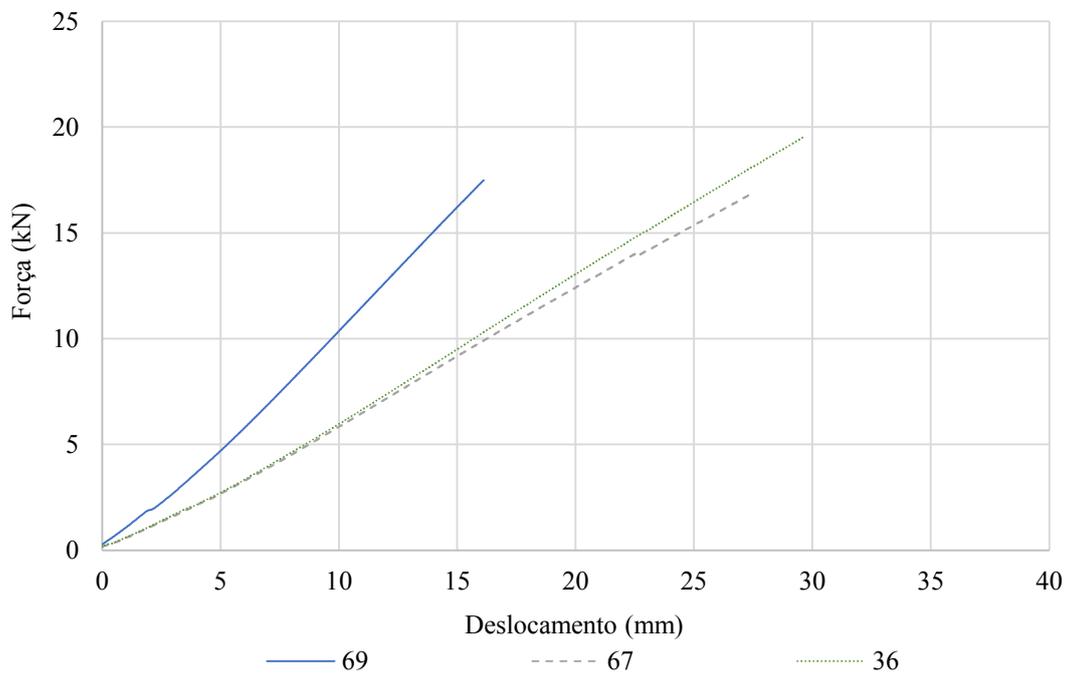


Figura A - 2 - Gráfico Força vs Deslocamento dos provetes do grupo 2.

