



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 apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Reabilitação de Edifícios - Reabilitação Não Estrutural I, sob a orientação do 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

Coimbra, Julho de 2020

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 apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Reabilitação de Edifícios - Reabilitação Não Estrutural I, sob a orientação do 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

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Coimbra, Julho de 2020

ÍNDICE

1 ENQUADRAMENTO	4
2 OBJETIVOS E OBJETOS	5
3 METODOLOGIA.....	11
3.1 Método não-destrutivo para caracterização da madeira	11
3.2 Avaliação das propriedades do reforço da madeira com FRP.....	11
3.3 Métodos de aplicação do FRP	12
4 PLANO DE TRABALHO.....	15
5 COMENTÁRIO SOBRE AS REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS UTILIZADAS	16
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - RELAÇÃO TENSÃO DEFORMAÇÃO PARA O REFORÇO FIBROSO E A MATRIZ (NEWHOOK E SVECOVA, 2007).....	7
FIGURA 2 - UTILIZAÇÃO DO TIMBER GRADER MTG NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA (MARTINS, 2019).....	11
FIGURA 3 - ESQUEMA PARA ENSAIO À FLEXÃO (EN 408, 2012).....	12
FIGURA 4 - MÉTODO EBR (ACI, 2008).....	13
FIGURA 5 – MÉTODO NSM (DE LORENZIS E TENG, 2007).....	13
FIGURA 6 – MÉTODO MF-FRP (WALID E. ELSAYED ET AL., 2009).....	13
FIGURA 7 - SECÇÕES TRANSVERSAIS DAS VIGAS ENSAIADAS COM A DISPOSIÇÕES DAS FIBRAS CFRP INDICADAS (MM) (JANKOWSKI ET AL. 2010).....	16
FIGURA 8 – CARGA DE ROTURA DAS AMOSTRAS (JANKOWSKI ET AL. 2010).....	17
FIGURA 9 – ESQUEMAS DE REFORÇO COM MANTAS DE CFRP (BORRI ET AL., 2005).....	17
FIGURA 10 – ESQUEMAS DE REFORÇO COM VARÕES DE CFRP (BORRI ET AL., 2005).....	18
FIGURA 11 – CURVA DE CARGA-DEFLEXÃO DOS REFORÇOS COM MANTA DE CFRP (Nº 12, 17 E 19: VIGAS SEM REFORÇO; Nº 1 E 16: ESQUEMA 1 DE REFORÇO; Nº 9 E 15: ESQUEMA 2 DE REFORÇO; Nº 4 E 6: ESQUEMA 3 DE REFORÇO) (BORRI ET AL., 2005).....	19
FIGURA 12 - CURVA DE CARGA-DEFLEXÃO PARA OS REFORÇOS DE MANTA DE CFRP PRÉ-TENSIONADOS (Nº 12, 17 E 19: VIGAS SEM REFORÇO; Nº 8 E 10: ESQUEMA 1 DE REFORÇO; Nº 3 E 18: ESQUEMA 2 DE REFORÇO) (BORRI ET AL., 2005).....	19
FIGURA 13 - CURVA DE CARGA-DEFLEXÃO PARA OS REFORÇOS COM VARÕES DE CFRP (Nº 12, 17 E 19: VIGAS SEM REFORÇO; Nº 5 E 11: UM VARÃO DE CFRP DE REFORÇO; Nº 2 E 13: DOIS VARÕES DE REFORÇO DE CFRP; Nº 20, REFORÇO COM DOIS VARÕES DE REFORÇO DE CFRP (BORRI ET AL., 2005).....	20
FIGURA 14 – ESQUEMA DA LOCALIZAÇÃO (ADAPTADO DE HOSEINPOUR ET AL., 2018).....	21
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE CARGA E DESLOCAMENTO DA AMOSTRA CFRP-EP-1-01 (ADAPTADO DE HOSEINPOUR ET AL., 2018).....	22
FIGURA 16 - DIAGRAMA DE CARGA E DESLOCAMENTO DA AMOSTRA FFRP-EP-3-01 (ADAPTADO DE HOSEINPOUR ET AL., 2018).....	22
FIGURA 17 - DIAGRAMA DE CARGA E DESLOCAMENTO DA AMOSTRA FFRP-V-5-01 (ADAPTADO DE HOSEINPOUR ET AL., 2018).....	23
FIGURA 18 – GRÁFICO DE CARGA-DEFLEXÃO DAS AMOSTRAS VEC 1 (DONADON ET AL., 2020).....	24
FIGURA 19 – GRÁFICO DE CARGA-DEFLEXÃO DAS AMOSTRAS VEC 1 (DONADON ET AL., 2020).....	24
FIGURA 20– CONFIGURAÇÃO DAS TIPOLOGIAS UTILIZADAS (RAFTERY, 2015).....	25
FIGURA 21 - GRÁFICO DE CARGA-DEFLEXÃO DAS AMOSTRAS VEC 1 (RAFTERY, 2015).....	26

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES MÉDIOS E CARACTERÍSTICOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE PINHEIRO BRAVO (ADAPTADO DE LNEC, 1997).	6
TABELA 2 – VALORES MÉDIOS E CARACTERÍSTICOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE CRIPTOMÉRIA (ADAPTADO DE NP 4544, 2015).....	6
TABELA 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE VÁRIAS FIBRAS USADAS EM FRP (ADAPTADO DE NEWHOOK E SVECOVA, 2007).	8
TABELA 4 – PROPRIEDADES TÍPICAS DE RESINAS TERMOENDURECIDA (ADAPTADO DE NEWHOOK E SVECOVA, 2007).	9
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DOS ADESIVOS (ADAPTADO DE RAFTERY ET AL., 2009).	9
TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FRP (ADAPTADO DE RAFTERY ET AL., 2009).....	10
TABELA 7 – ESQUEMAS DE REFORÇO (ADAPTADO DE SCHOBER ET AL., 2005).	14
TABELA 8 – RESULTADOS OBTIDOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (ADAPTADO DE SCHOBER ET AL., 2005).....	14
TABELA 9 - PLANIFICAÇÃO DAS TAREFAS A SEREM REALIZADAS.....	15
TABELA 10 – RESULTADOS DOS ENSAIOS A FLEXÃO – REFORÇO COM MANTA DE CFRP (ADAPTADO DE BORRI ET AL., 2005).	18
TABELA 11 - RESULTADOS DOS ENSAIOS A FLEXÃO – REFORÇO COM MANTA PRÉ-TENSIONADAS DE CFRP (ADAPTADO DE BORRI ET AL., 2005).	18
TABELA 12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS A FLEXÃO – REFORÇO COM VARÕES DE CFRP (ADAPTADO DE BORRI ET AL., 2005).	18
TABELA 13 - RESULTADOS DOS ENSAIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS (ADAPTADO DE HOSEINPOUR ET AL., 2018).....	21
TABELA 14 – DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS (ADAPTADO DE DONADON ET AL., 2020).....	23
TABELA 15 – RESULTADOS DA CARGA DE ROTURA E RIGIDEZ DAS AMOSTRAS (ADAPTADO DE DONADON ET AL., 2020).....	25
TABELA 16 – PROGRAMA EXPERIMENTAL (RAFTERY, 2015).	25

1 ENQUADRAMENTO

A crescente procura por materiais sustentáveis no sector da construção, para fazer face à redução da pegada ecológica, apresenta-se como uma oportunidade de excelência para a afirmação da madeira enquanto material estrutural. A sua utilização é válida tanto em cenários de construção nova, como na reabilitação, nomeadamente na reparação/substituição de elementos já existentes.

Adicionalmente, o Decreto Lei 95/2019 tem nos seus princípios fundamentais para reabilitação de edifícios, o da proteção e valorização do existente. Assim, visto que as coberturas e pavimentos de edifícios antigos são maioritariamente em madeira, o proprietário deve priorizar a utilização da madeira na reabilitação do edifício.

No presente trabalho pretende-se estudar soluções de reforço ou reparação de elementos de madeira através do uso de polímeros de fibra (*fibre reinforced polymer*, FRP). Dada a diversidade de cenários em que a madeira se aplica, serão considerados como objeto de estudo: i) elementos já em utilização com o objetivo de promover a preservação do património; ii) novos elementos em que se verifica a necessidade de incremento das propriedades mecânicas, em particular a rigidez e a capacidade de carga. De entre os vários produtos de madeira comumente utilizados na construção (fins estruturais), pretende-se avaliar o benefício da aplicação do reforço em elementos de madeira serrada maciça e madeira lamelada colada (MLC).

