



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



Júlio Costaldello de Almeida

# REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO

Dissertação de Mestrado em Reabilitação de Edifícios, no Ramo de Reabilitação Estrutural, orientada pelo Professor Doutor Paulo Manuel Mendes Pinheiro da Providência e Costa e pelo Professor Doutor Anísio Alberto Martinho de Andrade, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2019



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Júlio Costaldello de Almeida

# **REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO**

## **STRUCTURAL REINFORCEMENT OF TIMBER BEAMS WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS**

Dissertação de Mestrado em Reabilitação de Edifícios, no Ramo de Reabilitação Estrutural,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo Manuel Mendes Pinheiro da Providência e Costa e pelo Professor Doutor Anísio Alberto Martinho de Andrade

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, 21 de fevereiro de 2019

## **AGRADecIMENTOS**

Agradeço a minha Mãe pela força.

Aos colegas de curso e amigos pelos bons momentos de descontração.

Aos orientadores, Professores Paulo e Anísio, pelo acompanhamento e contribuição para o trabalho.

Aos professores do Mestrado de Reabilitação de Edifícios da Universidade de Coimbra.

À minha família.

À minha esposa Maria Vitória, pela paciência, amor e dedicação.

Ao meu filho Francisco, que será recebido com muito amor.

## RESUMO

O estudo aborda o reforço de vigas de madeira com materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP). Por vezes, a mudança de utilização de um edifício pode comprometer a verificação dos estados limites últimos da estrutura e/ou dos estados limites de serviço. É justamente esta a situação considerada no exemplo apresentado. É estudado o reforço à flexão, no vão, das vigas de madeira da estrutura original por colagem de um laminado na sua parte inferior, e tirando partido de uma técnica simplificada de pré-esforço baseada na aplicação de uma contra-flecha inicial às vigas a reforçar. Como o Eurocódigo 5 desaconselha a utilização da análise plástica, em virtude do carácter frágil da rotura por tração das fibras de madeira, toda a análise é efetuada em regime elástico linear. O exemplo apresentado mostra que é possível prolongar a vida útil das vigas originais que em resultado da alteração do tipo de uso passaram a demonstrar capacidade de carga insuficiente e flechas excessivas. Concluiu-se que a aplicação desta técnica de reforço, tirando partido do pré-esforço conseguido pela contra-flecha induzida no início da operação de reforço, pode trazer bons resultados para vigas com cargas não previstas no projeto original. A utilização do CFRP mostrou-se viável para o reforço de vigas de madeira. O alto módulo de elasticidade das fibras de carbono destes laminados é um fator essencial para a eficácia deste reforço.

**Palavras-chave:** CFRP, Reforço, Vigas de Madeira, Estrutura, Resistência.

## ABSTRACT

This study approaches the reinforcement of wood beams with carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP). Sometimes, the change of use of a building may compromise the verification of the ultimate boundary states of the structure and / or boundary service states. This is precisely the situation considered in the example presented. It is studied the reinforcement in the bracing of the wood beams of the original structure by gluing a laminate in its lower part, and taking advantage of a simplified prestress technique based on the application of an initial counter-deformation to the beams at reinforce. As Eurocode 5 discourages the use of plastic analysis, due to the fragile nature of the traction fracture of the wood fibers, all the analysis is carried out in a linear elastic regime. The chosen example shows that it is possible to extend the useful life of original beams that in other uses started to demonstrate insufficient load capacity and excessive deformations. It has been concluded that the application of this reinforcement technique, taking advantage of the prestress obtained by the induced counter-deformation at the beginning of the reinforcement operation, can give good results for beams with loads not foreseen in the original design. The use of CFSP proved to be feasible for the reinforcement of wooden beams. The high modulus of elasticity of the carbon fibers of these laminates is an essential factor for the effectiveness of this reinforcement.

**Key words:** CFRP, Reinforcement, Wood Beams, Structure, Resistance.

---

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. PROBLEMA.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo geral.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. JUSTIFICAÇÃO.....	3
1.3.1. Generalidades .....	3
1.3.2. Aspectos tecnológicos .....	3
1.3.3. Aspectos económicos.....	4
1.3.4. Aspectos sociais.....	4
1.3.5. Aspectos ambientais.....	4
1.4. METODOLOGIA .....	5
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>6</b>
2.1. COMPÓSITOS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO (CFRP) .....	6
2.2. APLICAÇÃO DE CFRP NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA.....	10
2.2.1. Adesivo e tratamento da superfície .....	11
2.2.2. Aplicação de pré-esforço a produtos de CFRP.....	14
2.3. PROBLEMAS NO REFORÇO DE VIGAS DE MADEIRA.....	17
2.4. UTILIZAÇÃO DO MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES .....	19
2.5. RESISTÊNCIA AO FOGO .....	20
2.5. SUSTENTABILIDADE DO MATERIAL .....	21
<b>3. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA</b> .....	<b>23</b>
3.1. AÇÕES PERMANENTES.....	23

---

3.1.1. Elementos estruturais .....	23
3.1.2. Piso .....	24
3.2. AÇÕES VARIÁVEIS .....	25
3.2.1. Sobrecarga de utilização .....	25
3.3. COMBINAÇÕES DAS AÇÕES.....	26
<b>4. VERIFICAÇÕES DA VIGA DE MADEIRA .....</b>	<b>29</b>
4.1. NORMAS BRASILEIRAS PARA CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA .....	31
4.2. CÁLCULO DAS CARGAS IMPOSTAS NA VIGA DE MADEIRA .....	34
4.2.1. Força vertical no apoio e momento no meio do vão .....	34
4.3. VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS E DE SERVIÇO .	35
4.3.1. Verificação da resistência à compressão perpendicular ao fio .....	35
4.3.2. Verificação da resistência à flexão .....	37
4.3.3. Verificação da resistência ao corte .....	38
4.3.4. Verificação das flechas.....	40
<b>5. ALTERAÇÃO DA CATEGORIA DO EDIFÍCIO .....</b>	<b>43</b>
<b>6. REFORÇO DA VIGA DE MADEIRA COM CFRP .....</b>	<b>45</b>
6.1. MÉTODO DA SEÇÃO TRANSFORMADA .....	45
6.2. APLICAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO .....	47
6.3. APLICAÇÃO DAS CARGAS DE MUDANÇA DE CATEGORIA.....	49
6.4. ANCORAGEM .....	53
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 – Representação qualitativa da seção transversal de um produto de FRP.....	7
Figura 02 – Processo de produção de fibras de carbono.....	7
Figura 03 – Materiais constituintes de alguns produtos de FRP.....	8
Figura 04 – Laminado (em rolo) e tecido de CFRP.....	9
Figura 05 – Reforço à flexão e ao corte.....	14
Figura 06 – Processo de pré-esforço com reforço através de chapa metálica aparafusada.....	15
Figura 07 – Aplicação de pré-esforço.....	16
Figura 08 – Aplicação do sistema de pré-esforço.....	17
Figura 09 – Tipos de rotura no elemento reforçado ou no próprio reforço.....	17
Figura 10 – Possibilidades de tratamento das extremidades do laminado de reforço.....	18
Figura 11 – Técnica EBRA.....	19
Figura 12 – Aplicação de CFRP em viga deteriorada.....	19
Figura 13 – Reforço de CFRP em vigas entalhadas.....	20
Figura 14 – Defeitos na superfície de fibras recicladas.....	21
Figura 15 - Diagrama de medidas e cargas da viga de projeto.....	30
Figura 16 – Área de contato com o pilar ( $A_{ef}$ ).....	35
Figura 17 – Diagrama da viga nos apoios.....	36
Figura 18 – Diagrama da viga nos apoios.....	39
Figura 19 – Componentes da flecha.....	40
Figura 20 – Seção Transformada.....	45
Figura 21 – Possíveis mecanismos de rotura no reforço à flexão com laminados colados.....	53

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 – Materiais constituintes dos sistemas de FRP.....	8
Tabela 02 – Propriedades de produtos de FRP com fibras numa ou duas direções.....	9
Tabela 03 – Propriedades das Resinas Epoxídicas.....	12
Tabela 04 – Propriedades dos CFRP.....	12
Tabela 05 – Análise de diferentes processos de reciclagem.....	22
Tabela 06 - Classes de força e valores característicos da madeira.....	24
Tabela 07 - Características de painel de isolamento.....	25
Tabela 08 - Sobrecargas em pavimentos, escadas e varandas de edifícios.....	26
Tabela 09 – Valores recomendados dos coeficientes de combinação.....	27
Tabela 10 - Valores recomendados para coeficientes de segurança.....	27
Tabela 11 - Classes de risco.....	29
Tabela 12 – Relação entre a classe de serviço e a classe de uso.....	30
Tabela 13 – Classe de resistência das coníferas.....	31
Tabela 14 – Classe de resistência das dicotiledôneas.....	31
Tabela 15 – Fatores de combinação e de utilização.....	32
Tabela 16 – Coeficientes parciais de segurança para ações permanentes de pequena variabilidade.....	32
Tabela 17 – Coeficientes parciais de segurança para ações variáveis.....	33
Tabela 18 – Classes de umidade.....	33
Tabela 19 – Valores mínimos de cargas verticais – sobrecargas.....	34
Tabela 20 – Limites de deslocamentos na viga.....	41
Tabela 21 – Laminado utilizado no cálculo de reforço.....	45
Tabela 22 – Resultados da utilização de um laminado de 40 mm.....	52

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, a construção civil deixou de voltar-se somente para a construção de novos edifícios e passou a acompanhar um novo mercado ascendente, o da reabilitação. Aliás, um olhar atento, mostra que a reabilitação, ou mesmo a alteração e o acrescento de edifícios existentes, é uma realidade histórica: basta atender, aqui à porta de casa, aos exemplos do Paço das Escolas e da Sé Velha. O tema tem surgido diariamente entre os técnicos, não somente por ser um campo de crescimento para os próximos anos, mas também, como palco de debate da relação de harmonia com o meio ambiente, e em particular o ambiente construído e o ambiente urbano.

Não há como afirmar que a demolição de uma construção até sua fundação seja a única forma de manter o mercado ativo. A reabilitação de edifícios traz esse tema, envolvendo a necessidade de optar por reabilitar um edifício e não apenas demoli-lo, contribuindo sobremaneira na redução do uso de recursos naturais, mas também na preservação do património, cultural ou não, existente.

Neste trabalho será apresentado o processo de reforço de vigas de madeira com materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP). Este tipo de solução pode ser interessante para vigas subdimensionadas ou que, em virtude de uma alteração de uso, tenham de passar a suportar cargas permanentes e/ou sobrecargas não previstas no projeto original.

Será selecionado um projeto modelo, de uma viga sujeita às ações habituais e dimensionada de acordo com os Eurocódigos.

Inicialmente, numa simulação do projeto original, o edifício será considerado como residencial, obtendo-se as forças que são suportadas pelas peças estruturais de madeira e verificando os estados limites últimos, nomeadamente as cargas máximas suportadas, e os estados limites de utilização através do Eurocódigo 5. Em seguida, é considerada a alteração do tipo de uso do edifício, correspondendo a uma alteração da sobrecarga da Categoria A para a Categoria C (Eurocódigo 1), aumentando o seu valor, e de modo que alguns estados limites últimos deixem de ser satisfeitos em alguns membros da estrutura.

O objetivo do trabalho é reforçar as peças, nomeadamente as vigas, que devido a este incremento da sobrecarga deixam de satisfazer a segurança, demonstrando que o reforço com CFRP é exequível, e permite repor uma situação satisfatória.

## **1.1 PROBLEMA**

A mudança de utilização de edificações, com o agravamento das ações consideradas no projeto original, pode comprometer a verificação dos estados limites últimos. Há necessidade de buscar soluções que permitam incrementar a resistência e/ou reduzir as deformações devidas ao incremento das ações. Os CFRP podem ser utilizados para este reforço, e constituem alternativas a soluções mais tradicionais, como o incremento da seção da (ou o número de) viga(s) de madeira. A solução com CFRP aparenta ser menos intrusiva, não aumenta o peso próprio da estrutura, aspeto relevante em estruturas antigas, nem reduz o pé-direito disponível, e a sua aplicação é possivelmente mais simples que outras alternativas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo consiste em abordar o reforço de vigas de madeira, ou outros elementos estruturais de madeira sujeitos principalmente a esforços de flexão, com polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP).

### **1.2.2 Objetivos específicos**

No âmbito da dissertação serão cobertos os seguintes objetivos específicos principais:

- Apresentar as principais características dos elementos de reforço em CFRP;
- Dimensionar uma estrutura em madeira (estudo de caso), para as ações previstas nos Eurocódigos, incluindo uma sobrecarga original; analisar a mesma estrutura e verificar novamente as condições relativas aos estados limites, para um novo valor das ações gravíticas (sobrecarga, revestimentos, divisórias, etc.) significativamente superior ao original;
- Apresentar o procedimento de cálculo para verificação dos estados últimos de membros reforçados com CFRP;

- Reforçar a estrutura considerada no estudo de caso com CFRP;
- Apresentar o procedimento de aplicação dos elementos de CFRP em vigas de madeira.

## 1.3 JUSTIFICAÇÃO

### 1.3.1 Generalidades

Cada vez mais é necessário o estudo e aplicação de materiais duráveis, sustentáveis, resistentes, rígidos, e fáceis de manusear e aplicar.

Buscou-se uma alternativa viável para prolongar a vida útil de vigas de madeira, que por algum motivo, mas sem revelar uma degradação muito significativa, passaram a demonstrar capacidade de carga insuficiente, aumentando a resistência destas peças reforçando-as com compósitos de polímeros reforçados com fibras de carbono.

A aplicação de CFRP pode ser um método eficaz no reforço dos elementos estruturais, possibilitando o ganho de resistência e de rigidez, além de não aumentar as dimensões das peças e de possuir baixo peso.

### 1.3.2 Aspetos tecnológicos

Os CFRP constituem uma tecnologia empregada em diversas áreas, como por exemplo na indústria aeroespacial, automobilística, ferroviária e naval, e atualmente vem sendo utilizado com bons resultados na construção civil.

O uso de compósitos de polímeros reforçados com fibras de carbono é um método de reforço de fácil aplicação e com resultados que podem corresponder ao esperado. Este material compósito possui elevada resistência à tração, à corrosão e à fadiga, possui baixo peso específico, bom comportamento ao choque e boas características de isolamento eletromagnético. Sendo este material de reforço não metálico, não corre o risco de corrosão típico do reforço alternativo com chapas metálicas, além de que tem um peso muito menor e é muito mais fácil de aplicar.

O material tem baixa resistência ao fogo, por este motivo não deve ser aplicado sem uma proteção para o caso de incêndio. Também são necessários cuidados particulares com os ambientes demasiado húmidos, as condições de acessibilidade que o deixem suscetível a atos

de vandalismo, premeditados ou não, as temperaturas elevadas, não associadas a incêndio, que não poderão ultrapassar a temperatura de transição vítrea, e os raios UV.

### **1.3.3 Aspectos económicos**

Apesar de o CFRP ter preços pouco competitivos, quando comparado com os materiais tradicionais de construção civil, a facilidade de instalação, o tempo despendido no reforço e os resultados obtidos podem compensar o custo do material propriamente dito.

O material tem sido pouco utilizado no mercado da construção civil, razão pela qual se acredita que, com o passar dos anos, os preços do produto possam vir a diminuir, se o seu consumo aumentar, como é espectável, visto que o mercado da reabilitação tem ganhado destaque a cada dia, e a utilização de materiais de fácil aplicação e que apresentam resultados desejados podem ganhar espaço.

### **1.3.4 Aspectos sociais**

A perda de capacidade de carga de elementos de madeira pode impactar na resistência do conjunto estrutural, podendo até mesmo colapsar a estrutura, sendo necessário buscar soluções para impedir o aparecimento de manifestações patológicas que possam comprometer a segurança da edificação e conseqüentemente a segurança daqueles que desfrutam dos ambientes construídos. Ainda, há necessidade de manutenção e cuidados com os elementos estruturais, principalmente em relação ao seu desempenho, durabilidade, trabalhabilidade e resistência.

