



## **Reforço Estrutural de Vigas de Madeira Apoiado em Soluções de Pré-esforço**

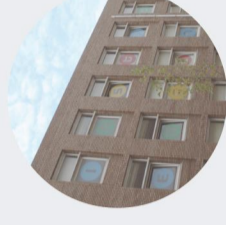
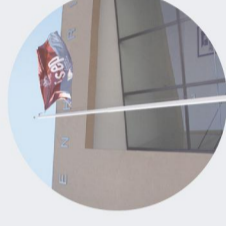
**LUCAS CORREA CARVALHO DE LIMA**

dezembro de 2016

**isep**

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DO PORTO



isep

Instituto Superior de  
**Engenharia** do Porto

## Reforço Estrutural de Vigas de Madeira Apoiado em Soluções de Pré-esforço

Reforço Estrutural de Vigas de Madeira Apoiado em Soluções de  
Pré-esforço

LUCAS CORREA CARVALHO DE LIMA  
Novembro de 2016

LUCAS CORREA CARVALHO DE LIMA  
Novembro de 2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto • Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 • 4249-015 Porto  
Tel. +351 228 340 500 • Fax +351 228 321 159 • mail@isep.ipp.pt • www.isep.ipp.pt

POLITÉCNICO  
DO PORTO





**REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA**  
**APOIADO EM SOLUÇÕES DE PRÉ-ESFORÇO**

LUCAS CORRÊA CARVALHO DE LIMA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES**

Orientador: Professor Doutor Alexandre Aníbal Meira Guimarães da Costa (ISEP)

Co-Orientador: Professor Doutor Carlos Filipe Guedes Rodrigues (ISEP)

Co-Orientador: Professor Doutor Alfonso Pappalardo Júnior (UPM)

**NOVEMBRO DE 2016**



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice de Texto.....	xi
Índice de Figuras .....	xv
Índice de Tabelas .....	xxi
1 Introdução .....	1
2 Revisão de Bibliografia .....	5
3 Concepção de Soluções de Reforço Pré-esforçadas .....	19
4 Análise Numérica e Dimensionamento dos Sistemas de Reforço .....	23
5 Campanha Experimental .....	43
6 Considerações Finais .....	105
Referências Bibliográficas .....	115
Anexo A – Classificação Visual das Vigas de Madeira .....	119



## RESUMO

Durante a vida útil de uma estrutura, suas necessidades de utilização podem ser alteradas passando a ser necessário resistir a novos carregamentos. Juntamente, torna-se necessário atender ao controle da deformação, que, no caso das estruturas de madeira, assume particular relevo por conta de o seu módulo de elasticidade ser inferior à generalidade dos demais materiais de construção e estarem sujeitas a deformações diferidas por fluência. Diante dessas situações, uma intervenção estrutural pode ser necessária para prover, novamente, níveis de segurança e funcionalidade adequados na estrutura.

Este trabalho tem como objetivo incrementar a capacidade de carga das vigas de madeira aliado a menores níveis de deformação a partir da implementação de sistemas de reforço utilizando pré-esforço. Para isso foram testados experimentalmente três soluções diferentes de reforço com aplicação de pré-esforço, sendo eles com chapa de aço, varão de aço e cabos de aço. Todos os sistemas foram submetidos previamente a análise numérica computacional, com objetivo de dimensionamento dos elementos de reforço e obtenção das forças de pré-esforço até a tensão admissível das vigas.

Atendendo ao objetivo inicial, os sistemas de reforço tiveram um excelente desempenho, conferindo às vigas um aumento de capacidade de carga de até 114 % para o reforço com chapa de aço, 106 % para o reforço com varão de aço e 286 % para o sistema reforçado com cabos de aço. Quanto ao desempenho na redução dos deslocamentos, o nível de carga obtida ao atingir o valor limite de flecha instantânea teve um acréscimo de até 210 % com o reforço por meio de chapa de aço, 529 % com o reforço do varão e 886% com o reforço por meio de cabos. De modo geral os sistemas adotados para reforço estrutural de vigas à flexão atenderam a todos os objetivos, conferindo ainda modos de rotura menos frágeis para as vigas de madeira.

**Palavras-chave:** Estruturas de madeira, Reforço estrutural, Pré-esforço, Análise por Elementos Finitos.



## **ABSTRACT**

During the life cycle of a structure, your requirement use can be changed needing to resit a new loads. At the same time, it is necessary to attend the deformation limits, in the case of timber structures it is requires more care because the reduced elasticity modulus compared to the other comum construction materials, in addition to be subject to deformation by creep. Faced with these situations, a structural intervention may be necessary to provide again security and appropriate functionality to the structure.

This work aims to increase the load capacity of timber beams with lower levels of deformation with Implementation of strengthening systems using prestress. For that purpose, three different strengthening solutions were experimentally tested with the application of prestress and making use of steel plates, steel rebars and steel cables. All systems were previously submitted to a finite element analysis, with the objective of simulating the experiments, designing the elements to use and obtaining the prestress forces, taking into account allowable stress levels in the wood.

Attending to the initial goal, the strengthening systems had an excellent performance, giving an increasing up to 114% of load capacity for strengthening with steel plate, 106% for reinforcement with steel rebar and 286% for the strengthening system with steel cables. As the performance in the reduction of displacements, the load level obtained upon reaching the limit instant displacement had increased by up to 210% with the strengthening with steel plate, 529% with the rebar strengthening and 886% with the strengthening system with steel cables. Altogether, the structural strengthening systems proposed to timber beams in bending attended to all objectives, conferring less fragile failure modes to the timber beams.

**Keywords:** Timber structures, Structural strengthening, Prestress, Finite element analysis (FEA).



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela graça da vida, por me amparar nos momentos difíceis e me dar forças para seguir em frente em busca dos meus sonhos;

Ao Professor Alexandre Costa, meu Orientador, por me conduzir no universo das estruturas de madeira, pela inesgotável disponibilidade e interesse em ajudar a desenvolver este trabalho, tanto na parte experimental, tanto na parte teórica;

Ao Professor Carlos Rodrigues, meu Co-Orientador, pelos valiosos ensinamentos na parte da modelação numérica, instrumentação e monitorização dos ensaios. Agradeço seu profundo interesse e dedicação em me ajudar a realizar este trabalho, e mais que isso, por todos os ensinamentos no campo da engenharia que guardarei para a toda a vida;

Ao Laboratório de estruturas na pessoa do Professor Paulo Guedes pela disponibilização do espaço e equipamentos para a realização da parte experimental;

Ao Laboratório de Geotecnia pelo empréstimo da câmara termográfica para filmagem dos ensaios;

Ao Laboratório de Mecânica pela cedência de equipamentos específicos para preparação de elementos do ensaio;

A Rothoblaas, pela doação dos parafusos específicos de alto desempenho para uso na madeira;

Por último, mas não menos importante, aos meus amigos pelo apoio e acolhimento em Portugal, e principalmente aos meus pais, por tornarem realidade o meu mestrado em Portugal, e sempre me incentivarem nos momentos cruciais com carinho e amor.



# ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivo .....	1
1.3	Estrutura da Dissertação .....	2
2	Revisão de Bibliografia .....	5
2.1	Adição de Peças de Madeira à Seção Original .....	5
2.2	Adição de Perfis de Aço à Seção Original .....	6
2.3	Reforço da Seção por Polímeros Reforçados com Fibras.....	8
2.4	Reforço por pré esforço .....	12
3	Concepção de Soluções de Reforço Pré-esforçadas .....	19
3.1	Considerações Iniciais .....	19
3.2	Reforço com Chapa Metálica Pré-Esforçada na Face Inferior.....	20
3.3	Reforço com Varão Inferior Pré-Esforçado .....	21
3.4	Reforço com Cabos de Aço Pré-Esforçados .....	21
4	Análise Numérica e Dimensionamento dos Sistemas de Reforço .....	23
4.1	Considerações Iniciais .....	23
4.2	Modelação Numérica do Reforço com Chapa De aço .....	25
4.3	Análise do Reforço com Varão Inferior .....	29
4.3.1	Modelação Numérica da Viga Reforçada .....	29
4.3.2	Modelação Numérica da Peça de Ancoragem do Varão .....	31
4.4	Análise do Reforço com Cabos de Aço.....	33
4.4.1	Modelação Numérica da Viga Reforçada .....	34

4.4.2	Modelação Numérica das Peças de Aplicação do Pré-Esforço .....	36
4.4.2.1	Afastador Para Cabos de Pré-esforço .....	36
4.4.2.2	Peça para Ancoragem dos Cabos de Pré-esforço .....	37
4.5	Comparativo Entre as Modelações .....	40
5	Campanha Experimental .....	43
5.1	Introdução.....	43
5.2	Classificação Visual das Vigas de Madeira .....	43
5.3	Vigas de Série Referência.....	44
5.4	Instrumentação.....	46
5.5	Vigas Reforçadas com Chapa de Aço Pré-Esforçada .....	48
5.5.1	Instrumentação .....	48
5.5.2	Pré-Esforço da Chapa De aço .....	50
5.5.3	Ensaio à Flexão .....	58
5.5.4	Análise dos Resultados.....	63
5.6	Vigas Reforçadas com Varão de Aço Pré-Esforçado .....	67
5.6.1	Instrumentação .....	67
5.6.2	Montagem do sistema de reforço.....	69
5.6.3	Aplicação de Pré-Esforço no Varão A500 .....	71
5.6.4	Ensaio à Flexão .....	75
5.6.5	Análise dos Resultados.....	80
5.7	Vigas Reforçadas com Cabos de Aço Pré-Esforçados.....	83
5.7.1	Instrumentação .....	83
5.7.2	Montagem do Sistema de Reforço.....	85
5.7.3	Aplicação do Pré-esforço.....	87
5.7.4	Ensaio à Flexão .....	93
5.7.5	Análise dos Resultados.....	100
6	Considerações Finais .....	105

6.1	Comparativos.....	105
6.2	Reforço por Meio de Chapa de Aço Pré-esforçada.....	110
6.3	Reforço por meio de Varão de Aço Pré-esforçado.....	111
6.4	Reforço Por Meio de Cabos de Aço Pré-esforçados.....	111
6.5	Modelação numérica.....	112
6.6	Conclusões Finais.....	113
6.7	Desenvolvimentos Futuros.....	114



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Reforço por meio da adição de peças de madeira (Arriaga et al., 2002). .....	6
Figura 2.2 – Reforço por adição de perfis UPN e IPE (Mazzolani, 1991 <i>apud</i> Carneiro, 2012). .....	6
Figura 2.3 – Reforço por perfis “L” ou cantoneiras fixos na face inferior da viga (Mariani, 2004). .....	7
Figura 2.4 – Reforço por chapa metálica fixa na face inferior (Mazzolani, 1991 <i>apud</i> Carneiro, 2012). .....	7
Figura 2.5 – Reforço com perfil de aço na face superior da seção (Bravo, 2007). .....	8
Figura 2.6 – Localização do sistema CFRP na seção transversal (Dias, Branco, e Cruz, 2006). .....	9
Figura 2.7 – Modos de ruína (Dias, Branco, e Cruz, 2006). .....	10
Figura 2.8 – Rotura por tração na madeira (Fiorelli e Dias, 2005). .....	11
Figura 2.9 – Seção transversal das vigas reforçadas com barras de GFRP (Yusof e Saleh, 2004). .....	11
Figura 2.10 – Delaminação do sistema CFRP por falha de ancoragem na madeira (Lehmann , 2015). .....	12
Figura 2.11 – Viga reforçada com cabos de pré-esforço (Bohannan, 1964). .....	13
Figura 2.12 – Seção transversal das vigas reforçadas (De Luca e Marano, 2012). .....	14
Figura 2.13 – Exemplo de aplicação do sistema de reforço com tirantes pré-esforçados (Mariani, 2004 <i>apud</i> Carneiro, 2012). .....	15
Figura 2.14 – Elementos principais da ponte de madeira laminada protendida (Fonte e Junior, 2006). ..	16
Figura 2.15 – Instalação do tabuleiro da ponte (Fonte e Júnior, 2006). .....	16
Figura 2.16 – Prova de carga realizada na ponte (Fonte e Júnior, 2006). .....	17
Figura 3.1 – Processo de reforço com pré-esforço da chapa metálica. ....	20
Figura 3.2 – Esquema de montagem do reforço com varão. ....	21
Figura 3.3 – Esquema de reforço com cabos pré-esforçados. ....	22
Figura 4.1 – Vigas a serem ensaiadas. ....	23
Figura 4.2 – Disposição das vigas para ensaio (medidas em m).....	25

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.3 – Discretização da viga reforçada por meio de chapa de aço. ....	25
Figura 4.4 – Aplicação de contra-flecha na viga. ....	26
Figura 4.5 – Pré-esforço da chapa de aço. ....	27
Figura 4.6 – Carga correspondente para tensão máxima admissível no modelo. ....	27
Figura 4.7 – Chapa de aço a ser utilizada no reforço (medidas em mm). ....	28
Figura 4.8 – Tensão na viga resultante do pré-esforço do varão. ....	29
Figura 4.9 – Deformação do modelo pela aplicação de carga. ....	30
Figura 4.10 – Carregamento na viga pré-esforçada. ....	30
Figura 4.11 – Representação da peça de ancoragem do varão pré-esforçado. ....	31
Figura 4.12 – Modelação numérica da chapa de ancoragem do varão. ....	32
Figura 4.13 – Chapa de ancoragem do varão executada em serralheria. ....	33
Figura 4.14 – Modelação numérica da viga reforçada por cabos de aço pré-esforçados. ....	34
Figura 4.15 – Obtenção de força de pré-esforço nos cabos de aço. ....	35
Figura 4.16 – Carregamento para obtenção da tensão de 30 MPa na madeira. ....	35
Figura 4.17 – Afastador para os cabos de aço. ....	36
Figura 4.18 – Modelação numérica do afastador. ....	37
Figura 4.19 – Desviador para cabos de aço pré-esforçados. ....	37
Figura 4.20 – Perfil UPN para ancoragem dos cabos de aço. ....	38
Figura 4.21 – Primeira modelação numérica do perfil UPN. ....	38
Figura 4.22 – Projeto de reforço para perfil UPN. ....	39
Figura 4.23 – Segunda modelação numérica do perfil UPN. ....	39
Figura 4.24 – Perfil de ancoragem UPN reforçado. ....	39
Figura 4.25 – Comparativo entre resultados da modelação numérica. ....	41
Figura 5.1 – Diagrama de força versus deslocamento da série referência. ....	45
Figura 5.2 – Representação da posição dos LVDTs ao longo da viga (medidas em m). ....	47
Figura 5.3 – Imagem da câmara termográfica. ....	47
Figura 5.4 – Instrumentação do modelo reforçado com chapa de aço (medidas em m). ....	48