Tendo em consideração o conjunto de espécies existentes na floresta portuguesa, procurar-se-á avaliar o desempenho dos FRP's nas espécies que, tradicionalmente, são mais utilizadas no setor da construção, e/ou possuem maior potencial para melhorar o seu desempenho mecânico tendo em consideração também a sua disponibilidade em serração. Em relação à construção tradicional em madeira, no âmbito do cenário da construção de Coimbra, conforme Vicente, R. (2008), as espécies mais comuns são: Castanho (*Castanea Sativa* Mill.); Carvalho (*Quercus robur* L.) e Pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.). Por outro lado, ao nível de disponibilidade de matéria-prima o Pinheiro Bravo se justifica para uso neste estudo por ser a espécie resinosa de maior abundância em Portugal. Adicionalmente, a Criptoméria (*Cryptomeria japonica* D. Don), também espécie resinosa, existe com bastante abundância nos Açores e se torna uma espécie interessante. A nível comercial, quando se tem o conhecimento, através do Direção Regional de Recursos Florestais (DRRF, 2020), que a região dos Açores implementa um sistema de gestão das florestas com o objetivo de promover, incentivar e modernizar o setor de base florestal, baseado na gestão florestal responsável, demonstra-se o interesse na produção e utilização deste material em Portugal. Por último, o Choupo, apesar de pouco abundante em Portugal, apresenta, segundo Martins (2019), um aumento da disponibilidade de madeira serrada em serração, além de possuir propriedades mecânicas interessantes para uso em MLC (Martins et al., 2019), e comprovando por Hodousek et al. (2017) em ensaios de madeira serrada.

2 OBJETIVOS E OBJETOS

Este trabalho tem como principal objetivo potenciar o desempenho da madeira enquanto elemento estrutural quer em edifícios existentes, quer ao nível de construção nova, por via da utilização de FRP's. A madeira enquanto material natural apresenta algumas desvantagens, nomeadamente as associadas à elevada variabilidade das propriedades mecânicas, por via de condições de crescimento dispares entre árvores e mesmo na própria árvore (seção de onde é recolhido a peça, presença ou não de medula, presença de nós, etc...). Ao nível do comportamento mecânico é caracterizada por roturas frágeis (à flexão e à tração), o que é um inconveniente relativamente a outros materiais de construção (aço e betão). Os FRP's têm sido amplamente utilizados em cenários de reabilitação, em particular em estruturas de betão armado, pretendendo-se avaliar com este estudo, o potencial do melhoramento das propriedades do conjunto madeira-FRP, ao nível da rigidez, da resistência à flexão e, se possível, explorar o incremento da ductilidade da solução.

Como base de fundamentação ao estudo, será feita uma revisão bibliográfica com levantamento dos métodos de aplicação de FRP, materiais com potencial para uso e os modelos de dimensionamento. A revisão bibliográfica permitirá definir qual ou quais os métodos de reforço mais adequados tendo em consideração os objetivos pré-estabelecidos. Seguir-se-á uma campanha experimental de caracterização mecânica dos materiais e da solução compósita (madeira-FRP). Para além disso, será conduzida uma análise paramétrica por via de modelos analíticos para levantar a relação entre os modelos computacionais e os experimentos realizados. Por fim, será elaborada uma análise de viabilidade económica da solução.

As espécies objeto de estudo serão o Pinheiro Bravo e a Criptoméria, sendo a consideração do Choupo ainda condicional, isto para o potenciar do desempenho mecânico das espécies. A avaliação do desempenho da utilização de FRP's nas espécies Castanho e/ou Carvalho dependerá da disponibilidade de se encontrar uma estrutura existente onde seja possível fazer essa mesma avaliação, caso contrário será conduzida uma análise teórica.

Relativamente às propriedades mecânicas das espécies, o Pinheiro bravo, segundo LNEC (1997), pode ser dividido em duas classes de qualidade, E (Estruturas) e EE (Especial para Estruturas) (Tabela 1), sendo enquadrada na classe de resistência C18 pela EN 1912 (CEN 2004), para a classe de qualidade E. Relativamente à classe EE, apresenta propriedades semelhantes à classe C35, no entanto não é reconhecida internacionalmente como tal. Relativamente à Criptoméria as suas propriedades físicas e mecânicas encontram-se listadas na Tabela 2. Em relação ao Choupo, é uma espécie folhosa, sendo no entanto enquadrada em termos estruturais nas classes de resistência das resinosas pela EN 338 (CEN, 2003), sendo uma espécie pouco explorada para fins estruturais. No entanto, na EN 1912 (CEN 2004), alguns clones de *Populus x euroamericana* ("Robusta"; Dorskamp" e "I 214") com origem em França podem ser considerados como C18 e/ou como C24. A nível nacional, foram realizados alguns estudos que demonstram o seu potencial para fins estruturais enquanto madeira serrada maciça (Hodousek et al., 2017), e para o fabrico de madeira lamelada colada (Martins et al., 2019).

Tabela 1 – Valores médios e característicos das propriedades mecânicas da madeira de Pinheiro Bravo (Adaptado de LNEC, 1997).

Propriedades mecânicas		Classe de Qualidade	
		EE	E
Flexão estática (N/mm ²)	$f_{m,k}$	35	18
Tração paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{t,0,k}$	21	10,8
Tração perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{t,90,k}$	0,49	0,46
Compressão paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$	24,7	18
Compressão perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{c,90,k}$	7,3	6,9
Corte (N/mm ²)	$f_{v,k}$	3,4	2,0
Módulo de elasticidade (kN/mm ²)			
Paralelo às fibras			
(Valor médio)	E_{mean}	14	12
(Valor característico)	$E_{0,05}$	9,38	8,0
Perpendicular às fibras (valor médio)			
	E_{mean}	0,46	0,40
Módulo de distorção (kN/mm ²)			
	G_{mean}	0,87	0,75
Massa volumétrica (kg/m ³)			
(Valor médio)	ρ_{mean}	610	580
(Valor característico)	ρ_k	490	460

Tabela 2 – Valores médios e característicos das propriedades mecânicas da madeira de Criptoméria (Adaptado de NP 4544, 2015).

Propriedades mecânicas		Classe de Qualidade	
		Classe CYS I	Classe CYS II
Flexão (N/mm ²)	$f_{m,k}$	19	12
Tração paralela ao fio (N/mm ²)	$f_{t,0,k}$	13	9
Tração perpendicular ao fio (N/mm ²)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4
Compressão paralela ao fio (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$	20	17
Compressão perpendicular ao fio (N/mm ²)	$f_{c,90,k}$	2,2	1,8
Corte (N/mm ²)	$f_{v,k}$	3	3
Módulo de elasticidade (kN/mm ²)			
Paralelo ao fio			
- valor médio	E_{mean}	7	5,8
- valor característico	$E_{0,05}$	4,7	3,9
Perpendicular ao fio			
- valor médio	$E_{90,mean}$	0,24	0,19
Módulo de distorção (kN/mm ²)			
	G_{mean}	0,44	0,36
Massa volumétrica (kg/m ³)			
- valor médio	ρ_{mean}	350	290
- valor característico	ρ_k	312	250

Para além da madeira serrada maciça, outra opção que surge com elevado índice de utilização em construção nova é a madeira lamelada colada, que segundo Martins (2019), possui como vantagens em relação a madeira maciça possibilitar seções transversais e vãos de grande dimensão, grande variedade de aspetos estéticos e arquitetónicos, e apresentar menor variabilidade das propriedades e melhor resistência ao fogo (comparando seções iguais). Logo, este material pode ainda ter suas propriedades incrementadas com FRP, tornando-o ainda mais atrativo e aumentando a gama de aplicações na construção civil.

Como solução de reforço será utilizado o FRP, que são materiais compósitos, resultado da combinação de uma resina matriz com fibras. Segundo Parkyn (1970), citado por Newhook e Svecova (2007), a resina matriz, a fibra e o FRP tem as seguintes relações tensão-deformação:

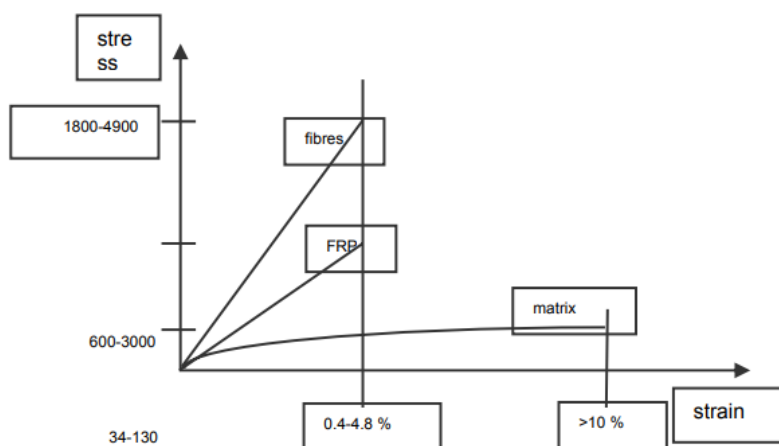


Figura 1 - Relação tensão deformação para o reforço fibroso e a matriz (Newhook e Svecova, 2007).