Deve-se levar em consideração que obras civis são executadas para suprir necessidades básicas, e que problemas como a perda de capacidade de carga em elementos estruturais pode ocasionar riscos aos seus usuários.

### **1.3.5 Aspectos ambientais**

Os processos de extração de minério, e mesmo de produção madeira, são altamente prejudiciais ao meio ambiente. Tratamentos que aumentam a vida útil da estrutura e evitam o descarte do material são fundamentais para a preservação do ecossistema.

Os compósitos não são materiais isentos de contribuição para a poluição global, pois gastam grandes quantidade de energia para serem produzidos. Porém, acredita-se que em razão do ganho de resistência nas peças reforçadas, pode-se colaborar para evitar a degradação ainda

maior do meio ambiente, impedindo que novos materiais sejam explorados para substituição dos materiais que não atendem às necessidades impostas.

## 1.4 METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema abordado, ou seja, o reforço à flexão de estruturas de madeira com CFRP, suas relações com estruturas de madeira, seus efeitos na proteção das peças e suas características de reforço estrutural.

Através da elaboração de um projeto modelo, com definição de geometria, materiais e ações, nomeadamente, cargas nas lajes e vigas, verificou-se as ações e combinações de ações regulamentares que permitiram determinar os esforços na estrutura.

O Eurocódigo 5 foi usado para a verificação da segurança dos elementos de madeira, e com ele apresentado um procedimento para a determinação da resistência das vigas reforçadas. Foi incluída uma seção referindo as normas brasileiras aplicáveis e as principais diferenças relativamente às da União Europeia.

Conhecido o valor das cargas máximas resistidas pelas peças, pode-se definir uma sobrecarga no pavimento, referente a uma possível mudança de categoria de utilização dos espaços, sendo uma sobrecarga não prevista no projeto estrutural original, levando a conclusão que sem o reforço de algumas vigas, haverá comprometimento da segurança da estrutura.

Na sequência do trabalho foram utilizados métodos de cálculo de reforço com CFRP colado na face inferior das peças, admitindo-se que não continuidade sobre os apoios, tornando os elementos estruturais mais resistentes à flexão e conseqüentemente com maior suporte de cargas, demonstrando que com o reforço a estrutura não irá romper.

O trabalho abordará o método de aplicação do material CFRP na base de uma viga de madeira, ao longo de todo o comprimento entre os apoios. Serão também avaliados o interesse e a exequibilidade do pré-esforço das fibras, por criação de uma contraflecha na viga, possibilitando melhor aproveitamento do material compósito.

Serão abordados os materiais utilizados na recuperação estrutural das vigas de madeira, os cálculos estruturais, os cálculos de reforço e a forma de aplicação. A pesquisa será realizada integralmente de forma teórica e numérica, mas não experimental, optando-se por usar testes de rompimento de trabalhos já realizados por outros autores, avaliando e concluindo a eficiência ou não destes compósitos no reforço à flexão de vigas de madeira.

---

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

As deficiências em estruturas de madeira originam-se por variadas razões, dentre elas, a deterioração do material, por exemplo, devido a uma proteção inadequada relativamente à umidade, erros de dimensionamento e cargas não consideradas. Algumas destas deficiências levaram ao desenvolvimento e aplicação de novos materiais e equipamentos para o reforço estrutural dos elementos.

Para a execução de reparações e/ou reforços, primeiro é necessário diagnosticar o problema, analisar se será viável a execução de reforço, investigar o estado da estrutura com auxílio de ensaios não destrutivos, e por fim, escolher a melhor técnica para reabilitar o conjunto estrutural (PINTO, 2000).

Tentando buscar um método diferente da utilização de chapas metálicas/madeira na recuperação de peças de madeira, optou-se pelo estudo dos Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP), aumentando a resistência e melhorando as flechas causadas pelas deformações na viga.

### **2.1 COMPÓSITOS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO (CFRP)**

A literatura designa os compósitos de polímeros reforçados com fibras, pela sigla FRP, “Fiber Reinforced Plastic” ou “Plásticos Reforçados com Fibras” (SILVA, 1999). De facto, o P da sigla FRP também pode designar um Polímero (Polymer), que é um tipo de plástico.

As fibras de carbono, com 5 a 15  $\mu\text{m}$  de diâmetro, que conferem a resistência aos FRP, são elas próprias compósitos filamentosos providos de mais de 90% de carbono. Nos FRP, as fibras são unidas por um polímero denominado de matriz (resina). Esta matriz constitui a fase contínua dos FRP, enquanto que as fibras são a sua fase discreta ou dispersa, ver Figura 01.

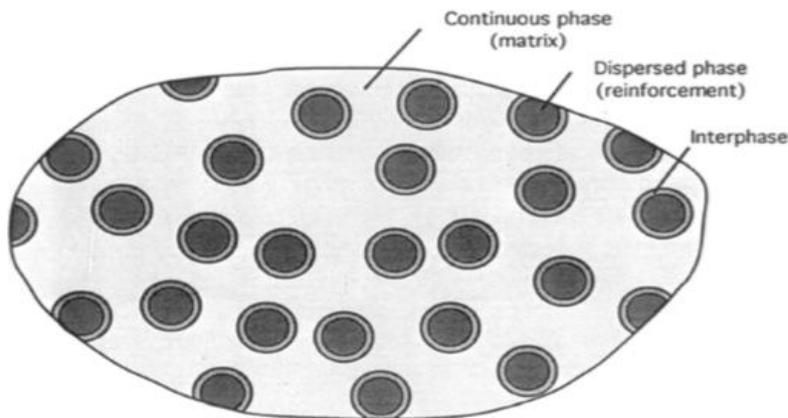


Figura 01 – Representação qualitativa da seção transversal de um produto de FRP (CORREIA, 2013).

Fibras de carbono são produzidas submetendo as fibras de base orgânica (acrílico ou alcatrão) a tratamentos térmicos elevados (1000°C a 3000°C); desta forma, o material transforma-se em carbono por pirólise (CHASTRE, 2005).

A poliacrilonitrila (PAN) é a principal matéria-prima usada na fabricação de fibras de carbono, trata-se de um polímero de adição formado por adições sucessivas de monômeros de acrilonitrila, se caracteriza principalmente por não ser fusível; o seu aquecimento acima de 180°C provoca a ciclização dos agrupamentos nitrílicos (CN), com grande liberação de energia e gases. A acrilonitrila foi descoberta em 1893 pelo químico francês C. Moreau, pela desidratação de etilenocianidrina ou metanolacetonitrila ( $C_3H_5NO$ ) com pentóxido de fósforo (ALVES et al., 2018).

Na Figura 02, ilustra-se o processo de produção de fibras de carbono.

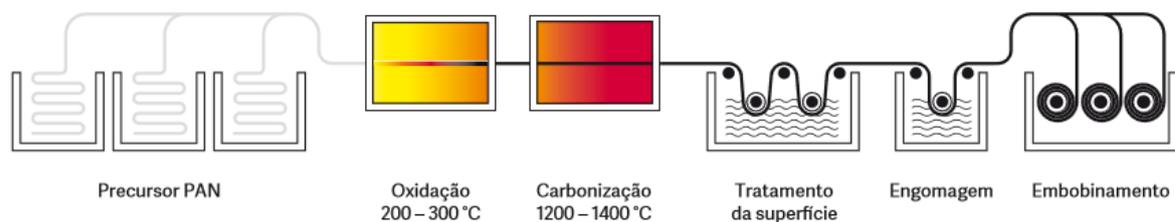


Figura 02 – Processo de produção de fibras de carbono (SGL GROUP, 2018).

Existem diversos sistemas exteriores de reforço com CFRP. De forma geral, podem subdividir-se em sistemas curados "in situ", que são transversalmente flexíveis, como um tecido normal, e em sistemas pré-curados ou pré-fabricados, como laminados, que são relativamente rígidos.

Conforme a Tabela 01, nos sistemas curados "in situ" há impregnação dos fios no local das obras, mantas ou tecidos (unidireccionais ou multidireccionais) com uma resina de saturação, a qual serve também para ligar as fibras de FRP à superfície preparada do elemento a reforçar. Já os sistemas pré-curados ou pré-fabricados têm diversas formas, indo desde os varões aos laminados ou chapas, coletes e estribos que são colados ao substrato com um adesivo, como resinas epóxi (CHASTRE, 2005).

Os laminados possuem uma espessura da ordem de 1 mm e são produzidos por pultrusão ou por laminação. Os tecidos podem ser unidireccionais, bidireccionais ou com mais orientações de fibras (CARRAZEDO, 2005).

Tabela 01 – Materiais constituintes dos sistemas de FRP (JUVANDES, 2011).

Sistema Comercial	Primário	Argamassa de Regularização	Adesivo	Resina de Impregnação	Compósito FRP	Fibras contínuas secas ou pré-impreg.
Pré-Fabricado	Opcional	Opcional	Sim	–	Sim	–
Curado "in situ"	Sim	Opcional	–	Sim	–	Sim

As Figuras 03 e 04 ilustram o formato/aparência dos sistemas pré-fabricados e curados "in situ".

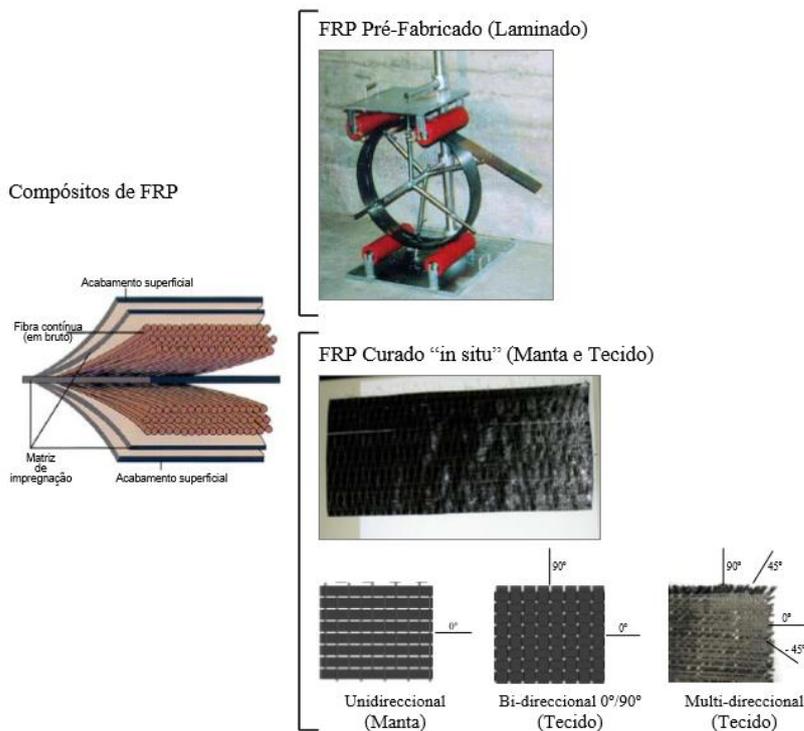


Figura 03 – Materiais constituintes de alguns produtos de FRP (JUVANDES, 2011).



Figura 04 – Laminado (em rolo) e tecido de CFRP (CORREIA, 2013).

A evolução do emprego de materiais compósitos com fibras deve-se às suas vantagens (CARNEIRO, 2004):

- Elevada resistência à tração;
- Boa resistência à corrosão, ataques químicos e cargas dinâmicas;
- Relação resistência/peso elevada;
- Boa capacidade de deformação (embora apresente comportamento frágil);
- Disponibilidade de diferentes formas, tipos e dimensões;
- Custo reduzido em manutenção e aplicação.

A Tabela 02 apresenta algumas propriedades gerais dos produtos de CFRP.

Tabela 02 – Propriedades de produtos de FRP com fibras numa ou duas direções (ACI 440.2R, 2002) (CARNEIRO, 2004).

Tipos de Lâmina (Orientação das Fibras)	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)		Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)		Deformação Última $\varepsilon_{fu}$ (%)
	0°	90°	0°	90°	0°
<b>Carbono (0°)</b>	1020 a 2080	35 a 70	100 a 140	2 a 7	10,0 a 15,0
<b>Carbono (0°/90°)</b>	700 a 1020	700 a 1020	55 a 76	55 a 75	10,0 a 15,0
<b>Carbono (+45°/-45°)</b>	180 a 280	180 a 280	14 a 28	14 a 28	15,0 a 25,0

As fibras de carbono têm um peso específico entre 17 kN/m<sup>3</sup> e 21 kN/m<sup>3</sup>, suportam temperaturas próximas de 275°C (CARNEIRO, 2004), muito superiores, portanto, aos valores suportados pelos polímeros em que são imersas nos FRP.

Os reforços com CFRP podem apresentar alguns inconvenientes, como (EMMONS, 1998):

- Não possibilitar a visualização de fissuras no substrato devido ao cobrimento da peça pelo produto de FRP;
- Alto custo do material, por exemplo quando comparado com o aço;
- Possibilidade de descolamento do produto de FRP;
- Coeficiente de dilatação térmica diferente do material do substrato;
- Necessidade de proteção contra incêndios e radiação ultravioleta.

A ação dos CFRP só é efetiva quando são solicitados à tracção na direção das fibras; têm resistência muito inferior se submetidos a esforços de tracção perpendicularmente às fibras (GARCEZ, 2007).

A técnica de colagem pode ser realizada externamente, designada por EBR (Externally Bonded Reinforcement) ou no interior de um rasgo criado na madeira NSR (Near-Surface Mounted Reinforcement) (JUVANDES, 1999).

Os produtos de CFRP também podem ser utilizados em vigas novas. Porém, por terem um preço relativamente alto, têm especial importância para o reforço de estruturas existentes, incluindo as do património cultura edificado, deterioradas ou não, onde pode não ser aceitável a alteração do aspeto e/ou natureza da construção, sendo preferível este processo de reabilitação pouco intrusivo (BALSEIRO et al., 2008).

## **2.2 APLICAÇÃO DE CFRP NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA**

Para o desenvolvimento do trabalho, adotou-se o reforço com CFRP externo (EBR) de uma viga de madeira maciça. Note-se que na madeira lamelada colada também é possível o reforço com os compósitos entre as lamelas, mas esse tipo de aplicação não foi considerado neste trabalho.

O processo de aplicação pode ter grande importância para o reforço de estruturas existentes, uma vez que não é necessário remover o elemento estrutural e que a interferência é mínima. Trata-se de um sistema adequado para edifícios com interesse histórico, nos quais é necessário respeitar a originalidade da construção (BALSEIRO et al., 2008).

É possível utilizar outros materiais no tratamento da madeira, como o exemplo da fibra de vidro. Tecidos de fibra de vidro apresentam custo 20 vezes menor se comparados com tecidos de fibra de carbono. Assim, embora a resistência de uma camada de fibra de carbono seja equivalente a três camadas de fibra de vidro de igual seção, é mais vantajoso o uso de fibras de vidro se comparadas apenas pelo custo do produto (FIORELLI, 2002).

Para avaliação do presente trabalho, desconsiderou-se o alto custo das fibras de carbono, tendo a pesquisa relevância na análise e estudo do material como elemento de reforço. Refira-se, porém, que os produtos de FRP podem exigir menos trabalho na aplicação se for possível aplicar um menor número de camadas, reduzindo o tempo de aplicação do reforço (pode-se considerar o EBR se for necessário reforçar uma viga contínua sobre um apoio). Note-se ainda, que os CFRP apresentam uma rigidez muito superior à do GFRP, o que é fundamental para o controle de flechas.

Entendendo que o FRP apresenta elevada resistência à tração e que as maiores tensões de tração em vigas simplesmente apoiadas ocorrem na sua face inferior, o CFRP é um material excelente para o reforço. O efeito de eventuais defeitos naturais apresentados pela madeira, como nós, cuja presença na zona submetida à tração reduz significativamente a resistência à flexão do elemento, poderá também ser amenizado pela colocação de laminados de FRP (DIAS et al., 2006).

Os sistemas de CFRP são constituídos por fibras de alta resistência à tração, matriz envolvente e adesivo. A matriz e o adesivo são normalmente resinas poliméricas, devendo a primeira assegurar o funcionamento solidário com as fibras. O adesivo, frequentemente uma resina epóxi, tem que assegurar uma boa aderência entre o reforço e a madeira (CARRAZEDO, 2005).

