

Reforço estrutural de vigas de madeira com soluções de pré-esforço

Structural strengthening of timber beams with prestressing solutions

Lucas Corrêa C. de Lima
Alexandre A. Costa
Carlos F. Rodrigues

Resumo

A reabilitação, procurando a preservação do património e a minimização dos custos de intervenção, compreende, presentemente, o aproveitamento de pavimentos com estrutura de madeira. Contudo, estas estruturas nem sempre estão preparadas para cumprir os requisitos atuais sem intervenções de reforço estrutural. O presente trabalho tem como objetivo a conceção e a análise de soluções de reforço baseadas em elementos pré-esforçados, com vista ao aumento da capacidade de carga e à diminuição dos níveis de deformação de vigas de madeira. Apresenta-se o desenvolvimento de três propostas de reforço recorrendo a chapas, varões e cabos de aço pré-esforçados. Expõe-se o dimensionamento destas soluções com recurso à modelação numérica e apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais. No cômputo geral, os sistemas de reforço apresentados tiveram um notável desempenho conferindo às vigas um aumento de capacidade de carga última até 286% e melhorando a capacidade de carga em estado limite de utilização até 886%.

Abstract

The rehabilitation of existing constructions has the maintenance of existing timber floors as a main goal nowadays, based on heritage preservation concerns and minimizing the overall costs of interventions. However, this maintenance is not always consistent with actual requirements without structural strengthening. In this context, this work has the objective of develop and test experimentally strengthening solutions making use of prestress forces, increasing the performance levels of timber elements in terms of load capacity and deformation levels. These strengthening solutions make use of steel sheets, steel rebars and steel cables. The proposals presented herein were designed making use of numerical modelling, implemented on real specimens, and tested under lab conditions. As main results, the proposed strengthening schemes presented a novel performance, increasing the load capacity up to 286% and upgrading the load capacity under serviceability limit states to 886% when compared with unstrengthened conditions.

Palavras-chave: Estruturas de madeira / Reforço estrutural / Pré-esforço / Análise por elementos finitos

Keywords: Timber structures / Structural strengthening / Prestress / Finite element analysis (FEA)

Lucas Corrêa C. de Lima

Mestre em Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Porto, Portugal
englucaslima@hotmail.com

Alexandre A. Costa

Professor Adjunto Convidado
Instituto Superior de Engenharia do Porto, CONSTRUCT
Porto, Portugal
alc@isep.ipp.pt

Carlos F. Rodrigues

Professor Adjunto Convidado
Instituto Superior de Engenharia do Porto, CONSTRUCT
Porto, Portugal
cfg@isep.ipp.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

LIMA, Lucas [et al.] – Reforço estrutural de vigas de madeira com soluções de pré-esforço. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 6. ISSN 2183-8488. (março 2018) 41-52.

1 Introdução

Tendo em conta o cenário atual referente à manutenção e à reabilitação do edificado, deve ser realçada a importância da preservação das estruturas de madeira. Estas constituem uma das bases mais presentes nos edifícios históricos, materializando um número significativo de pisos e coberturas. Contudo, as atuais intervenções acarretam, não raras vezes, necessidades de melhoria estrutural para novas solicitações e novas exigências de utilização.

Alguns dos problemas mais comuns nas estruturas antigas de madeira estão relacionados com o envelhecimento e degradação dos materiais, colocando em risco a sua integridade, com a capacidade de carga incompatível com as novas solicitações e com os novos critérios de segurança, bem como com as deformações instaladas, ultrapassando o estado limite de utilização convencionado. Diante destas situações, pode ser possível a reparação e o reforço destas estruturas recorrendo a várias técnicas (p. ex., [1]). Entre estas, a utilização de pré-esforço como sistema de reforço estrutural torna-se interessante, podendo prover eficazmente a estrutura de novos níveis de segurança e de funcionalidade.

Em estudos acerca da utilização de pré-esforço em vigas de madeira, Lehmann [2] observou que vigas de madeira maciça reforçadas na sua face inferior com laminados de CFRP pré-esforçados obtiveram um aumento de capacidade de carga de 50% para o Estado Limite Último e de até 70% para o Estado Limite de Utilização. Seguindo a mesma vertente, Balseiro [3] realizou um estudo com vigas reforçadas com laminados de CFRP com e sem pré-esforço. Os resultados obtidos revelaram um incremento na capacidade de carga de 19% para as vigas simplesmente reforçadas e de 26% para as vigas com pré-esforço.

De Luca e Marano [4] realizaram um estudo comparativo entre vigas de madeira lamelada colada reforçadas com varões de aço de 10 mm nas faces superior e inferior, com e sem pré-esforço, solidarizadas à viga por meio de resina epóxi. A partir de ensaios experimentais, constatou-se que as vigas reforçadas com o varão na face superior e inferior sem pré-esforço obtiveram um incremento de 48,1% quanto à capacidade de carga e 43,8% quanto à ductilidade. Relativamente às soluções com pré-esforço, foi obtido um incremento de 40,2% quanto à capacidade de carga e 79,1% quanto à ductilidade.

No estudo desenvolvido por Bohannon [5], foi também avaliado o comportamento de vigas de madeira lamelada colada com cabos de aço pré-esforçados localizados na parte inferior, dentro das mesmas. As vigas foram divididas em cinco grupos com diferentes níveis de pré-esforço, de 11 MPa até 19 MPa. Após os ensaios, notou-se que as vigas com menor força de pré-esforço obtiveram melhor desempenho, sendo que os acréscimos de tensão adicionais não resultaram em efeitos benéficos.

Com base nesta informação, o presente trabalho aborda três métodos de reforço de vigas de madeira utilizando aço pré-esforçado. Os objetivos principais das soluções apresentadas visam aumentar a capacidade resistente das vigas reforçadas, bem como diminuir os deslocamentos verticais associados. A simplicidade e facilidade de implementação dos sistemas de reforço em situação real é também um dos aspetos perseguidos. Procuram-se soluções de reforço que colmatem conflitos de espaço físico e que acarretem o menor impacto possível do ponto de vista funcional e arquitetónico. Por último, refere-se que o material aqui apresentado é resultado de um

trabalho de investigação realizado no Laboratório de Estruturas do ISEP, tendo resultado já um trabalho publicado [6], pretendendo-se com o presente artigo complementar a informação divulgada.

2 Soluções de reforço pré-esforçadas concebidas e analisadas

Havendo a necessidade de um sistema de reforço para determinada estrutura, esse sistema deve ser idealizado de modo a que a sua instalação seja simples, sem necessidade de equipamentos muito específicos e, assim, possa resultar numa intervenção rápida e eficaz.