A fibra na composição do FRP pode ser de diferentes materiais como aramida, carbono ou vidro e essa diferenciação gera diferentes propriedades no FRP. Fato é que mesmo dentro de um só grupo, como o das fibras de carbono, pode-se ter variações de propriedades, já que esta é relacionada com a composição química, formato da seção transversal e comprimento. Observa-se que além destas propriedades de seção, a qualidade do produto final (FRP) também é dependente da qualidade da fibra, orientação, razão volumétrica, adesão na matriz e no processo de fabricação. Apresenta-se um resumo das propriedades mecânicas mais importantes de algumas fibras tipicamente utilizadas na produção de FRP (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de várias fibras usadas em FRP (Adaptado de Newhook e Svecova, 2007).

Propriedades mecânicas típicas das fibras						
Tipo de fibra	Resistência a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Coefficiente de expansão térmica (x10 ⁻⁶)	Coefficiente de Poisson	
Carbono						
PAN	Alta resistência	3500	200-240	1,3-1,8	(-1,2) a (-0,1) (α _{frpL})	-0,2
	Alta resistência	2500-4000	350-650	0,4-0,8	7 a 12 (α _{frpT})	
Pitch	Comum	780-1000	38-40	2,1-2,5	(-1,6) a (-0,9) (α _{frpL})	N/A
	Alta resistência	3000-3500	400-800	0,4-1,5		
Aramida						
Kevlar 29	3620	82,7	4,4	N/A		
Kevlar 49	2800	130	2,3	-2,0 (α _{frpL}), 59 (α _{frpT})		
Kevlar 129	4210 (est.)	110 (est.)	--	N/A	0,35	
Kevlar 149	3450	172-179	1,9	N/A		
Twaron	2800	130	2,3	(-2,0) (α _{frpL}), 59 (α _{frpT})		
Technora	3500	74	4,6	N/A		
Vidro						
E-Glass	3500-3600	74-75	4,8	5	0,2	
S-Glass	4900	87	5,6	2,9	0,22	
Alkali Resistant Glass	1800-3500	70-76	2,0-3,0	N/A	N/A	

Newhook e Svecova (2007), indicam que além de todas as variáveis apresentadas, a resina matriz também irá desempenhar um papel importante para o produto final (FRP), já que as propriedades físicas e térmicas desta afetam significativamente o produto final. Os mesmos autores, citando Phillips (1989), indicam que, para a otimização das propriedades das fibras, a matriz deve ser capaz de suportar tensões de rotura mais elevadas que as das fibras, ou seja, a resina não deve ser só projetada para proteger a fibra contra a abrasão mecânica, mas também transferir as tensões entre fibras. Newhook e Svecova (2007) destacam, como papel muito importante da resina, a transferência do cisalhamento interlaminar e no plano do compósito, o fornecimento de suporte lateral às fibras, este último para atuar contra a flambagem, quando a estrutura está sujeita a compressão.

Assim como as fibras, as resinas podem ser divididas em dois grupos que se diferenciam por suas propriedades: o das termoplásticas e o das termoendurecidas. A termoplástica, segundo Pereira (2009), se caracteriza por, a cada aquecimento poder ser conformada mecanicamente, são lineares ou ramificadas e parcialmente cristalinos ou totalmente amorfos. Já as termoendurecidas só podem ser conformadas plasticamente em um estágio intermediário de sua fabricação, o produto final é duro, não amolece com aumento de temperatura, são insolúveis, infusíveis e mais resistentes ao calor que as termoplásticas. De acordo com Newhook e Svecova (2007), as termoendurecidas são mais utilizadas (Tabela 4), já que possuem baixo peso

molecular, baixa viscosidade e suas moléculas possuem ligações químicas cruzadas, então formam uma estrutura tridimensional rígida.

Tabela 4 – Propriedades típicas de resinas termoendurecidas (Adaptado de Newhook e Svecova, 2007).

Propriedades típicas das resinas termoendurecida				
Resina	Peso Específico	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Retração por cura (%)
Epoxy	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

Conforme descrito por Schober et al. (2015), geralmente os adesivos são muito rígidos para serem aplicados à madeira, visto que a madeira está suscetível a variações dimensionais, por conta da variação no teor de água. Contudo, resinas com características específicas para madeira foram desenvolvidas, ficando indicado por este autor cinco categorias adequadas: epóxis, poliuretano, poliésteres, fenólicos e aminoplásticos. Mesmo com este desenvolvimento ainda é recomendado o uso de ambientes controlados para a realização da colagem e a escolha criteriosa do produto. Como última observação sobre este estudo, os adesivos epóxis são geralmente considerados mais adequados por possuírem propriedades de preenchimento de vazios e serem tixotrópicos e possuem baixa retração na cura.

Já Raftery et al. (2009) analisam em um programa de ensaios a conformidade higrotérmica de adesivos convencionais usados para madeira lamelada colada na colagem de FRP, através da ISO 6238 e EN 302. Neste foram analisados cinco adesivos convencionais para madeira lamelada colada: dois fenol resorcinol formaldeído (PRF's); um melamina-ureia-formaldeído (MUF); um poliuretano (PU) e um emulsão polimérica de isocianato (EPI) (Tabela 5) e três tipos de FRP (Tabela 6). Este estudo incluiu, conforme orientado pelo fornecedor do FRP, um promotor de adesão (*adhesion promoter*, AP) à base de silano (AP) especialmente formulado. Como conclusão, o estudo afirma que o desempenho do GFRP 1 (*Glass Fiber Reinforced Plastic*, GFRP) tem excelente desempenho com várias tipologias adesivas, o que demonstra um potencial para o uso alternativo a colas convencionais, como os adesivos epóxis, o que torna a solução de reforço mais atrativa no âmbito econômico, segundo os autores.

Tabela 5 – Características dos adesivos (Adaptado de Raftery et al., 2009).

Denominação	Taxa de resina (g/m ²)	Pressão de aperto (N/mm ²)	Tempo de aperto (h)
PRF 1	400	0,7	24
PRF 2	400	0,7	24
MUF	400	0,7	24
PU	250	0,7	3
EPI	400	0,7	3

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos FRP (Adaptado de Raftery et al., 2009).

Tipo de FRP	Resistência a tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência a flexão (MPa)
GFRP 1	-	40	1000
Fulcrum	1000	45	150
GFRP 2	210	17,5	210
Irish grown Sitka Spruce	35	9,68	36,3

Em resumo sobre os FRP e a resina, é necessário realizar ainda uma maior busca por materiais, fazer suas comparações e avaliar a disponibilidade para uso destes materiais para esta dissertação.

3 METODOLOGIA

3.1 Método não-destrutivo para caracterização da madeira

A determinação das propriedades mecânicas é regra geral associada a ensaios expeditos ao nível de instrumentação e tempo consumido, para além de para a determinação de algumas propriedades, implica a rotura do elemento, impedindo este de ser colocado posteriormente em serviço. Em alternativa, os avanços tecnológicos recentes permitem a caracterização das amostras de madeira através de metodologias não destrutivas, como por exemplo a vibração longitudinal que pode ser aplicada através do *Machine Timber Grader* (MTG) (Figura 2). Esta metodologia requer o acesso a ambos os topos da peça e a prévia medição das peças de madeira, com avaliação de largura, espessura, massa, teor de água e comprimento, para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico. O método possui excelentes resultados na predição das propriedades mecânicas da madeira serrada, em particular do Pinho Bravo, Choupo e Eucalipto, conforme estudado por Balsa, 2013, Hodousek et al., 2017 e Martins, 2015, respetivamente. Neste estudo o método de avaliação não destrutiva, realizada pelo MTG, será adotada para evitar a inviabilidade do uso das peças após a análise do módulo de elasticidade e a resistência a flexão, mas também sendo adotado o ensaio à flexão para as peças de madeiras reforçadas com FRP, conforme subcapítulo 3.2.



Figura 2 - Utilização do Timber Grader MTG na caracterização mecânica não destrutiva (Martins, 2019).

3.2 Avaliação das propriedades da madeira reforçada com FRP

Pretendendo avaliar a variação das propriedades da madeira reforçada com FRP em relação a peça de madeira sem reforço (avaliada conforme o subcapítulo 3.1), será adotado o ensaio à flexão descrito na EN 408 (CEN, 2010) que permite a obtenção do módulo de elasticidade à flexão (global e local), e a resistência à flexão (Figura 3) .

Os trabalhos de Borri et al. (2005), Schober et al. (2005) e Jankowski et al. (2010) utilizaram deste mesmo método, considerando transformadores lineares diferenciais variáveis (*Linear Variable differential transformer*, LVDT) e toda a metodologia descrita na EN 408 (CEN, 2010), para avaliar as mesmas propriedades.