Para ocorrer a correta utilização do CFRP, deve-se ter cuidado com a escolha do adesivo e técnica de colagem, pois o reforço deve atuar juntamente com estrutura de madeira. Desta forma, a preparação da superfície é um dos principais cuidados que devem ser tomados, sendo necessária mão de obra bem preparada (PINTO, 2000).

### **2.2.1 Adesivo e tratamento da superfície**

Os adesivos sintéticos termofixos são indicados para o reforço da madeira, pois apresentam grande resistência à ação da água e resistem ao ataque de microorganismos. As resinas epóxi ou epoxídicas apresentaram os melhores resultados no tratamento de vigas de madeira (FIORELLI, 2002).

A Tabela 03 apresenta as características gerais de resinas epóxi.

Tabela 03 – Propriedades das Resinas Epoxídicas (FIB, 2001).

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

É necessária uma preparação da superfície da madeira bastante simples. Em particular, é importante destacar que a superfície da madeira deve estar livre de pó ou qualquer sujidade que comprometa a aderência. Uma técnica utilizada para criar rugosidade pode ser a passagem de escova de aço na superfície de madeira. Uma rugosidade elevada aumenta o valor da tensão de aderência, e dispensa a aplicação de camada de primário (DIAS et al., 2006).

Conforme testes realizados por DIAS et al. (2006), os valores obtidos (ensaio de pull off) para a tensão de aderência na ligação madeira-CFRP foram de 3,5-3,9 MPa na manta, e de 2,8-2,9 MPa no laminado. Estes valores são aceitáveis para a utilização desta técnica como reforço, superiores aos valores estipulados como mínimos para a aderência betão-CFRP.

Os materiais utilizados nos testes mencionados acima, são apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 – Propriedades dos CFRP (DIAS et al., 2006).

Sistema de CFRP	Materiais	Designação	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão última (%)	Espessura (mm)
MBrace Manta	Primário	MBrace Primário	12	0.7	30	-
	Cola	MBrace Saturante	54	3	25	-
	Reforço	MBrace Manta C1-30	3700	240	15	0.167
MBrace Laminado	Primário	MBrace Primário	12	0.7	30	-
	Cola	MBrace Adesivo	-	7	-	-
	Reforço	MBrace Laminado HM	2200	200	11	1.4

Os modelos com o reforço externo de CFRP por colagem simples, apresentaram um acréscimo do valor da carga máxima superior a 50% (52% para a manta e 54% para o laminado) quando comparadas com vigas sem o reforço (DIAS et al., 2006).

Porém, conforme BALSEIRO et al. (2008), o reforço mediante colagem simples de laminados de CFRP, tem baixo potencial, merecendo especial atenção para o risco de delaminação na interface de colagem. Segundo os autores há incapacidade de explorar mais do que 15 a 20% da resistência à tração do laminado.

Para os ensaios mencionados acima, utilizou-se um laminado Sika® CarboDur, e resina epoxídica para a colagem Sikadur® 30. O laminado apresentava resistência média à tração de 3100 MPa e um módulo de elasticidade de 165 GPa (BALSEIRO et al., 2008).

Segundo FIORELLI (2002), através do estudo de diferentes adesivos para o reforço de vigas, constatou-se que o produto epóxi AR-300, fornece excelente penetração nas fibras, não desenvolve superfície pegajosa depois da cura e pode ser usado em diferentes camadas de fibras sobrepostas.

De forma geral, a aplicação dos compósitos de CFRP só será eficaz se (DIAS et al., 2006):

- Houver uma boa condição de aderência através da preparação da superfície;
- A colagem sobre o elemento estrutural for realizada de forma correta e com a superfície limpa;
- Houver cuidados com mão de obra especializada e acompanhamento antes, durante e depois da aplicação.

Concluindo os estudos realizados por DIAS et al. (2006), verificou-se que é viável a utilização das colas dos sistemas de reforço MBrace Manta e MBrace Laminado utilizadas em superfícies de madeira, não havendo vantagem na aplicação de uma camada de primário para melhorar a aderência madeira-CFRP. Os defeitos da madeira possuem influência significativa nos valores da aderência e o reforço externo conduziu ao maior valor da capacidade máxima resistente.

A preparação cuidadosa da superfície é essencial para conseguir integridade e a durabilidade da ligação devendo ser realizada imediatamente antes da colagem. A aplicação do adesivo deve seguir as instruções do fabricante, evitando falhas que podem acarretar na ruptura da cola de forma não prevista no projeto de reforço das estruturas (SCHOBER et al., 2015).

A Figura 05 ilustra algumas formas de aplicação do reforço à flexão e ao corte.

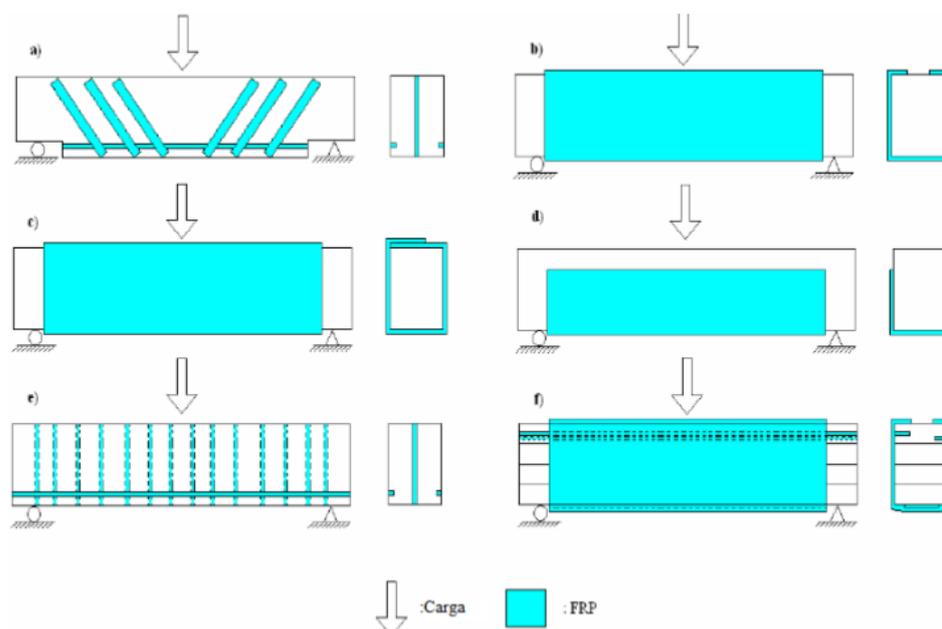


Figura 05 – Reforço à flexão e ao corte (CRUZ, 2015, citando, ANDRE, 2006).

## 2.2.2 Aplicação de pré-esforço a produtos de CFRP

Visto que na bibliografia estudada a capacidade de suporte de cargas com a simples colagem do laminado acaba sendo pouco significativa, muitas vezes não utilizando todo o potencial das fibras de carbono, optou-se por seguir com a análise de reforço com aplicação de pré-esforço, tratando-se de um método que pode aproveitar mais a resistência oferecida pelo CFRP, oferecendo maior suporte de cargas em relação a simples aplicação do material na superfície da viga.

No trabalho realizado por LIMA (2016), foram realizados ensaios com aplicação de pré-esforço em vigas de madeira reforçadas com chapa de aço aparafusada, através da análise numérica computacional obteve-se as forças de pré-esforço até a tensão admissível das vigas. O sistema de reforço conferiu aumento de capacidade de carga de até 114% acima do valor obtido sem reforço.

Apesar dos ensaios serem realizados com chapas metálicas, LIMA (2016), também utilizou estudos de autores que tratam do pré-esforço em vigas reforçadas com CFRP, sendo possível concluir que a técnica de pré-esforço utilizada é semelhante, porém, com materiais diferentes. A técnica utilizada em seu estudo é ilustrada na Figura 06.

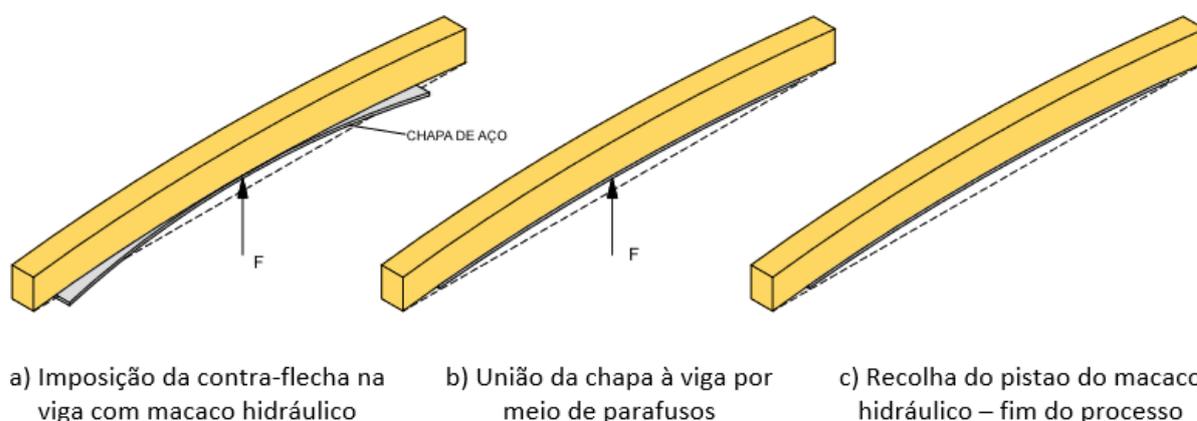


Figura 06 – Processo de pré-esforço com reforço através de chapa metálica aparafusada (LIMA, 2016).

O reforço com CFRP mediante colagem simples, constitui uma não-solução, aproveitando pouco o potencial das fibras, principalmente por problemas de delaminação na interface de colagem ou na sua vizinhança. A colagem do laminado sob uma contraflecha inicial deixa uma contraflecha residual (ver exemplo apresentado) que reduz as deformações das estruturas de madeira, embora não elimine integralmente o problema da delaminação, fator que exige melhoramento (ancoragem, cuidados com a aderência e colagem do laminado) (BALSEIRO, 2007).

A comparação do aumento de resistência entre vigas de madeira reforçada sem e com pré-esforço foi modesto; todavia, a técnica de pré-esforço pode compensar devido à redução da flecha. Verificou-se um ganho adicional de 26 % em resistência à flexão nas vigas pré-esforçadas e de 19 % nas reforçadas sem pré-esforço, quando testadas até o colapso da estrutura, rompimento do laminado e/ou delaminação na interface (BALSEIRO et al., 2008).

Nota-se uma grande diferença de valores de ganho de resistência obtidos por LIMA (2006), nas chapas metálicas e por BALSEIRO (2007), nos CFRP, ambos sendo materiais de alta resistência, porém, aplicados na superfície do elemento estrutural de formas distintas, ou seja, parafusos e adesivos.

O pré-esforço aplicado nas vigas de madeira não deve exceder 80% da resistência característica à flexão, valor que leva em consideração a segurança da estrutura, evitando possíveis danos ao elemento estrutural (LIMA, 2016).

Foi acordado que para os ensaios a tensão máxima empregada nas vigas através do pré-esforço seria correspondente a 90% da resistência característica à flexão. Buscando-se uma máxima deformação sem danificar a viga e mantendo a peça em fase elástica. Para a imposição da contraflecha as vigas foram viradas, tornando a aplicação da carga de cima para baixo (BALSEIRO, 2007).

Nota-se que a diferença de porcentagem da resistência característica no pré-esforço, citada nos dois últimos parágrafos acima, foi por opção dos autores, ambos buscando a segurança da peça e a maior deformação possível.

Porém, pode ocorrer a aplicação do pré-esforço com a viga carregada e neste caso, deve-se considerar aos 80/90% da resistência característica da peça as tensões geradas pelo carregamento, neste caso, as forças aplicadas podem ser superiores a resistência da peça, anulando as cargas impostas.

A Figura 07 apresenta a proposta para aplicação de pré-esforço no compósito, semelhante ao exposto na Figura 06.

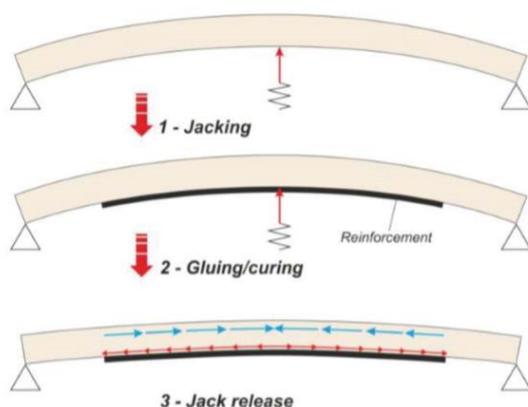


Figura 07 – Aplicação de pré-esforço (SCHOBER et al., 2015).

A Figura 08 ilustra a forma de aplicação do pré-esforço, utilizando macacos hidráulicos no meio do vão, mantém-se a viga deformada, cola-se o laminado à face inferior da viga, e após a cura retira-se os macacos.

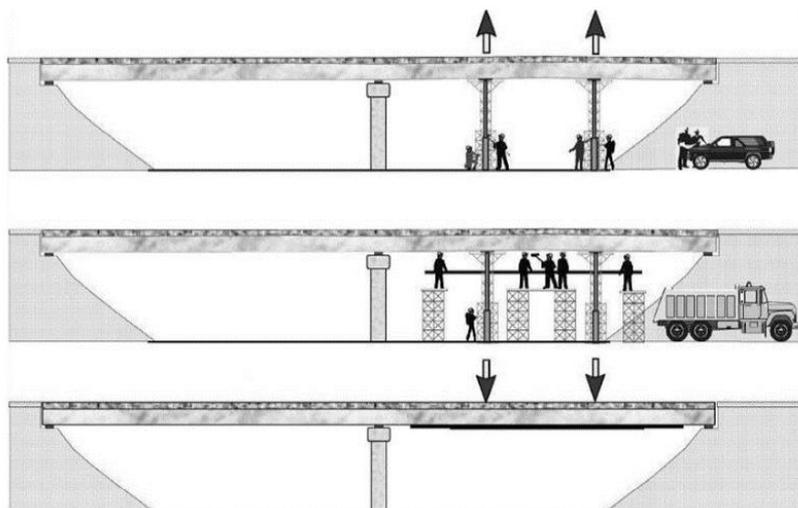


Figura 08 – Aplicação do sistema de pré-esforço (BALSEIRO, 2007).

A madeira é deformada antes da colagem do laminado FRP resolvendo em partes o problema da delaminação, pois o diagrama de momentos introduzido na viga tem forma triangular e o esforço de corte na linha de cola, em situação de serviço, é constante e não muito alto (BALSEIRO, 2007).

### 2.3 PROBLEMAS NO REFORÇO DE VIGAS DE MADEIRA

Podemos encontrar seis falhas que ocasionam efeitos indesejados no reforço de vigas de madeira com CFRP, conforme apresentadas na Figura 09.

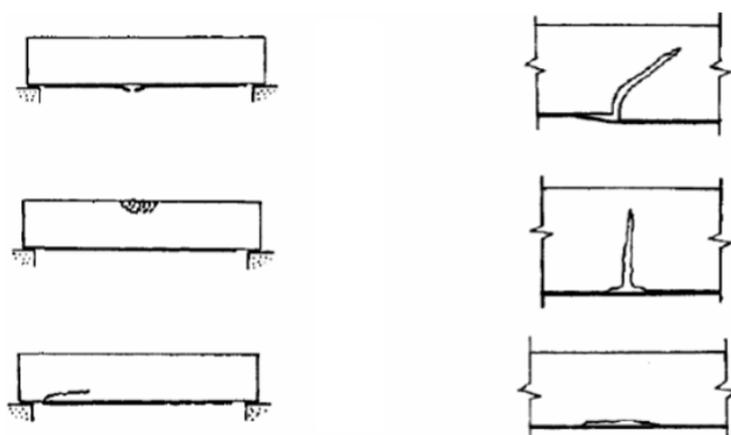


Figura 09 – Tipos de rotura no elemento reforçado ou no próprio reforço (BALSEIRO, 2007, citando, MARTIN et al., 2000).