Figura 5.5 – Preparação da superfície da chapa e colagem do strain gauge. ....	49
Figura 5.6 – Soldadura e proteção do strain gauge. ....	49
Figura 5.7 – Posicionamento dos LVDTs no modelo. ....	50
Figura 5.8 – Imposição de força para arqueamento nos modelos VCH2 e VV2.....	51
Figura 5.9 – Gráfico força vs. deslocamento na imposição do arqueamento dos modelos VCH1 e VCH2 e comparação com simulação numérica. ....	52
Figura 5.10 – Execução do pré-furo. ....	52
Figura 5.11 – Parafuso HBS com cabeça escareada (Rothoblaas, 2014).....	53
Figura 5.12 – Instalação dos parafusos no modelo.....	53
Figura 5.13 – Imagem da câmara termográfica na instalação dos parafusos.....	54
Figura 5.14 – Processo de instalação dos parafusos concluído. ....	54
Figura 5.15 – Monitoramento do deslocamento vertical dos modelos durante imposição da contra-flecha e descarregamento. ....	55
Figura 5.16 – Sobreposição dos LVDS centra na fase de carregamento e descarregamento. ....	56
Figura 5.17 – Nível de tensão instalada na chapa pelo pré-esforço no modelo VCH1. ....	57
Figura 5.18 – Tensões instaladas na chapa na fase de pré-esforço obtidos por modelação numérica. ....	57
Figura 5.19 – Início do ensaio de rotura do modelo VCH2.....	58
Figura 5.20 – Rotura do modelo VCH2.....	59
Figura 5.21 – Energia liberada no nó 3 captada pela câmara termográfica.....	59
Figura 5.22 – Rotura da viga VCH1 captada por câmara termográfica. ....	60
Figura 5.23 – Rotura da viga VCH1 (vista frontal).....	60
Figura 5.24 – Rotura da viga VCH1 (vista traseira).....	61
Figura 5.25 Inspeção dos parafusos após ensaio, VCH1. ....	61
Figura 5.26 – Rotura simultânea em dois pontos captada pela câmara termográfica. ....	62
Figura 5.27 – Rotura viga VCH2 (vista traseira).....	62
Figura 5.28 – Pormenor da rotura da viga VCH2 (vista frontal). ....	63
Figura 5.29 – Inspeção dos parafusos após ensaio, VCH2. ....	63
Figura 5.30 – Diagrama de força versus deslocamento da série VCH. ....	64

Figura 5.31 — Deformações colhidas pelos LVDTs no decorrer do ensaio da viga VCH1. ....	66
Figura 5.32 – Deformações colhidas pelos LVDTs no decorrer do ensaio da viga VCH2. ....	67
Figura 5.33 – Instrumentação do modelo reforçado com varão de aço (medidas em m). ....	68
Figura 5.34 – Preparação da superfície do varão e colagem do strain gauge. ....	68
Figura 5.35 – Instalação concluída dos strain gauges na viga VV2. ....	69
Figura 5.36 – Parafuso M12 classe 8.8 soldado na extremidade do varão A500. ....	69
Figura 5.37 – Perfuração da viga para a união da peça de ancoragem do varão. ....	70
Figura 5.38 – Peça de ancoragem fixa a viga (pormenor para a chapa de apoio dos parafusos). ....	70
Figura 5.39 – Aperto da porca com chave dinamométrica para pré-esforço do varão. ....	71
Figura 5.40 – Aplicação de pré-esforço no varão. ....	72
Figura 5.41 – Deslocamento instantâneo sofrido no processo de pré-esforço. ....	73
Figura 5.42 – Força instantânea de pré-esforço instalada no varão. ....	73
Figura 5.43 – Força de pré-esforço no varão <i>versus</i> deslocamento. ....	74
Figura 5.44 – Pormenor do sistema de ancoragem. ....	75
Figura 5.45 – Desprendimento de fibras de madeira na face frontal (VV2). ....	75
Figura 5.46 – Ruína da viga VV2. ....	76
Figura 5.47 – Início da cedência do varão A500 na viga VV2. ....	76
Figura 5.48 – Rotura da viga VV2 acompanhada com a cedência do varão A500. ....	77
Figura 5.49 – Vista frontal da rotura da viga VV2. ....	77
Figura 5.50 – Vista traseira da rotura da viga VV2. ....	78
Figura 5.51 – Rotura da VV1 acompanhada da cedência do varão. ....	78
Figura 5.52 – Vista traseira da rotura da VV1. ....	79
Figura 5.53 – Vista frontal da rotura da VV1. ....	79
Figura 5.54 – Diagrama de força <i>versus</i> deslocamento da série VV. ....	81
Figura 5.55 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VV1. ....	82
Figura 5.56 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VV2. ....	83
Figura 5.57 – Instrumentação do modelo reforçado com cabos de aço (medidas em m). ....	84

Figura 5.58 – Instrumentação dos parafusos.....	85
Figura 5.59 – Entalhe executado na madeira para ancoragem do perfil UPN. ....	86
Figura 5.60 – Instalação dos afastadores dos cabos de aço.....	86
Figura 5.61 – Cabo de aço fixo ao sistema de ancoragem ativo. ....	87
Figura 5.62 – Aperto das porcas com chave dinamométrica. ....	87
Figura 5.63 – Valores de força obtidos na fase de pré-esforço, VC1. ....	88
Figura 5.64 – Valores de força obtidos na fase de pré-esforço, VC2. ....	89
Figura 5.65 – Média dos valores SG 6 + SG 7 das vigas VC1 e VC2 <i>versus</i> deslocamento vertical das vigas. .....	90
Figura 5.66 – Deformação das vigas da série VCH durante a aplicação do pré-esforço. ....	91
Figura 5.67 – Fim do processo de rosqueamento dos parafusos e pré-esforço dos cabos. ....	91
Figura 5.68 – Viga VC1 preparada para receber o pré-esforço.....	92
Figura 5.69 – Viga VC1 com o processo de pré-esforço finalizado. ....	92
Figura 5.70 – Rotura da viga VC2. ....	93
Figura 5.71 – Cedência do parafuso de olhal captada pela câmera termográfica. ....	94
Figura 5.72 – Rotura da viga VC2 captada pela câmera termográfica. ....	94
Figura 5.73 – Pormenor da localização dos nós da viga VC2 e local de rotura. ....	95
Figura 5.74 – Pormenor da rotura na seção transversal da VC2.....	96
Figura 5.75 – Efeitos da rotura do parafuso no sistema de ancoragem ativa.....	96
Figura 5.76 – Pormenor da rotura do parafuso de olhal.....	97
Figura 5.77 – Rotura da viga VC1. ....	97
Figura 5.78 – Cedência do parafuso de olhal e desprendimento das fibras da madeira junto ao desviador. .....	98
Figura 5.79 – Rotura da viga VC1 captada pela camera termográfica. ....	98
Figura 5.80 – Pormenor da rotura na seção transversal da VC1.....	99
Figura 5.81 – Perfil UPN deslocado.....	100
Figura 5.82 – Diagrama de força <i>versus</i> deslocamento da série VC. ....	101
Figura 5.83 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VC1. ....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.84 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VC2. ....	103
Figura 6.1 – Diagramas de força <i>versus</i> deslocamento das vigas reforçadas e referência. ....	106
Figura 6.2 – Comparação entre os valores máximos de carga obtidos em cada sistema de reforço. ....	107
Figura 6.3 – Comparação do acréscimo de rigidez proporcionada pelos sistemas de reforço. ....	109
Figura 6.4 – Carga obtida ao atingir o valor limite de flecha instantânea (Winst). ....	110

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Acréscimo de capacidade de carga nos diferentes tipos de madeira.....	8
Tabela 4.1 – Nomeação das vigas e propriedades dimensionais.....	24
Tabela 4.2 - Dados de entrada para modelagem numérica da viga com sistema de reforço.....	26
Tabela 4.3 - Resumo da modelação numérica para o sistema de reforço com chapa de aço.....	27
Tabela 4.4 - Resumo de elementos para instalação do reforço com chapa de aço pré-esforçada.....	28
Tabela 4.5 – Dados de entrada para modelagem numérica da viga com sistema de reforço.....	29
Tabela 4.6 – Resumo da modelação numérica para o sistema de reforço com varão pré-esforçado.....	31
Tabela 4.7 – Resumo de elementos para instalação do reforço com varão de aço pré-esforçado.....	33
Tabela 4.8 – Dados de entrada para modelagem numérica da viga com sistema de reforço.....	34
Tabela 4.9 – Resumo da modelação numérica para o sistema de reforço com cabos de aço.....	35
Tabela 4.10 – Resumo de elementos para instalação do reforço com cabos de aço pré-esforçados.....	40
Tabela 4.11 – Comparativo entre resultados da modelação numérica.....	40
Tabela 5.1 – Classificação de qualidade e resistência das vigas a serem reforçadas.....	44
Tabela 5.2 – Resumo de cargas e deslocamentos da série referência.....	45
Tabela 5.3 – Comparação entre os valores de deslocamentos verticais numéricos e experimentais obtidos na fase de carregamento e descarregamento.....	56
Tabela 5.4 – Comparação do nível de tensão instalado na chapa na fase de pré-esforço do modelo VCH1.....	58
Tabela 5.5 – Carga máxima e deformação instantânea da série VCH.....	65
Tabela 5.6 – Resumo de forças e deslocamentos na fase de pré-esforço das vigas VV1 e VV2.....	74
Tabela 5.7 – Carga máxima e deformação instantânea da série VVR.....	81
Tabela 5.8 – Resumo de forças e deslocamentos na fase de pré-esforço das vigas VC1 e VC2.....	91

*ÍNDICE DE TABELAS*

Tabela 5.9 – Carga máxima de deformação instantânea da série VC. ....	102
Tabela 6.1 – Acréscimo de carga proporcionado pelos sistemas de reforço. ....	107
Tabela 6.2 – Acréscimo de rigidez proporcionada pelos sistemas de reforço. ....	108
Tabela 6.3 – Carga instantânea ao atingir o valor limite de flecha instantânea. ....	109

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

Durante a vida útil da estrutura, suas necessidades de utilização podem ser alteradas, bem como o surgimento de anomalias decorrentes do envelhecimento e degradação dos materiais, sismos, incêndios ou acidentes, podendo colocar em risco a integridade da estrutura. Diante dessas situações, uma intervenção estrutural pode ser necessária para prover novamente a estrutura níveis de segurança e funcionalidade adequados.

A principal motivação para a realização deste trabalho é analisar, dentro desta ampla área de estudo, novas técnicas de reforço, além de aperfeiçoar técnicas antigas através do pré-esforço, para estruturas em que não se é possível a simples substituição do elemento estrutural. O intuito do trabalho é auxiliar a escolha de um método eficiente para o reforço de vigas de madeira, e que principalmente tenha uma boa facilidade de implementação.

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo geral deste trabalho é abordar diferentes métodos de reforço em vigas de madeira utilizando o aço como elemento pré-esforçado, com intuito de aumento de resistência à aplicação de carga e obtenção de menores deslocamentos verticais. A facilidade de implantação dos sistemas de reforço em situação real também foi um dos pontos analisados.

De acordo com Balseiro (2007), o pré-esforço é um tema de estudo e pesquisa em diversos centros de investigação e desenvolvimento, isto já ocorre há alguns anos, porém os estudos específicos nesta área são considerados recentes, já que a madeira não é o material mais utilizado em estruturas atualmente. Ainda em estudos realizados por Balseiro, foi identificado que as técnicas de reforço são frequentemente utilizadas como tema de estudo e prática apenas em países mais desenvolvidos.

Apesar de ao longo do tempo ter sido substituída pelo betão e o aço, a madeira é um dos materiais mais antigos utilizados em construções. Entretanto, atualmente a madeira tem sido notada como um material vantajoso, levando em conta sua elevada durabilidade e resistência, já que é utilizada em estruturas. Apesar da durabilidade elevada que a madeira apresenta, há de se levar em conta as

condições ambientais em que a madeira ficará exposta, já que trata-se de um material natural, e sua durabilidade é diretamente relacionada a este fator.

A utilização de reforço em vigas de madeira tem se mostrado em acelerado crescimento nos últimos anos, com um impacto econômico crescente. Isto ocorre devido a existência cada vez maior de necessidade de reabilitação e reforço em estruturas já existentes, principalmente nas mais antigas, onde em muitos casos a estrutura da edificação, para além do telhado, era constituída de madeira.

Portanto, levando em conta esta necessidade e crescimento do método, é possível observar que há um amplo campo para novos estudos e testes para aperfeiçoamento da técnica. Durante a pesquisa, as premissas foram utilizar materiais resistentes, e que conservem a execução simples desta técnica.

Para realização deste trabalho, primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de perceber as técnicas mais usuais de reforços para vigas de madeira e seus pontos positivos e negativos. A fase seguinte foi a concepção dos sistemas de reforços utilizando pré-esforço e a comparação de cada um dos sistemas para se obter a eficiência de cada um, para tal, foram submetidos a modelação numérica computacional e posteriormente a uma análise experimental em vigas de madeira novas, sem degradação.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, onde cada um apresenta um tema distinto dentro do tema de reforços estruturais para vigas de madeira, porém de âmbito comum, fazendo com que o trabalho se apresente de forma lógica desde a concepção dos sistemas de reforço até aos estudos experimentais.

Depois deste capítulo introdutório, onde são apresentados a motivação deste estudo e objetivos, é apresentado o **Capítulo 2**, que engloba toda a revisão bibliográfica para a realização deste trabalho, envolvendo os métodos de reforço mais usuais, envolvendo diferentes materiais e técnicas de aplicação, com suas vantagens e desvantagens.

No **Capítulo 3** temos a concepção das três soluções de reforço utilizando pré-esforço idealizadas pelo autor, abordando de forma simples e objetiva cada solução proposta em relação a sua implementação a uma viga já existente bem como os materiais necessários para tal.