As três soluções de reforço propostas são baseadas na introdução de elementos de reforço pré-esforçados, em aço. As soluções incluem: i) o reforço com uma chapa metálica pré-esforçada na face inferior da viga (VCH); ii) o reforço com um varão de aço pré-esforçado (VV); e iii) o reforço com cabos de aço pré-esforçados (VC).

2.1 Reforço com chapa metálica pré-esforçada na face inferior

A Figura 1 apresenta o reforço de uma viga à flexão com uma chapa pré-esforçada. A técnica consiste na introdução de uma chapa metálica fixada à viga de madeira por meio de parafusos na face inferior. Promove-se a eficiência do reforço com o pré-esforço da chapa, passando a estrutura a trabalhar com níveis de tensão otimizados que permitem um maior aproveitamento da capacidade resistente da chapa e da madeira.

O procedimento de pré-esforço com as peças integradas numa estrutura é iniciado colocando-se a chapa na face inferior da viga sem ligação com a mesma. No faseamento da intervenção, é posicionado um macaco hidráulico no centro da chapa e, com o seu auxílio, aplica-se um deslocamento vertical na viga até ao nível de contraflecha desejado (Figura 1-a). Deve ser utilizada uma célula de carga ou equipamento equivalente para acompanhar a força introduzida na viga, de modo a não superar a tensão resistente da madeira. Na sequência, com o macaco hidráulico ainda em carga, é feita a ligação da chapa metálica à viga por meio de parafusos (Figura 1-b), sendo eles os responsáveis pela transmissão dos esforços transversos da viga para a chapa de aço. Finalizado o processo de

reforço, é recolhido o pistão do macaco hidráulico, e com isso a viga ao querer voltar à sua posição original acaba por solicitar a chapa, fazendo com que a mesma fique tracionada e origine o pré-esforço desejado (Figura 1-c).

O nível da força de pré-esforço a instalar na chapa pode ser quantificado a partir da modelação numérica da viga a reforçar. Por fases, deve ser avaliado o efeito da força externa máxima e a contraflecha na viga ainda sem reforço (fase I), o seu retorno para a viga reforçada depois de solidarizadas as peças (fase II) até ao estado limite último (fase III). Nas diferentes fases, devem ser controlados os níveis de tensão instalados na madeira e no aço.

Na fase de instalação do reforço, o nível da força de pré-esforço pode ser monitorizado a partir não só da medição da força de desvio do macaco hidráulico mas também da medição da contraflecha. O recurso a um modelo numérico calibrado corretamente com as propriedades físicas da viga de madeira e da chapa de aço deve permitir estimar a contraflecha necessária. O nível da força de pré-esforço pode ser validado com recurso a extensómetros instalados na chapa de reforço. Conhecida a área da chapa e o seu módulo de elasticidade, determina-se a força instalada a partir da variação da extensão média medida durante a transferência de cargas.

2.2 Reforço com varão inferior pré-esforçado

A técnica consiste na instalação de um varão de aço (A500, por exemplo) excêntrico na parte inferior da viga. A ligação entre o varão e a viga é implementada por uma peça metálica presa à viga por parafusos passantes. Concebida para este fim, a peça, para além de conferir a ancoragem, potencia o efeito do pré-esforço através de uma excentricidade controlada.

O pré-esforço é realizado através do aperto de porcas nas extremidades do varão previamente roscadas. O varão será tensionado até ao nível desejado e o respetivo esforço será transmitido para a peça de madeira, que irá reagir com uma contraflecha. Na Figura 2 é possível observar o esquema de montagem do reforço na viga de madeira.

O nível de pré-esforço instalado no varão pode ser monitorizado com recurso a extensómetros instalados no mesmo. As porcas devem ser apertadas até ao nível de tensão estabelecido pela modelação numérica.

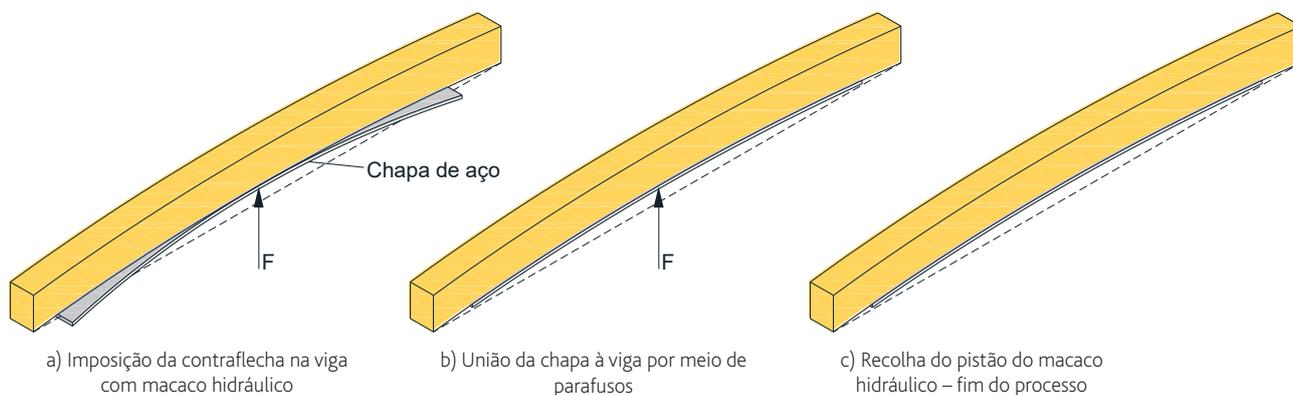


Figura 1 Reforço com pré-esforço da chapa metálica

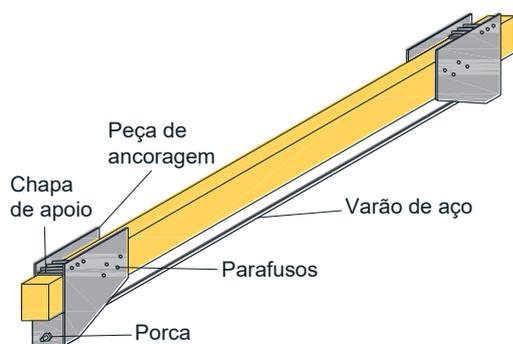


Figura 2 Reforço com varão de aço pré-esforçado

2.3 Reforço com cabos de aço pré-esforçados

O reforço com cabos de aço pré-esforçados é aqui baseado na instalação de dois cabos de aço ao longo da viga de madeira, seguindo um traçado trapezoidal. Os cabos são ancorados nas suas extremidades em parafusos de olhal, onde os mesmos são presos através de uma porca ancorada num perfil UPN instalado num corte na peça de madeira, garantindo assim a ancoragem e correta orientação dos cabos, conforme representação na Figura 3.