Sendo elas:

- Rotura pelo FRP (mais rara de acontecer);
- Rotura por compressão da madeira;
- Rotura por corte na madeira na zona de ancoragem do FRP;
- Descolamento do FRP devido a fendas de corte na madeira;
- Descolamento do FRP devido a fendas de flexão;
- Deslocamento do FRP devido a colagem mal efetuada.

Pode-se utilizar sistemas de ancoragem adicionais para diminuir o risco de rotura nas extremidades do reforço. A aplicação de placas de alumínio ou colagem de uma ou mais camadas de fibra em U sobrepostas às extremidades, podem ser utilizadas para que não ocorra o descolamento do CFRP nem a rotura por corte devido as tensões de cisalhamento (GARCEZ, 2007).

A Figura 10, ilustra o reforço para evitar rotura na zona de ancoragem em vigas de betão armado, acredita-se que a técnica também pode ser utilizada em vigas de madeira.

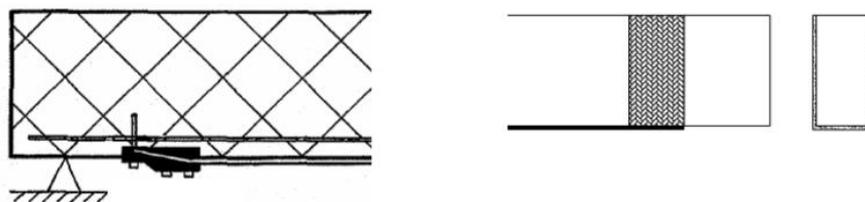


Figura 10 – Possibilidades de tratamento das extremidades do laminado de reforço (GARCEZ, 2007).

Uma nova técnica denominada de EBRA (Externally Bonded Reinforcement Anchorage) pode melhorar o comportamento do CFRP no reforço da madeira, eliminando roturas prematuras presentes na técnica EBR, consiste em ancorar os cantos do CFRP, de forma a obter o rendimento máximo do reforço. Para a ancoragem do CFRP é necessário perfurar a viga, fazendo um furo inclinado longe da zona tracionada (centro da viga), para a ancoragem no furo utiliza-se a mesma resina que é utilizada no restante da viga. A Figura 11 apresenta a técnica EBRA.

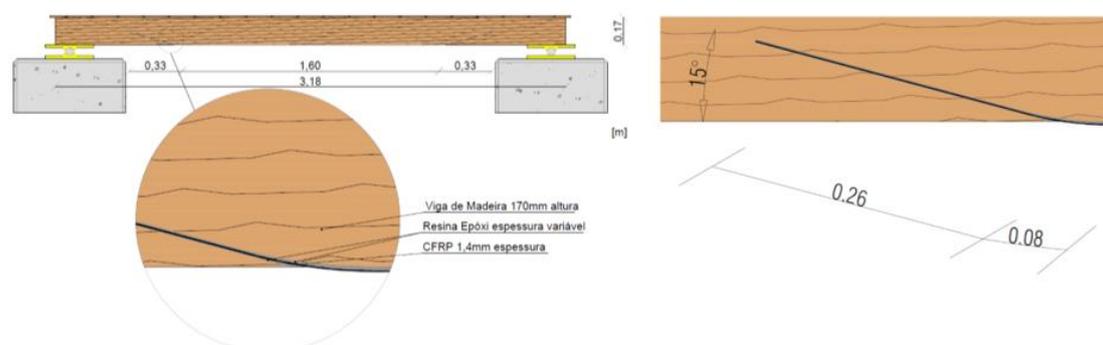


Figura 11 – Técnica EBRA (CRUZ, 2015).

## 2.4 UTILIZAÇÃO DO MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES

Há necessidade da realização de manutenções em estruturas de madeira, com a finalidade de prolongar sua vida útil. Fatores como apodrecimento, erros humanos no dimensionamento dos projetos, construção e escolha dos materiais e cargas acidentais, bem como a mudança de utilização de uma edificação, podem comprometer a estabilidade e a capacidade de suporte de cargas da estrutura. (CARNEIRO, 2004).

Além do reforço à flexão de vigas de madeira conforme estudo aqui proposto, o compósito pode ser utilizado em casos de deterioração (podridão) da madeira nos pontos de apoio, segue-se com a remoção da porção deteriorada da madeira, geralmente terminando em um corte inclinado. Uma nova peça de madeira é moldada para substituir a seção deteriorada, através da preparação de orifícios externos, preenchimento com adesivo e elementos de reforço entre a madeira original e a recém introduzida. A última etapa é a inserção de uma lâmina de madeira, para ocultar os sulcos, seguido da remoção dos suportes de viga após a completa cura do adesivo (SCHOBBER et al., 2015), ver Figura 12.



Figura 12 – Aplicação de CFRP em viga deteriorada (SCHOBBER et al., 2015).

A Figura 13 apresenta outra proposta para a utilização do CFRP no canto do entalhe de vigas, logo após o apoio, para reforço da peça aumentando a resistência ao corte nestes pontos.

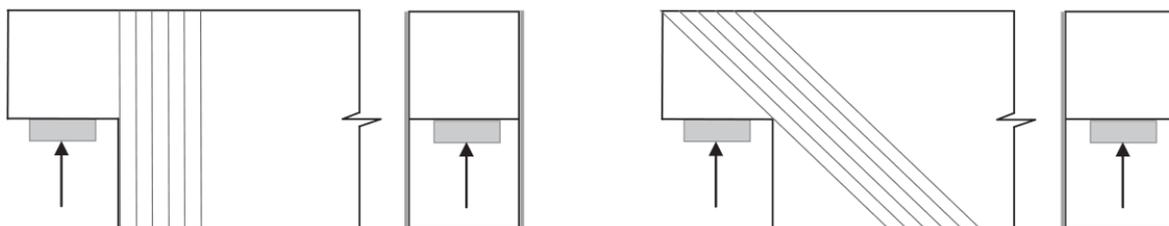


Figura 13 – Reforço de CFRP em vigas entalhadas (SCHOBBER et al., 2015)

## 2.5 RESISTÊNCIA AO FOGO

A utilização dos compósitos de CFRP no reforço de estruturas exige uma proteção ao fogo eficaz das fibras. Para tal, pode-se utilizar laminados com cartões de gesso ou painéis de sílica, aplicando-se estes materiais em tetos falsos suspensos pelas lajes (JUVANDES, 1999).

Quando o material é submetido a temperaturas elevadas, a força e rigidez são reduzidas devido à perda de integridade mecânica da matriz de polímeros. Os adesivos epoxídicos utilizados na ligação, têm temperaturas de transição vítrea inferiores a 100°C. A fim impedir uma situação de colapso da estrutura, as propriedades de isolamento da madeira podem ser usadas para proteger o reforço através de uma camada de madeira adequada sobre o CFRP (SCHOBBER et al., 2015).

Os polímeros utilizados como matrizes do CFRP são combustíveis, podendo liberar grandes quantidades de fumaça muitas vezes tóxicas. A utilização de sistemas de isolamento, coberturas intumescentes, aditivos aplicados na matriz ou, ainda, a utilização de lâminas de madeira coladas na extremidade reforçada, podem contribuir na proteção do material contra incêndios (GARCEZ, 2007).

A estrutura reforçada é dimensionada para suportar a combinações habituais de ações permanentes e variáveis. No entanto, dado o comportamento ao fogo deste tipo de material, recomenda-se que o reforço das estruturas não exceda em mais de 50% a resistência dos elementos estruturais originais, de modo a evitar o colapso da estrutura sem aviso prévio durante um incêndio (JUVANDES, 1999).

## 2.6 SUSTENTABILIDADE DO MATERIAL

Em 2015 cerca de 18.000 toneladas de resíduos de fibra de carbono foram produzidas no mundo todo, dos quais apenas cerca de 1.600 toneladas foram recicladas. Fibras de carbono recicladas podem ser adquiridas por metade do preço de fibras virgens, têm potencial de aquecimento global significativamente menor e demonstram as mesmas propriedades mecânicas (BAKEWELL, 2016).

Uma pesquisa mostrou que a fibra reciclada pode substituir a fibra nova, oferecendo economia significativa nos custos de produção e na eliminação de dióxido de carbono para a produção. A reciclagem de fibra de carbono pode ser feita com aproximadamente 70% do custo e gastando menos de 5% da eletricidade se comparada com a fabricação da fibra de carbono nova (CARBERRY, 2008).

A pirólise, que como se referiu é um dos processos de produção destes materiais, pode ser usada para reciclar fibras de carbono impregnadas. No Reino Unido, a ELG separa e raspa o CFRP, que após este tratamento é aquecido a 400-600°C em uma atmosfera inerte para queimar a resina (BAKEWELL, 2016).

Alguns defeitos podem ser encontrados em fibras de carbono recicladas que não afetam de forma significativa a sua resistência mecânica, como defeitos pontuais e traços de carbonização, conforme ilustrado na Figura 14.

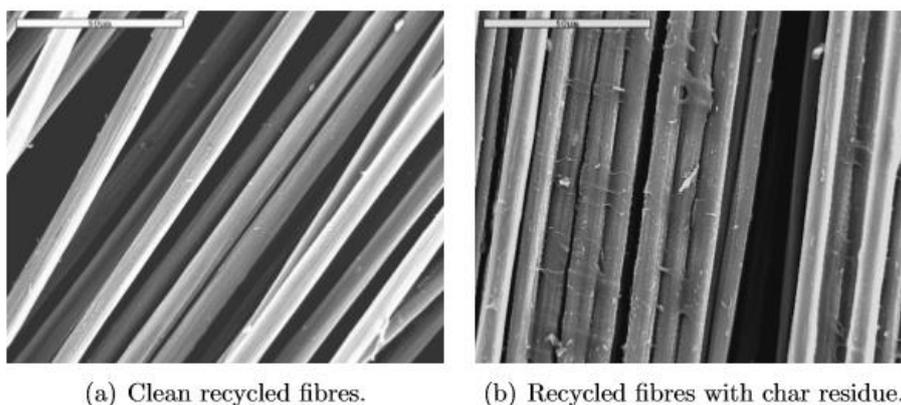


Figura 14 – Defeitos na superfície de fibras recicladas (PIMENTA e PINHO, 2011).

Pesquisadores do Instituto de Tecnologia da Geórgia, nos Estados Unidos, descobriram que epóxis à base de vitrímer podem ser dissolvidos em etilenoglicol a temperaturas elevadas. Este tratamento altera a estrutura da resina num tecido sem afetar a integridade das fibras, uma vez

dissolvida a resina, a fibra de carbono não danificada pode ser reutilizada enquanto o etilenoglicol pode ser evaporado e o epóxi reformado (BAKEWELL, 2016).

A Tabela 05 apresenta algumas vantagens e desvantagens de fibras de carbono recicladas.

Tabela 05 – Análise de diferentes processos de reciclagem (PIMENTA e PINHO, 2011).

	Tipo de Reciclagem		
	Pirólise	Leito Fluidizado	Reciclagem Química
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manutenção das propriedades mecânicas</li> <li>- Potencial para recuperar a matéria-prima da resina</li> <li>- Sem uso de solventes químicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tolerância à contaminação</li> <li>- Sem a presença de resíduo de carbonização na superfície das fibras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retenção das propriedades mecânicas e comprimento das fibras</li> </ul>
<b>Desvantagem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possível deposição de resíduo de carbonização na superfície da fibra</li> <li>- Sensibilidade das propriedades das fibras recicladas para os parâmetros de processamento</li> <li>- Gases tóxicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Degradação da resistência mecânica entre 25% e 50%</li> <li>- Degradação do comprimento da fibra</li> <li>- Estrutura não uniforme da fibra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adesão à resina polimérica reduzida</li> <li>- De todos os métodos baixa reprodução em grande escala</li> <li>- Gera impacto ambiental caso solventes sejam usados</li> </ul>

A bibliografia existente é carente de informações sobre o uso de fibras de carbono recicladas em obras civis. Se realmente não houver mudanças significativas nas propriedades mecânicas do material, sua utilização pode reduzir em grande escala (cerca de 30%) o custo do material e consequentemente o custo para execução do reforço. Porém, ainda é um mercado que deve ser estudado nos próximos anos, necessitando de testes (ensaios) com aplicações do material reciclado.

Visto que o custo do material é uma das principais barreiras para a sua utilização no mercado da construção civil e que o potencial da resistência mecânica do CFRP normalmente não é aproveitado, seria interessante a utilização do material reciclado no reforço de elementos estruturais em caso de viabilidade.

## **CAPÍTULO 3 - DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA**

Para identificar o tipo de madeira do elemento a reforçar, quando não houver outra informação, deve-se analisar a cor, a largura dos veios de verão e de inverno, a dureza superficial, as diferenças entre o borne e o cerne, podendo eventualmente efetuar-se a extração de uma amostra para avaliação laboratorial (CARDOSO, 2010).

Para o presente trabalho, considerou-se a utilização de vigas de Pinho Bravo, madeira muito utilizada na construção civil em Portugal.

O Pinho Bravo, da família das resinosas, é encontrado em todo o território de Portugal. Apresenta como principais inconvenientes o elevado número de nós, a elevada massa volúmica e a rigidez reduzida. Como vantagens o facto de ser económica e muito macia (CRUZ, 2015).

As vigas rectangulares usadas como elementos estruturais de pavimentos utilizadas a partir do século XX, possuem larguras entre 7 cm e 12 cm e alturas entre 18 e 25 cm, apresentando comprimento de 4,0 a 7,0 m e espaçamentos de face a face superiores a 50 cm (CARDOSO, 2010).

Para CRUZ (2015), os pavimentos são compostos por vigas de madeira distanciadas de 30 cm a 60 cm e apoiadas nas paredes. A seção das vigas varia em função do vão e das cargas a suportar.

Desta forma, o conjunto estrutural da laje será elaborado conforme as dimensões referidas nas duas publicações anteriores, adotando-se uma laje de 6,1x4,0 m, onde as vigas terão largura de 10 cm, altura de 20 cm, comprimento de 4,0 m e espaçamento de face a face de 50 cm.

### **3.1 AÇÕES PERMANENTES**

#### **3.1.1 Elementos Estruturais**

O peso próprio linear da viga, é dado por unidade de comprimento, seguindo a expressão (1), em que  $\gamma$  é o peso volúmico da madeira e  $A$  é a área da seção da viga:

$$P.P = \gamma \times A \quad (1)$$

Conforme a EN 338:2009, temos a Tabela 06, que informa as características das diferentes classes de madeiras, em que C designa as Resinosas (Coniferous) e D as Folhosas (Deciduous).

Tabela 06 - Classes de força e valores característicos da madeira (EN 338, 2009).

		Softwood species													Hardwood species						
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<b>Strength properties (in N/mm<sup>2</sup>)</b>																					
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tension parallel	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tension perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression parallel	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compression perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Shear	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
<b>Stiffness properties (in kN/mm<sup>2</sup>)</b>																					
Mean modulus of elasticity parallel	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
5 % modulus of elasticity parallel	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Mean shear modulus	$G_{mean}$	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
<b>Density (in kg/m<sup>3</sup>)</b>																					
Density	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	550	620	700	900
Mean density	$\rho_{mean}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
NOTE 1 Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, 5 % modulus of elasticity, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus, have been calculated using the equations given in Annex A. NOTE 2 The tabulated properties are compatible with timber at a moisture content consistent with a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 %. NOTE 3 Timber conforming to classes C45 and C50 may not be readily available. NOTE 4 Characteristic values for shear strength are given for timber without fissures, according to EN 408. The effect of fissures should be covered in design codes.																					

O Pinho Bravo sem deterioração pertence a classe C18, com densidade média  $\rho_{mean} = 380 \text{ kg/m}^3$ , o que corresponde a um peso volúmico de  $\gamma = 3,73 \text{ kN/m}^3$ .

Ora, como a seção da viga, tem área  $A = b \times h = 0,1 \times 0,2 = 0,02 \text{ m}^2$ , vem para o peso linear, ou seja, por unidade de comprimento,  $P.P = 3,73 \times 0,02 = 0,075 \text{ kN/m}$ .

### 3.1.2 Piso

Para o peso próprio do piso sobre as vigas, foi considerado que seria composto por uma camada de soalho em madeira, isolamento acústico e seriam consideradas paredes divisórias.