Com esta metodologia, unindo o método não destrutivo (MTG) na madeira sem reforço e o ensaio destrutivo (EN 408, 2010) na madeira reforçada com FRP, será possível a avaliação das propriedades da mesma peça de madeira.

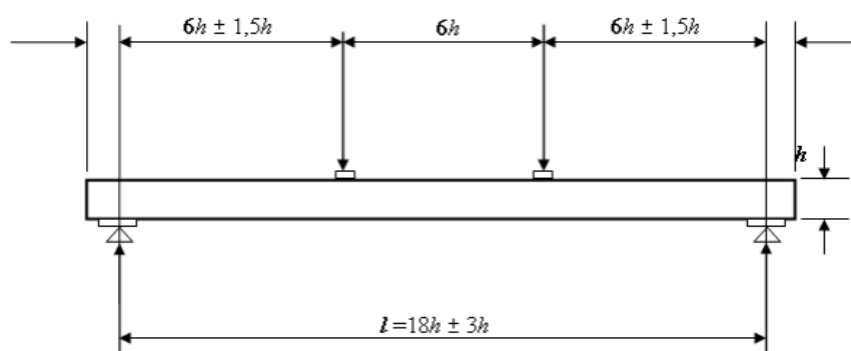


Figura 3 - Esquema para ensaio à flexão (EN 408, 2012).

3.3 Métodos de aplicação do FRP

As metodologias de aplicação de reforço mais comuns são: i) o método de reforço colado externamente (*Externally Bonded Reinforcement*, EBR) (Figura 4), ii) o reforço colado próximo à superfície (*Near-Surface Mounted*, NSM) (Figura 5) e iii) reforço fixado mecanicamente (*Mechanically Fastened*, MF-FRP) (Figura 6).

De Lorenzis e Teng (2007), descrevem que o método NSM pode conter vantagens em relação aos outros como, a) maior regularidade da superfície; b) remoção da “fraca” camada superficial do concreto, que não é necessária para ancoragem do FRP. Por outro lado, Elsayed et al. (2009), indicam como vantagem do MF-FRP: a) rápida instalação; b) não precisa de preparação prévia da superfície; c) possibilidade de utilização do incremento de propriedades na seção reforçada logo após a instalação.

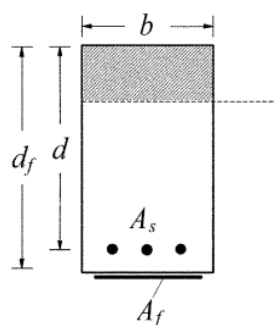


Figura 4 - Método EBR (ACI, 2008).

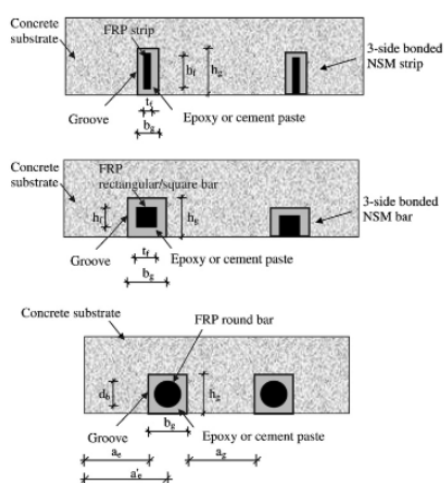


Figura 5 – Método NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).

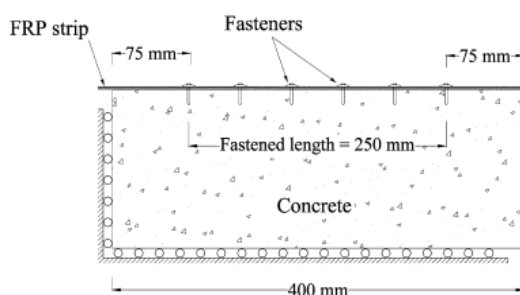


Figura 6 – Método MF-FRP (Walid E. Elsayed et al., 2009).

Schober et al. (2005) avaliaram três métodos de aplicação do reforço. Denominou-se Vh para o reforço colado na parte inferior da seção, na zona tracionada e no sentido horizontal, Vs para o colado lateralmente, na zona tracionada e no sentido horizontal, e Vv para o colado na parte central inferior da seção, na zona tracionada e no sentido vertical (Tabela 7). O resultado para o acréscimo no valor do módulo de elasticidade se mostra maior para o tipo Vh, seguido por Vs e depois Vv, seguindo uma média de 5,86% no acréscimo para todas as tipologias adotadas (Tabela 8).

Tabela 7 – Esquemas de reforço (Adaptado de Schober et al., 2005).




Tipos de séries	Descrição
Vh 	1 x 1,4 x 50 mm - Colado na parte central inferior da seção, na zona tracionada e no sentido horizontal
Vs 	2 x 1,4 x 25 mm - Colado lateralmente, na zona tracionada, a 3 cm do fundo, em uma ranhura e no sentido horizontal
Vv 	1 x 1,4 x 50 mm - Colado na parte central inferior da seção, na zona tracionada e no sentido vertical

Tabela 8 – Resultados obtidos de módulo de elasticidade (Adaptado de Schober et al., 2005).

Tipo de série	MOE (MPa)	MOE ^{fict} (MPa)	Efic / E (%)
S03/1 - Vh	12,622	14,39	113.99
S04/1 - Vh	14,9	15,54	104.34
S05/1 - Vh	13,229	14,875	112.45
S07/1 - Vh	10,744	12,163	113.20
S02/2 - Vs	17,675	17,891	101.22
S03/2 - Vs	13,954	14,762	105.79
S05/2 - Vs	16,373	16,982	103.72
S08/1 - Vs	11,156	11,642	104.36
S02/1 - Vv	15,837	16,742	105.71
S04/2 - Vv	18,747	17,823	095.07
S09/1 - Vv	10,83	11,427	105.45
S09/1 - Vv	17,77	18,604	104.96
Média total			105.86

4 PLANO DE TRABALHO

O plano de trabalho estabelecido para atingir os objetivos propostos encontra-se dividido em 7 Tarefas principais, a destacar:

Tarefa 1) Revisão bibliográfica;

Tarefa 2) Avaliação dos modelos analíticos para dimensionamento com FRP;

Tarefa 3) Caracterização experimental dos materiais;

3.1) – Caracterização dos FRP's;

3.2) – Caracterização da madeira;

Tarefa 4) Caracterização experimental da solução madeira-FRP;

Tarefa 5) Estudo paramétrico por via de modelos analíticos de dimensionamento;

Tarefa 6) Análise de viabilidade económica da utilização de FRP's no reforço de madeira;

Tarefa 7) Redação da Dissertação II.

De seguida é apresentado o diagrama de Gantt (Tabela 9) que demonstra a planificação das tarefas descritas e a realizar durante o período correspondente a um semestre.

Tabela 9 - Planificação das tarefas a serem realizadas

Tarefa	Designação da Tarefa	1 Semestre					
		1	2	3	4	5	6
1	Revisão bibliográfica						
2	Modelos analíticos para dimensionamento com FRP						
3	Caracterização experimental dos materiais						
4	Caracterização experimental da solução madeira-FRP						
5	Estudo paramétrico por via de modelos analíticos de dimensionamento						
6	Análise de viabilidade económica da utilização de FRP's no reforço de madeira						
7	Redação da Dissertação II						

Relativamente à campanha experimental será considerada numa primeira fase o estudo do incremento das propriedades mecânicas relativas à Criptoméria. Para qualquer das espécies, a matéria-prima (madeira serrada) a analisar será caracterizada ao nível das propriedades físicas e mecânicas sem qualquer reforço (de preferência no mínimo 20 provetes) e com reforço (no mínimo 5 provetes por configuração de reforço). No que à madeira lamelada colada diz respeito, será considerada uma amostra mínima de 3 provetes por configuração de reforço.

Enquanto variáveis a considerar na configuração do reforço, apesar de ainda não se encontrarem definidas, serão detalhadas de acordo com a informação obtida por via da realização da Tarefa 1. No entanto, além do posicionamento do reforço, outros aspetos serão considerados: i) largura do reforço; ii) comprimento do reforço; iii) tipo de reforço (laminado, manta, etc...); iv) material FRP (aramida, carbono, vidro, etc..).