Após o posicionamento dos componentes de reforço, o pré-esforço é aplicado com o aperto das porcas inseridas no parafuso de olhal, fazendo com que o olhal se aproxime do perfil UPN e, por conseguinte, tracione o cabo de aço. O nível de pré-esforço instalado nos cabos pode ser obtido, por exemplo, através de extensômetros colados nos parafusos de olhal.

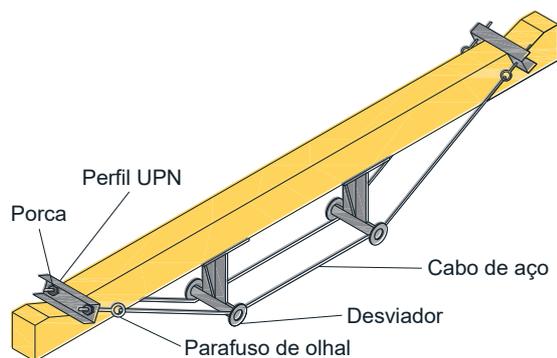


Figura 3 Esquema de reforço com cabos de aço pré-esforçados

3 Modelação numérica das soluções de reforço

3.1 Objeto de estudo

A fim de se prever o comportamento de vigas de madeira com os elementos de reforço, dimensionar os elementos integrantes dos sistemas de reforço e obter as forças para imposição de contraflecha, recorreu-se a uma análise com auxílio de modelação numérica por meio da análise por elementos finitos, utilizando o software *Robot*

Structural Analysis Professional [7-8]. A modelação numérica é uma poderosa ferramenta para se controlar as tensões provocadas pelo pré-esforço, ainda mais quando a aplicação da força não é dada diretamente na viga, mas sim através de elementos de reforço, não havendo analiticamente um método de cálculo expedito.

É possível através da modelação ter em consideração os efeitos de segunda ordem, originados por deformações nos elementos sob ação de forças, que dão origem a não linearidades geométricas. Também é possível simular as etapas de instalação do reforço por fases, como a aplicação inicial de uma contraflecha por um macaco hidráulico, obtendo as tensões na viga, e posteriormente a instalação do reforço, obtendo através da modelação a força no elemento pré-esforçado.

Para a abordagem a seguir apresentada relativamente a uma aplicação prática, foram estimadas as propriedades da madeira envolvida na modelação por meio da análise experimental de vigas sem reforço [8]. A Tabela I resume as restantes propriedades adotadas nesta modelação para os casos de estudo seguidamente apresentados.

Tabela I Resumo de dados para a modelação

Classe de resistência da madeira:	C30
Discretização do modelo:	Painel com malha de elementos finitos de casca
Análise numérica	Não-linear, P-Delta
Força para a imposição do pré-esforço:	80% da resistência característica à flexão da madeira
Dimensões (cm ³):	8 × 11 × 210

Na sequência, é dado um exemplo de dimensionamento com base no sistema de reforço concebido em 2.1, utilizando uma chapa de aço pré-esforçada como elemento de reforço.

3.2 Exemplo de modelação de reforço com chapa de aço pré-esforçada

De forma geral, o ponto de partida para estabelecer a força de pré-esforço deve atender à tensão de resistência característica à flexão suportada pela madeira. A partir desse dado, é estabelecida a força de pré-esforço a ser aplicada na viga e feito o dimensionamento da secção de reforço. Neste caso, a madeira em questão de classe C30 possui uma resistência característica à flexão de 30 MPa. Por medida de segurança, foi adotada 80% da sua capacidade de resistência para atribuição do reforço, obtendo-se o valor de controlo de 24 MPa. Contudo, refere-se que este valor deverá ser ajustado em função dos resultados obtidos na inspeção visual realizada às peças de madeira, tal como realizado e apresentado em [8].

A discretização da viga no modelo numérico foi executada sendo a viga de madeira um painel com malha de elementos finitos de casca. O primeiro passo consiste em estabelecer a força de desvio e a contra-flecha, com base na tensão admissível da madeira. Neste

exemplo, na primeira fase, a viga e a chapa na face inferior, sem ligação entre si, são submetidas a uma força de 7,04 kN a meio do vão capaz de solicitar as fibras da madeira até a tensão de 24 MPa, conforme apresenado na Figura 4, fazendo com que a viga se deforme com 12,8 mm de contraflecha.

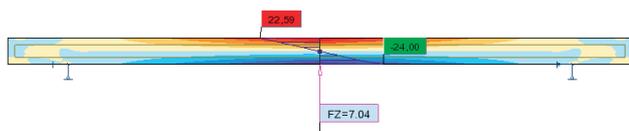


Figura 4 Aplicação de contraflecha na viga

Em seguida, no faseamento da modelação, com a geometria da viga deformada é feita a instalação dos parafusos para garantir a união da viga à chapa de aço, conforme ilustrado na Figura 5.

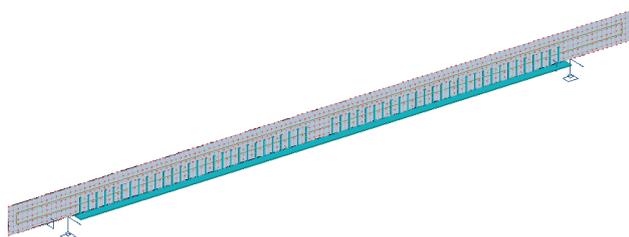


Figura 5 Discretização da viga reforçada por meio de chapa de aço

Após a simulação da colocação dos parafusos no modelo numérico, a força a meio-vão é retirada e a viga tende a retornar à posição original, solicitando a chapa de aço e assim é introduzido o pré-esforço da chapa com contraflecha da peça de madeira. O resultado final desta fase é a viga com uma contraflecha residual de 6,4 mm, e a chapa com uma tensão de pré-esforço de 128,77 MPa, conforme a Figura 6. Com base na tensão de pré-esforço, foi adotada uma chapa de aço S275 de secção $3 \times 80 \text{ mm}^2$ e 56 parafusos para a sua ancoragem.