Para o isolamento acústico e térmico, utilizou-se um material da Mundiperfil, com ficha técnica de onde foi retirada a informação que consta da Tabela 07. Buscando um bom isolamento, optou-se por utilizar chapas de 75 mm de espessura, com peso de  $0,16 \text{ kN/m}^2$ .

Tabela 07 - Características de painel de isolamento (Mundiperfil, 2018).

PESO DO PAINEL, ISOLAMENTO TÉRMICO E ACÚSTICO POR ESPESSURA						
ESPESSURA NOMINAL	PESO kg/m <sup>2</sup> 0,5/0,5	ISOLAMENTO TÉRMICO		RESISTENCIA FOGO		TRANSMISSÃO ACÚSTICA
		W/m <sup>2</sup> K	Kcal/m <sup>2</sup> h <sup>o</sup> C	EI (minutos)	E (minutos)	RW (db)
40	12,54	0,54	0,46	30	90	-
50	13,54	0,41	0,37	45	180	30
75	16,04	0,34	0,3	90	180	31
100	18,54	0,3	0,25	180	240	39

Para efeitos de cálculo, adotou-se um peso total por unidade de superfície para o revestimento de 1,6 kN/m<sup>2</sup>, justificando pesos de elementos não explicitados. Portanto, a carga permanente total da laje por unidade de superfície vale:

$$g_k = 0,16 + 1,60 = 1,76 \text{ kN/m}^2$$

Considerando vigas com base de 10 cm e espaçadas de 50 cm (entre faces), teremos uma faixa de influência de 60 cm, ou seja:

$$g_k = 1,76 \times 0,60 + 0,075 = 1,13 \text{ kN/m}$$

## 3.2 AÇÕES VARIÁVEIS

### 3.2.1 Sobrecargas de utilização

A edificação foi considerada inicialmente como residencial, correspondendo à Categoria A do Eurocódigo 1 (EN 1991-1-1:2009) – Atividades domésticas e residenciais, ver Tabela 08.

Tabela 08 - Sobrecargas em pavimentos, escadas e varandas de edifícios (NP EN 1991-1-1/2009).

<i>Categorias de zonas carregadas</i>	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]
<b>Pavimentos</b>		
<i>Categoria A</i>	2,0	2,0
<i>Categoria B</i>	3,0	4,0
<i>Categoria C</i>		
<i>C1</i>	3,0	4,0
<i>C2</i>	4,0	4,0
<i>C3</i>	5,0	4,0
<i>C4</i>	5,0	7,0
<i>C5</i>	6,0	4,5
<i>Categoria D</i>		
<i>D1</i>	4,0	4,0
<i>D2</i>	5,0	6,0
<i>Varandas</i>	<i>Ver a Nota 1</i>	<i>Ver a Nota 3</i>
<i>Escadas</i>	<i>Ver a Nota 2</i>	<i>Ver a Nota 3</i>
<i>NOTA 1: Deve adoptar-se uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 5,0 kN/m<sup>2</sup> numa faixa de 1 m de largura adjacente ao parapeito.</i>		
<i>NOTA 2: Deve adoptar-se uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 3,0 kN/m<sup>2</sup>.</i>		
<i>NOTA 3: Deve adoptar-se uma sobrecarga concentrada idêntica à do pavimento adjacente.</i>		

Desta forma, a sobrecarga empregada na estrutura será de 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

Considerando a área de influência de cada viga, teremos:

$$q_k = 2,0 \times 0,6 = 1,2 \text{ kN/m}$$

### 3.3 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

As expressões para as combinações de ações são definidas no Eurocódigo 0 (NP EN 1990:2009). Para os estados limites últimos esta norma apresenta a seguinte expressão para as combinações fundamentais, ou seja, relativas às situações de projeto persistentes ou transitórias:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Para os estados limites de utilização, mais particularmente, para as combinações quase-permanentes, usualmente aplicadas para verificar efeitos a longo prazo ou que se refiram ao aspeto da estrutura, a expressão apresentada é:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Nestas expressões G, Q e P, representam o valor das ações permanentes, variáveis e pré-esforço, respetivamente,  $\gamma$  são os coeficientes parciais de segurança e  $\psi$  são os coeficientes de combinação. Os valores destes coeficientes são definidos nas Tabelas 09 e 10.

Tabela 09 – Valores dos coeficientes de combinação (Quadro A1.1 da NP EN 1990:2009).

Ação	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN < peso dos veículos $\leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Ação da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) <sup>*)</sup>			
– Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Ação do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

*NOTA:* Os valores de  $\psi$  poderão ser definidos no Anexo Nacional.  
<sup>\*)</sup> Para os países não mencionados, considerar as condições locais relevantes.

Tabela 10 - Valores recomendados para coeficientes de segurança (Quadro NA A1.2(B) da Norma EN 1990:2009).

Situações de projecto persistentes e transitórias	Acções permanentes		Pré-esforço	Acção variável de base da combinação <sup>*)</sup>	Acções variáveis acompanhantes <sup>*)</sup>
	Desfavoráveis	Favoráveis			
(Expressão 6.10)	$\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$	$\gamma_P P$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

<sup>\*)</sup> As acções variáveis são as consideradas no Quadro A1.1.

**NOTA 1:** As combinações de acções indicadas nas expressões (6.10a) e (6.10b) não devem ser utilizadas.

**NOTA 2:** Os valores de  $\gamma_F$  que devem ser adoptados são os seguintes:  
 $\gamma_{Gj,sup} = 1,35$   
 $\gamma_{Gj,inf} = 1,00$   
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$  nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)  
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$  nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)  
 $\gamma_F$  - os valores deste coeficiente constam dos Eurocódigos aplicáveis.  
 Para os valores de  $\gamma$  a utilizar para as deformações impostas, ver os Eurocódigos aplicáveis.

**NOTA 3:** Os valores característicos de todas as acções permanentes com a mesma origem são multiplicados por  $\gamma_{Gj,sup}$ , caso o efeito total das acções resultante seja desfavorável, e por  $\gamma_{Gj,inf}$ , caso o efeito total das acções resultante seja favorável. Por exemplo, todas as acções devidas ao peso próprio da estrutura podem ser consideradas como sendo da mesma origem; tal também se aplica se estiverem envolvidos diferentes materiais.

**NOTA 4:** Para determinadas verificações, os valores de  $\gamma_G$  e de  $\gamma_Q$  podem ser subdivididos em  $\gamma_g$  e  $\gamma_q$  e no coeficiente de incerteza do modelo  $\gamma_{Sa}$ . Na maioria dos casos correntes, pode utilizar-se um valor de  $\gamma_{Sa}$  variando entre 1,05 e 1,15.

Conforme dados apresentados nas Tabelas 09 e 10, temos como pior situação a seguinte combinação:

$$Y_{G,j \text{ sup}} = 1,35 \rightarrow 1,35 (G_k + P. P)$$

$$Y_{Q,i} = 1,50 \rightarrow 1,50 Q_k$$

Logo, substituindo os valores das ações permanentes e variáveis:

$$\text{Carga Total} = 1,35G_k + 1,50Q_k$$

$$\text{Carga Total} = 1,35 \times 1,13 + 1,50 \times 1,2 = 3,33 \text{ kN/m}$$

## CAPÍTULO 4 - VERIFICAÇÕES DA VIGA DE MADEIRA

Ligações de resina-madeira não ocorreram como o desejado em locais onde a madeira apresenta teores de água (ou umidade) elevados (iguais ou superiores a 20%) e/ou locais onde haja variação do teor de água da madeira, fator que acaba provocando o inchamento e a retração afetando a adesão do laminado. A quantidade de água existente na madeira reduz o volume de cola absorvida pela mesma, impedindo a ligação entre os dois materiais. Portanto, o reforço com laminados CFRP deve ser efetuado em ambiente seco (BALSEIRO, 2007), e mais do que isso, os elementos reforçados devem ser mantidos relativamente secos.

Pode-se utilizar um humidímetro de agulhas para efetuar a leitura instantânea da umidade nos elementos de madeira e verificar se o reforço com CFRP é indicado para estes elementos estruturais.

Para melhor compreender a análise do local, podemos utilizar as Tabelas 11 e 12, que relacionam a classe de risco com a classe de serviço.

Tabela 11 - Classes de risco (EN 335: 2012)

CLASSE DE RISCO	SITUAÇÃO GERAL DE SERVIÇO	EXPOSIÇÃO À HUMIDADE	OCORRÊNCIA DE AGENTES BIOLÓGICOS				
			Fungos lenhíveros (destruidores da madeira)		Fungos cromogénicos (4)	Insectos	
			Basidio-micetas	Podridão mole	Azulado	Escaravelhos (1)	Térmitas
<b>1</b>	Sem contacto com o solo, sob coberto (seco)	Nenhuma (2)	-	-	-	U	L
<b>2</b>	Sem contacto com o solo, sob coberto (risco de humedificação)	Aumento ocasional (3)	U	-	U	U	L
<b>3</b>	Sem contacto com o solo, não coberto (condições exteriores).	Frequente	U	-	U	U	L
<b>4</b>	Em contacto com o solo, ou água doce	Permanente	U	U	U	U	L
<b>5</b>	Em água salgada	Permanente	U	U	U	U	L

Tabela 12 – Relação entre a classe de serviço e a classe de uso (NEGRÃO, 2018).

Classe de serviço do EC5-1-1	Possível correspondência com as classe de uso da EN 335
1	Classe de uso 1
2	Classe de uso 1. Usar a classe 2 se o elemento está sujeito a humedificação ocasional causada, por exemplo, por condensação.
3	Classe de uso 2. Usar a classe 3 ou superior em aplicações exteriores.

Conforme a EN 1995-1-1 – EC5, item 2.3.1.3, temos:

- Classe de serviço 1: Refere-se a um teor de água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a uma umidade relativa do ar ambiente superior a 65% apenas durante algumas semanas por ano;
- Classe de serviço 2: Refere-se a um teor de água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a uma umidade relativa do ar ambiente superior a 85% apenas durante a algumas semanas por ano;
- Classe de serviço 3: Refere-se a condições climáticas que conduzem a valores do teor em água dos materiais superiores aos da classe de serviço 2.

Considerando a avaliação de BALSEIRO (2007), optou-se pela utilização de vigas de madeira em condições ambientais que correspondem à classe de serviço 1.

Assim, como já mencionado acima, o trabalho consiste na adoção de um modelo teórico, tendo como objetivo apresentar os métodos de cálculos estruturais, os resultados para uma viga de madeira e cuidados necessários para obter bons resultados no reforço. Desta forma, utilizou-se um modelo conforme apresentado na Figura 15.

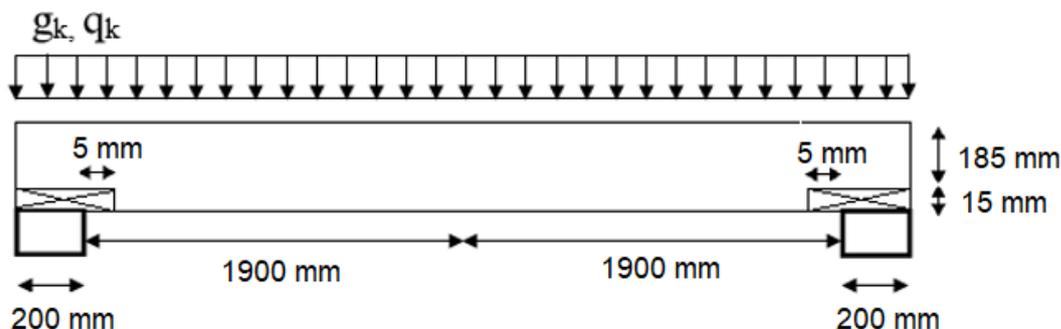


Figura 15 - Diagrama de medidas e cargas da viga de projeto.

#### 4.1 NORMAS BRASILEIRAS PARA CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

Para efeito de comparação com as Normas europeias existentes, realizou-se uma breve análise das Normas brasileiras para dimensionamento de estruturas de madeira.

A Norma ABNT-NBR 7190 (1997) – Projeto de Estruturas de Madeira, informa que para a verificação das propriedades da madeira, deve-se analisar a estrutura anatômica do elemento, distinguindo-se entre coníferas e dicotiledôneas, conforme classes de resistência apresentadas nas Tabelas 13 e 14, retiradas do Item 6.3.5 da Norma.

Tabela 13 – Classe de resistência das coníferas (ABNT-NBR 7190/1997).

Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U = 12%)					
Classes	$f_{c0k}$ MPa	$f_{vk}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	<sup>1)</sup> $\rho_{bas,m}$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{aparente}$ kg/m <sup>3</sup>
C 20	20	4	3 500	400	500
C 25	25	5	8 500	450	550
C 30	30	6	14 500	500	600

<sup>1)</sup> Como definida em 6.1.2.

Tabela 14 – Classe de resistência das dicotiledôneas (ABNT-NBR 7190/1997).

Dicotiledôneas (Valores na condição-padrão de referência U = 12%)					
Classes	$f_{c0k}$ MPa	$f_{vk}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	<sup>1)</sup> $\rho_{bas,m}$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{aparente}$ kg/m <sup>3</sup>
C 20	20	4	9 500	500	650
C 30	30	5	14 500	650	800
C 40	40	6	19 500	750	950
C 60	60	8	24 500	800	1 000

<sup>1)</sup> Como definida em 6.1.2.

O item 6.1.2 define-se como o termo prático “densidade básica” da madeira como sendo a massa específica convencional obtida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado. A massa seca é determinada mantendo-se os corpos de-prova em estufa a 103°C até que a massa

do corpo de-prova permaneça constante. O volume saturado é determinado em corpos-de-prova submersos em água até atingirem peso constante.

Para as combinações, temos no item 5.5.2. os fatores de combinações apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17.

Tabela 15 – Fatores de combinação e de utilização (ABNT-NBR 7190/1997).

Ações em estruturas correntes	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
- Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
- Pressão dinâmica do vento	0,5	0,2	0
Cargas acidentais dos edifícios	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
- Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos fixos, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,4	0,3	0,2
- Locais onde há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,7	0,6	0,4
- Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
- Pontes de pedestres	0,4	0,3	0,2 <sup>1)</sup>
- Pontes rodoviárias	0,6	0,4	0,2 <sup>1)</sup>
- Pontes ferroviárias (ferrovias não especializadas)	0,8	0,6	0,4 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Admite-se  $\psi_2 = 0$  quando a ação variável principal corresponde a um efeito sísmico.

Tabela 16 – Coeficientes parciais de segurança para ações permanentes de pequena variabilidade (ABNT-NBR 7190/1997).

Combinações	Para efeitos <sup>1)</sup>	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	$\gamma_g = 1,3$	$\gamma_g = 1,0$
Especiais ou de construção	$\gamma_g = 1,2$	$\gamma_g = 1,0$
Excepcionais	$\gamma_g = 1,1$	$\gamma_g = 1,0$

<sup>1)</sup> Podem ser usados indiferentemente os símbolos  $\gamma_g$  ou  $\gamma_G$ .

Tabela 17 – Coeficientes parciais de segurança para ações variáveis (ABNT-NBR 7190/1997).

Combinações	Ações variáveis em geral, incluídas as cargas acidentais móveis	Efeitos da temperatura
Normais	$\gamma_Q = 1,4$	$\gamma_E = 1,2$
Especiais ou de construção	$\gamma_Q = 1,2$	$\gamma_E = 1,0$
Excepcionais	$\gamma_Q = 1,0$	$\gamma_E = 0$

Nota-se que existem algumas diferenças nas classes de resistência da madeira e nos valores dos coeficientes comparados com as Normas europeias, porém, não são significativamente expressivos.

Assim como o Eurocódigo 5 (EC5), os projetos de estruturas de madeira devem ser avaliados conforme uma classe de umidade.

As classes de umidade ajustam as propriedades de resistência e rigidez da madeira em função das condições ambientais onde as estruturas serão executadas. Os resultados com teores variados de umidade devem ser corrigidos para o valor padrão contido no item 6.1.5 da NBR 7190, e apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Classes de umidade (ABNT-NBR 7190/1997).