No **Capítulo 4** é realizada a modelação numérica das vigas em conjunto com cada sistema de reforço, com o propósito de se obter a força de pré-esforço a ser aplicada nos elementos de reforço até

o limite de segurança da viga de madeira, abrangendo desde o dimensionamento das peças necessárias para o sistema de ancoragem até o comportamento conjunto do sistema.

No **Capítulo 5** temos a materialização dos três sistemas de reforço propostos, apresentando o preparo de cada viga de madeira e a instalação do sistema de reforço, bem como a instrumentação para a monitorização das vigas e dos reforços durante o ensaio até a ruína, compondo a campanha experimental e apresentando ao final dos ensaios os resultados obtidos.

Finalmente no **Capítulo 6** são feitas comparações entre os resultados dos ensaios experimentais e relatadas as conclusões obtidas através dos mesmos. Ao final do capítulo são feitas sugestões para futuros desenvolvimentos acerca do tema.



## **2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA**

Diante do cenário atual referente ao reforço estrutural, é possível observar a importância da preservação das estruturas de madeira, tanto por ser um material economicamente viável quanto pela madeira ser uma das bases mais utilizadas em construções existentes e que necessitam de preservação.

Nestes casos, onde há a necessidade de intervenção estrutural, várias técnicas de reforço para as estruturas de madeira foram desenvolvidas até aos dias de hoje, a fim de melhorar seu desempenho estrutural original. Com o desenvolvimento de novos materiais mais resistentes, as técnicas de reforço têm-se aperfeiçoado e comprovado resultados positivos. A revisão de bibliografia deste estudo aprofunda a área estrutural, mais especificamente em sistemas para reforço de elementos estruturais de madeira.

### **2.1 ADIÇÃO DE PEÇAS DE MADEIRA À SEÇÃO ORIGINAL**

Se tratando da aplicação da madeira nas estruturas, é possível observar que nos dias atuais uma das soluções mais correntes, pela sua simplicidade, é a adição de novos elementos de madeira a seção original, como ilustrado na Figura 2.1. O método consiste em fixar por meio de pregos ou parafusos novas peças de madeira a seção original, fazendo com que as peças trabalhem conjuntamente.

Para um bom funcionamento do reforço, segundo Ilharco (2012), é importante que os novos elementos a serem adicionados tenham propriedades semelhantes como resistência mecânica e módulo de elasticidade aos da seção original.

Ainda segundo o autor, quando é inviável a obtenção de madeira idêntica à existente, uma solução para atenuar a diferença é a obtenção de madeira proveniente de demolições ou o armazenamento das novas peças no mesmo ambiente da estrutura a ser reforçada, a fim de que adquiram a mesma proporção de umidade.

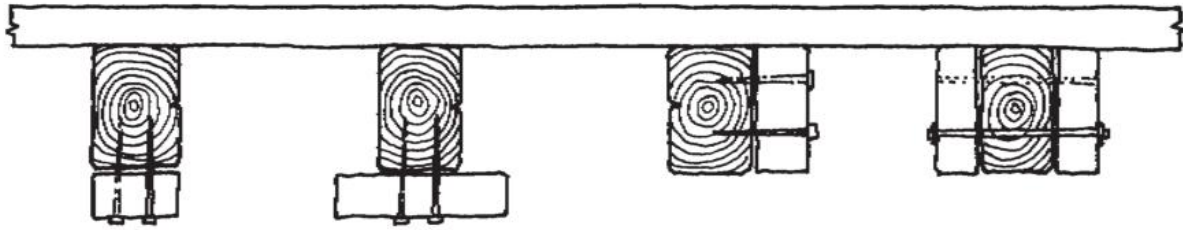


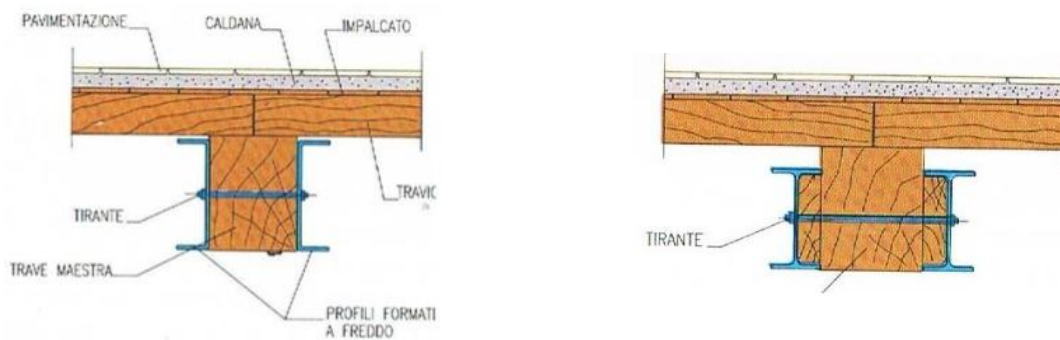
Figura 2.1 - Reforço por meio da adição de peças de madeira (Arriaga et al., 2002).

Embora o método seja de grande utilidade é notável alguns inconvenientes, sendo uma das objeções ao método o aumento da seção transversal, onde a altura útil da envolvente pode ser um parâmetro decisivo para comportar o acréscimo de altura do elemento de reforço. Outro inconveniente pode ocorrer durante a instalação do reforço, já que, segundo Arriaga et al. (2002), a seção original geralmente já é deformada, enquanto as novas peças para adicionar são retas.

## 2.2 ADIÇÃO DE PERFIS DE AÇO À SEÇÃO ORIGINAL

Outra opção de reforço amplamente utilizada e enunciada em diversos estudos é a união de perfis ou chapas de aço à seção original. Várias são as opções de perfis para a definição do reforço, tal como apresentado na Figura 2.2-a, com a ligação de perfis UPN nas faces laterais da viga, unidos através de varões.

É possível observar também uma outra opção na Figura 2.2-b, com perfis IPE com empalmes de madeira no vão do perfil IPE em contato com a face lateral da viga, elevando a resistência do sistema de reforço. As duas alternativas apresentam, segundo Carneiro (2012), incremento de rigidez e resistência à flexão da viga.



a) Perfis UPN ligados às faces laterais da viga por varões

b) Perfis IPE e empalmes de madeira ligados as faces laterais da viga por varões

Figura 2.2 – Reforço por adição de perfis UPN e IPE (Mazzolani, 1991 *apud* Carneiro, 2012).

Além das alternativas já mencionadas anteriormente, é também possível executar o reforço com cantoneiras ou perfis “L”, onde os mesmos são fixos na viga pela aba em contato com a face lateral, aumentando a inércia da seção e sobretudo a resistência à tração na face inferior. Ilustra-se a solução na Figura 2.3, onde dois perfis “L” são unidos a viga por uma barra roscada presa por porcas em suas extremidades.

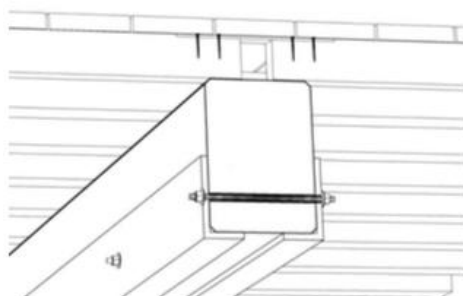


Figura 2.3 – Reforço por perfis “L” ou cantoneiras fixos na face inferior da viga (Mariani, 2004).

Por último, uma alternativa simples e eficaz é a união de uma chapa metálica à face inferior da viga, onde a mesma é fixa por meio de parafusos preferencialmente instalados com o ângulo de 45°, como ilustrado na Figura 2.4, incrementando a capacidade resistente da viga ao esforço transverso. Essa solução aumenta a capacidade à tração nas fibras inferiores da seção, fazendo com que a peça de madeira absorva na maior parte das vezes apenas os esforços de compressão e a chapa metálica os esforços de tração. Essa técnica de reforço será uma das soluções a serem estudadas, pela sua simplicidade e boa eficiência, porém como diferencial a técnica será aprimorada recorrendo ao pré-esforço da chapa de aço, utilizado ao máximo a capacidade resistente da chapa e da viga de madeira.

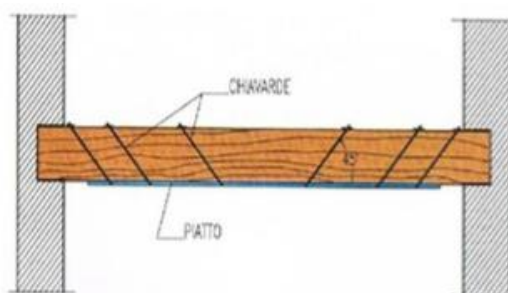
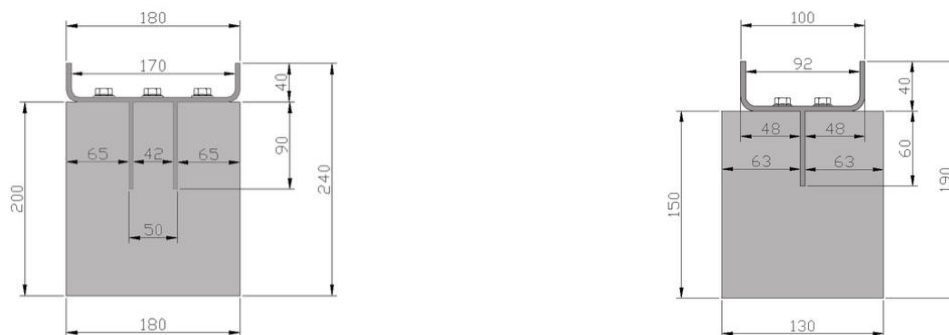


Figura 2.4 – Reforço por chapa metálica fixa na face inferior (Mazzolani, 1991 *apud* Carneiro, 2012).

No estudo realizado por Bravo (2007), se teve como intuito principal o reforço das vigas de madeira sem a necessidade de intervenção na parte inferior da seção, para fim estético em obras de reabilitação e também como solução para vigas que apresentem sua face superior em processo de deterioração e necessitem de reforço na parte superior. A solução dada pelo autor se deu em perfis

metálicos parafusados em forma de U com uma aba inferior a ser entalhada na seção de madeira. Os ensaios foram realizados em três grupos de madeira, sendo madeira laminada colada, madeira maciça e madeira proveniente da demolição de um edifício de cerca de 120 anos de idade, da espécie *Pinus*. O desenho do projeto executivo deste reforço está ilustrado na Figura 2.5.



a) Reforço para modelos de madeira laminada colada e maciça      b) Reforço para modelos de madeira antiga

Figura 2.5 – Reforço com perfil de aço na face superior da seção (Bravo, 2007).

Como resultado experimental, houve acréscimo da capacidade de carga das peças reforçadas em comparação com as peças de referência, comprovando a eficácia do reforço, conforme demonstra Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Acréscimo de capacidade de carga nos diferentes tipos de madeira.

Material	Acréscimo da capacidade de carga
Madeira laminada colada	36%
Madeira maciça	58%
Madeira proveniente de demolição	27%

### 2.3 REFORÇO DA SEÇÃO POR POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

Nos últimos anos, através do aumento da capacidade tecnológica no processamento de polímeros, surgiram os materiais compósitos conhecidos por polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*), que têm ganho notoriedade no âmbito do reforço de estruturas pela sua facilidade de implantação, elevada resistência à tração e ataques químicos e ínfimo aumento de peso à estrutura. Entre os compósitos mais utilizados para o reforço de elementos de madeira estão os FRPs constituídos por fibra de carbono (CFRP) e fibra de vidro (GFRP), que podem ser colados à viga por resinas epóxi na face inferior ou no interior do elemento estrutural.

Em estudo realizado por Dias, Branco, e Cruz (2006), foi avaliada a técnica de reforço por CFRP em vigas de madeira laminada colada com o sistema de mantas e também laminados. Tanto as mantas como os laminados de CFRP foram colados na viga na face inferior, no exterior da viga, e também no interior, entre a última e a penúltima lamela de madeira, ilustrado na Figura 2.6 para posterior comparação de eficiência.

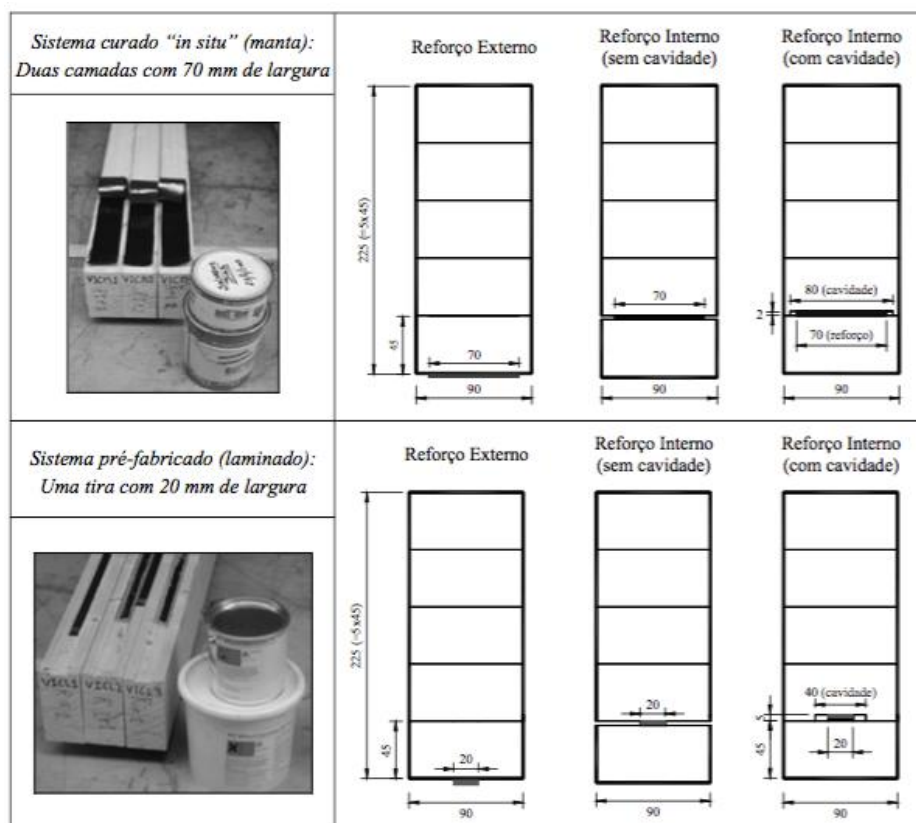
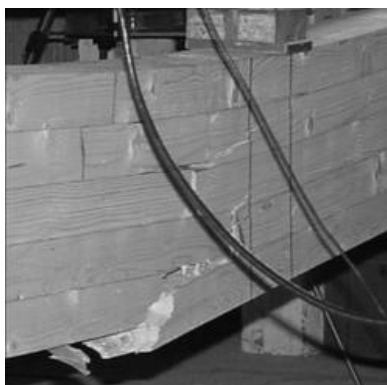


Figura 2.6 – Localização do sistema CFRP na seção transversal (Dias, Branco, e Cruz, 2006).