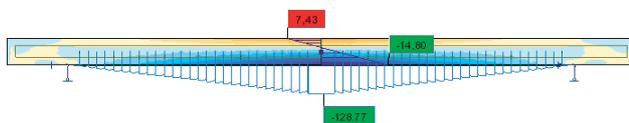


Figura 6 Viga de madeira com chapa de aço pré-esforçada

Generalizando, relativamente aos outros métodos de reforço, a modelação da viga de madeira segue os mesmos princípios do exemplo com a chapa de aço, mudando somente os elementos de reforço a serem instalados.

3.3 Modelação de reforço com varão inferior pré-esforçado

No caso do reforço com o varão inferior pré-esforçado, pode-se admitir uma simplificação no modelo relativamente às peças de ancoragem que servem de reação para aplicação do pré-esforço. Sendo assim, é admitido que o varão tem as extremidades fixas na viga de madeira por uma secção de aço com módulo de elasticidade

elevado, conforme representado na Figura 7. Realiza-se em separado a análise numérica das peças de ancoragem para dimensionamento das mesmas.

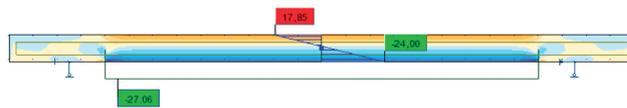


Figura 7 Tensão na viga resultante do pré-esforço do varão

Neste caso, concluiu-se que a força de tração a ser exercida no varão é de 27,06 kN, resultando numa contraflecha de 17,2 mm, comprimindo as fibras inferiores até à tensão de 24 MPa.

3.4 Modelação de reforço com cabos de aço pré-esforçados

Para a modelação do reforço com os cabos de aço pré-esforçados, os cabos foram ligados nas extremidades a elementos de ancoragem discretizados como barras de aço com módulo de elasticidade elevado, minimizando a deformação e levando em conta somente a deformação sofrida pelos cabos, que seguem em paralelo à viga e são afastados do seu eixo por desviadores, perfazendo o traçado trapezoidal, conforme Figura 8. As peças de ancoragem e desviadores foram modelados em separado de acordo com as solicitações estabelecidas na modelação da viga reforçada.

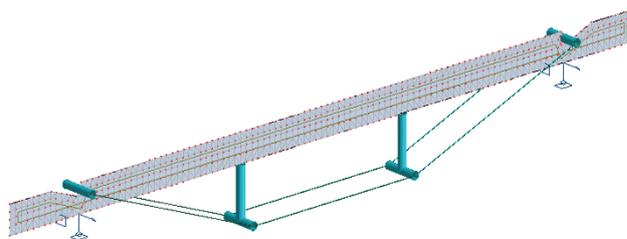


Figura 8 Modelação numérica da viga reforçada por cabos de aço pré-esforçados

Como resultado da modelação, o valor da força de pré-esforço necessária nos cabos para que o nível de tensão máxima na madeira não ultrapassasse 24 MPa foi estabelecido com uma força de 7,03 kN em cada cabo de aço, produzindo uma contraflecha de 15,2 mm.

3.5 Resultados da modelação numérica

Concluída a etapa de modelação numérica, pode-se comparar com base nos resultados obtidos a eficiência de cada tipo de reforço para uma madeira de classe de resistência C30, ilustrados na Tabela II, sendo um parâmetro importante para prever o comportamento real das vigas reforçadas nos ensaios experimentais.

Como se pode observar na Tabela II quanto menor a excentricidade, maior é a força de pré-esforço necessária. Porém, uma força maior de pré-esforço não implica necessariamente uma maior capacidade de carga. Conforme apresentado, o reforço com cabos de aço é o que menos força de pré-esforço implica, e mais carga suporta, estando esse desempenho associado não somente à força de

pré-esforço mas também à sua excentricidade. Outro fator que afeta o seu efeito é o posicionamento dos desviadores dos cabos, que neste caso estão imediatamente abaixo dos pontos de carga, encaminhando a mesma pelos cabos para os apoios, favorecendo a viga no troço central.

Tabela II Comparativo entre resultados da modelação numérica

Tipo de reforço	Excentricidade (cm)	Força de pré-esforço (kN)	Carga máxima (kN)
Varão inferior	12,5	27,06	22,26
Chapa de aço	5,7	30,90	24,34
Cabos de aço	25,5	7,03	42,20

4 Campanha experimental

A presente campanha experimental tem como objetivo a validação dos sistemas de reforço propostos, bem como avaliar a estratégia de dimensionamento apoiada na modelação numérica. A primeira série de vigas ensaiadas envolveu seis vigas de referência (VR), vigas sem reforço para efeito de comparação com as vigas reforçadas, servindo também para validação e calibração dos modelos numéricos [8].

Na segunda série de ensaios, foram submetidas à análise experimental as três técnicas de reforço envolvendo pré-esforço e já apresentadas na Secção 2. Para cada técnica, foram ensaiados dois modelos de vigas com características geométricas idênticas.

Com o objetivo de monitorizar os deslocamentos e as forças atuantes nas vigas durante todo o processo de aplicação do pré-esforço e durante o ensaio a flexão, para além da célula de carga do atuador, foram instalados, nas vigas, três LVDTs espaçados entre si de 52 cm (L/4), conforme representado na Figura 9, e extensómetros elétricos de resistência (*strain gauges*) nos elementos de reforço.

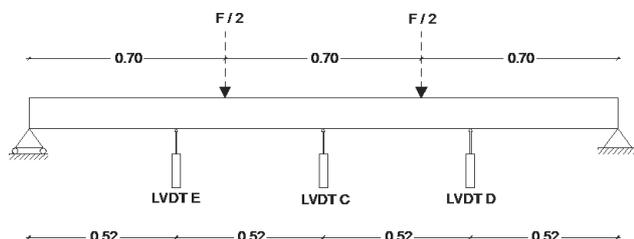


Figura 9 Representação da posição dos LVDTs ao longo da viga

De forma a agregar outra informação relevante para a análise dos resultados, foi utilizada uma câmara termográfica para recolher diferenças de temperatura na superfície das vigas e dos elementos de reforço, servindo de auxílio na tentativa de identificar pontos mais solicitados e zonas mais frágeis, como potenciais pontos de rotura da peça.

4.1 Classificação visual das vigas de madeira

Antes da atribuição do tipo de reforço a ser instalado em cada viga, foi especialmente importante submeter os provetes a uma inspeção visual, a fim de determinar a classe de qualidade da madeira.

No caso deste estudo, a madeira utilizada foi da espécie Pinho Bravo, seguindo-se a respetiva norma para classificação visual NP 4305 [9]. São atribuídas duas classes de qualidade para a viga de madeira, classe "EE" (especial para estruturas) e classe "E" (estruturas). A classe de resistência é atribuída de acordo com a classe de qualidade, atendendo à correlação estabelecida na norma NP EN 1912 [10].