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente $U_{amb}$	Umidade de equilíbrio da madeira $U_{eq}$
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

A classe 1 de umidade constitui a condição-padrão de referência, definida pelo teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%, resultados de ensaios realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo entre 10% e 20%.

A resistência deve ser corrigida pela expressão

$$f_{12} = f_{u\%} \left[ 1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right]$$

e a rigidez por:

$$E_{12} = E_{u\%} \left[ 1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right]$$

Admitindo-se que a resistência e a rigidez da madeira sofram apenas pequenas variações para umidades acima de 20%.

A Norma NBR 7190 considera como desprezível a influência da temperatura na faixa usual de utilização de 10°C a 60°C.

As cargas permanentes e variáveis (sobrecargas) para realização dos cálculos estruturais, são retiradas da Norma ABNT NBR 6120 (1980) – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. A tabela 19 apresenta um corte retirado da Norma, onde retira-se o valor mínimo para a carga vertical acidental em edifícios residenciais.

Tabela 19 – Valores mínimos de cargas verticais – sobrecargas (ABNT-NBR 6120/1980).

11 Edifícios residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro Despensa, área de serviço e lavanderia	1,5 2
12 Escadas	Com acesso ao público (ver 2.2.1.7) Sem acesso ao público	3 2,5
13 Escolas	Anfiteatro com assentos fixos Corredor e sala de aula Outras salas	3 2

Avaliando as condições gerais, não se observam diferenças consideráveis entre as Normas europeias e brasileiras nas considerações iniciais para efeito dos cálculos.

## 4.2 CÁLCULO DAS CARGAS APLICADAS À VIGA DE MADEIRA

### 4.2.1 Força vertical no apoio e momento no meio do vão

Considerando cargas distribuídas ao longo de toda a viga, conclui-se que as forças cortantes máximas ocorrem nos apoios e que o momento máximo ocorre no meio do vão. Desta forma, seguiu-se com a análise das forças através das seguintes expressões:

$$V_{ed} = (g_k + q_k) \times \frac{l}{2} = 3,33 \times \frac{4,0}{2} = 6,66 \text{ kN} \quad (2)$$

$$M_{ed} = (g_k + q_k) \times \frac{l^2}{8} = 3,33 \times \frac{4,0^2}{8} = 6,66 \text{ kNm} \quad (3)$$

### 4.3 VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS E DE SERVIÇO

Por não ser o objetivo do presente trabalho, não foram realizadas as comparações das fórmulas e verificações presentes na ABNT NBR 7190 (1997) e no Eurocódigo 5. Desta forma, o trabalho se deu apenas pela avaliação da estrutura através da Norma Europeia.

#### 4.3.1 Verificação da resistência à compressão perpendicular ao fio

A Figura 16, apresenta o local onde ocorre a compressão perpendicular ao fio.

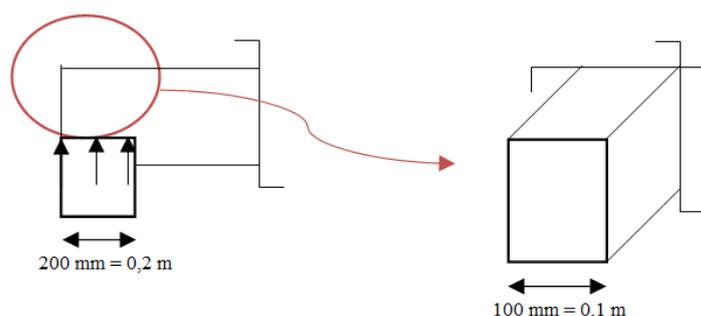


Figura 16 – Área de contato com o pilar ( $A_{ef}$ ).

O item 6.1.5 do EC5, apresenta a condição a satisfazer pela tensão de compressão perpendicular ao fio:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \quad (4)$$

Em que o valor da tensão resistente de compressão ao fio é dado por:

$$f_{c,90,d} = k_{mod} \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (5)$$

Conforme o EC5, através de consulta da tabela 2.3 do item 2.4.1 e tabela 3.1 do item 3.2, foi possível identificar os valores para as condições de serviço e material empregado neste estudo:

- $f_{c,90,k} = 2,2 \text{ N/mm}^2 = 2200 \text{ kN/m}^2$  (EN 338);
- $k_{\text{mod}} = 0,80$  (EC5 – Tabela 3.1) (Madeira maciça/Classe 1 com média duração);
- $\gamma_M = 1,3$  (EC5 – Tabela 2.3) (Madeira maciça).

Aplicando estes valores na expressão (5), temos:

$$f_{c,90,d} = 0,80 \times \frac{2200}{1,3} = 1354 \text{ kN/m}^2$$

Para a determinação de  $k_{c,90}$ , coeficiente que relaciona a variação de resistência com a geometria e extensão carregada da viga, o EC5 apresenta a Figura 17.

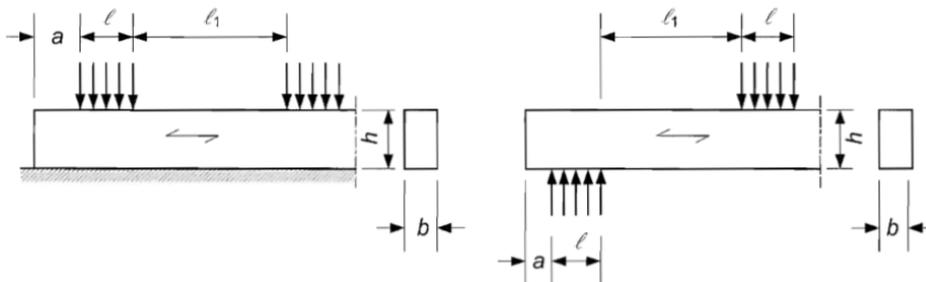


Figura 17 – Diagrama da viga nos apoios (EN 1995-1-1 – EC5).

Conforme a Norma, a área de contato efetiva perpendicular ao apoio, deve ser determinada tendo em conta o comprimento de contato efetivo paralelo ao apoio, o comprimento de contato real,  $\ell$  (comprimento carregado) e  $\ell_1$  (distância entre as zonas de carregamento).

Se  $\ell_1 < 2h$ ,  $k_{c,90} = 1,00$ . Se  $\ell_1 \geq 2h$ :

- Para membros sobre suporte (apoiio) contínuo:
  - $k_{c,90} = 1,25$  para madeira maciça;
  - $k_{c,90} = 1,50$  para madeira laminada colada.
- Para os membros sobre suportes discretos:
  - $k_{c,90} = 1,50$  para madeira maciça;
  - $k_{c,90} = 1,75$  para madeira laminada colada com  $\ell \leq 400\text{mm}$ .

Como o carregamento está distribuído em todo o vão da peça, temos que  $\ell_1 < 2h$ , vindo:

$$k_{c,90} = 1,0.$$

Logo, teremos os seguintes valores:

$$A_{ef} = 0,2 \times 0,1 = 0,02 \text{ m}^2$$

$$F_{c,90,d} = V_{ed} = 6,66 \text{ kN}$$

Aplicando na fórmula (4):

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{6,66}{0,02} = 333 \text{ kN/m}^2 \leq 1,0 \times 1354 = 1354 \text{ kN/m}^2 \quad \text{OK!}$$

Sendo assim, verificamos que a viga atende a Norma em relação à compressão perpendicular ao fio.

#### 4.3.2 Verificação da resistência à flexão

A verificação de segurança é dada pela limitação da máxima tensão actuante de flexão à tensão resistente à flexão:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (6)$$

Para a avaliação da tensão resistente à flexão, deve-se considerar um coeficiente parcial de segurança ( $\gamma_M$ ) e um coeficiente de modificação da resistência ( $k_{mod}$ ), retirados da EC5 e já informados neste trabalho:

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (7)$$

Dado:

$$- f_{m,k} = 18,0 \text{ N/mm}^2 = 18000 \text{ kN/m}^2 \text{ (EN 338).}$$

Temos:

$$f_{m,y,d} = 0,80 \times \frac{18000}{1,3} = 11077 \text{ kN/m}^2$$

A máxima tensão actuante de flexão é dimensionada pela expressão:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{ed}}{W_y} \quad (8)$$

Em que o módulo elástico  $W_y$  vale:

$$W_y = \frac{I_y}{h/2} = \frac{b \cdot h^3 / 12}{h/2} = \frac{b \times h^2}{6} = \frac{0,1 \times 0,2^2}{6} = 667 \text{ cm}^3 \quad (9)$$

Aplicando na fórmula (8), temos:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6,66}{6,67 \times 10^{-4}} = 9985 \text{ kN/m}^2$$

Aplicando os valores obtidos para as tensões na fórmula (6), segue:

$$\frac{9985}{11077} = 0,90 < 1 \quad \text{OK!}$$

Verificamos que a viga atende a Norma do EC5 em relação à flexão, estando muito próximo do limite de suporte de cargas.

#### 4.3.3 Verificação da resistência ao corte

Para verificação de segurança da tensão de cisalhamento, temos:

$$\tau_d \leq k_v f_{v,d} \quad (10)$$

Onde temos para a força de cisalhamento na condição real:

$$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (11)$$

Dado:

- $f_{v,k} = 3,4 \text{ N/mm}^2 = 3400 \text{ kN/m}^2$  (EN 338).

Logo, substituindo os valores fornecidos:

$$f_{v,d} = 0,80 \times \frac{3400}{1,3} = 2092 \text{ kN/m}^2$$

Utiliza-se o EC5, item 6.5.2, para verificação do  $k_v$ :

$$k_v = \min \left[ 1; \frac{k_n(\sqrt{h} + 1,1i^{1,5})}{h \cdot \sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,80x\sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}} \right] \quad (12)$$

No mesmo item 6.5.2, retira-se o valor para o  $k_n$  da fórmula (12).

Para verificação de  $\alpha$ , deve-se considerar a relação entre a altura da viga e a altura efetiva da viga no ponto de apoio, o EC5 apresenta a Figura 18.

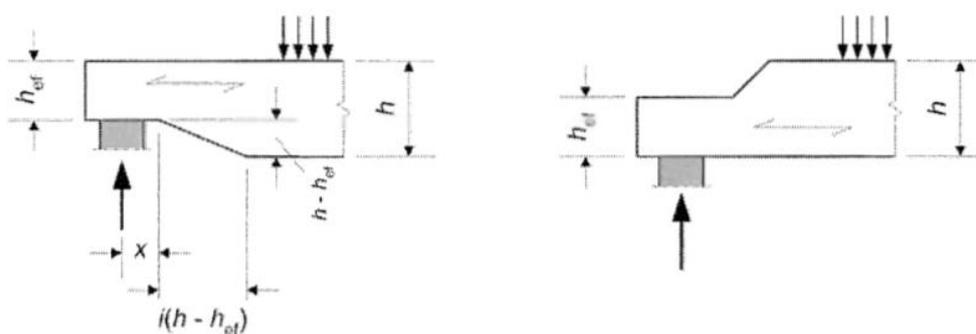


Figura 18 – Diagrama da viga nos apoios (EN 1995-1-1:2004).

Os dados para obter o valor de  $k_v$  são:

- $k_n = 5$  (EC5 – item 6.5.2) (Madeira maciça);
- $\alpha = \frac{h_{ef}}{h} = \frac{185}{200} = 0,925$  mm;
- $x = 205$  mm;
- $i = 0$  (inclinação).

Substituindo os valores, temos:

$$k_v = \min \left[ 1; \frac{5 \times (\sqrt{200} + 0)}{200 \times \sqrt{0,925 \times (1 - 0,925)} + 0,8 \times 205 \times \sqrt{\frac{1}{0,925} - 0,925^2}} \right]$$

$$k_v = \min[1; 0,54] \rightarrow k_v = 0,54$$

Para a tensão de cisalhamento deve ser verificado que:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_{ed}}{b_{ef} \cdot h_{ef}} \quad (13)$$

Dados:

- $k_{cr} = 0,67$  (EC5 – item 6.1.7) (Madeira maciça);
- $b_{ef} = k_{cr}b \rightarrow b_{ef} = 0,67 \cdot 0,1 \rightarrow b_{ef} = 0,067$  m;
- $V_{ed} = 6,66$  kN;
- $h_{ef} = 0,185$  m.

Aplicando os dados na fórmula (13), temos:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{6,66}{0,067 \times 0,185} = 806 \text{ kN/m}^2$$

Aplicando o resultado de  $\tau_d$  na fórmula (10):

$$806 < 0,54 \times 2092 = 1130 \text{ OK!}$$

#### 4.3.4 Verificação das flechas

Relativamente aos estados limites de utilização, não se considerarão as vibrações, por uma questão de tempo, verificando-se apenas as flechas. A figura 19 apresentada no item 7.2 da EN 1995-1-1, representa os parâmetros a considerar na verificação das flechas. Nesta figura surgem as seguintes quantidades:

- $w_c$  = contraflecha no elemento não carregado;
- $w_{inst}$  = deslocamento instantâneo;
- $w_{creep}$  = deslocamento de fluência;
- $w_{fin}$  = deslocamento final;
- $w_{net,fin}$  = deslocamento final líquido, ou seja, medido a partir da corda do elemento.

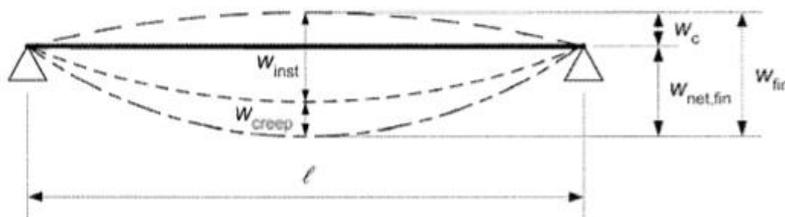


Figura 19 – Componentes da flecha (EN 1995-1-1:2004).

Para o cálculo das deformações, aplica-se a expressão para as combinações frequentes apresentada anteriormente, obtendo-se uma força distribuída de 2,33 kN/m na viga, com resultante  $Q = 2,33 \times 4 = 9,32$  kN.

O deslocamento instantâneo a meio-vão numa viga simplesmente apoiada de vão  $l$ , secção de inércia  $I$ , módulo de elasticidade  $E_{0,m}$ , sujeita a uma carga uniformemente distribuída de resultante  $Q$ , determina-se facilmente pelo método da força unitária (Providência e Andrade, 2018), e efetuando a integração por exemplo pela regra de Simpson, surgindo também em muitas referências, como o EC5 ou PORTEOUS e KERMANI (2013):

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \frac{Q \cdot l^3}{E_{0,m} \cdot I} = \frac{5 \cdot Q \cdot l^3}{32 \cdot E_{0,m} \cdot b \cdot h^3} \quad (14)$$

em que a segunda expressão se aplica à secção retangular  $b \times h$ . Substituindo os valores, temos:

$$w_{inst} = \frac{5 \times 9,32 \times 4^3}{32 \times 9000000 \times 0,1 \times 0,2^3} = 0,0129 \text{ m} = 12,9 \text{ mm}$$

A verificação das deformações deve atender os limites indicados na tabela 20, retirada do item 7.2 da EN 1995-1-1. O deslocamento instantâneo satisfaz o limite indicado nesta tabela.

Tabela 20 – Limites de deslocamentos na viga (EN 1995-1-1:2004)

	$w_{inst}$	$w_{net,fin}$	$w_{fin}$
Beam on two supports	$l/300$ to $l/500$	$l/250$ to $l/350$	$l/150$ to $l/300$
Cantilevering beams	$l/150$ to $l/250$	$l/125$ to $l/175$	$l/75$ to $l/150$

Para obter o deslocamento final, ou seja, a longo prazo, é necessário incluir o efeito da fluência. Neste caso, as cargas permanentes e variáveis são tratadas separadamente, de acordo com as expressões da secção 2.2.3 da EN 1995-1-1:2004, ou de PORTEOUS e KERMANI (2013):

$$w_{fin} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) + w_{inst,Q} \cdot (1 + \Psi_2 \cdot k_{def}) \quad (15)$$

em que:

- $k_{def} = 0,80$  (coeficiente de modificação da deformação definido na tabela 3.2 do EC5);
- $\Psi_2 = 0,30$  (coeficiente de combinação retirado da tabela 09 deste trabalho e presente no EC0).