Após o ensaio, concluiu-se que o reforço aderido na face inferior exterior obteve melhor desempenho diante dos reforçados internamente, atingindo 52 % para a manta e 54 % de acréscimo para o laminado. Além do ganho de resistência à flexão, constatou-se também aumento da capacidade de carga no Estado Limite de Serviço, onde foram alcançadas cargas superiores com deslocamentos inferiores as vigas sem reforço.

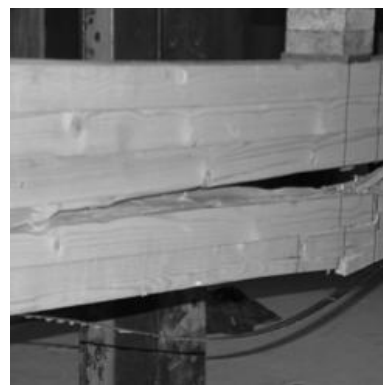
Segundo o autor, os modos de rotura foram variados de acordo com a forma de adesão reforço, tendo na viga sem reforço uma rotura por tração nas lamelas (Figura 2.7-a); as vigas reforçadas na face exterior inferior por manta tiveram rotura do reforço (Figura 2.7-b) e as reforçadas com laminado, uma por descolamento do laminado (Figura 2.7-c) e outra por esgotamento do CFRP. No caso das vigas com reforço interno, a rotura deu-se pela última lamela, tendo o reforço a continuar a funcionar mas acabando por descolar-se ou atingir a sua rotura (Figura 2.7-d, e).



a) Viga Referência



b) Sistema curado "in situ":  
Reforço externo



c) Sistema pré-fabricado:  
Reforço externo



d) Sistema curado "in situ": Reforço interno



e) Sistema pré-fabricado: Reforço interno

Figura 2.7 – Modos de ruína (Dias, Branco, e Cruz, 2006).

Também no ramo do reforço com FRP, outro material compósito eleito para reforço estrutural de madeira é a fibra de vidro (GFRP), que possui propriedades mecânicas condizentes para o reforço da madeira, tendo um módulo de elasticidade de 70 GPa, e tensão última de ruptura entre 1860 e 2680 MPa, com alongamento mínimo de ruptura de 4,5 % (ACI 440.2R, 2008). A fibra possuindo maior capacidade de deformação, resulta em um melhor desempenho no trabalho conjunto entre a viga de madeira e o reforço.

Fiorelli e Dias (2005) avaliaram o ganho de resistência do reforço de GFRP em diferentes proporções para vigas de madeira laminada colada. As vigas foram reforçadas na face inferior, sujeita à tração, e a espessura da camada de fibra foi na proporção de 1,2 % e 3,3 % da altura da viga, com seção transversal de 6 x 30 cm<sup>2</sup>. Após a realização dos ensaios de flexão foram obtidos os acréscimos de resistência. As vigas reforçadas com 1,2 % da seção obtiveram ganho de 54 % no momento fletor, enquanto que as reforçadas com 3,3 % obtiveram 103 % de ganho, concluindo que o reforço foi satisfatório.

Foi observado que o modo de rotura era iniciado pelo esmagamento das fibras na região comprimida e terminava pela rotura da viga por tração, como visto na Figura 2.8. Outro fator importante, segundo os autores, é que a rotura das vigas reforçadas deu-se de modo menos frágil, após elevado deslocamento vertical, característica importante para a confiabilidade dos elementos estruturais.



Figura 2.8 – Rotura por tração na madeira (Fiorelli e Dias, 2005).

Em estudo realizado por Yusof e Saleh (2004), modelos de vigas de madeira foram reforçados por meio de barras de GFRP entalhadas na face inferior das vigas, conforme ilustrado na Figura 2.9. A união das barras com a madeira foi executada através de adesivo epóxi.

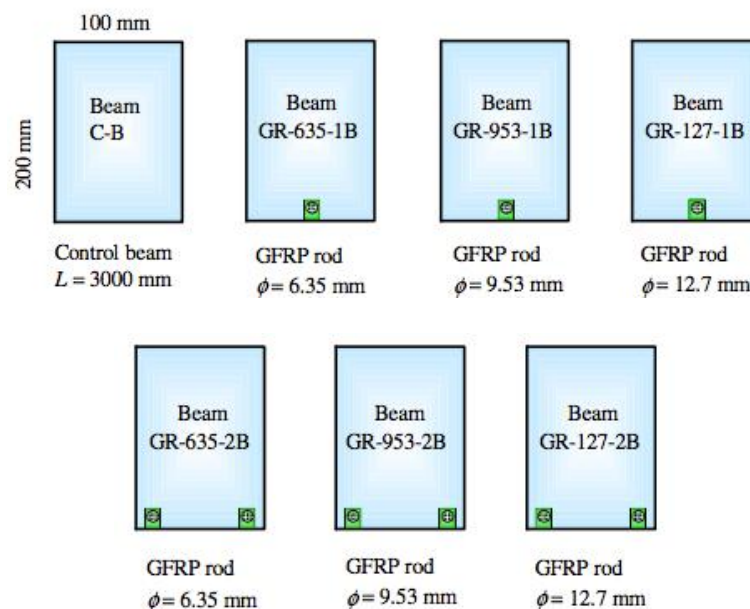


Figura 2.9 – Seção transversal das vigas reforçadas com barras de GFRP (Yusof e Saleh, 2004).

Após os ensaios à flexão, verificou-se o maior acréscimo de resistência de carga no modelo GR-127-1B, com aumento de 31,6 %, contando apenas uma barra de diâmetro 12,7 mm de GFRP centrada em seu eixo. Quanto ao aumento de rigidez, o modelo GR-127-2B obteve o melhor resultado,

com um incremento de 60,4%. Analisando estes resultados, conclui-se que o reforço por meio de GFRP é satisfatório pelo acréscimo da capacidade resistente, também apresentando bons resultados, e também atraente do ponto de vista financeiro, tendo um custo mais competitivo do que a fibra de carbono.

## 2.4 REFORÇO POR PRÉ ESFORÇO

Segundo Prata (1995 *apud* Fonte e Junior, 2006), a protensão em laminados teve início aproximadamente na década de 70 no Canadá, como uma forma de reabilitação para tabuleiros laminados pregados. A técnica surgiu quando foi observado que as pontes do país apresentavam grandes deficiências estruturais. Foi então que surgiu a possibilidade de aplicar o pré-esforço para recuperar as pontes.

Diante deste fato, foram realizadas muitas pesquisas para verificar qual seria o desempenho estrutural e qual seria a durabilidade deste sistema e os resultados foram positivos. A técnica mostrou ser um sistema economicamente competitivo em relação a outros materiais utilizados para gerar este tipo de benfeitoria.

Em estudo realizado por Lehmann (2015), foi avaliado o método de pré-esforço por arqueamento da viga. O método consiste em aplicar uma força no centro da viga até que se atinja a deformação desejada, então é feita a união do laminado de CFRP à viga por meio de resina específica, e após a cura da resina a força é retirada, fazendo com que o CFRP seja solicitado pela viga, estando com pré-esforço. O estudo foi desenvolvido com 35 modelos em tamanho reduzido para que fossem testados diferentes tipos de resinas para efetuar a colagem, e também diferentes níveis de pré-esforço aplicados aos modelos, após análise dos resultados, 10 modelos em tamanho real foram ensaiados (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Delaminação do sistema CFRP por falha de ancoragem na madeira (Lehmann , 2015).

Segundo o autor, o reforço pelos laminados de CFRP pré-esforçadas obteve um aumento de 50% para o Estado Limite Último e de até 70% para o Estado Limite de Serviço. O estudo comprovou que

o método de pré-esforço por arqueamento pode ser efetuado de forma simples e rápida, sendo uma alternativa eficiente para reforço. Esta metodologia de reforço também será estudada neste trabalho, utilizando como o autor, uma força no centro da viga para arquear a mesma e na sequência fixar por meio de parafusos uma chapa de aço, que após presa à viga é neutralizada a força central, fazendo com que a chapa absorva os esforços e seja pré-esforçada.

Seguindo a mesma vertente, Balseiro (2007) realizou um estudo com vigas reforçadas com laminados de CFRP com e sem pré-esforço, onde também fora utilizada a técnica do arqueamento para os modelos reforçados com pré-esforço. Os resultados obtidos verificaram um incremento de 19% para as vigas simplesmente reforçadas e de 26% para as vigas com pré-esforço. A diferença se deve ao fato de o pré-esforço impor à viga uma deformação de sentido contrário, denominada contra-flecha, fazendo com que o desempenho da viga tanto no ELS como no ELU sejam superiores pela deformação negativa a ser superada. Segundo a autora, o estudo permitiu concluir que houve ganho do sistema de reforço com o pré-esforço, embora esta técnica tenha fragilidade na ancoragem entre a madeira e o laminado CFRP por envolver tensões elevadas, podendo causar falha de delaminação e levar o sistema à ruína.

Bohannan (1964) desenvolveu um estudo para avaliar o comportamento de uma viga de madeira laminada colada com cabos de aço no seu interior com pré-esforço (Figura 2.11). As vigas foram fabricadas em pares, sendo uma viga controle e outra com pré-esforço, sendo depois os pares divididos em grupos. A fim de garantir semelhança nas propriedades de resistência dos pares, antes de sua montagem, as lamelas foram classificadas e separadas de modo que tanto a viga controle como a com pré-esforço, fosse constituída das lamelas com propriedades semelhantes. O grupo 1 foi constituído de 25 pares, sendo divididos em 5 grupos de diferentes níveis de pré-esforço, de 11 MPa até 19 MPa. O pré-esforço foi aplicado nas vigas imediatamente antes do ensaio de flexão, por meio de um macaco hidráulico.

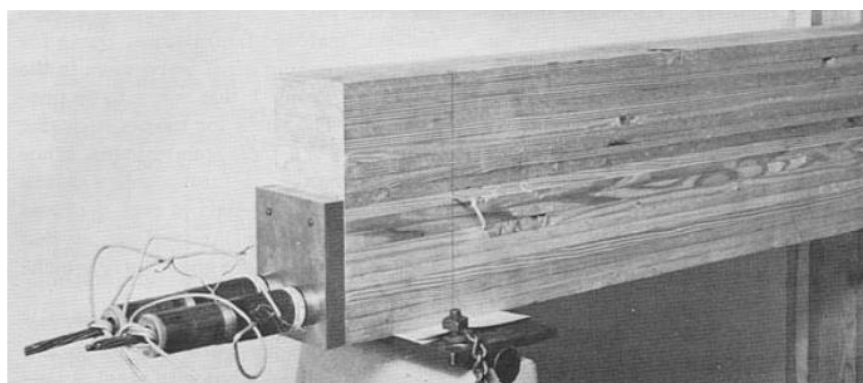


Figura 2.11 – Viga reforçada com cabos de pré-esforço (Bohannan, 1964).

Após os ensaios, notou-se que as vigas com menor força de pré-esforço obtiveram melhor desempenho. Segundo o autor, um pré-esforço de 9 MPa foi suficiente para utilizar a resistência de compressão das vigas laminadas. Os acréscimos de tensão adicionais não resultaram em efeitos benéficos. Bohannon acaba por concluir que as vigas pré-esforçadas tiveram em média 31 % de aumento na capacidade resistente se comparadas com as sem reforço, concluiu-se também que o nível de pré-esforço fez a diferença para o aumento da capacidade de carga da viga, sendo importante o controle e estimativa no nível de pré-esforço.

De Luca e Marano (2012) realizaram um estudo comparativo entre vigas de madeira laminada colada reforçadas com barras de aço na face superior e inferior, com e sem pré-esforço. O processo de reforço deu-se através de uma abertura de 20 mm x 20 mm nas faces superior e inferior da viga, que alojaram em cada uma, uma barra de aço de 10 mm, conforme ilustra a Figura 2.12, sendo solidarizadas à viga por meio de resina epóxi.

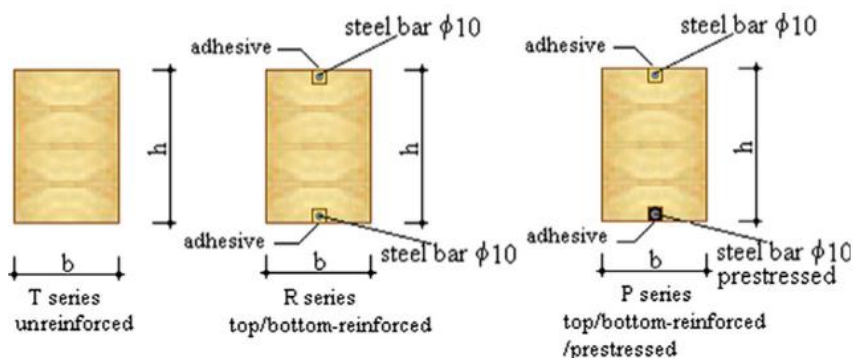


Figura 2.12 – Seção transversal das vigas reforçadas (De Luca e Marano, 2012).

As vigas foram então divididas em três séries, sendo a série T as vigas sem reforço, para referência; a série R, vigas reforçadas na face superior e inferior com uma barra de aço de 10 mm, e finalmente a série P, onde também fora reforçada com uma barra de aço de 10 mm na face superior e inferior, tendo a barra da face inferior uma pré-tensão com uma força de 18 kN antes de ser solidarizada na viga por adesivo epóxi.

Após a realização dos ensaios, constatou-se que as vigas da série R obtiveram um incremento de 48,1% quanto a capacidade de carga e 25,9% quanto a rigidez, já as da série P obtiveram um incremento de 40,2% quanto a capacidade de carga e 37,9% quanto a rigidez.