Foram utilizadas seis vigas de madeira nos ensaios realizados, duas por cada sistema de reforço. De modo geral, as vigas tiveram uma classificação de qualidade intermédia, com provetes acima e abaixo da média. Na Tabela III resume-se a classificação quanto à classe de qualidade e resistência das vigas a serem reforçadas, oferecendo maior critério de comparação para possíveis diferenças de desempenho das vigas ensaiadas com o mesmo sistema de reforço.

Tabela III Classificação da qualidade e resistência das vigas a serem reforçadas

Sistema de reforço pré-esforçado	Nomenclatura das vigas	Classe de qualidade (NP 4305)	Classe de resistência (NP EN 1912)
Chapa de aço	VCH1	E	C18
	VCH2	EE	C35
Varão de aço	VV1	E	C18
	VV2	E	C18
Cabos de aço	VC1	Reprovada	–
	VC2	E	C18

A viga VC1 foi reprovada para uso estrutural devido à taxa de crescimento e deformação excessiva de arco de canto. Das duas causas de reprovação, uma delas foi corrigida pelo pré-esforço, o arco de canto. Porém, mesmo assim a viga continua reprovada pela norma de classificação visual NP 4305 devido à sua taxa de crescimento. Por se tratar de um ensaio controlado em laboratório, mesmo reprovada, a viga foi utilizada como candidata a receber um sistema de reforço.

Além disso, um dos objetivos da utilização do reforço recorrendo às peças metálicas passou também por avaliar a influência que a qualidade da madeira poderia ter no resultado final obtido. Como será observado posteriormente na Secção 5, as diferenças observadas não refletem diferentes resultados obtidos em fase de classificação visual, mas sim o desempenho do próprio sistema de reforço.

4.2 Vigas reforçadas com chapa de aço pré-esforçada

4.2.1 Pré-esforço da chapa de aço

Para iniciar o processo de pré-esforço, o primeiro passo envolveu a imposição de uma contraflecha à viga. Com o atuador, foi aplicada uma carga de 7,04 kN estabelecida na modelação numérica sobre a chapa metálica de secção $80 \times 3 \text{ mm}^2$. Nesta fase, a chapa não tinha qualquer tipo de ligação mecânica com a viga, sendo que a mesma se deformava livremente sem solidarização com a chapa, conforme ilustra a Figura 10.



Figura 10 Imposição de força para contraflecha nos modelos VCH1 e VCH2

Seguidamente, manteve-se a posição do atuador (mantendo a força instalada) e deu-se início à fixação da chapa com a viga através de 56 parafusos HBS $8 \times 100 \text{ mm}$, dimensionados para o esforço transversal longitudinal. O nível de tensão de pré-esforço instalado na chapa foi acompanhado por meio dos extensômetros instalados na chapa.

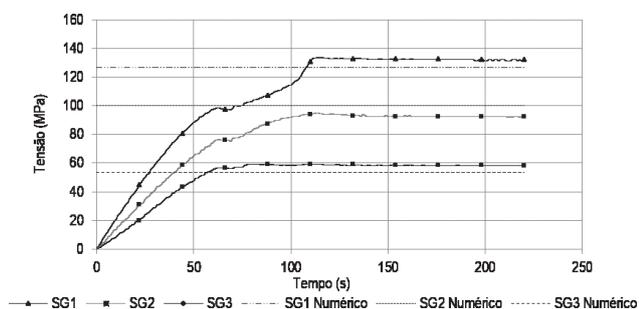


Figura 11 Nível de tensão instalada na chapa pelo pré-esforço no modelo VCH1

A Figura 11 representa o nível de tensão nos três pontos de leitura previamente estabelecidos para a viga VCH1, desde o instante de tempo zero onde o atuador começa a ser recolhido, até à descarga total da viga, onde o pré-esforço já está instalado na chapa. Esta tensão foi estimada a partir dos três extensômetros (SGi) instalados diretamente na chapa de reforço. Conforme mostra a figura, obteve-se uma boa aproximação entre o modelo numérico e o modelo real.

A Tabela IV faz a comparação entre os valores calculados pela modelação numérica e os experimentais, para o nível de tensão instalado na chapa na fase de pré-esforço da viga VCH1. De referir que para a viga VCH2 foram obtidos valores semelhantes.

Tabela IV Comparação do nível de tensão instalada na chapa na fase de pré-esforço do provete VCH1

Extensómetros	X (m)	Modelação numérica (MPa)	Experimental (MPa)	Erro ¹ (%)
SG1	0,94	127,07	131,68	3,63
SG2	0,73	99,99	92,68	7,31
SG3	0,44	53,75	58,00	7,91

X: Distância do bordo da chapa ao extensómetro (*strain-gauge*, SGi).

¹ Diferença percentual entre valor numérico e experimental.

4.2.2 Ensaio à flexão

Com o processo de pré-esforço finalizado, a viga foi invertida com a face dos parafusos para baixo e o ensaio à flexão foi iniciado. A rotura das vigas VCH1 e VCH2 ocorreu de forma semelhante, por esgotamento da capacidade resistente da madeira à tração nas fibras inferiores. A chapa de aço e os parafusos permaneceram sem danos, conforme apresentado na Figura 12, mas com plastificação da chapa metálica, identificada através da termografia. De referir que se obteve um modo de rotura dúctil, potenciado pela ligação entre a chapa e a madeira, que não permitiu a rotura frágil da peça de madeira.

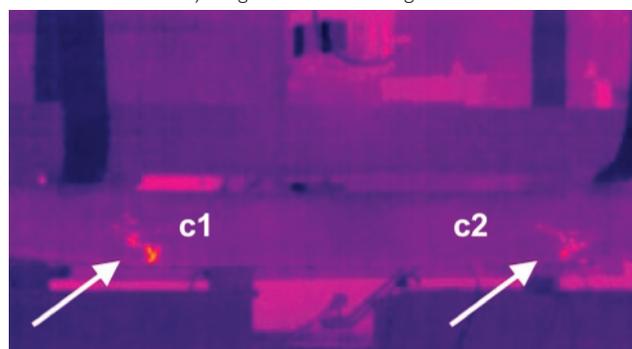


Figura 12 Rotura do modelo VCH2

Apresenta-se, na Figura 13, a imagem da câmara termográfica no instante da rotura da viga VCH2, onde foi possível identificar através da termografia que a rotura da viga VCH2 se deu simultaneamente em dois pontos, c1 e c2, localizados abaixo do ponto de aplicação da carga. Ambos os pontos de rotura eram livres de nós e imperfeições nas fibras, sendo que a rotura foi dada por esgotamento da capacidade resistente da madeira à tração nas fibras inferiores.



a) Imagem da câmara fotográfica



b) Imagem da câmara termográfica

Figura 13 Pontos da rotura simultânea da viga VCH2

4.3 Vigas reforçadas com varão de aço pré-esforçado

4.3.1 Aplicação de pré-esforço no varão

Após a preparação da viga com os elementos de reforço, foi iniciada a fase de pré-esforço no varão, tendo-se utilizado um varão de 10 mm de diâmetro em aço A500, para o efeito. Para a aplicação do pré-esforço, foi necessário o aperto das porcas nas duas extremidades do varão, fazendo uso de uma chave dinamométrica, de modo que o mesmo fosse tensionado de forma equilibrada e controlada.