Logo:

$$w_{fin} = \left( \frac{5 \times 4,52 \times 4^3}{32 \times 9000000 \times 0,1 \times 0,2^3} \times (1 + 0,80) \right) + \left( \frac{5 \times 4,80 \times 4^3}{32 \times 9000000 \times 0,1 \times 0,2^3} \times (1 + (0,30 \times 0,80)) \right) = 0,0195 = 19,5 \text{ mm}$$

O deslocamento final é atendido pela verificação. Porém, se se admitir que na construção original não foi introduzida qualquer contra-flecha, o deslocamento final líquido é igual ao deslocamento final, e o limite de verificação para  $w_{net,fin}$  não é atendido.

Conclui-se, que a viga de madeira resiste as cargas distribuídas aplicadas na peça em relação a compressão perpendicular no fio, flexão, corte e atende as verificações de deformação, exceto o deslocamento final líquido que necessitaria de reforço mesmo sem as alterações propostas pelo trabalho.

## CAPÍTULO 5 - ALTERAÇÃO DA CATEGORIA DO EDIFÍCIO

Conforme informado acima, o trabalho foi desenvolvido com a proposta de alterar o uso do edifício, mudando sua categoria de A para C. Desta forma, nas ações variáveis serão agregadas sobrecargas não previstas no projeto original.

A tipologia adotada para o estudo, seguiu as informações presentes na NP EN 1991-1-1:2009, item 6.3.1.1, Quadro 6.1, onde está descrito cada categoria de edificação.

Optou-se por dimensionar a estrutura para a categoria C1 – Zonas com mesas, etc.; por exemplo, em escolas, cafés, restaurantes, salões de jantar, salas de leitura, recepções.

Na teoria, a edificação deixou de ser utilizada como residência e o local foi transformado em um ambiente comercial (restaurante) com acesso ao público, alterando a sobrecarga para 3,0 KN/m<sup>2</sup>, conforme a Tabela 08, presente neste trabalho.

Portanto, temos para a área de influência a seguinte carga por unidade de comprimento:

$$q_k = 3,0 \times 0,6 = 1,8 \text{ kN/m}$$

obtendo-se para a combinação de ações o novo valor:

$$\text{Carga Total} = 4,23 \text{ kN/m}$$

Utilizando as fórmulas descritas no Capítulo 4, temos os seguintes resultados:

- Verificação da Compressão Perpendicular ao Fio

$$V_{ed} = 8,46 \text{ kN}$$

$$M_{ed} = 8,46 \text{ kN.m}$$

$$f_{c,90,d} = 1354 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{c,90,d} = 423 \text{ kN/m}^2$$

Atende!

- Verificação de Flexão

$$f_{m,y,d} = 11077 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = 12684 \text{ kN/m}^2$$

$$1,15 > 1,0$$

Não atende!

- Verificação de Corte

$$f_{v,d} = 2092 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_d = 1024 \text{ kN/m}^2$$

$$1024 < 1130$$

Atende!

- Deformação

$$w_{inst} = 16,2 \text{ mm Não atende!}$$

$$w_{fin} = 23,7 \text{ mm Atende!}$$

$$w_{net,fin} = 23,7 \text{ mm Não atende!}$$

Conforme análise destes resultados, as vigas não possuem resistência e rigidez suficientes para atender aos esforços causados pela flexão e aos valores da deformação instantânea, mantendo-se obviamente também a necessidade de reforço para o deslocamento final líquido, sendo necessário a troca do material ou o reforço das vigas.

Nota-se que o reforço necessário é inferior a 50% da resistência original, o que satisfaz a recomendação de JUVANDES (1999). Desta forma, estando as vigas secas e num local com humidade reduzida, a aplicação de CFRP é uma opção admissível para o caso de estudo.

## CAPÍTULO 6 - REFORÇO DA VIGA DE MADEIRA COM CFRP

Para o reforço da viga de madeira, optou-se pela utilização de laminados de fibras de carbono S&P CFK 200/2000, conforme características informadas na tabela 21.

Tabela 21 – Laminado utilizado no cálculo de reforço (S&P, 2019).

200/2000 Modulo de elasticidade: 210 kN/mm <sup>2</sup>	[mm <sup>2</sup> ]	Resistência à tracção recomendada para o cálculo: 2200 N/mm <sup>2</sup>
10 / 1.4 *	14	30.8 kN
20 / 1.4 *	28	61.6 kN

### 6.1 MÉTODO DA SEÇÃO TRANSFORMADA

Na análise elástica linear, o Método da Seção Transformada consiste na transformação da seção transversal de uma viga constituída por dois materiais homogéneos em uma seção equivalente idealizada por apenas um material, normalmente um desses dois (SILVA, 2013).

No exemplo da Figura 20, ilustra-se os diferentes materiais que constituem a viga, sendo eles a madeira (1) e o laminado com fibras de carbono (2).

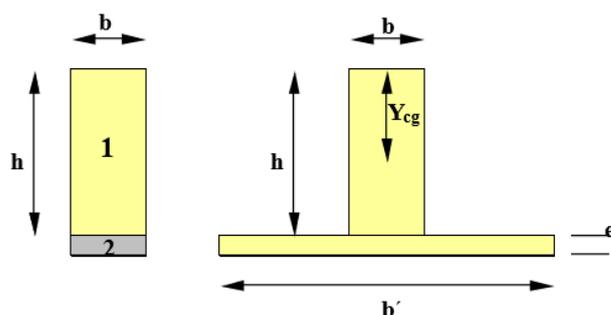


Figura 20 – Seção Transformada (FIORELLI, 2002).

A homogeneização deve ser calculada substituindo-se a área do laminado de fibras de carbono por uma área correspondente de madeira.

Para obter a largura transformada  $b'$  do material 2 necessária para uniformizar a peça, transformando-a numa peça equivalente feita apenas com o material 1, deve-se multiplicar a largura real do material 2 pelo coeficiente de homogeneização  $\eta$ ,

$$\eta = \frac{E_2}{E_1}$$

em que os módulos de elasticidade longitudinal para a madeira (material 1) e laminado (material 2), valem:

- $E_1 = 9000 \text{ N/mm}^2$ ;
- $E_2 = 210000 \text{ N/mm}^2$ .

Portanto, temos para o coeficiente de homogeneização  $\eta = 23,33$ .

Desta forma, temos para a seção do reforço homogeneizada

$$b' = 20 \times 23,33 = 466,60 \text{ mm}$$

$$A' = 466,60 \times 1,4 = 653,24 \text{ mm}^2$$

e para a seção total homogeneizada:

$$A_T = A_{\text{viga}} + A' = 20000 + 653,24 = 20653,24 \text{ mm}^2$$

A profundidade do centro geométrico relativamente à face superior da viga ( $y$ ) e o momento de inércia da secção homogeneizada ( $I_T$ ), ignorando-se na segunda o cubo da espessura do laminado), são dados pelas expressões

$$y = \frac{A' \cdot \left(\frac{h_f}{2} + h_v\right) + A_v \cdot \frac{h_v}{2}}{A_T} \quad (16)$$

$$I_T = \frac{b_v \cdot y^3}{3} + \frac{b_v \cdot (h_v - y)^3}{3} + A' \cdot \left(\frac{h_f}{2} + h_v - y\right)^2 \quad (17)$$

em que o subscrito v se refere à viga original em madeira e o f ao laminado. Substituindo, vem:

$$y = \frac{653,24 \times \left(\frac{1,4}{2} + 200\right) + 20000 \times \frac{200}{2}}{20653,24} = 103,19 \text{ mm}$$

$$I_T = \frac{100 \times 103,19^3}{3} + \frac{100 \times (200 - 103,19)^3}{3} + 653,24 \times \left(\frac{1,4}{2} + 200 - 103,19\right)^2 = 73081325,29 \text{ mm}^4 = 7308 \text{ cm}^4$$

Por comparação com a viga original, observa-se que o momento de inércia aumentou e que, como o laminado será aplicado na parte inferior da viga, o centro geométrico da peça baixou.

## 6.2 APLICAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO

Por segurança, optou-se por seguir a recomendação de LIMA (2016), adotando um valor máximo para o pré-esforço de 80% da resistência característica à flexão da madeira, ou seja:

$$\sigma = 80\% \times f_{m,k} = 0,8 \times 18 = 14,4 \text{ N/mm}^2$$

Desta forma, o momento fletor gerado pelo pré-esforço ou, melhor, pela contra-flecha introduzida com os macacos, antes da aplicação do reforço com laminado vale:

$$M = \frac{\sigma \cdot I}{h_v/2} = - \frac{14,4 \times 66666666,67}{\frac{200}{2}} = - 9600000 \text{ N. mm} = - 9,60 \text{ kN. m}$$

Seguindo o método proposto por BALSEIRO (2007), com o pré-esforço destacado na figura 08, utilizando macacos hidráulicos a terço de vão, é possível verificar a força e a deformação aplicada, antes da colagem do laminado, com o auxílio das fórmulas (18) e (19). A primeira destas expressões resulta da análise da viga com cargas  $F$  a terço e dois terços de vão: as reações valem também  $F$ , e portanto o momento fletor no terço central vale  $FL/3$ . Por outro lado, conjugando este campo de momento fletor com o associado a uma carga unitária na secção central da viga obtém-se a segunda expressão pelo método da força unitária (Providência e Andrade, 2018). Este resultado surge também em diversas obras, como PISSARENKO (1975).

$$F = \frac{3M}{L} \quad (18)$$

$$\delta = \frac{23}{24 \times 27} \frac{FL^3}{EI} = 0,0355 \cdot \frac{FL^3}{EI} \quad (19)$$

Sendo:

$$F = \frac{3 \times 9,6}{4} = 7,2 \text{ kN}$$

Como se tem uma força  $F$  em cada um dos dois macacos, a força total aplicada vale  $2 \times F$ .

Aplicando a força na fórmula (19) obtém-se a contra-flecha a aplicar com os macacos:

$$\delta = -0,0355 \times \frac{(7,2 \times 10^3) \times (4,0 \times 10^3)^3}{9000 \times 66666666,67} = -27,26 \text{ mm}$$

A contra-flecha aplicada na viga, gera uma tensão na face superior da viga de +14,4 N/mm<sup>2</sup> (tração) e na face inferior de -14,4 N/mm<sup>2</sup> (compressão).

A aplicação do laminado ocorre antes da remoção dos macacos hidráulicos, ou seja, sua tensão inicial é zero.

Após a colagem do laminado e alívio das cargas impostas pelos macacos hidráulicos, obtém-se os seguintes incrementos do valor para a tensão na face superior da viga de madeira, na face inferior da viga e no centro do laminado (considerando que este é de madeira,  $E_1$ ):

$$\sigma_{\text{superior}} = \frac{M \cdot y_s}{I_T} = -\frac{9600000 \times 103,19}{73081325,29} = -13,56 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{inferior viga}} = \frac{M \cdot y_i}{I_T} = \frac{9600000 \times (200 - 103,19)}{73081325,29} = 12,72 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma'_{\text{centro do laminado}} = \frac{M \cdot y_f}{I_T} = \frac{9600000 \times (200,7 - 103,19)}{73081325,29} = 12,81 \text{ N/mm}^2$$

Porém, como o laminado não é de madeira, mas sim de CFRP ( $E_2$ ):

$$\sigma_{\text{centro do laminado}} = \frac{M \cdot y_l}{I_T} \cdot \eta = \frac{9600000 \times (200,7 - 103,19)}{73081325,29} \times 23,33 = 299 \text{ N/mm}^2$$

Somando estes incrementos com o valor da tensão quando se aplicou a contra-flecha, temos:

$$\sigma_{\text{superior}} = 14,4 - 13,56 = 0,84 \text{ N/mm}^2 \text{ (tração)}$$

$$\sigma_{\text{inferior viga}} = -14,4 + 12,72 = -1,68 \text{ N/mm}^2 \text{ (compressão)}$$

$$\sigma_{\text{centro do laminado}} = 0 + 299 = 299 \text{ N/mm}^2 \text{ (tração)}$$

Nota-se na análise do estado de tensão que a viga apresenta uma pequena contra-flecha *residual* motivada pelo pré-esforço, o qual causa uma tensão de tração na parte superior e de compressão na parte inferior da viga de madeira.

Para obter a variação da contra-flecha devida ao alívio das cargas impostas pelos macacos hidráulicos, utilizamos novamente a fórmula (19), porém, com a inércia da seção transformada:

$$\delta = 0,0355 \times \frac{(7,2 \times 10^3) \times (4,0 \times 10^3)^3}{9000 \times 73081325,29} = 24,87 \text{ mm}$$

O valor total da contra-flecha após este alívio é determinado subtraindo à flecha obtida quando se levantou a viga com os macacos, o seu abatimento quando estes foram retirados. Este valor total é não nulo, e será designado de contra-flecha residual (convexidade voltada para cima):

$$\delta = w_c = -27,26 + 24,87 = -2,39 \text{ mm}$$

Trata-se da contra-flecha gerada pelo pré-esforço, quando se ignora o carregamento na peça.

### 6.3 APLICAÇÃO DAS CARGAS DE MUDANÇA DE CATEGORIA

Considerando agora o momento fletor de 8,46 kN.m, aplicado na viga com a alteração de categoria do edifício, obtêm-se os seguintes acréscimos para os valores da tensão:

$$\sigma_{\text{superior}} = \frac{M \cdot y_s}{I_T} = -\frac{8460000 \times 103,19}{73081325,29} = -11,95 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{inferior viga}} = \frac{M \cdot y_i}{I_T} = \frac{8460000 \times (200 - 103,19)}{73081325,29} = 11,21 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{centro do laminado}} = \frac{M \cdot y_l}{I_T} \cdot \eta = \frac{8460000 \times (200,7 - 103,19)}{73081325,29} \times 23,33 = 263,38 \text{ N/mm}^2$$

Somando estes incrementos aos valores determinados após a remoção dos macacos, temos:

$$\sigma_{\text{superior}} = 0,84 - 11,95 = -11,11 \text{ N/mm}^2 \text{ (compressão)}$$

$$\sigma_{\text{inferior viga}} = -1,68 + 11,21 = 9,53 \text{ N/mm}^2 \text{ (tração)}$$

$$\sigma_{\text{centro do laminado}} = 299 + 263,38 = 562,38 \text{ N/mm}^2 \text{ (tração)}$$

Logo, aplicando na fórmula (6) para a verificação de flexão:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{11,11}{11,08} \cong 1$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{9,53}{11,08} = 0,86 < 1$$

Como a viga transformada não tem seção retangular, aplica-se a expressão no primeiro membro da fórmula (14):

$$w_{\text{inst}} = \frac{5 \times 11,72 \times 4^3}{384 \times 9000000 \times 0,00007308132529} = 0,01485 \text{ m} = 14,85 \text{ mm}$$

Somente com o reforço do laminado a contra-flecha instantânea ainda não seria atendida pelas verificações da tabela 20.

Porém, devemos considerar a contra-flecha residual imposta pelo pré esforço, logo:

$$w_{\text{inst}} = -2,39 + 14,85 = 12,46 \text{ mm}$$

Ou seja:

$$12,46 < 13,33 \text{ mm OK!}$$

Assim, verifica-se a importância do pré-esforço para que seja atendido o limite definido na Tabela 20 da Norma em relação as deformações instantâneas da peça. Aplicando a fórmula (15) com o apoio da fórmula (19) para obter a contra-flecha final:

$$w_{\text{fin}} = \left( \frac{5 \times 4,52 \times 4^3}{384 \times 9000000 \times 0,00007308132529} \times (1 + 0,80) \right) + \left( \frac{5 \times 7,20 \times 4^3}{384 \times 9000000 \times 0,00007308132529} \times (1 + (0,30 \times 0,80)) \right) = 0,02162 \text{ m} = 21,62 \text{ mm}$$

O deslocamento final seria atendido sem a necessidade de pré-esforço. Mas realmente o que interessa verificar é o deslocamento final líquido, vindo agora:

$$w_{\text{net,fin}} = w_{\text{fin}} - w_c = 21,62 - 2,39 = 19,23 > 16 \text{ mm}$$

Conclui-se que a viga reforçada com o laminado atende as necessidades impostas com a mudança de utilização do edifício, relativas à resistência à flexão (ELU), estando no limite da verificação. Porém, como não passou na verificação do deslocamento final líquido, ou seja, não são satisfeitos os estados limites de utilização, verifica-se que são estes de facto que governam o dimensionamento. Para resolver esta questão, resolveu-se aumentar a área de laminado. Note-se ainda, que o valor de 19,23 mm é um valor por excesso, porque se aplicou à secção transformada o coeficiente associado à fluência da madeira, e que portanto só devia ter sido aplicado à secção inicial. No entanto, uma vez que o acréscimo da inércia da secção transformada relativamente à inicial, não foi assim tão significativo, não nos parece que uma consideração mais precisa deste cálculo fosse suficiente para satisfazer a flecha admissível.