5 COMENTÁRIO SOBRE AS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS UTILIZADAS

Jankowski et al. (2010) avaliaram 6 tipos de posicionamento do FRP para reforço em madeira com FRP. As configurações foram: viga A – uma viga de referência (não reforçada); viga B – uma viga reforçada com uma lamina de CFRP colada verticalmente ao longo de toda a extensão da viga; viga C - viga com duas tiras de CFRP coladas verticalmente ao longo de todo o comprimento da viga; viga D - uma viga reforçada com duas tiras de CFRP coladas na vertical ao longo de todo o comprimento a viga; viga E - uma viga reforçada com duas tiras de CFRP coladas verticalmente ao longo de toda a extensão da viga; viga F - uma viga reforçada horizontalmente na zona de momento fletor máximo com três tiras de CFRP de 400 a 600 mm de comprimento; viga G - uma viga de referência de madeira nova (Figura 7). De entre as diferentes configurações, a F foi a que apresentou menor incremento, na média dos resultados, da capacidade de carga (21%). Por outro lado, a configuração D apresentou um ganho, na média dos resultados, de 79%. As restantes configurações demonstram um incremento intermédio na capacidade de carga. São demonstrados os resultados individuais de cada série, dividida de “A” até “G”, e os resultados individuais de cada amostra das séries, tendo três amostras em cada série (Figura 8).

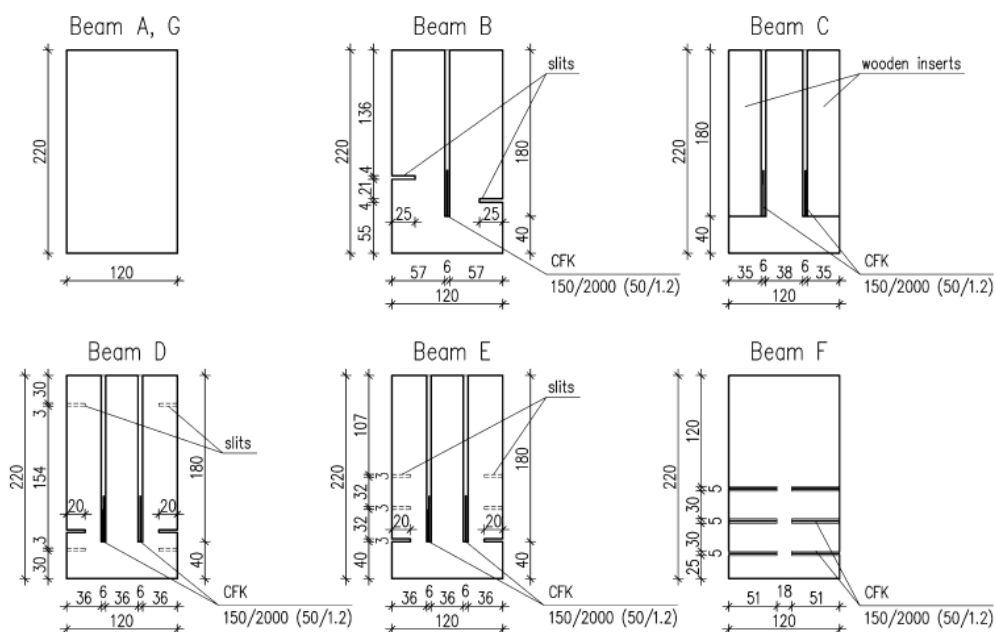


Figura 7 - Secções transversais das vigas ensaiadas com a disposições das fibras CFRP indicadas (mm) (Jankowski et al. 2010).

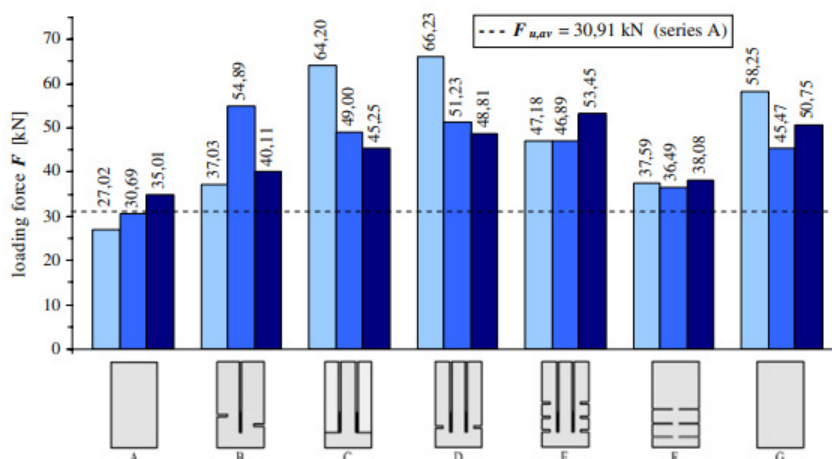


Figura 8 – Carga de rotura das amostras (Jankowski et al. 2010).

Borri et al. (2005) avaliaram três tipologias de posicionamento do reforço para fibra de carbono (CFRP) em mantas (Figura 9): a) duas camadas na parte inferior da viga (esquema 1); b) três camadas na parte inferior da viga (esquema 2) e c) duas camadas abrangendo parcialmente a base e a lateral do elemento de madeira (esquema 3). Outras tipologias foram adotadas com varões de CFRP, dimensões de 20 x 10 x 3600 mm (Figura 10). Além dessas, foi estudado também o comportamento, para o esquema 1 e 2, do pré-tensionamento dos reforços com mantas de CFRP, tendo duas e três mantas, respectivamente. Como resultado, o estudo indica os reforços externos com mantas de CFRP segundo o esquema “b” como a melhor configuração a adotar, com resultados de aumento de capacidade de carga à flexão de 60,3% (Tabela 10), quando comparados com as vigas não reforçadas. Os resultados para a manta pré tensionada foram de 52,4% e 43,8% (Tabela 11). Os varões de CFRP obtiveram menores aumentos de capacidade de carga (Tabela 12).

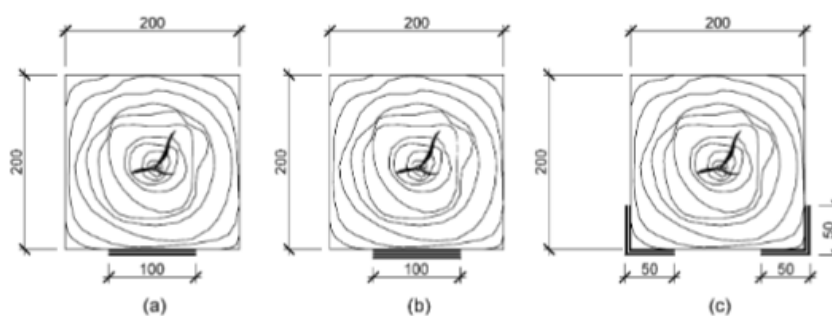


Figura 9 – Esquemas de reforço com mantas de CFRP (Borri et al., 2005).

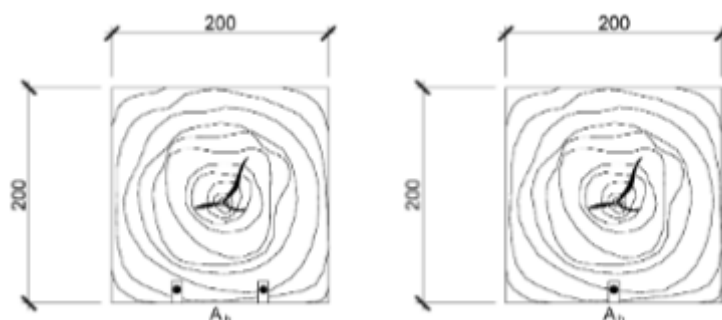


Figura 10 – Esquemas de reforço com varões de CFRP (Borri et al., 2005).

Tabela 10 – Resultados dos ensaios a flexão – Reforço com manta de CFRP (Adaptado de Borri et al., 2005).

Tipologia do reforço	Viga de madeira	Carga máxima (kN)	Incremento máximo de carga (%)	Incremento de rigidez (%)
Esquema 1	3	102,96	42,3	22,5
Esquema 2	2	115,96	60,3	29,2
Esquema 3	2	112,16	55	30,3

Tabela 11 - Resultados dos ensaios a flexão – Reforço com manta pré-tensionadas de CFRP (Adaptado de Borri et al., 2005).

Tipologia do reforço	Viga de madeira	Carga máxima (kN)	Incremento máximo de carga (%)	Incremento de rigidez (%)
Esquema 1	2	110,26	52,4	27,7
Esquema 2	2	104,03	43,8	24,8

Tabela 12 - Resultados dos ensaios a flexão – Reforço com varões de CFRP (Adaptado de Borri et al., 2005).