Todo o processo de pré-esforço foi monitorizado tanto por LVDTs (para que a operação não superasse a flecha máxima pre-estabelecida em fase de modelação numérica por segurança), como por extensómetros, com o objetivo de instalar no varão o nível de tensão estabelecido pela modelação numérica. Na Figura 14, é possível observar o sistema de reforço já instalado, notando-se a contraflecha da viga devido ao pré-esforço.

A Figura 15 representa o processo de aplicação do pré-esforço com a chave dinamométrica vs. deslocamento vertical a meio-vão da viga. Devido ao efeito de aperto com chave dinamométrica, é possível notar alguns desvios devidos ao aperto manual das porcas, originando os picos no gráfico. Contudo, o ponto objetivo

é o deslocamento final vs. força instalada, demonstrando uma boa correlação com os valores obtidos através do modelo numérico.



Figura 14 Viga VV1 com sistema de reforço instalado

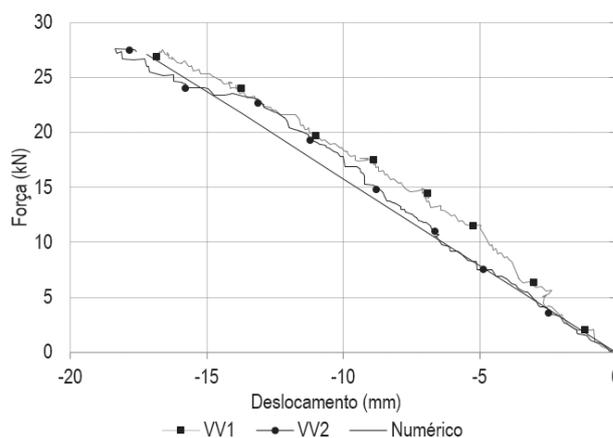


Figura 15 Força de pré-esforço no varão vs. deslocamento

É possível também observar uma boa correlação entre a rigidez do modelo numérico e a do modelo experimental durante a fase de pré-esforço, apresentando ligeiras diferenças como é resumido na Tabela V.

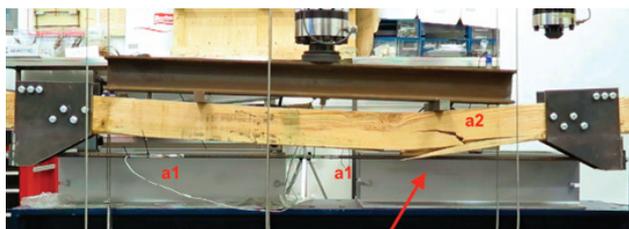
Tabela V Resumo de forças e deslocamentos na fase de pré-esforço das vigas VV1 e VV2

Força/ Deslocamento	Numérico	VV1	DP1 (%)	VV2	Erro ¹ (%)
Força de pré-esforço (kN)	27,06	27,8	2,7	27,7	2,4
Deslocamento (mm)	-17,2	-16,8	2,3	-18,3	6,4

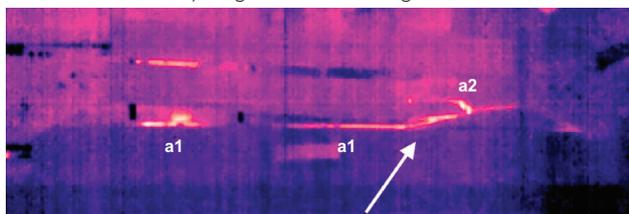
¹ Diferença percentual entre valor numérico e experimental

4.3.2 Ensaio à flexão

A rotura dos modelos VV1 e VV2 foi dada junto aos nós das vigas localizados entre os LVDTs C e D, que culminou no desprendimento das fibras da madeira na face inferior, com entrada em cedência do varão de aço. A partir das imagens da câmara termográfica, pode-se observar o pormenor da cedência do varão A500 registada nos pontos a1 e rotura da viga VV2 no ponto a2 da Figura 16-b.



a) Imagem da câmara fotográfica



b) Imagem da câmara termográfica

Figura 16 Rotura da viga VV2

Particularmente, no caso dos modelos reforçados com o varão pré-esforçado, tem-se o efeito da não-linearidade geométrica mais evidente, por conta da redução da excentricidade do pré-esforço devido à aplicação de carga, pois não há nenhum afastador que garanta a mesma excentricidade do início ao fim do ensaio com a aplicação da carga. Ao deformar-se, a viga aproxima-se cada vez mais do varão, perdendo parte do efeito do pré-esforço.

4.4 Vigas reforçadas com cabos de aço pré-esforçados

4.4.1 Aplicação do pré-esforço

Após a preparação da viga com os elementos de reforço, foram utilizados cabos de aço $\varnothing 8 \text{ mm } 6 \times 19$ com tensão última de 1960 MPa. Para a aplicação do pré-esforço, foi necessário o aperto das porcas na extremidade dos parafusos de olhal M12 com o uso de uma chave dinamométrica, fazendo com que os cabos, ligados aos parafusos, fossem tensionados.

O aperto das porcas foi dado em fases, baseado nos valores obtidos na monitorização dos extensómetros colocados nos olhais, procurando iguais níveis de tensão em ambos os cabos. Tal como no caso anterior, foi controlado também o nível de contraflecha induzida a meio vão da viga. A Figura 17 representa a viga pré-esforçada e a contraflecha resultante desse processo.