A próxima solução a ser apresentada (Figura 2.13), é comumente utilizada em pavimentos com vãos extensos que demonstrem deformação considerável. Este sistema de tirantes metálicos acaba por ser utilizado para que seja possível criar uma contra-flecha idêntica ao valor da deformação do pavimento. Desta forma ocorre então a anulação da flecha presente inicialmente (Reis e Branco 2006).

O sistema consiste em tensionar tirantes conectados a um desviador no centro do vão, fazendo com que a viga seja arqueada para cima, criando uma contra-flecha na mesma. O efeito do pré-esforço é potencializado devido à excentricidade do desviador até o eixo neutro da viga. Esse sistema de reforço também será estudado neste trabalho, porém no lugar de tirantes, serão um par de cabos de aço, com um sistema de desviadores apropriado e ancoragem diferente do método a seguir apresentado.

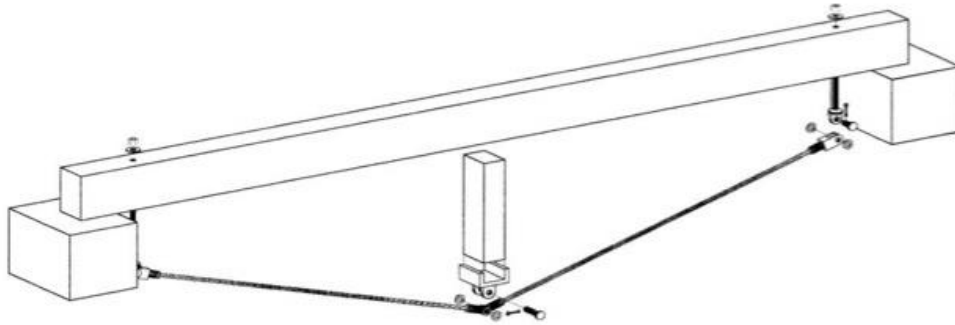


Figura 2.13 – Exemplo de aplicação do sistema de reforço com tirantes pré-esforçados (Mariani, 2004 *apud* Carneiro, 2012).

Segundo Barros e Martins (2006), a utilização deste tipo de solução já ocorre há um certo tempo em Portugal, sendo uma técnica dedicada apenas a estruturas específicas. Por ser um método que era possibilitado de acordo com a capacidade económica do proprietário do edifício, ou em casos de grande necessidade, isto se encaixava apenas para edifícios que demandavam um nível de segurança elevado.

Outro ramo possível de aplicação é o pré-esforço transversal de vigas de madeira para confecção de tabuleiros para pontes, testado experimentalmente por Fonte e Júnior (2006). O sistema do pré-esforço é composto por vigas de madeira transpassadas transversalmente com barras de aço pós-tencionadas, sendo que o fundamento do sistema consiste basicamente em uma só placa de madeira laminada pré-esforçada, ou seja uma superestrutura apoiada ao longo das extremidades, compondo longitudinalmente um meio contínuo, encarregado pela transmissão dos esforços da estrutura para os apoios. A seguir na Figura 2.14 é possível ver a representação do sistema.

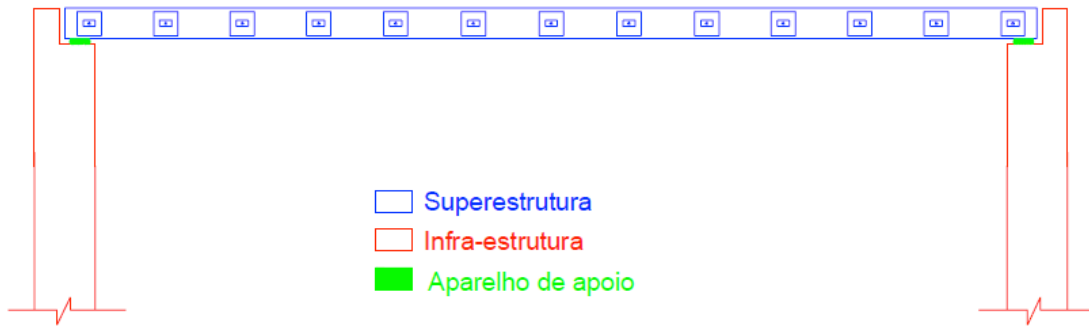


Figura 2.14 – Elementos principais da ponte de madeira laminada protendida (Fonte e Junior, 2006).

O tabuleiro foi levado já pronto para o local definitivo da ponte, tendo o módulo um peso total de 8 toneladas. O transporte foi realizado por meio de um caminhão e içado por um guindaste. A Figura 2.15 mostra o momento do içamento e a instalação do tabuleiro.



Figura 2.15 – Instalação do tabuleiro da ponte (Fonte e Júnior, 2006).

Foram realizados ensaios de carga no início e ao final dos 6 meses para avaliação do comportamento da ponte, principalmente quanto aos deslocamentos sofridos pela aplicação de carga. A Figura 2.16 demonstra o veículo utilizado no procedimento.



Figura 2.16 – Prova de carga realizada na ponte (Fonte e Júnior, 2006).

De acordo com as informações recolhidas, foi concluído que de maneira geral a protensão transversal mostrou um ótimo desempenho. Os resultados foram superiores ao que era esperado na maioria dos aspectos. Para Fonte e Júnior (2006), a ponte foi de fácil construção, aliada ao baixo custo de material e construção. O pré-esforço definitivo pode ser realizado no local, sendo a perda de pré-esforço médio após 6 meses de tráfego normal sobre a ponte de 27%, sendo realizada apenas uma reaplicação de pré-esforço.



## **3 CONCEPÇÃO DE SOLUÇÕES DE REFORÇO PRÉ-ESFORÇADAS**

### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

As soluções desenvolvidas neste estudo estão voltadas em duas vertentes principais: a primeira é a eficiência do sistema de reforço, que deve propiciar à estrutura existente uma capacidade portante superior a inicial sem prejuízos à mesma; a segunda, é o quão exequível é a solução de reforço em uma estrutura real, com base na execução dentro do laboratório.

A escolha de potencializar as soluções de reforço com pré-esforço tem base em princípios benéficos do mesmo, que já eram empregados por populares no passado, embora sem o controle da engenharia, para o reforço das ramadas da vinha, tensionando os arames a fim que a estrutura suportasse mais peso.

Mais recentemente ocupou seu uso no betão armado, promovendo ao mesmo maior durabilidade pela ausência ou redução da fissuração, inibindo o fenómeno da corrosão, menor deformação final, pelo fato que o pré-esforço equilibra grande parte do carregamento da estrutura, além de promover secções mais esbeltas, maiores vãos e estruturas mais leves (Cholfe & Bonilha, 2014). Parte desses benefícios também podem ser aplicados a estruturas de madeira, aprimorando as propriedades e garantindo maior eficiência à mesma.

O pré-esforço a ser empregado nas vigas de madeira é um meio de criar tensões de compressão em regiões antes submetidas à tração por consequência das ações na estrutura, fazendo com que a mesma possa atingir a mesma tensão de tração anterior com uma carga superior, pois primeiro o carregamento necessita neutralizar a ação de compressão exercida pelo pré-esforço, fazendo com que a estrutura ganhe uma capacidade portante superior. Outro benefício do pré-esforço é redução das deformações, que usualmente condicionam o dimensionamento de estruturas de madeira.

As soluções elaboradas têm como mencionado anteriormente, a vertente de ser exequível em obra, para isso, foram escolhidos materiais usuais da construção civil que podem ser adquiridos com certa facilidade, sendo eles o varão de aço, a chapa de aço e os cabos de aço. A seguir são apresentadas as soluções de reforço utilizando cada tipo de material.

As soluções elaboradas têm como mencionado anteriormente, a vertente de ser exequível em obra, tendo-se escolhido para isso materiais usuais da construção civil que podem ser adquiridos com certa facilidade, sendo eles o varão de aço, a chapa de aço e os cabos de aço. Na sequência são apresentadas as soluções de reforço utilizando cada tipo de material.

São três as soluções que seguidamente se propõe e analisam: i) reforço com chapa de aço pré-esforçada na face inferior; ii) reforço com varão inferior pré-esforçado; iii) reforço com cabos de aço pré-esforçados.

### 3.2 REFORÇO COM CHAPA METÁLICA PRÉ-ESFORÇADA NA FACE INFERIOR

O método de reforço com a chapa pré-esforçada foi concebido especialmente para instalação em lugares onde não seja desejável notar-se a presença do reforço, como por exemplo em estruturas localizadas imediatamente acima dos forros, ou em estruturas à vista e que não seja desejável alterar a estética do ambiente. Se trata de um tipo de reforço discreto e que pode ser revestido ou camuflado com pintura específica da mesma cor da madeira após sua instalação.

O reforço consiste em uma chapa metálica fixa à viga de madeira por meio de parafusos, estando o diferencial da técnica no pré-esforço da chapa. O procedimento de pré-esforço com as peças integradas em uma estrutura é dado colocando-se a chapa na face inferior da viga sem ligação nenhuma com a mesma. Na sequência é posicionado um macaco hidráulico no centro da viga e com auxílio do mesmo, faz-se um arqueamento na viga até o nível de contra-flecha desejado (Figura 3.1-a). Na sequência, com o macaco hidráulico ainda operante, é feita a ligação da chapa metálica à viga por meio de parafusos (Figura 3.1-b). Finalizando o processo de reforço, é recolhido o pistão do macaco hidráulico, e com isso, a viga ao querer voltar a sua posição original acaba por solicitar a chapa, fazendo com que a mesma fique tracionada, ocasionando o pré-esforço (Figura 3.1-c).

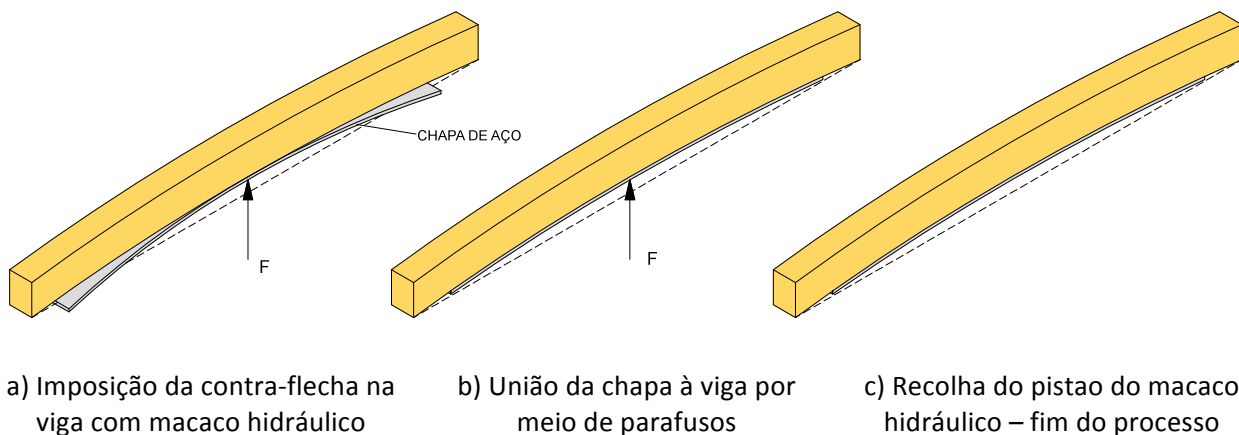


Figura 3.1 – Processo de reforço com pré-esforço da chapa metálica.

### 3.3 REFORÇO COM VARÃO INFERIOR PRÉ-ESFORÇADO

O reforço com varão inferior pré-esforçado propõe uma técnica nova para o reforço de peças de madeira, onde utiliza um material usual na construção civil que é o varão de aço A500. Esta técnica tem o diferencial de submeter o varão à sua capacidade integral, através do pré-esforço.

A técnica consiste na instalação de um varão A500 na parte inferior da viga, onde a ligação entre o varão e a viga é implementada por uma peça metálica concebida para este fim, que além de conferir a ancoragem, potencializando o efeito do pré-esforço através de uma excentricidade de 12,5 cm.

O pré-esforço é realizado através do aperto de porcas nas extremidades do varão, que tem soldados em suas extremidades parafusos M12 de classe de resistência 8.8, fazendo com que o mesmo seja tensionado até o nível desejado e transmita o esforço para a peça de madeira, que irá reagir com uma contra-flecha. Na Figura 3.2, é possível observar o esquema de montagem do reforço na viga de madeira.

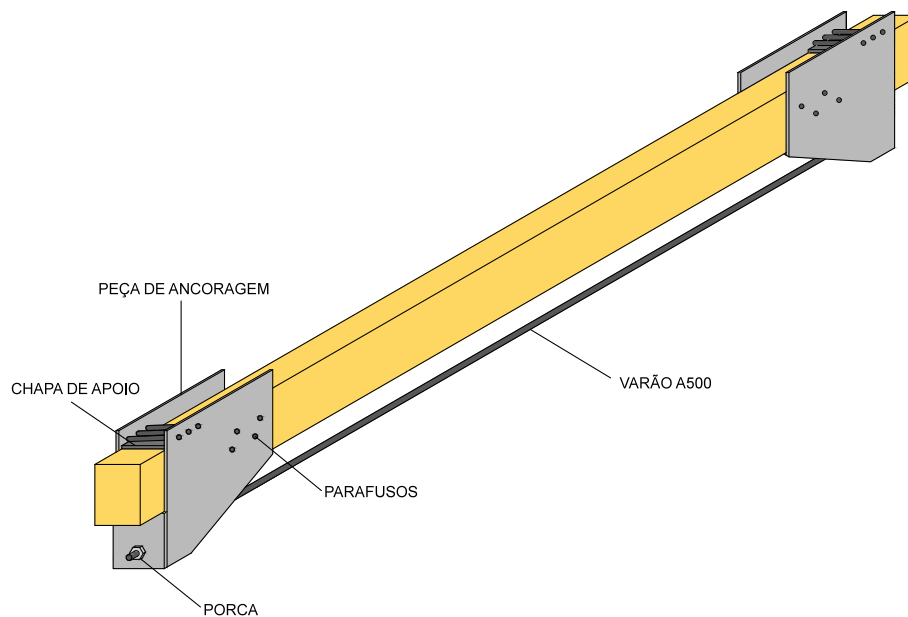


Figura 3.2 – Esquema de montagem do reforço com varão.