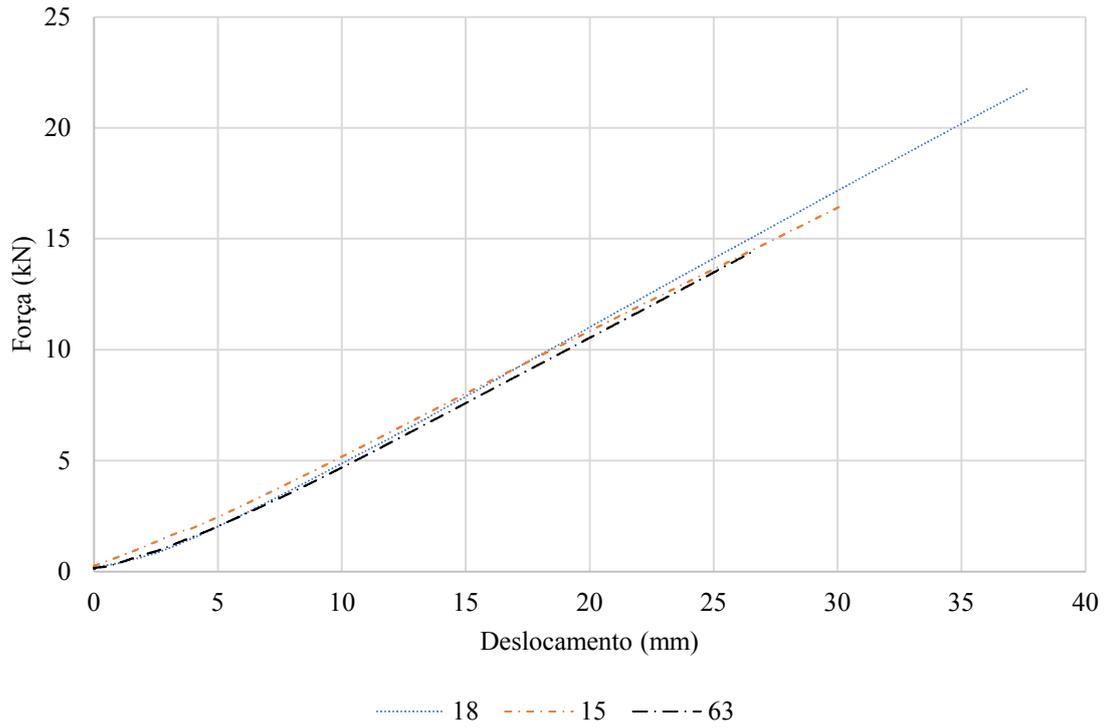


Figura A - 3 - Gráfico Força vs Deslocamento dos provetes do grupo 3.

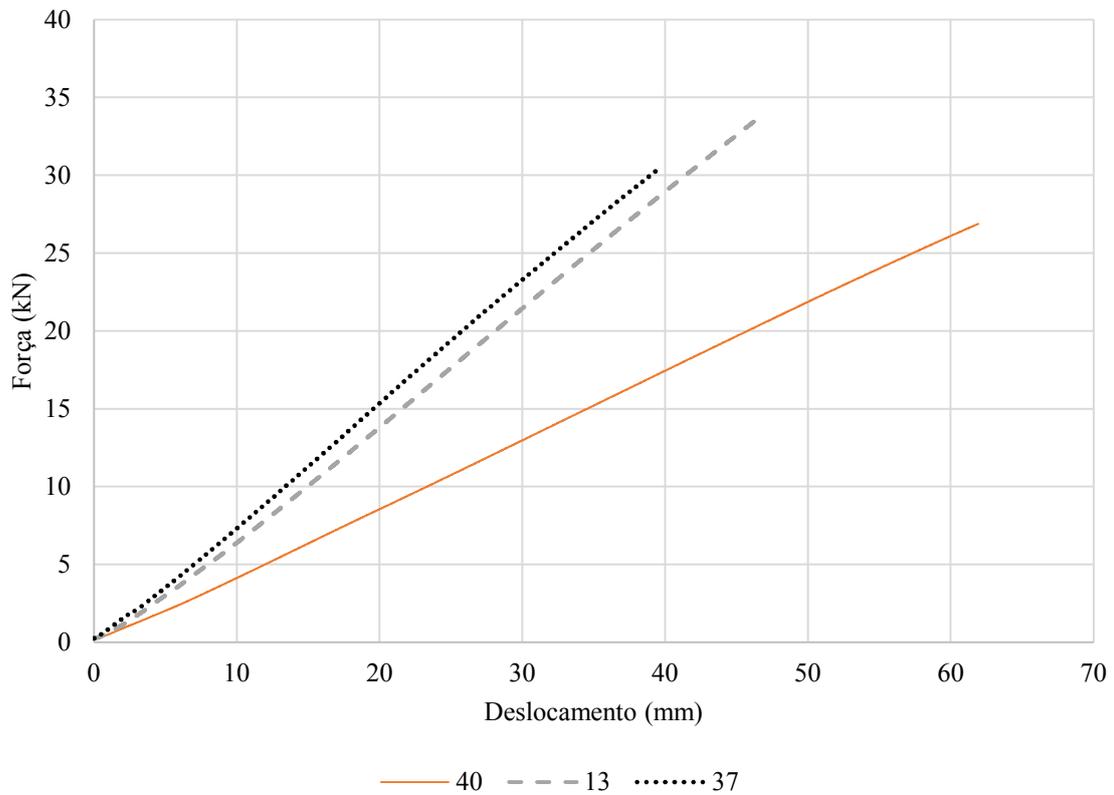


Figura A - 4 - Gráfico Força vs Deslocamento dos provetes do grupo 4.