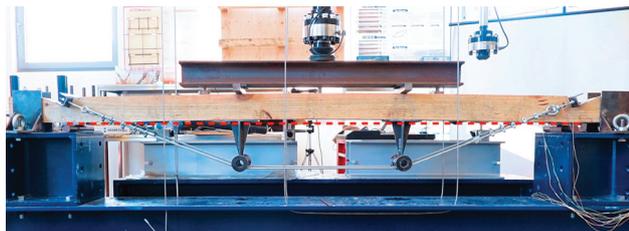


Figura 17 Viga VC1 com pré-esforço instalado

4.4.2 Ensaio à flexão

A rotura das vigas ocorreu pelo esgotamento da capacidade à tração do parafuso de olhal na ancoragem ativa, que, quando rompeu, acabou por libertar o cabo pré-esforçado. Após a rotura do olhal, a carga que antes era sustentada pelo cabo foi desviada para a viga que, não suportando a nova força, rompeu imediatamente. Esse resultado final é ilustrado na Figura 18.

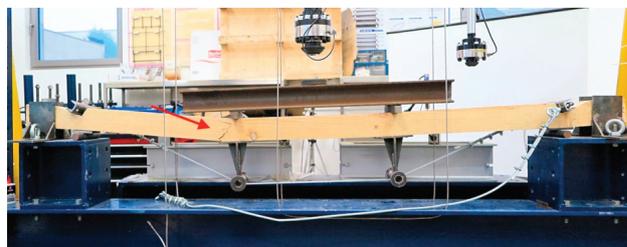
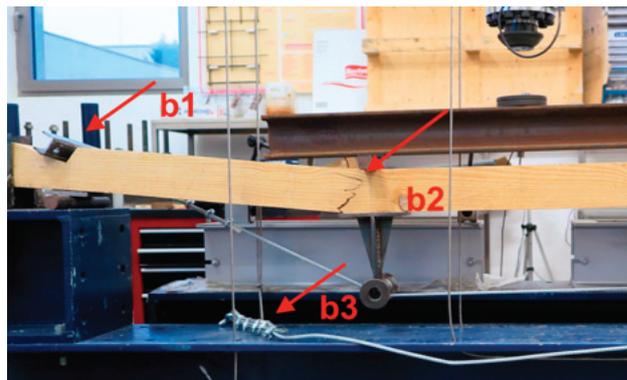
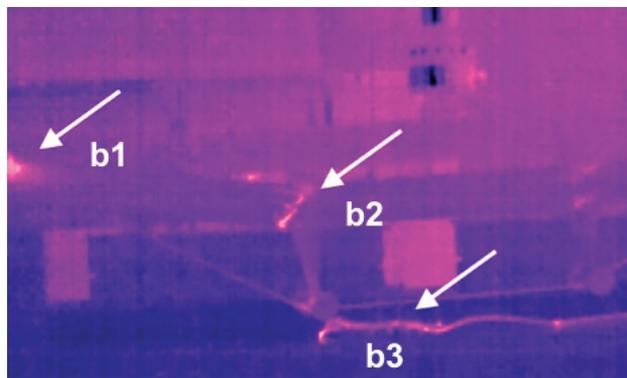


Figura 18 Rotura da viga VC2

A partir da imagem da câmara termográfica, na Figura 19, pode ser observado: o local de apoio do parafuso de olhal partido, indicando dissipação de calor no ponto b1; a rotura da viga VC2 no ponto b2; e o cabo de aço com o olhal partido na extremidade no ponto b3 da viga.



a) Imagem da câmara fotográfica



b) Imagem da câmara termográfica

Figura 19 Rotura da viga VC2

5 Análise comparativa dos resultados

Na Figura 20, apresenta-se a sobreposição dos resultados experimentais relativos a todas as vigas ensaiadas reforçadas, na forma deslocamento vertical (meio-vão) vs. carga total instalada. Inclui-se ainda o resultado de uma viga representativa da série de referência, por ter valores intermédios desta série, para efeito de comparação.

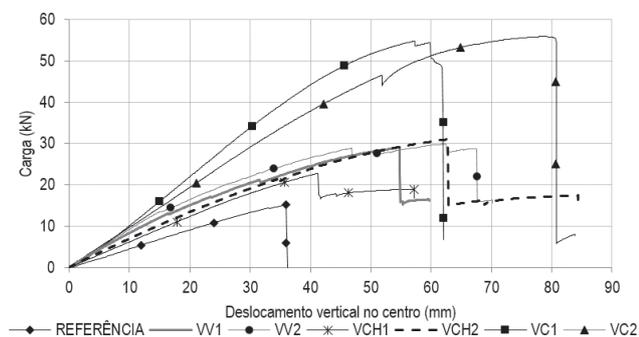


Figura 20 Diagramas de força versus deslocamento vertical a meio-vão das vigas reforçadas e de uma viga de referência

A partir do gráfico, é possível verificar que o sistema de reforço com cabos de aço (VC) conduziu a um aumento significativo da capacidade de carga da viga quando comparado com os outros dois sistemas de reforço. A seguir, aparecem os modelos reforçados com o varão (VV) e com a chapa de aço (VCH). Todas as vigas reforçadas superaram os resultados representativos da série de referência.

A Tabela VI expressa as cargas máximas de rotura das vigas reforçadas e o respetivo acréscimo de carga proporcionado pelos sistemas de reforço. Como referência, foi adotada a média das vigas da série sem reforço.

Tabela VI Acréscimo de carga proporcionado pelos sistemas de reforço

Tipo de reforço	Série	Carga de rotura (kN)	Acréscimo de carga (%)
Sem reforço	VR	14,47	–
Chapa de aço	VCH1	22,75	57
	VCH2	31,00	114
Varão de aço	VV1	29,03	101
	VV2	29,86	106
Cabos de aço	VC1	54,80	279
	VC2	55,89	286

Observa-se uma diferença significativa no resultado de duas vigas para o mesmo sistema de reforço, correspondente à chapa de aço

(VCH1 e VCH2). Como mencionado anteriormente em 4.1, a viga VCH1 foi classificada como classe “E” devido a vários fatores, entre eles a presença massiva de nós ao longo da viga, com destaque para um grupo na linha de aplicação da carga nas fibras mais solicitadas à tração, onde se deu a rotura. O sistema de reforço com a chapa de aço foi escolhido para a VCH1 justamente para que a chapa e os parafusos pudessem ajudar no desempenho da viga à tração por conta dos nós, de forma a promover algum enrijecimento aos mesmos. Já a viga VCH2 era um dos provetes mais bem avaliados entre todos, tendo obtido classe “EE”, com a zona central da viga isenta de nós ou imperfeições, e obteve um desempenho superior. Contudo, a rigidez observada em ambos os modelos foi bastante semelhante.