Tipologia do reforço	Viga de madeira	Carga máxima (kN)	Incremento máximo de carga (%)	Incremento de rigidez (%)
1 CFRP bar	2	93,27	28,9	22
2 CFRP bars	2	109,99	52	25,5
2 CFRP bars (pré-tensionado)	1	102,96	42,3	30,3

Borri et al. (2005) avaliaram ainda a curva carga-deflexão para os reforços realizados com mantas (Figura 11), mantas pré-tensionadas (Figura 12) e varões (Figura 13) e demonstraram que nos três casos a curva é elástica-linear até à ocorrência de falhas locais, consequência da presença de defeitos na madeira, como são os nós. Após este ponto a resposta deixou de ser linear, resultando na rotura da madeira e, conseqüentemente, a fratura do reforço na zona de tração.

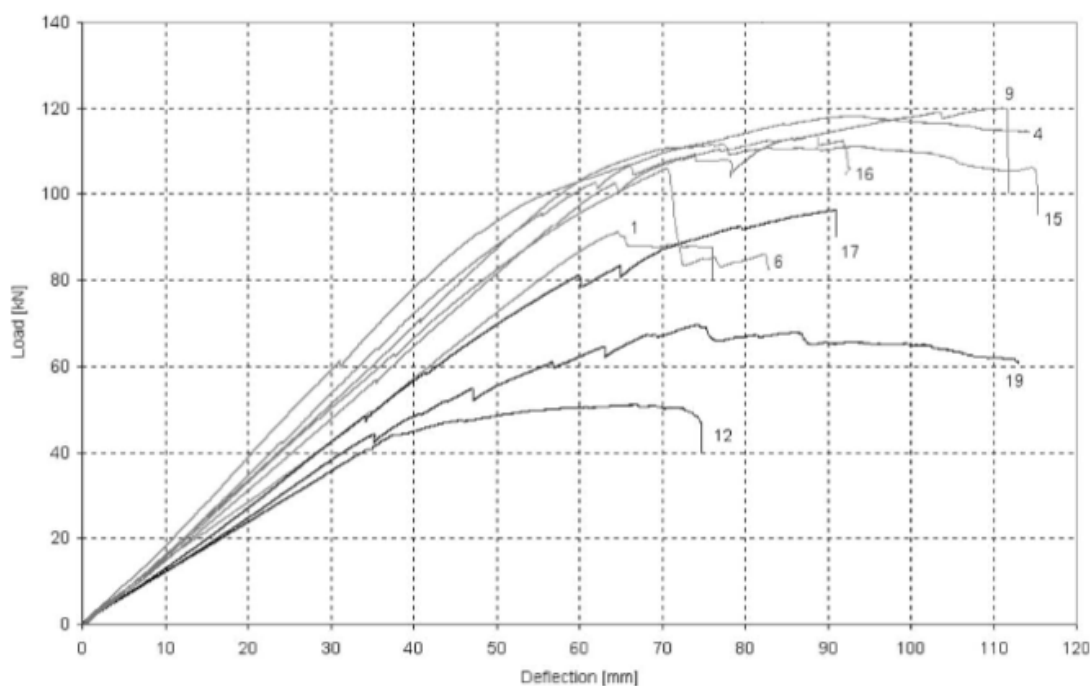


Figura 11 – Curva de carga-deflexão dos reforços com manta de CFRP (n° 12, 17 e 19: vigas sem reforço; n° 1 e 16: esquema 1 de reforço; n° 9 e 15: esquema 2 de reforço; n° 4 e 6: esquema 3 de reforço) (Borri et al., 2005).

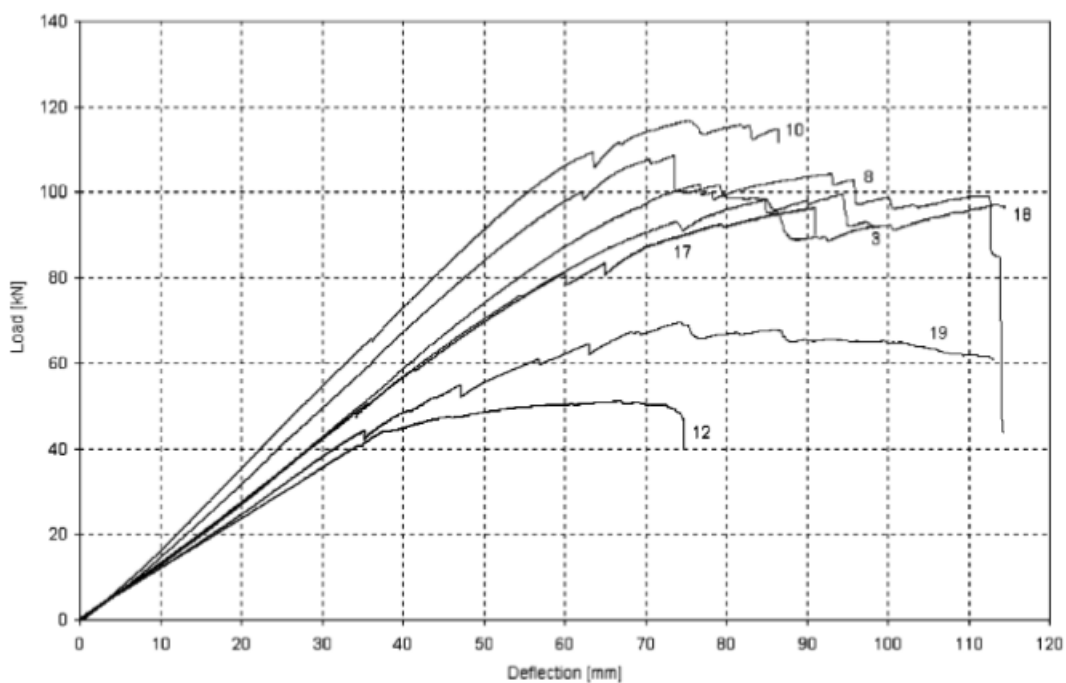


Figura 12 - Curva de carga-deflexão para os reforços de manta de CFRP pré-tensionados (n° 12, 17 e 19: vigas sem reforço; n° 8 e 10: esquema 1 de reforço; n° 3 e 18: esquema 2 de reforço) (Borri et al., 2005).

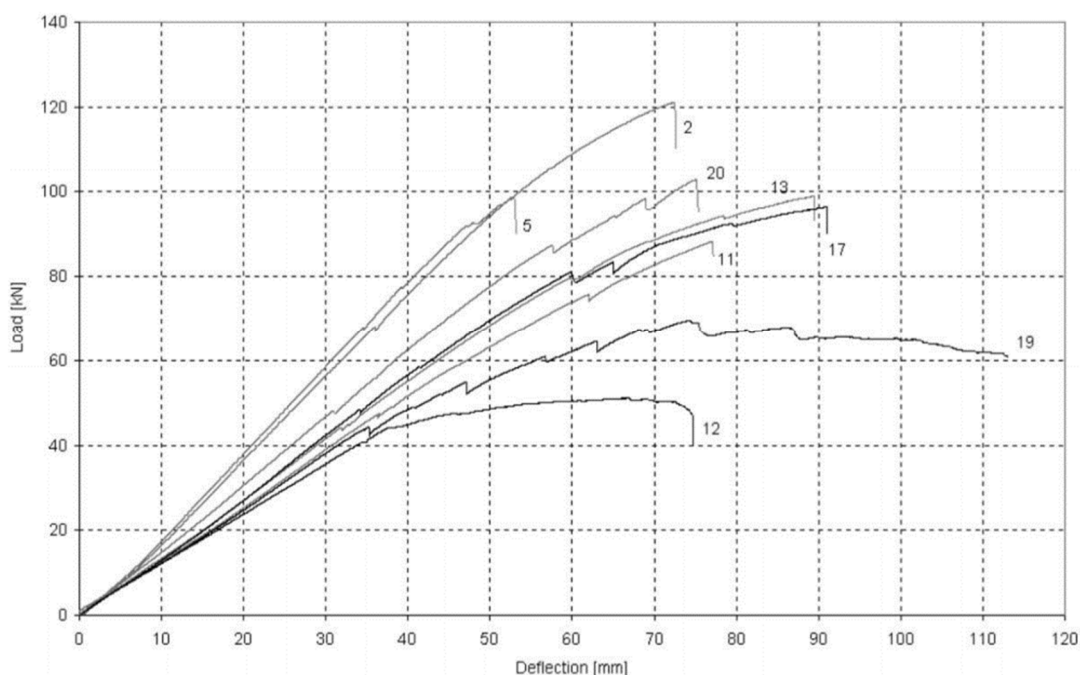


Figura 13 - Curva de carga-deflexão para os reforços com varões de CFRP (n° 12, 17 e 19: vigas sem reforço; n° 5 e 11: um varão de CFRP de reforço; n° 2 e 13: dois varões de reforço de CFRP; n° 20, reforço com dois varões de reforço de CFRP (Borri et al., 2005).