### 3.4 REFORÇO COM CABOS DE AÇO PRÉ-ESFORÇADOS

O reforço com cabos de aço pré-esforçados é baseado na instalação de dois cabos de aço ao longo da viga de madeira, com espaçamento adequado à viga de madeira (no caso dos presentes

ensaios, 13 cm entre si). Os cabos são ancorados em suas extremidades em parafusos de olhal, onde os mesmos são presos através do rosqueamento de uma porca em um perfil UPN, conforme representação na Figura 3.3.

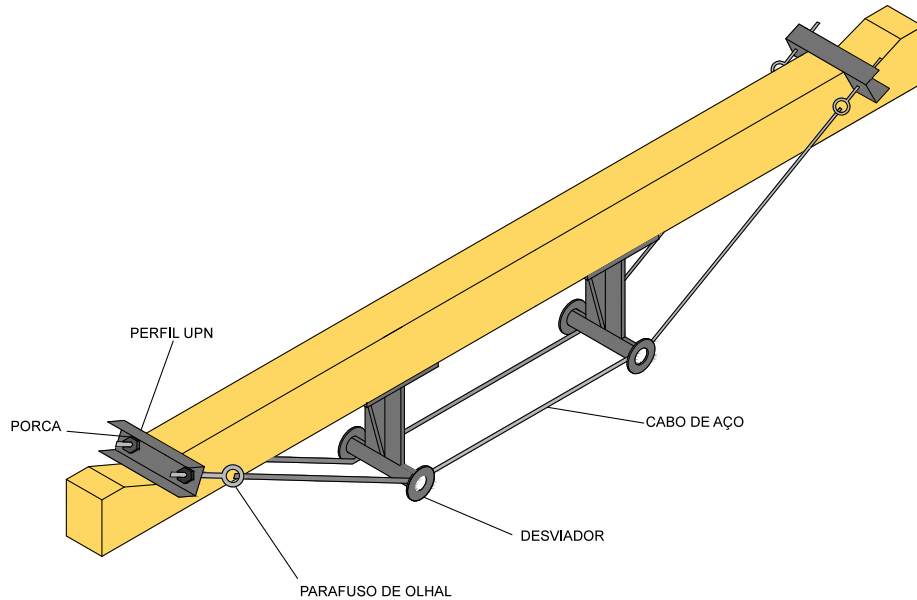


Figura 3.3 – Esquema de reforço com cabos pré-esforçados.

Após o posicionamento dos componentes de reforço, o pré-esforço é dado com o aperto das porcas inseridas no parafuso de olhal, fazendo com que a rosca do parafuso entre cada vez mais para dentro do perfil UPN e por consequência tracione o cabo de aço. A ação do pré-esforço é potencializada pela excentricidade aplicada pelo desviador, que faz com que haja no presente caso uma distância de 20 cm entre os cabos e a viga, totalizando uma excentricidade de 25,5 cm até seu eixo neutro.

## 4 ANÁLISE NUMÉRICA E DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE REFORÇO

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A seguir na Figura 4.1 são apresentadas as vigas a serem reforçadas, um total de seis vigas da espécie Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster*) empilhadas em dois paletes para a conservação das mesmas acima do solo.



Figura 4.1 – Vigas a serem ensaiadas.

Na Tabela 4.1 temos a divisão das vigas, sendo cada uma nomeada de acordo com o grupo de reforço que irá pertencer, juntamente com suas propriedades dimensionais.

Tabela 4.1 – Nomeação das vigas e propriedades dimensionais.

Sistema de reforço pré-esforçado	Nomeação das vigas	Propriedades dimensionais (cm)		
		Base	Altura	Comprimento
Chapa de aço	VCH1	8,0	11,2	266,5
	VCH2	8,1	10,5	268,0
Varão de aço	VV1	8,3	11,2	264,5
	VV2	8,0	11,3	264,0
Cabos de aço	VC1	8,5	10,9	265,3
	VC2	8,1	10,5	265,3

O comportamento físico das vigas de madeira com os elementos de reforço foi analisado com auxílio de modelação numérica computacional, por meio da análise por elementos finitos, com a utilização do software *Robot Structural Analysis Professional*. Foram levados em consideração os efeitos de segunda ordem, originados por deformações nos elementos sob ação de forças, originando a não linearidade geométrica, denominada análise P-Delta.

Por meio de análise experimental de vigas sem reforço realizadas no passado (com os resultados apresentados no Capítulo 5), foi possível obter dados necessários para a modelação numérica das vigas reforçadas, bem como para validação da modelação. De regra geral, a força de pré-esforço nos modelos reforçados não excederá 80% da resistência característica à flexão da madeira, por medida de segurança. Conforme ensaios realizados nos modelos de referência no Item 5.3, foi estabelecido que a classe média de resistência das vigas é C30, valor que será utilizado na modelação das vigas com seus respectivos reforços. Outro aspecto importante na modelação foi a consideração da ortotropia da madeira, que apresenta propriedades mecânicas únicas e independentes em cada um dos três eixos espaciais.

As modelações e os ensaios seguem o padrão de ensaio dado pela norma EN 408:2010+A1:2012, onde é estabelecido que o vão livre deve ser de 18 vezes a altura da peça e o carregamento deve ser realizado em dois pontos, espaçados simetricamente em 6 vezes a altura da peça. Dado que as vigas a serem ensaiadas possuem altura de 11 cm, temos a disposição do ensaio e modelação dada pela Figura 4.2.

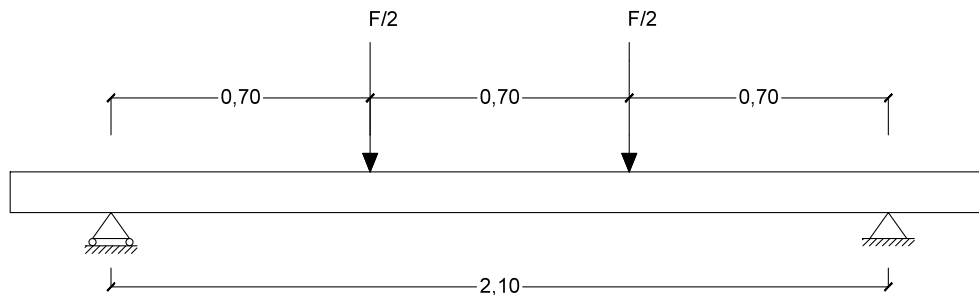


Figura 4.2 – Disposição das vigas para ensaio (medidas em m).

Na sequência são apresentadas as modelações numéricas referentes às peças de ancoragem utilizadas nos reforços e também das vigas de madeira com os reforços instalados.

## 4.2 MODELAÇÃO NUMÉRICA DO REFORÇO COM CHAPA DE AÇO

A discretização do modelo foi executada sendo a viga de madeira um painel com malha de elementos finitos de casca, com uma chapa de aço S275 fixa à viga na sua face inferior por meio de parafusos com 10 cm de comprimento, conforme Figura 4.3.

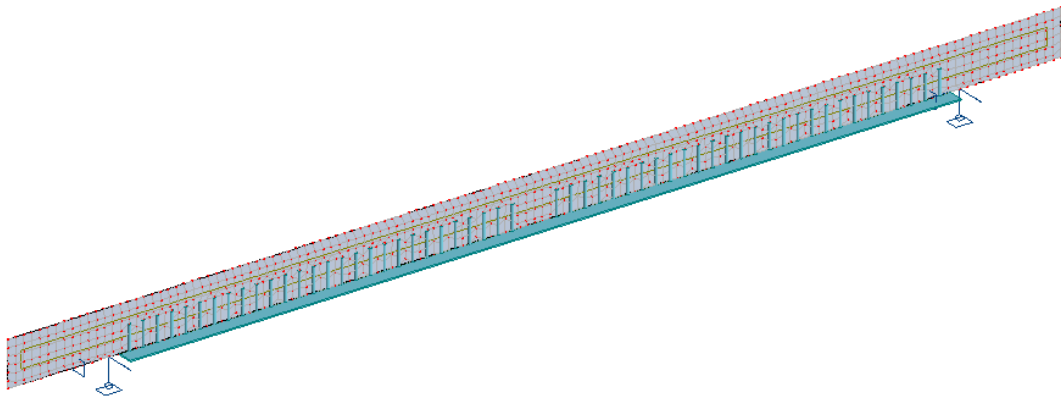


Figura 4.3 – Discretização da viga reforçada por meio de chapa de aço.

O número final de parafusos foi estabelecido pela resistência última da chapa de aço S275, com tensão última à tração  $f_u = 430$  MPa estabelecido pela norma NP EN 1993-1-1 (2010), conferindo à chapa uma força de até 103 kN. Com a força solicitante, o cálculo dos parafusos foi executado pela norma EN 1995-1-1 (2004), realizadas as verificações de segurança, partiu-se para o catálogo dos parafusos disponíveis. Foi escolhido o parafuso HBS 8 x 100, produzido a partir de aço carbônico com zincagem galvânica branca, com resistência característica ao corte de 3,96 kN (Rothoblaas, 2014), sendo adotados 28 parafusos em cada lado da viga, totalizando 56 parafusos.

A modelação do reforço com chapa metálica foi compreendida em duas fases, sendo a primeira fase a aplicação do pré-esforço na chapa e a segunda fase, a partir da geometria da viga deformada da primeira fase, consistiu na aplicação de carga até atingir a tensão da resistência característica à flexão da madeira. A seguir na Tabela 4.2 são estabelecidos os dados de entrada para a análise numérica.

Tabela 4.2 - Dados de entrada para modelagem numérica da viga com sistema de reforço.

Dados de entrada	
Classe de resistência da madeira:	C30
Tensão máxima nas fibras:	24 MPa (30 MPa x 80%)
Elemento de reforço:	Chapa de aço S275
	e = 3 mm
	L = 2,05 m

Na primeira fase a viga e a chapa em sua 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 Figura 4.4, fazendo com que a viga se deforme com 12,8 mm de contra-flecha.

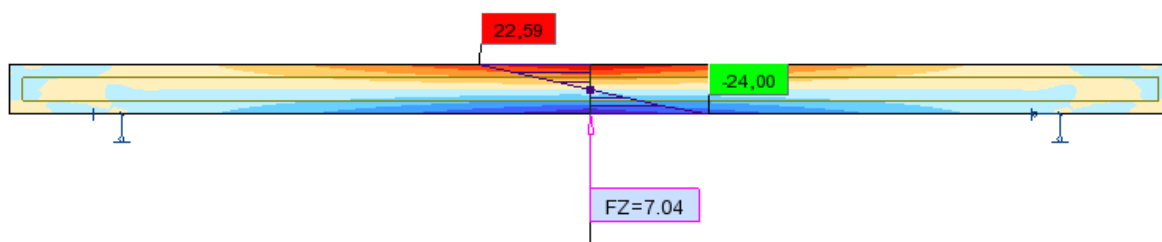


Figura 4.4 – Aplicação de contra-flecha na viga.

Sendo alcançado o deslocamento desejado, a força a meio do vão continua constante e são inclusos os parafusos que fazem a união entre a chapa de aço e a viga já deformada. Após a união a força a meio vão é neutralizada e a viga ao tender retornar para sua forma original solicita a chapa de aço, pré-esforçando. O resultado final desta fase é a viga com uma contra-flecha residual de 6,4 mm, e a chapa com uma tensão de pré-esforço de 128,77 MPa, conforme Figura 4.5.

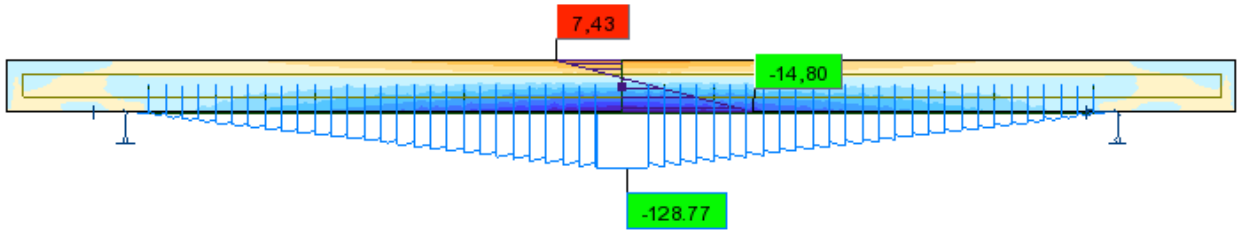


Figura 4.5 – Pré-esforço da chapa de aço.

Na segunda fase, após o pré-esforço da chapa, a viga é carregada incrementalmente até que seja atingida a tensão de resistência característica à flexão da madeira nas fibras mais solicitadas, para a obtenção do valor da carga correspondente. Como nos casos anteriores, a análise P-Delta foi utilizada para a consideração da não linearidade geométrica. Conforme ilustra a Figura 4.6, a tensão de 30 MPa foi obtida com a aplicação de uma força de 24,34 kN, resultando também em uma flecha de 11,3 mm e força de 102,25 kN na chapa.

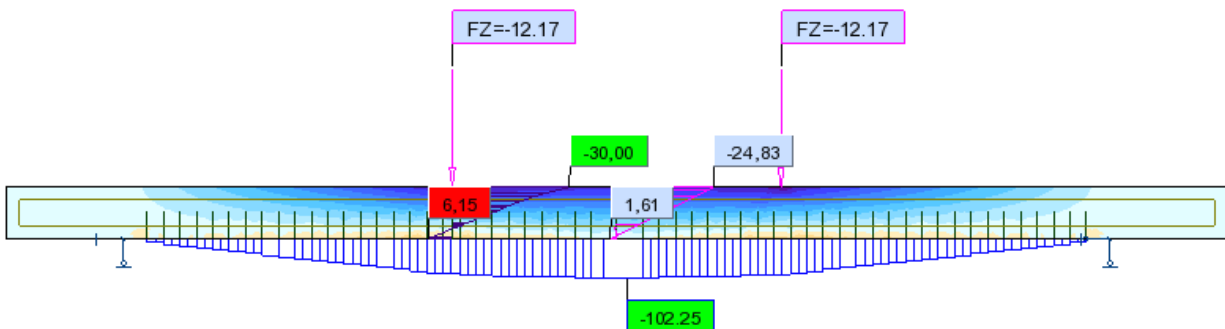


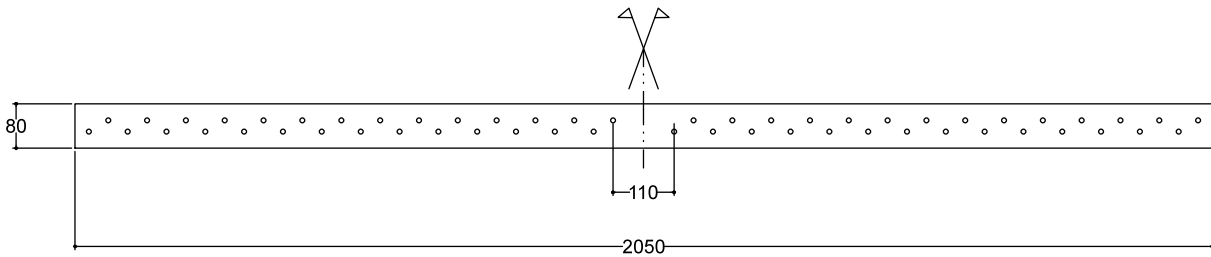
Figura 4.6 – Carga correspondente para tensão máxima admissível no modelo.