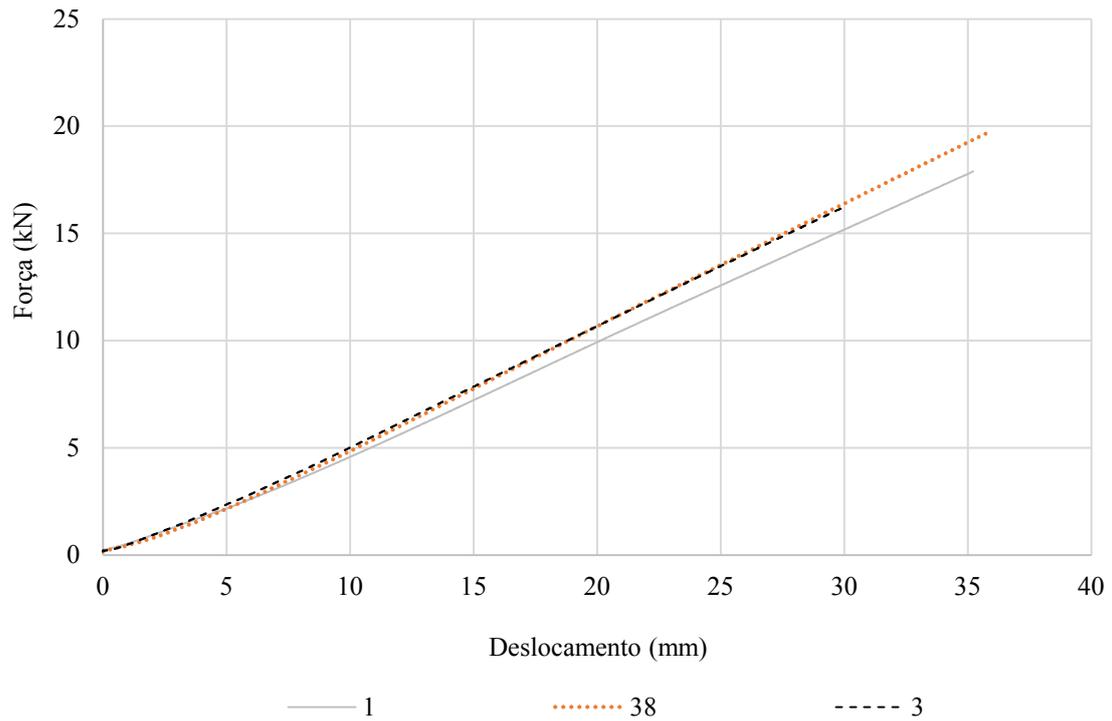


Figura A - 5 - Gráfico Força vs Deslocamento dos provetes do grupo 5.