Hoseinpour et al. (2018), analisaram o comportamento em ensaios de flexão, conforme descrito na EN 408 (CEN, 2010), em onze vigas de madeira, sendo uma não reforçada e dez reforçadas. Foram considerados cinco LVDT's dispostos ao longo da viga como indicado na Figura 14. O material de reforço utilizado foi o CFRP e fibras de linho. Para a fibra de linho a resina utilizada variou entre vinil e epóxi. Com isso, foi adotada a nomenclatura NR (para vigas não reforçadas), FFRP-V e FFRP-EP, para fibra de linho com vinil e epóxi, respectivamente. A sigla EP, também foi adotada para indicar a aplicação da resina epóxi no CFRP. Nas amostras de CFRP foi adotada uma camada de reforço e o FFRP varia entre três ou cinco camadas de reforço. Os resultados (Tabela 13) demonstram o comportamento de cada amostra. As análises descrevem a mudança nos comportamentos de vigas de madeiras reforçadas com FRP, indicando que em vigas sem reforço a resistência à tração era atingida sem que a resistência à compressão fosse explorada, avaliando que as vigas reforçadas na zona de tração permitiu que o comportamento de compressão plástica da madeira fosse explorado (Figuras 15, 16 e 17).

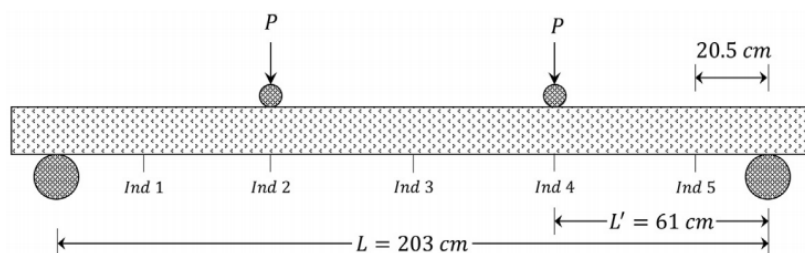


Figura 14 – Esquema da localização (Adaptado de Hoseinpour et al., 2018).

Tabela 13 - Resultados dos ensaios teóricos e experimentais (Adaptado de Hoseinpour et al., 2018).

Referencia da amostra	Deflexão máxima (mm)		Carga de rotura (N)		Modo de rotura	Rigidez à flexão (Nm)		Grau de plastificação (hcy/h)%
	ex	th	ex	th		ex	th	th
NR-02	49	34	54,341	56,511	tp	1426	1112	25
CFRP-Ep-1-01	50	46	90,296	89,193	cp	2013	1943	47
CFRP-Ep-1-02	40	46	60,994	89,193	cp	1307	943	47
FFRP-Ep-3-01	34	36	63,893	64,898	tp	1192	1285	30
FFRP-Ep-3-02	53	36	72,369	64,898	tp	1684	1285	30
FFRP-Ep-5-01	45	37	63,300	66,705	tp	1207	1230	32
FFRP-Ep-5-02	36	37	37,351	66,705	tp	885	1230	32
FFRP-V-3-01	64	35	69,804	58,732	tp	1802	1169	27
FFRP-V-3-02	40	35	51,335	58,732	tp	988	1169	27
FFRP-V-5-01	56	35	60,664	58,901	tp	1521	1171	27
FFRP-V-5-02	55	35	68,245	58,901	tp	1473	1171	27

Nota: Na coluna “Modo de rotura” a sigla “tp” indica a rotura por tração com comportamento plástico na zona de compressão e “cp” para rotura por compressão com comportamento plástico na zona de compressão. As linhas que tem indicação “ex” e “th” informam amostras experimentais e teórica, respetivamente

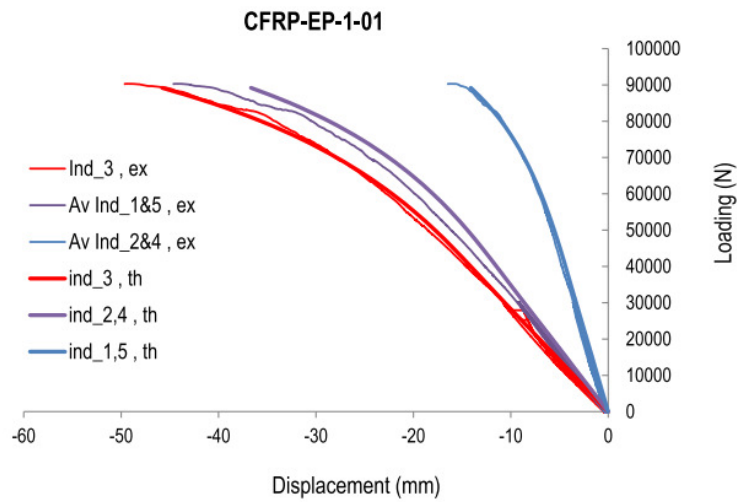


Figura 15 – Diagrama de carga e deslocamento da amostra CFRP-EP-1-01 (Adaptado de Hoseinpour et al., 2018).

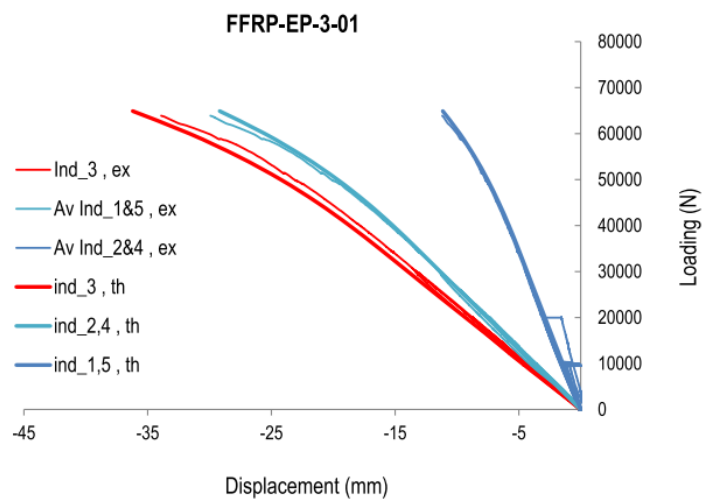


Figura 16 - Diagrama de carga e deslocamento da amostra FFRP-EP-3-01 (Adaptado de Hoseinpour et al., 2018).

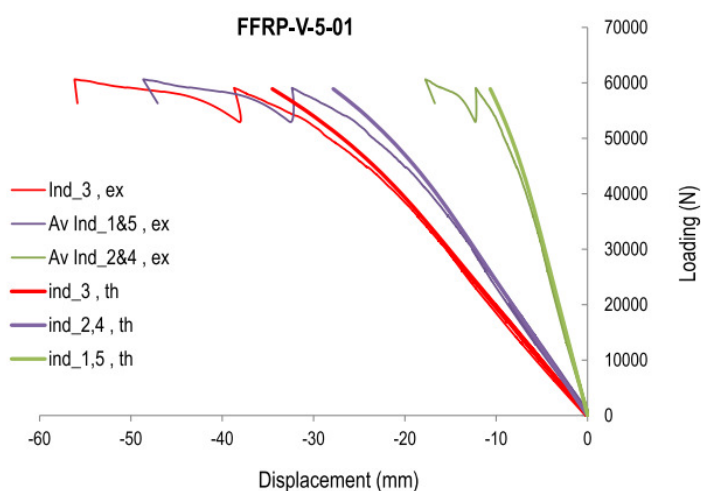


Figura 17 - Diagrama de carga e deslocamento da amostra FFRP-V-5-01 (Adaptado de Hoseinpour et al., 2018).

Donadon et al. (2020) avaliaram os incrementos de propriedades mecânicas no reforço de madeira lamelada com reforço de GFRP e colada com resina epóxi, mais especificamente, usando Vectran FRP e SikaDur 32. Foram avaliadas cinco amostras com diferentes números de camada de reforço (Tabela 14). Os ensaios foram feitos de acordo com a NBR 7190, tendo as cinco vigas sido submetidas a este ensaio com e sem reforço, tendo referencia U e UR, respectivamente (Figuras 18 e 19). As amostras sem reforço foram carregadas até metade da carga calculada de rotura (F50%). Este sistema proporcionou um aumento de 19,48% a 34,95% na rigidez no regime elástico e de 7% a 40% na carga final (Tabela 15), quando comparada com vigas semelhantes não reforçadas.

Tabela 14 – Descrição das amostras (Adaptado de Donadon et al., 2020).