Na sequência temos resumido na Tabela 4.3 os valores obtidos na modelação numérica.

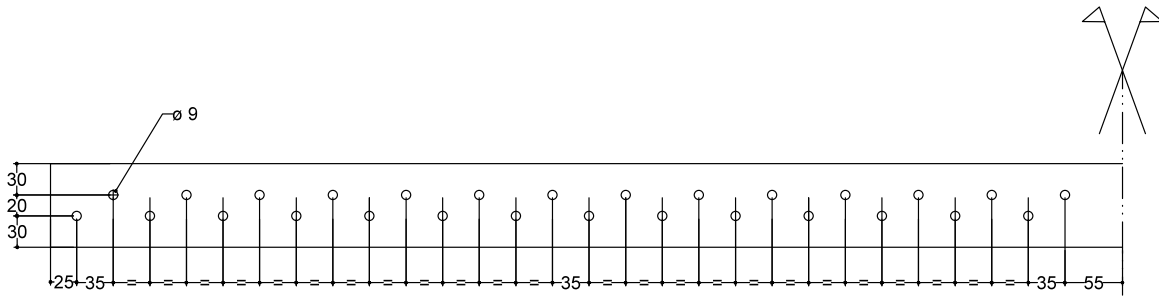
Tabela 4.3 - Resumo da modelação numérica para o sistema de reforço com chapa de aço.

<b>1ª Fase - Pré-esforço</b>	
Tensão de pré-esforço:	128,77 MPa
Tensão máxima na madeira:	24 MPa
Contra-flecha expectável:	- 6,4 mm
<b>2ª Fase – Carregamento</b>	
Carga aplicada:	24,34 kN
Tensão máxima na madeira:	30 MPa
Flecha expectável:	11,3 mm

Na Figura 4.7, apresenta-se o detalhe da chapa metálica com as devidas furações. O número de furos na chapa é consequência do número de parafusos necessários para resistir a força de rotura da chapa, a geometria da furação em ziguezague foi escolhida para otimização da seção transversal.



a) Dimensões da chapa de aço de reforço



b) Pormenor da furação da chapa de aço

Figura 4.7 – Chapa de aço a ser utilizada no reforço (medidas em mm).

Na sequência, a Tabela 4.4 apresenta o resumo de material para reforço com a chapa de aço pré-esforçada.

Tabela 4.4 - Resumo de elementos para instalação do reforço com chapa de aço pré-esforçada.

Material	Unidades
Chapa de aço S275 3mm	2,05 m
Parafuso HBS 8 x 100	56

### 4.3 ANÁLISE DO REFORÇO COM VARÃO INFERIOR

A modelação do reforço com o varão inferior pré-esforçado envolve a análise em separado da peça responsável pela ancoragem do varão, e a análise como um todo da viga de madeira com o reforço.

#### 4.3.1 Modelação Numérica da Viga Reforçada

Dadas as propriedades dos materiais e geometrias correspondentes, a viga de madeira foi modelada juntamente com seu reforço. O processo de análise numérica foi iterativo, pela análise P-Delta, levando em conta as deformações sofridas com a aplicação das forças.

A discretização do modelo foi executada sendo a viga de madeira um painel com malha de elementos finitos de casca com um varão de aço A500 de 10 mm de diâmetro fixo a viga, submetido a pré-esforço. A modelação foi realizada em fases, sendo a primeira fase a aplicação do pré-esforço e a segunda fase, deu-se a partir da geometria da viga deformada da primeira fase com a aplicação de carga até a tensão de resistência característica à flexão da madeira.

Tabela 4.5 – Dados de entrada para modelagem numérica da viga com sistema de reforço.

Dados de entrada	
Classe de resistência da madeira:	C30
Tensão máxima nas fibras:	24 MPa (30 MPa x 80%)
Elemento de reforço:	Varão A500 Ø 10 L = 1,80 m

Na primeira fase, o principal objetivo foi obter o valor da força de pré-esforço necessária para que o nível de tensão máximo nas fibras fosse obtido, conforme ilustra a Figura 4.8.

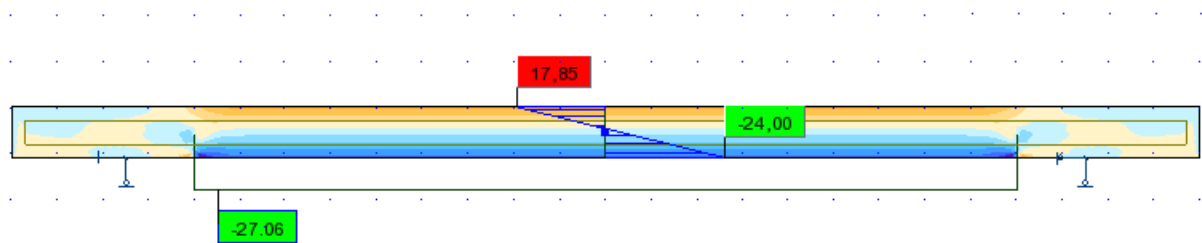


Figura 4.8 – Tensão na viga resultante do pré-esforço do varão.



Na sequência temos resumido na Tabela 4.6 os valores obtidos na modelação numérica.

Tabela 4.6 – Resumo da modelação numérica para o sistema de reforço com varão pré-esforçado.

<b>1ª Fase - Pré-esforço</b>	
Força de pré-esforço:	27,06 kN
Tensão máxima na madeira:	24 MPa
Contra-flecha expectável:	-17,2 mm
<b>2ª Fase – Carregamento</b>	
Carga aplicada:	22,26 kN
Tensão máxima na madeira:	30 MPa
Flecha expectável:	15,4 mm

#### 4.3.2 Modelação Numérica da Peça de Ancoragem do Varão

No que concerne ao dimensionamento das peças de ancoragem, tendo em conta a geometria pretendida, conforme Figura 4.11, e a resistência do aço a ser utilizado para a materialização da peça, a análise numérica foi determinante para estabelecer a espessura da chapa a ser utilizada para resistir a força de 50 kN, dada pela resistência última de um varão A500 com 10 mm de diâmetro, mais uma margem de segurança.

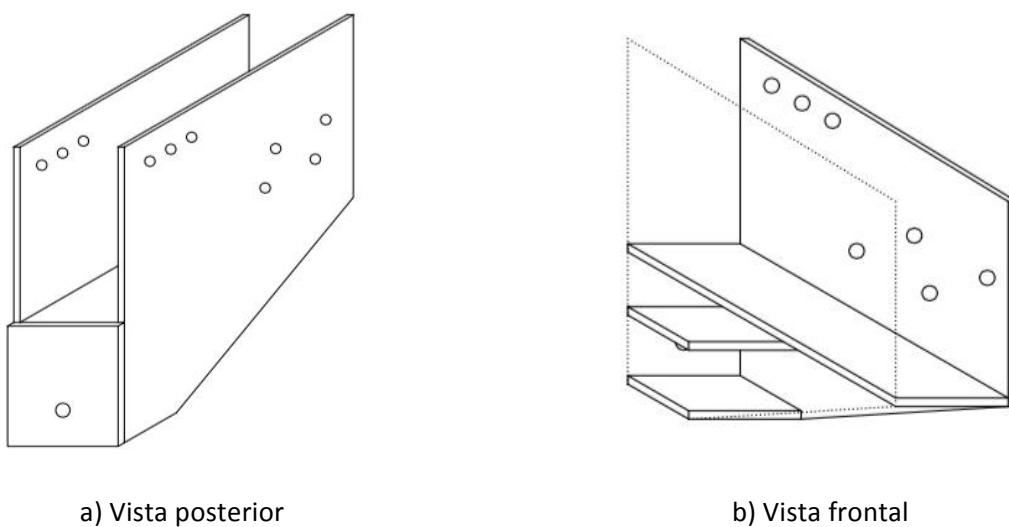


Figura 4.11 – Representação da peça de ancoragem do varão pré-esforçado.

Adotaram-se como dados de entrada para modelação a tensão de cedência do aço da chapa em 235 MPa (aço S235) e a força  $F = 50 \text{ kN}$ , aplicada simulando efeito do varão, conforme Figura 4.12.

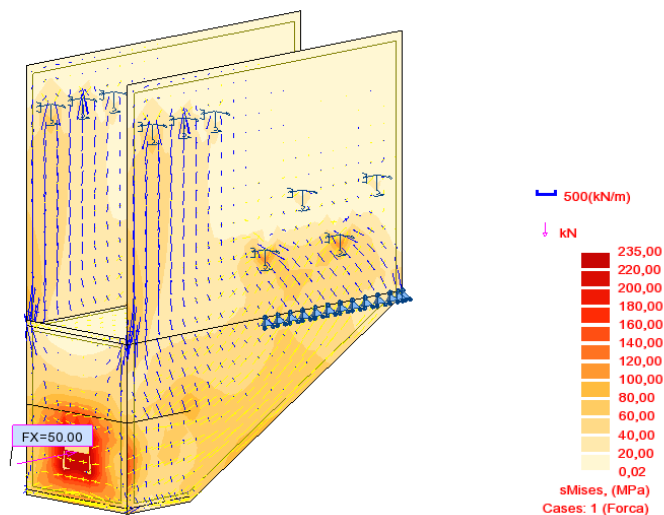


Figura 4.12 – Modelação numérica da chapa de ancoragem do varão.

A peça de ancoragem aqui apresentada resulta de um processo iterativo de estudo da melhor geometria das chapas metálicas e seus pontos de fixação. Através da modelação numérica da peça, ilustrada pela Figura 4.12, foi possível estabelecer os pontos de ancoragem mais benéficos e o melhor arranjo geométrico da peça para favorecer a trajetória das forças a serem encaminhadas aos apoios da peça.

Foi possível estabelecer a espessura da chapa em 6 mm. Somente onde o varão é ancorado será necessário o uso de uma chapa extra, funcionando como uma anilha, devido ao elevado nível de tensão aplicado pelo varão. Decidiu-se também que o principal apoio para a reação vertical será efetuado por três parafusos alinhados na face superior da peça. Entre os parafusos e a madeira será encaixada uma chapa metálica, com intuito de dissipar as tensões no apoio e não causar esmagamento local da madeira. Mostra-se o resultado final da peça executada em serralheria na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Chapa de ancoragem do varão executada em serralheria.

A Tabela 4.7 apresenta o resumo dos elementos necessários para o sistema de reforço com o varão de aço pré-esforço, validados pela análise numérica.

Tabela 4.7 – Resumo de elementos para instalação do reforço com varão de aço pré-esforçado.

<b>Material</b>	<b>Unidades</b>
Varão A500 $\varnothing$ 10	1,83 m
Peça de ancoragem	2
Parafuso 8.8 M12 x 50	2
Parafuso 8.8 M10 x 120	14
Porca M10	14
Porca M12	2

#### 4.4 ANÁLISE DO REFORÇO COM CABOS DE AÇO

Para o reforço do modelo por cabos de aço, foi necessária a modelação das peças para a aplicação do pré-esforço em análises separadas, para além do sistema de reforço instalado na viga. A seguir são apresentadas as modelações numéricas das peças de ancoragem e afastador, além da análise como um todo da viga de madeira com o reforço dos cabos de aço.

#### 4.4.1 Modelação Numérica da Viga Reforçada

A discretização do modelo, dada pela Figura 4.14 compreendeu a inserção dos cabos ligados em suas extremidades a viga de madeira e afastados do centro por um afastador, a análise não-linear P-Delta foi utilizada tanto na fase de pré-esforço quanto na fase de carregamento da viga reforçada. A modelação foi realizada em fases, sendo a primeira fase a aplicação do pré-esforço e a segunda fase, deu-se a partir da geometria da viga deformada da primeira fase com a aplicação de carga até a tensão de resistência característica à flexão da madeira.

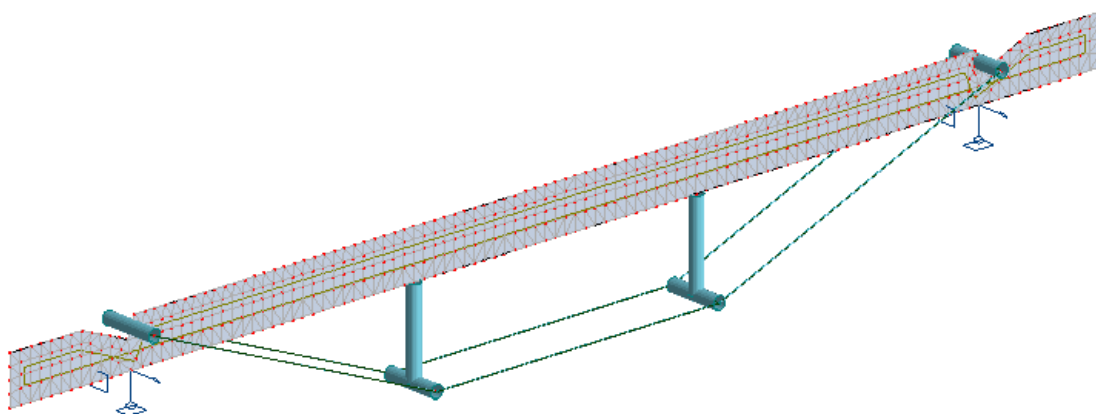


Figura 4.14 – Modelação numérica da viga reforçada por cabos de aço pré-esforçados.