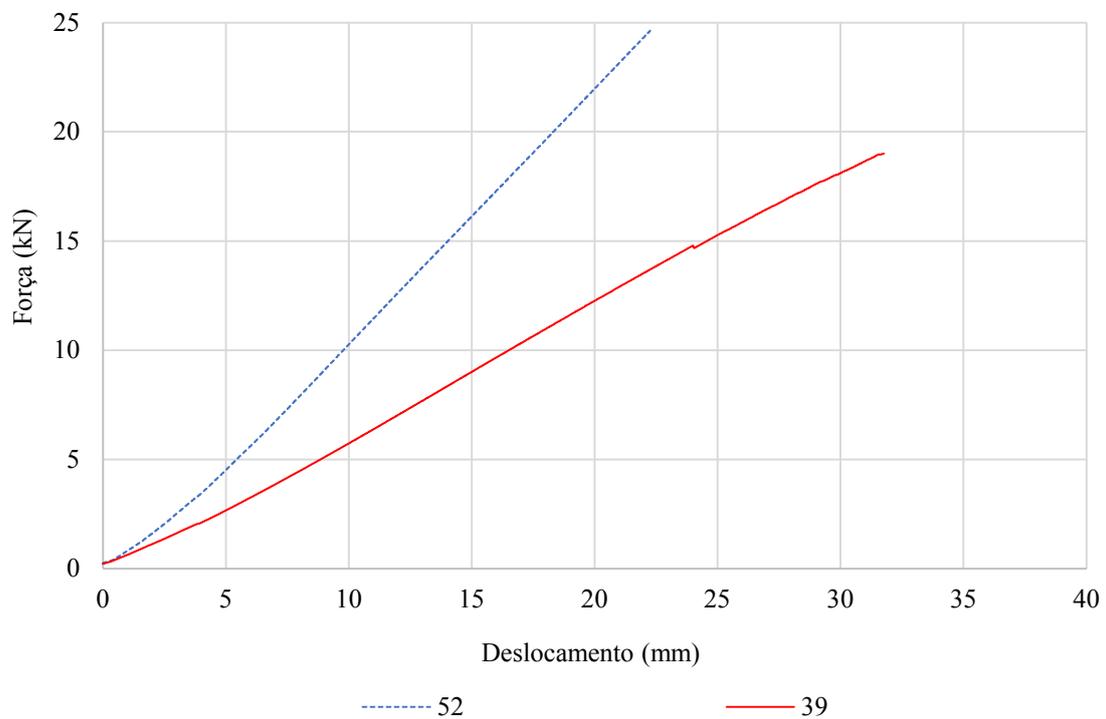


Figura A - 6 - Gráfico Força vs Deslocamento dos provetes do grupo 6.

ANEXO B – Resultados da análise do ELS para os pavimentos de madeira e detalhes da composição dos preços de mão de obra.

Tabela B - 1 - Análise do ELS de deformação para o pavimento de Criptoméria não reforçado.

S (m)	U _{inst,G} (mm)	U _{inst,Q} (mm)	U _{fin,G} (mm)	U _{fin,Q} (mm)	U _{inst} (mm)	U _{fin} (mm)	VS	
							W _{inst}	W _{fin}
0,3	1,21	5,56	2,17	6,89	6,76	9,06	verif.	verif.
0,35	1,41	6,48	2,53	8,04	7,89	10,57	verif.	verif.
0,4	1,61	7,41	2,89	9,18	9,01	12,08	verif.	verif.
0,45	1,81	8,33	3,26	10,33	10,14	13,59	verif.	verif.
0,5	2,01	9,26	3,62	11,48	11,27	15,10	verif.	verif.
0,55	2,21	10,18	3,98	12,63	12,40	16,61	verif.	verif.
0,6	2,41	11,11	4,34	13,78	13,52	18,12	ñ verif.	verif.
0,65	2,61	12,04	4,70	14,93	14,65	19,63	ñ verif.	verif.
0,7	2,81	12,96	5,06	16,07	15,78	21,14	ñ verif.	verif.
0,75	3,01	13,89	5,43	17,22	16,90	22,65	ñ verif.	verif.
0,8	3,22	14,81	5,79	18,37	18,03	24,16	ñ verif.	verif.
0,85	3,42	15,74	6,15	19,52	19,16	25,67	ñ verif.	verif.
0,9	3,62	16,67	6,51	20,67	20,28	27,18	ñ verif.	ñ verif.
0,95	3,82	17,59	6,87	21,81	21,41	28,69	ñ verif.	ñ verif.

Tabela B - 2 - Análise do ELS de deformação para o pavimento de Criptoméria reforçado com laminado de fibra de carbono.

S (m)	U _{inst,G} (mm)	U _{inst,Q} (mm)	U _{fin,G} (mm)	U _{fin,Q} (mm)	U _{inst} (mm)	U _{fin} (mm)	VS	
							W _{inst}	W _{fin}
0,3	0,78	3,61	1,41	4,48	4,40	5,89	verif.	verif.
0,35	0,92	4,22	1,65	5,23	5,13	6,88	verif.	verif.
0,4	1,05	4,82	1,88	5,98	5,87	7,86	verif.	verif.
0,45	1,18	5,42	2,12	6,72	6,60	8,84	verif.	verif.
0,5	1,31	6,02	2,35	7,47	7,33	9,82	verif.	verif.
0,55	1,44	6,63	2,59	8,22	8,06	10,81	verif.	verif.
0,6	1,57	7,23	2,82	8,96	8,80	11,79	verif.	verif.
0,65	1,70	7,83	3,06	9,71	9,53	12,77	verif.	verif.
0,7	1,83	8,43	3,30	10,46	10,26	13,75	verif.	verif.
0,75	1,96	9,04	3,53	11,20	11,00	14,74	verif.	verif.
0,8	2,09	9,64	3,77	11,95	11,73	15,72	verif.	verif.
0,85	2,22	10,24	4,00	12,70	12,46	16,70	verif.	verif.
0,9	2,35	10,84	4,24	13,45	13,20	17,68	verif.	verif.
0,95	2,48	11,45	4,47	14,19	13,93	18,66	ñ verif.	verif.