Outro resultado relevante remete para o desempenho da viga VC1, que foi reprovada para uso estrutural conforme exposto em 4.1. Apesar da reprovação, o sistema de reforço foi extremamente benéfico à viga, fazendo-a alcançar um carregamento de mais de 50 kN com deformação inferior à viga VC2 de classe E.

Relativamente à rigidez proporcionada por cada sistema de reforço, foi determinado, para efeito comparativo, um parâmetro “k”, que relaciona a força com a deformação instantânea. De forma a obter uma leitura da fase elástica da viga, sem interferência do início do carregamento e da fase final, onde a própria viga ou os elementos de reforço já possam estar plastificados, tomou-se como intervalo de avaliação entre 10% e 40% da força máxima obtida pelo sistema, em conjunto com as deformações instantâneas em ambos os carregamentos.

Na Tabela VII, é apresentado o parâmetro “k”, servindo como medida para avaliação genérica da rigidez de cada viga, sem levar em conta mudanças da mesma ocorridas no decorrer do ensaio.

Tabela VII Acréscimo de rigidez proporcionada pelos sistemas de reforço

Vigas	F 40% – F 10% (kN)	D 40% – D 10% (mm)	k	Aumento percentual (%)
VR	4,34	8,85	0,49	–
VCH1	6,83	11,13	0,61	25
VCH2	9,30	14,07	0,66	35
VV1	8,71	11,10	0,78	60
VV2	8,96	9,81	0,91	86
VC1	16,44	14,17	1,16	137
VC2	16,77	17,44	0,96	96

Verificou-se que os sistemas de reforço aumentaram a rigidez das vigas, no mínimo, 25%. Atingiu-se até 137% de aumento nas vigas com o sistema de reforço com cabos de aço (VC), até 86% nas vigas reforçadas com varão (VV) e, por último, até 35% nas vigas reforçadas com chapa (VCH).

Complementarmente ao objetivo do acréscimo de carga, pretendeu-se comparar o desempenho das diferentes soluções perante o objetivo de obter os menores deslocamentos verticais. Para avaliar e comparar o desempenho dos modelos reforçados, foram analisadas as cargas verificadas no instante onde se atingiu o valor de flecha limite instantânea, correspondente ao Estado Limite de Utilização. No caso do ensaio, esse valor é de 7,00 mm, equivalente ao resultado de $l/300$, de acordo com o Eurocódigo 5 [11].

Na Tabela VIII, tem-se o valor limite de flecha instantânea imposta (W_{inst}) subtraído da contraflecha (W_c), ou seja, $W_{inst} - W_c$, em conjunto com o valor da carga instantânea.

Tabela VIII Carga instantânea ao atingir o valor limite de flecha instantânea

Série	Ref.	Chapa de aço		Varão de aço		Cabos de aço	
		VCH1	VCH2	VV1	VV2	VC1	VC2
W_{inst} (mm)				7,00			
W_c (mm)	0	-6,9	-7,05	-16,8	-18,3	-20,3	-20,4
$W_{inst} - W_c$ (mm)	7,00	13,9	14,05	23,8	25,3	27,3	27,4
Carga instantânea (kN)	3,12	8,67	9,66	17,04	19,65	30,73	26,69

Todos os sistemas de reforço diminuíram significativamente o deslocamento vertical até à flecha limite instantânea. De modo geral, a carga associada à flecha limite instantânea teve um acréscimo de até 210% na série VCH, até 530% na série VV, e até 885% na série VC, em comparação com as vigas da série referência.

6 Conclusões

Em termos gerais, foi notável o efeito positivo do reforço. Em comparação com as vigas sem reforço, assinalam-se significativas melhorias tanto na parte da resistência última quanto na redução dos deslocamentos. Entre os modos de rotura observados, houve um aumento significativo na ductilidade com o reforço por meio da chapa de aço, contra o modo de rotura frágil das vigas sem reforço. Conclui-se que os três sistemas de reforço com soluções pré-esforçadas analisados cumpriram os objetivos propostos inicialmente, com um acréscimo expressivo tanto na capacidade de carga, como na capacidade de assumir maiores valores de carga para o mesmo valor de flecha limite, aumentando a eficiência da estrutura no Estado Limite de Utilização. O pré-esforço foi fundamental para atingir ambos os objetivos, fazendo com que os materiais que receberam o pré-esforço pudessem ter um aproveitamento superior até a rotura.

De modo geral, a modelação numérica teve um papel essencial na fase de projeto, na conceção e dimensionamento dos elementos de ancoragem para os reforços e também para determinar as cargas de pré-esforço a serem impostas nas vigas.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho expressam o seu agradecimento ao Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pelas condições reunidas para a realização dos ensaios laboratoriais, assim como ao Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP, pelo seu contributo com a utilização da câmara termográfica. Os autores agradecem ainda à Rothoblaas pela cedência das soluções de fixação utilizadas na execução dos reforços e à CS Construtora. Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457-CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P. Os autores agradecem também aos dois revisores anónimos, ajudando desta forma a melhorar significativamente o trabalho final apresentado.

Referências

- [1] Branco, J. M. – *Reforço de elementos existentes de madeira*. Seminário Intervir em construções existentes de madeira, 71–86, Guimarães, Portugal, 2014.
- [2] Lehmann, M. – *Investigations of the load bearing behaviour of timber bending beams reinforced using prestressed CFRP lamellas*. Tese de Doutoramento, Bauhaus University, 2015.
- [3] Balseiro, A. M. R. – *Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP*. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, 2007.
- [4] De Luca, V.; Marano, C. – *Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars*. *Construction and Building Materials*, Vol. 30, p. 206–217, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.016
- [5] Bohannon, B. – *Prestressed Laminated Wood Beams*. Madison: Forest Service, Forest Product Laboratory, 1964.
- [6] Lima, L.C., Costa, A.A., Rodrigues, C.F. [2018] – *On the use of prestress for structural strengthening of timber beams: assessment with numerical support and experimental validation*, *International Journal of Architectural Heritage*, (IN PRESS). DOI:10.1080/15583058.2018.1442526
- [7] Autodesk® Robot™ – Structural Analysis Professional.
- [8] Lima, L.C. – *Reforço estrutural de vigas de madeira apoiado em soluções de pré-esforço*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [9] NP 4305. – *Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas. Classificação Visual*. Instituto Português da Qualidade, 1995.
- [10] NP EN 1912 – *Madeira para Estruturas. Classes de Resistência. Atribuição de Classes de Qualidade e Espécies*. Instituto Português da Qualidade, 2003.
- [11] ENV 1995-1-1:2004 – Eurocode 5: *Design of timber structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Comité Europeu de Normalização (CEN), 2004.