Logo, utilizou-se as mesmas expressões destacadas no trabalho para obter a tabela 22, onde são ilustrados os valores com a utilização de um laminado de 40 mm, colocado na parte inferior da viga.

Conforme tabela 22, verifica-se que o novo  $w_{\text{net,fin}}$  é de 15,69 mm, ou seja, o valor atende a verificação da tabela 20.

A utilização de um laminado de 40 mm reduziu também as tensões finais na viga, passando a proporcionar maior segurança para o componente estrutural.

Conforme tabela 21, a resistência à tração recomendada para cálculo do laminado é de 2200 N/mm<sup>2</sup>, muito superior a tensão de 503,48 N/mm<sup>2</sup> imposto no reforço para o problema tratado neste trabalho. Como se referiu, no reforço de estruturas de madeira, os laminados em CFRP são geralmente subaproveitados em termos de resistência, mas a sua elevada rigidez é fundamental, não só para o controlo das flechas mas também para a garantir a resistência necessária, o que afasta a possibilidade de utilizar outros tipos de fibras como a de vidro ou basalto. Por outro lado, o que é mais preocupante neste tipo de reforços, é a grandeza da tensão de aderência na madeira, que pode eventualmente levar à sua rotura ao corte, motivo pelo qual não é possível atingir tensões normais muito elevadas nos próprios laminados.

Tabela 22 – Resultados da utilização de um laminado de 40 mm.

Resultados para um laminado de 40 mm		
b do laminado	40	mm
b'	933,2	mm
A'	1306,48	mm <sup>2</sup>
A <sub>T</sub>	21306,48	mm <sup>2</sup>
y	106,175	mm
I <sub>T</sub>	79103881,62	mm <sup>4</sup>
Tensões após alívio de carga (macacos hidráulicos)		
$\sigma_{\text{superior}}$	-12,89	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{inferior viga}}$	11,39	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{centro do laminado}}$	267,63	N/mm <sup>2</sup>
Contra-flecha	22,98	mm
Tensões residuais na viga		
$\sigma_{\text{superior}}$	1,51	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{inferior viga}}$	-3,01	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{centro do laminado}}$	267,63	N/mm <sup>2</sup>
Contra-flecha	-4,28	mm
Tensões mudança de categoria		
$\sigma_{\text{superior}}$	-11,36	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{inferior viga}}$	10,03	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{centro do laminado}}$	235,85	N/mm <sup>2</sup>
Soma tensões de mudança com tensões residuais		
$\sigma_{\text{superior}}$	-9,85	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{inferior viga}}$	7,02	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{centro do laminado}}$	503,48	N/mm <sup>2</sup>
Deslocamento		
W <sub>inst</sub>	9,44	mm
W <sub>fin</sub>	19,97	mm
W <sub>net.fin</sub>	15,69	mm

Como exemplo podemos utilizar fibras de vidro com módulo de elasticidade de aproximadamente 87000 N/mm<sup>2</sup>, quando verificamos o coeficiente de homogeneização, chegamos ao valor de  $\eta = 9,67$ . Ou seja, como a verificação do reforço é realizada através da seção transformada, será necessário mais do que o dobro de laminado de fibra de vidro para atender as necessidades impostas, o que para o problema em análise até seria possível, uma vez que a solução em CFRP só usou 40 mm dos 100 mm disponíveis. Portanto, esta utilização da fibra de vidro tornar-se-ia competitiva se o custo de laminados GFRP não for muito superior ao dobro dos de CFRP, o que nos parece acontecer realmente. Neste caso, o GFRP teria ainda a importante vantagem de causar tensões de aderência muito mais reduzidas: ou seja, se se utilizar o dobro da largura do laminado, as tensões reduzem-se a metade.

## 6.4 ANCORAGEM

Conforme os resultados experimentais com pré-esforço apresentados por BALSEIRO (2007), o principal problema encontrado nas vigas foi a delaminação.

CREWS e SMITH (2006), relataram em suas pesquisas/testes que a delaminação da madeira tem sido o principal modo de falha no reforço estrutural, indicando que o comportamento do reforço pode ser controlado pelas propriedades da madeira em vez do adesivo.

Na figura 21, ilustra-se as falhas por delaminação nos diferentes materiais que compoem o reforço estrutural.

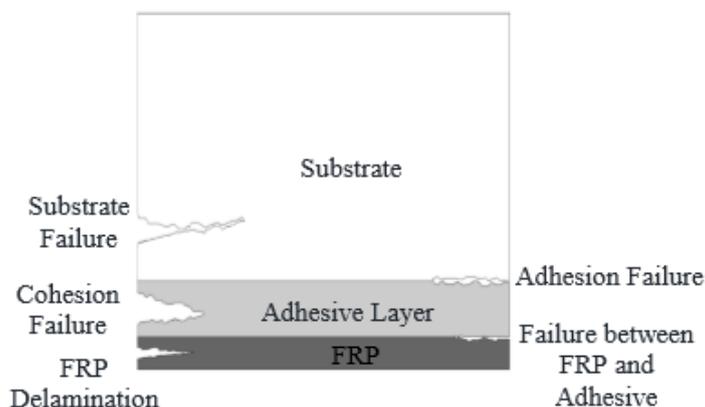


Figura 21 – Possíveis mecanismos de ruptura no reforço à flexão com laminados colados (VAHEDIAN et al., 2016).

Conforme VAHEDIAN et al. (2016), a força de aderência é definida como a carga máxima dividida pela área efetiva, sendo que a área efetiva é dada pela expressão  $A_e = b_f \cdot L_e$ ; onde  $b_f$  é a largura do FRP e  $L_e$  é comprimento de ligação eficaz. O uso de um adesivo com baixa rigidez interfacial aumenta o comprimento efetivo da ligação e, conseqüentemente, alivia a concentração de tensões no FRP que causará atraso na falha de descolagem.

Chen e Teng (2001), desenvolveram um modelo onde o comprimento eficaz da ligação e a força última da ligação podem ser calculados pelas fórmulas:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f'_c}} \quad (20)$$

e

$$P_u = 0,012 \cdot b_f \cdot L_e^{0,28} \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f} \quad (21)$$

Logo, temos:

- $E_f = 210000 \text{ MPa}$ ;
- $t_f = 1,4 \text{ mm}$ ;
- $f'_c = f_{m,k} = 18 \text{ MPa}$ ;
- $b_f = 40 \text{ mm}$ .

Substituindo nas fórmulas (21) e (22):

$$L_e = 127,80 \text{ mm}$$

$$P_u = 1012,15 \text{ N}$$

Ora a tensão máxima no laminado corresponde a uma força máxima de  $F_u = 503 \times 40 \times 1,4 = 28,2$  kN. Se se admitir que os laminados têm um comprimento de  $L_1 = 3,60$  m (vão livre subtraído de  $2 \times 5$  cm), e se se admitir de forma aproximada que a variação das tensões normais no laminado é também parabólica, ela será do tipo  $4 F_u (L_1 x - x^2) / L_1^2$ . A derivada deste campo de tensões normais é  $4 F_u (L_1 - 2x) / L_1^2$ , com valor extremo nas extremidades, correspondendo a um acréscimo de 3,87 kN a uma distância de  $L_e = 128$  mm. Uma vez que este valor é muito superior ao de  $P_u = 1,01$  kN, parece que seria mais apropriada a utilização da solução com GFRP, e, mesmo neste caso, a amarração das extremidades do laminado com um reforço periférico em U. Este reforço periférico deverá ser repetido no comprimento em que o acréscimo de tensão no laminado ultrapasse o valor de  $P_u$ , de acordo com a solução de laminados que se venha a utilizar, com um espaçamento de cerca de  $L_e$ .

## CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

No tratamento da viga de madeira buscou-se utilizar as técnicas de reforço com CFRP com aplicação do pré-esforço por contra-flecha inicial.

A combinação desta técnica, juntamente com a utilização do material em local e condições apropriadas, pode trazer bons resultados para o reforço de vigas com cargas não previstas no projeto original.

Como o trabalho não vislumbrou análises experimentais, não foi possível concluir a eficiência real dos métodos aqui mencionados, porém, na análise teórica o tratamento de vigas de madeira com CFRP pode ser eficaz se aplicado de maneira correta e com os devidos cuidados.

Trata-se de um reforço muito específico, não sendo recomendado para inúmeras situações de perda de carga do elemento estrutural, como exemplo: locais úmidos, de baixa ventilação, de altas temperaturas ou expostos diretamente ao sol.

Cuidados com sujidades na face do elemento estrutural que irá receber o tratamento, aderência entre os materiais, mão de obra qualificada, colas epoxídicas, ancoragem e aplicação do pré-esforço, são fundamentais para obtenção de bons resultados.

Esperava-se que o reforço da viga fosse necessário sobretudo para melhorar a resistência à flexão. Porém, no desenvolvimento do trabalho, notou-se que o dimensionamento do reforço foi governado pelos deslocamentos no meio do vão.

Mesmo com a resistência à flexão atendida pelo elemento estrutural reforçado, notou-se que a peça precisava de mais reforço para atender as verificações das flechas. Isso porque a madeira apresenta um módulo de elasticidade muito reduzido.

A aplicação de um laminado de CFRP de 40 mm com 3.60 m de comprimento foi suficiente para atender as necessidades de reforço da viga em relação a resistência à flexão e deslocamentos.

A utilização de outros tipos de fibras (ex: vidro) é viável, porém, como precisamos de mais material para obter os mesmos resultados, a escolha poderia não se tornar atrativa. No caso

---

corrente, porém, parece que o elevado gradiente das tensões no laminado tornariam de facto mais apropriada a solução com laminados com fibras de vidro, a qual porém não foi testada.

O pré-esforço foi fundamental para a obtenção de uma contra-flecha inicial que se atenuou os deslocamentos gerados com a aplicação das cargas, diminuindo a final da peça.

A aplicação do pré esforço com macacos hidráulicos aparenta ser relativamente fácil, buscando maior segurança, deve-se seguir as recomendações e utilizar apenas 80% da resistência característica à flexão da madeira que será reabilitada, evitando a rotura do elemento.

Recomenda-se para um futuro trabalho a aplicação experimental do modelo proposto no presente trabalho, avaliando e comparando os resultados obtidos.

Mais premente ainda é a análise de uma solução com GFRP, a avaliação da admissibilidade do nível das tensões de aderência, e, no caso destas serem excessivas, o estudo de um procedimento de ancoragem simples e efetivo.

Sugere-se ainda a possibilidade de aplicação de reforço com CFRP reciclado, apresentando resultados para avaliar a qualidade do material após reutilização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Nilton Pereira; BRITO, Carlos Alberto; GARCIA, Elson (2015). “PAN Termoplástica – Poliacrilonitrila – Um novo material de grande potencial tecnológico obtido com glicerina de biodiesel”. Revista Plástico Moderno, São Paulo.

ANDRE, Alann (2006). “Fibres for Strengthening of a timber structures”. Research report, Lulea University of Technology, Suécia.

BAKEWELL, James (2016). “Rota de reciclagem para fibra de carbono”. Automotive Manufacturing Solutions. EUA.

BALSEIRO, Ana M.; NEGRÃO, João H.; FARIA, José A. (2008). “Reforço de vigas de madeira com laminados de carbono pré-esforçados”. Revista Internacional Construlink, Nº 16, Vol. 6, Lisboa.

BALSEIRO, Ana Maria Resende (2007). “Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP”. Dissertação de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

CARBERRY, William (2008), “Airplane Recycling Efforts benefit Boeing operators”. Aircraft and Composite Recycling.

CARDOSO, Luís Manuel Ribeiro (2010). “Recuperação de pavimentos antigos em madeira com lajes mistas madeira-betão”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira (2004). “Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras”. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CARRAZEDO, Ricardo (2005). “Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexocompressão”. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo.

---

CHASTRE, Rodrigues Carlos (2005). “Colunas e pilares de betão armado reforçados com compósitos de FRP ou com betões poliméricos”. Centro de Investigação em Estruturas e Construção da UNL.

CHASTRE, Rodrigues Carlos (2005). “Reparação e reforço de estruturas de betão armado com sistemas compósitos de FRP”. Centro de Investigação em Estruturas e Construção da UNL.

CHEN, J.; TENG, J. (2001). “Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete”. *Journal of Structural Engineering*.

CORREIA, João Ramôa (2013). “The new FRP materials for civil engineering structural applications”. Instituto Superior Técnico/ICIST, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

CREWS, K.; SMITH, S.T. (2006). “Tests on FRP strengthened timber joints in Proceedings”. 3rd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE.

CRUZ, David Miguel Reis (2015). “Reforço de Elementos Estruturais de Madeira com Materiais Compósitos de Matriz Polimérica” Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa

DIAS, Salvador; BRANCO, Jorge; CRUZ, Paulo (2006). “Compósitos de CFRP Unidireccionais no Reforço de Vigas de Madeira Lamelada-Colada”. *Revista Internacional Construlink*, Nº 11, VOL. 4

EMMONS, Peter H.; THOMAS, Jay.; VAYSBURD, Alexander H. (1998). “Strengthening Concrete Structures”. *Concrete International*, Detroit.

FIORELLI, Juliano (2002). “Utilização de Fibras de Carbono e de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira” Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

GARCEZ, Mônica Regina (2007). “Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras”. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre.

JUVANDES, Luís Filipe Pereira (1999). “Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

JUVANDES, Luís Filipe Pereira (2011). “Aplicação de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas”. 1ª Jornada de Materiais na Construção, Porto.

LIMA, Lucas Correa Carvalho (2016). “Reforço Estrutural de Vigas da Madeira Apoiadas em Soluções de Pré-esforço”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

MARTIN, Zeno A., STITH, Joe K., TINGLEY, Dan A. (2000). "Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology"; Actas da "World Conference on Timber Engineering", Canadá.

MONTEIRO, António Carlos Pereira Janes (2014). “Reforço de vigas de betão armado com armaduras exteriores de FRP”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

NEGRÃO, João H. (2017). “Reabilitação de Estruturas Antigas – Parte I: Madeiras”. Material do Mestrado de Reabilitação de Edifícios, Edição 2017-2018. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

PIMENTA, Soraia; PINHO, Silvestre T. (2011). “Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook”. Waste Management, v.31, n.2.

PISSARENKO, G.S.; IAKOVLEV, A.P.; MATVELEV, V.V. (1975). “Prontuário de resistência de materiais”. 2. Ed. Mir. Moscou.

PORTEOUS, Jack; KERMANI, Abdy (2013). “Structural Timber Design to Eurocode 5”, Wiley-Blackwell; 2 Edition.

PROVIDÊNCIA, P.; ANDRADE, A., (2018). “Teoria das Estruturas I”. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

S&P, Clever Reinforcement Company. Fichas Técnicas. (2019). Amora, Portugal.

SCHOBER, K-U.; HARTE, A. M.; KLIGER, R.; JOCKWER, R.; XU, Q.; CHEN, J-F. (2015). “FRP reinforcement of timber structures”. *Construction and Building Materials*, *Construction and Building Materials*, Vol. 97, 106-118.

SGL GROUP – THE CARBON COMPANY (2018), “Fibras de carbono contínuas”. *Composites – Fiber and Materials*, SIGRAFIL, Alemanha.

SILVA, Paulo Alexandre da S. C. M. (1999). “Modelação e análise de estruturas de betão reforçadas com FRP”. *Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SILVA, Vítor Dias (2013). “Mecânica e Resistência dos Materiais”. 4ª Ed., Teresa Barreto Xavier, Coimbra.