Tabela B - 3 - Análise do ELS de deformação para o pavimento de Criptoméria reforçado com manta de fibra de carbono.

S (m)	U _{inst,G} (mm)	U _{inst,Q} (mm)	U _{fin,G} (mm)	U _{fin,Q} (mm)	U _{inst} (mm)	U _{fin} (mm)	VS	
							W _{inst}	W _{fin}
0,3	0,74	3,43	1,34	4,25	4,17	5,59	verif.	verif.
0,35	0,92	4,00	1,65	4,96	4,92	6,61	verif.	verif.
0,4	1,05	4,57	1,88	5,67	5,62	7,55	verif.	verif.
0,45	1,18	5,14	2,12	6,38	6,32	8,50	verif.	verif.
0,5	1,31	5,71	2,35	7,09	7,02	9,44	verif.	verif.
0,55	1,44	6,29	2,59	7,79	7,72	10,38	verif.	verif.
0,6	1,57	6,86	2,82	8,50	8,43	11,33	verif.	verif.
0,65	1,70	7,43	3,06	9,21	9,13	12,27	verif.	verif.
0,7	1,83	8,00	3,30	9,92	9,83	13,22	verif.	verif.
0,75	1,96	8,57	3,53	10,63	10,53	14,16	verif.	verif.
0,8	2,09	9,14	3,77	11,34	11,24	15,10	verif.	verif.
0,85	2,22	9,71	4,00	12,05	11,94	16,05	verif.	verif.
0,9	2,35	10,29	4,24	12,75	12,64	16,99	verif.	verif.
0,95	2,48	10,86	4,47	13,46	13,34	17,94	ñ verif.	verif.

Tabela B - 4 – Composição de preço de mão de obra para a laje de madeira sem reforço (Adaptado de CYPE Ingenieros ,2021).

Descrição	Rend.	Preço	Importância
		unitário	
	m ² /h	€/m ²	€/m ²
Oficial de 1ª montador de estruturas de madeira.	0,609	19,66	11,97
Ajudante de montador de estruturas de madeira.	0,202	19,18	3,87
Oficial de 1ª cofrador.	0,100	19,66	1,97
Ajudante de cofrador.	0,100	19,18	1,92

Tabela B - 5 - Composição de preço de mão de obra para a laje de madeira reforçada com laminado (Adaptado de CYPE Ingenieros ,2021).

Descrição	Rend.	Preço	Importância
		unitário	
	m ² /h	€/m ²	€/m ²
Oficial de 1ª montador de estruturas de madeira.	0,594	19,66	11,97
Ajudante de montador de estruturas de madeira.	0,195	19,18	3,87
Oficial de 1ª cofrador.	0,100	19,66	1,97
Ajudante de cofrador.	0,100	19,18	1,92
Oficial de 1ª estruturista.	0,308	20,01	6,16
Ajudante de estruturista.	0,308	19,53	6,02

Tabela B - 6 - Composição de preço de mão de obra para a laje de madeira reforçada com laminado (Adaptado de CYPE Ingenieros ,2021).

Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
	m ² /h	€/m ²	€/m ²
Oficial de 1ª montador de estruturas de madeira.	0,594	19,66	11,97
Ajudante de montador de estruturas de madeira.	0,195	19,18	3,87
Oficial de 1ª cofrador.	0,100	19,66	1,97
Ajudante de cofrador.	0,100	19,18	1,92
Oficial de 1ª estruturista.	0,462	20,01	9,24
Ajudante de estruturista.	0,462	19,53	9,02