Amostra	Altura da viga (mm)	Número de camadas (unidades)	Espessura (mm)	Taxa de reforço (%)	Massa específica (g/m ²)
Vec 1	180	2	3,5	1,9	1,622
Vec 2	180	4	3,0	1,7	1,632
Vec 3	180	3	5,0	2,8	2,433
Vec 4	180	6	6,0	3,3	2,448
Vec 5	180	8	6,0	5,0	3,264

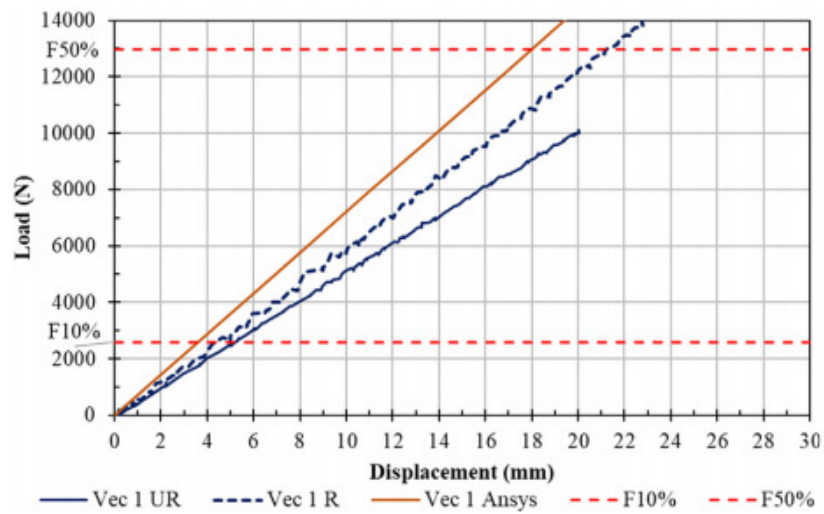


Figura 18 – Gráfico de carga-deflexão das amostras VEC 1 (Donadon et al., 2020).

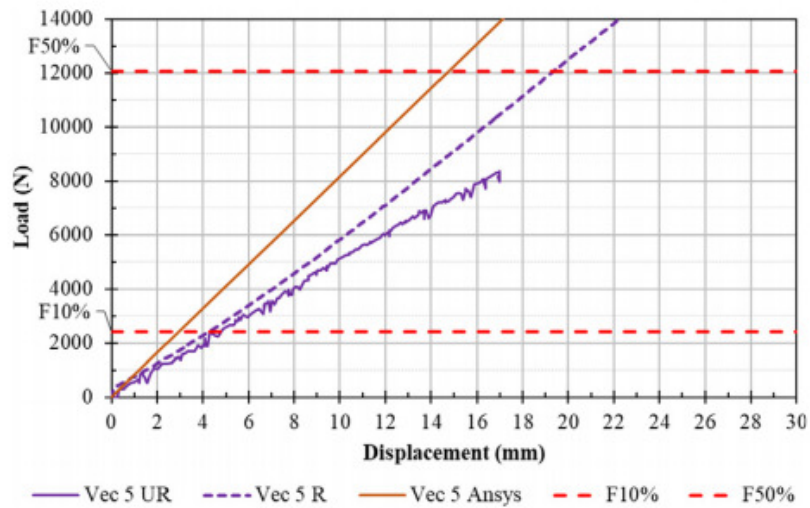


Figura 19 – Gráfico de carga-deflexão das amostras VEC 5 (Donadon et al., 2020).

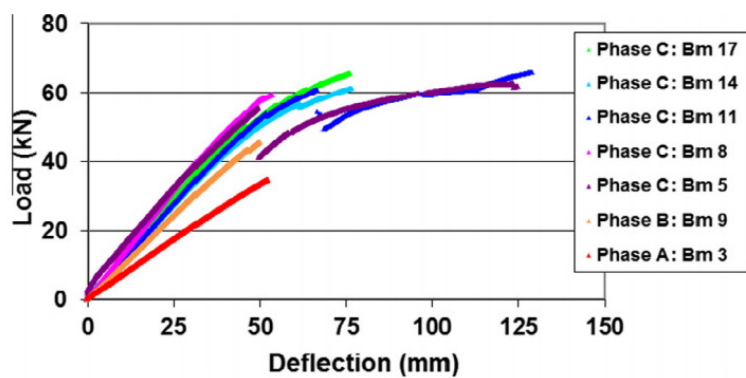


Figura 21 - Gráfico de carga-deflexão das amostras VEC 1 (Raftery, 2015).

6 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.
- Antonio Borri, Marco Corradi, Andrea Grazini, A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials, *Composites Part B: Engineering*, Volume 36, Issue 2, 2005, Pages 143-153.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190 – Projeto de estruturas de Madeira. 1997.
- Balsa, J. (2013). “Avaliação destrutiva e não destrutiva de elementos de madeira de Pinheiro bravo.” Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Universidade de Coimbra. MSc: 80.
- Bruno F. Donadon, Nilson T. Mascia, Ramon Vilela, Leandro M. Trautwein, Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement, *Engineering Structures*, Volume 202, 2020.
- Coelho, M.; Silva, L.; Sena-Cruz, J.M.; Barros, J. (2011) “Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP’s sob acções monotónicas e de fadiga.” *Revistas Portuguesa de Engenharia de Estruturas*.
- DRRF (2020). Ficha técnica – Criptoméria dos açoures - Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores. Secretaria Regional da Agricultura e Florestas – SRAF. Acedido em: 05/07/2020 em http://drrf-sraa.azores.gov.pt/areas/viveiros-florestais/Documents/Panfleto_Tecnico_Criptomeria.pdf
- Elsayed, Walid & Ebead, Usama & Neale, Kenneth. (2009). Studies on Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Systems. *ACI Structural Journal*. 106.
- EN 1912 (2013). Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 302-1 (2004). Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods - Part 1: Determination of bond strength in longitudinal tensile shear strength. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 302-2 (2004). Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods - Part 2: Determination of resistance to delamination. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 338 (2003). “Structural timber - Strength Classes.” European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 408 (2012). Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels
- Hamed Hoseinpour, Maria Rosa Valluzzi, Enrico Garbin, Matteo Panizza, Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials, *Construction and Building Materials*, Volume 191, 2018, Pages 1242-1251,
- Hodousek, M., A. M. P. G. Dias, C. Martins, A. F. S. Marques e M. Böhm (2017). “Comparison of Non-Destructive Methods Based on Natural Frequency for Determining the Modulus of Elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*.” *Bioresources* 12(1): 270-282.

- ISO 6238, Adhesives; Wood-to-wood adhesive bonds; Determination of shear strength by compressive loading, 2001
- Jankowski, Ludomir & Jasieńko, Jerzy & Nowak, Tomasz. (2010). Experimental assessment of CFRP reinforced wooden beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique. *Materials and Structures*.
- John Newhook, and Dagmar Svecova- ISIS Canada Networks of Centres of Excellence (NCE), Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers, no. 3. 2007.
- K. Schober, K. Rautenstrauch, Experimental investigation on flexural strengthening of timber structures with CFRP, in: Hong Kong, Proceeding of the international symposium on bond behavior of FRP in structures; BBFS, 2005.
- Kay-Uwe Schober, Annette M. Harte, Robert Kliger, Robert Jockwer, Qingfeng Xu, Jian-Fei Chen, FRP reinforcement of timber structures, *Construction and Building Materials*, Volume 97, 2015, Pages 106-118.
- Kostiantyn Protchenko, Maria Wlodarczyk, Elzbieta Szmigiera, Investigation of Behavior of Reinforced Concrete Elements Strengthened with FRP, *Procedia Engineering*, Volume 111, 2015, Pages 679-686.
- L. De Lorenzis, J.G. Teng, Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, *Composites Part B: Engineering*, Volume 38, Issue 2, 2007, Pages 119-143.
- LNEC – Ficha M2: Pinho bravo para estruturas. Série Madeira para construção, 1997.
- Marinella Fossetti, Giovanni Minafò, Maurizio Papia, Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords, *Construction and Building Materials*, Volume 95, 2015, Pages 54-64.
- Martins, Carlos & Dias, A. & Cruz, Helena. (2019). Using non-destructive testing to predict the strength of poplar glued laminated timber. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*.
- Martins, Carlos. (2019). Avaliação Estrutural de Elementos de Madeira Lamelada Colada Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, *Composites Part B: Engineering*, Volume 38, Issue 2, 2007, Pages 119-143.
- NP 4544 (2015). Madeira serrada de criptoméria para estruturas – Classificação visual para fins estruturas Instituto Português de Qualidade. Caparica.
- Pereira, Francisco. (2009). *Polymers - scientific and technological fundamentals (in portuguese); polímeros - Fundamentos científicos e tecnológicos*.
- Raftery, Gary & Harte, A.M. & Rodd, Peter. (2009). Bond quality at the FRP–wood interface using wood-laminating adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*.
- Raftery, Gary Annette M. Harte, Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate, *Composites Part B: Engineering*, Volume 42, Issue 4, 2011, Pages 724-735.
- Raftery, Gary, Peter D. Rodd, FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive, *Construction and Building Materials*, Volume 91, 2015, Pages 116-125.

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 apresentada à Universidade de Aveiro. 2008.