Tabela 4.8 – Dados de entrada para modelagem numérica da viga com sistema de reforço.

<b>Dados de entrada</b>	
Classe de resistência da madeira:	C30
Tensão máxima nas fibras:	24 MPa (30 MPa x 80%)
Elemento de reforço:	Cabo de Aço 19 x 6+ 1 Ø 8
	E = 90 GPa
	A = 24 mm <sup>2</sup>

Na primeira fase, o principal objetivo foi obter o valor da força de pré-esforço necessária nos cabos para que o nível de tensão máxima nas fibras fosse obtido. Conforme Figura 4.15, o nível de tensão desejado foi alcançado com uma força de 7,03 kN em cada cabo de aço, com contra-flecha de 15,2 mm.

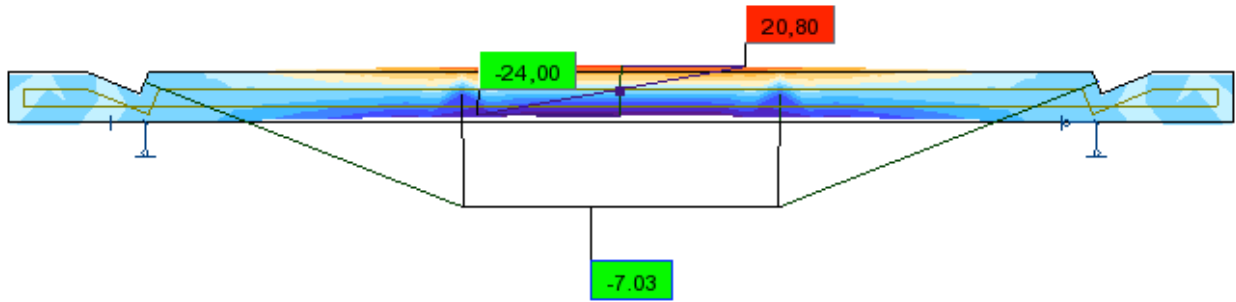


Figura 4.15 – Obtenção de força de pré-esforço nos cabos de aço.

Na fase seguinte, o carregamento foi dado de forma incremental com análise P-Delta, utilizando a geometria deformada da fase de pré-esforço. O carregamento necessário para atingir a tensão característica de 30 MPa nas fibras da madeira foi de 42,20 kN, com flecha de 13,1 mm, conforme Figura 4.16.

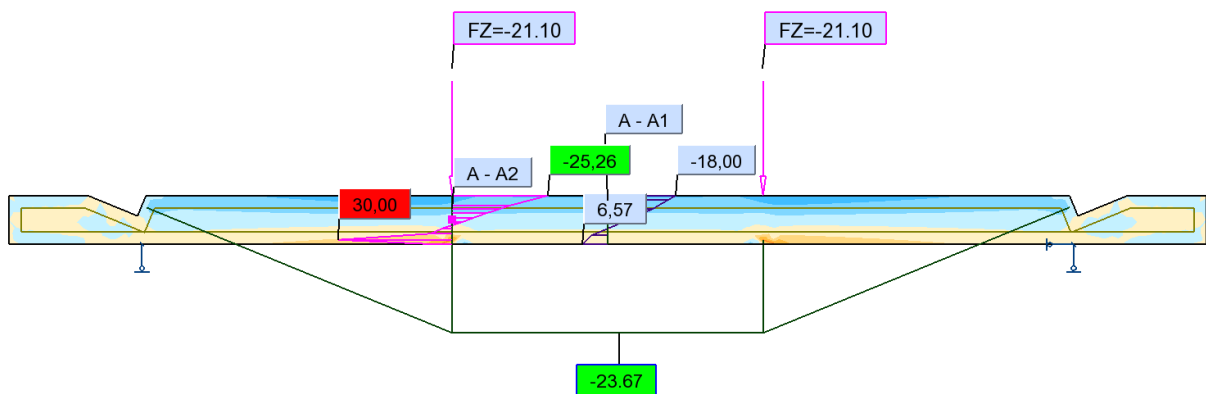


Figura 4.16 – Carregamento para obtenção da tensão de 30 MPa na madeira.

Na sequência temos resumido na Tabela 4.9 os valores obtidos na modelação numérica.

Tabela 4.9 – Resumo da modelação numérica para o sistema de reforço com cabos de aço.

<b>1ª Fase - Pré-esforço</b>	
Força de pré-esforço:	7,03 kN
Tensão máxima na madeira:	24 MPa
Contra-flecha expectável:	- 15,2 mm
<b>2ª Fase – Carregamento</b>	
Carga aplicada:	42,20 kN
Tensão máxima na madeira:	30 MPa
Flecha expectável:	13,1 mm

## 4.4.2 Modelação Numérica das Peças de Aplicação do Pré-Esforço

### 4.4.2.1 Afastador Para Cabos de Pré-esforço

A peça responsável por dar excentricidade entre a viga e os cabos de aço é denominada afastador, ilustrado na Figura 4.17. Esta peça foi modelada a fim de se obter a espessura da chapa de aço a ser utilizada e também garantir a estabilidade global da peça quando sujeita as ações de utilização.

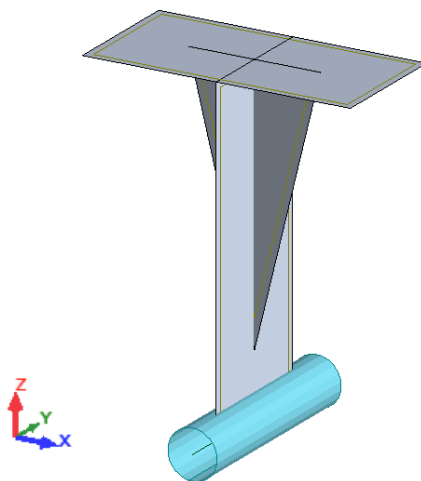


Figura 4.17 – Afastador para os cabos de aço.

As forças  $F_z$  e  $F_x$  foram obtidas primariamente na modelação da viga com o reforço dos cabos, sendo  $F_z$  a reação vertical dos cabos no afastador e  $F_x$  a componente da força de atrito horizontal causada pelos cabos tanto na fase de pré-esforço quanto na fase de carregamento da viga. Para modelagem do afastador foi estabelecido uma chapa de aço S235 com patamar de cedência de 235 MPa e forças  $F_x = 2,50$  kN e  $F_z = 12,15$  kN.

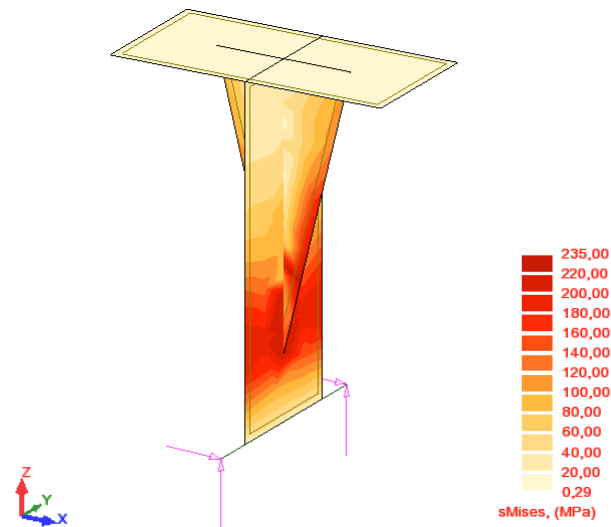


Figura 4.18 – Modelação numérica do afastador.

Como resultado da modelação dada na Figura 4.18, notou-se ser essencial a presença de enrijecedores na direção dos esforços causados pelo atrito do cabo com o afastador, para suportar a tensão de cedência do aço. Com base nesta informação, a espessura das chapas adotada foi de 8 mm.

É possível observar na Figura 4.19 o resultado final da peça executada em serralharia.



Figura 4.19 – Desviador para cabos de aço pré-esforçados.

#### 4.4.2.2 Peça para Ancoragem dos Cabos de Pré-esforço

A peça para ancoragem dos cabos de pré-esforço consiste em um perfil metálico UPN 50x38x5 tendo sido produzida com aço de resistência desconhecida. Foi então adotado na modelação numérica a

resistência do aço S235. A peça esquematizada na Figura 4.20 será acomodada e fixa por dois parafusos na zona junto aos apoios, em um entalhe executado na madeira para este fim conforme representação esquemática do reforço na Figura 3.3.

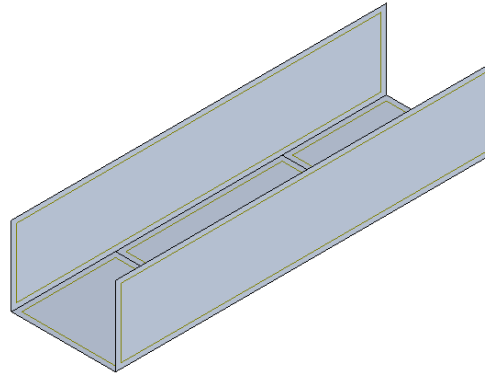


Figura 4.20 – Perfil UPN para ancoragem dos cabos de aço.

A força estabelecida para a modelação foi adotada como a resistência última do cabo de aço a ser pré-esforçado multiplicado por coeficiente de segurança, superestimando a força no cabo e mantendo níveis de tensão seguros a fim de evitar a cedência no perfil UPN. O apoio da peça foi definido como elástico, com base no módulo de elasticidade da madeira C30, de 12000 MPa. Para modelação do perfil UPN, o aço utilizado foi o S235, com um patamar de cedência de 235 MPa e duas componentes de força  $F_z = 35$  kN localizadas onde serão ancorados os cabos de aço.

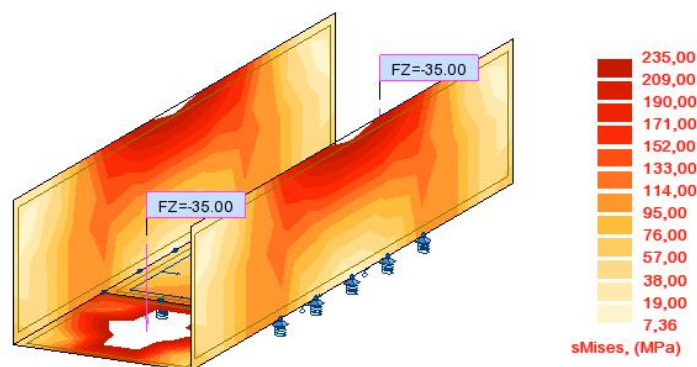


Figura 4.21 – Primeira modelação numérica do perfil UPN.

Na primeira modelação numérica dada pela Figura 4.21 foi perceptível que o nível de tensões no meio da aba do perfil UPN foi superior à cedência do aço S235. Por essa razão foi proposto um reforço consistindo em duas chapas metálicas com 80 x 35 mm com 4 mm de espessura a serem soldadas nas faces laterais do perfil, abrangendo o comprimento da viga, conforme Figura 4.22.

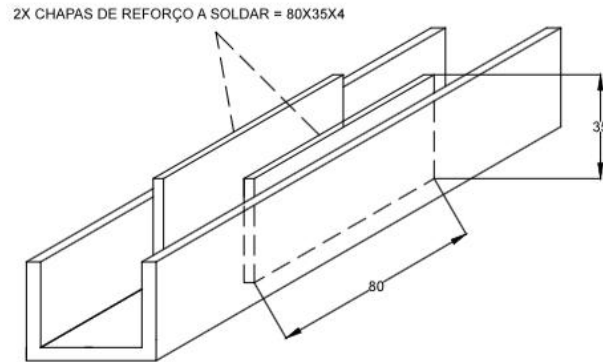


Figura 4.22 – Projeto de reforço para perfil UPN.

Na segunda modelação numérica dada pela Figura 4.23, o perfil com o reforço proposto apresenta uma diminuição substancial de tensões na zona que antes ultrapassava o patamar de cedência, sendo então aprovada a proposta de reforço.

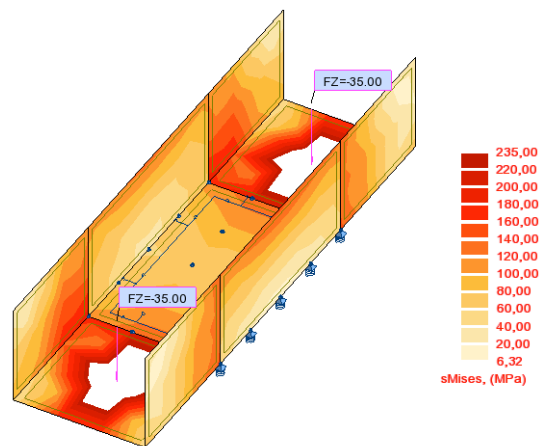


Figura 4.23 – Segunda modelação numérica do perfil UPN.

Na Figura 4.24, é possível observar o resultado final da peça executada em serralharia.

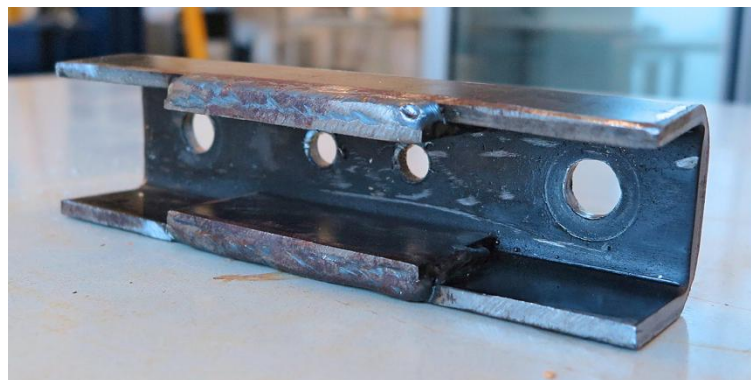


Figura 4.24 – Perfil de ancoragem UPN reforçado.

A seguir na Tabela 4.10 temos o resumo dos elementos necessários para o sistema de reforço com cabos de aço pré-esforçados, validados pela análise numérica.

Tabela 4.10 – Resumo de elementos para instalação do reforço com cabos de aço pré-esforçados.

<b>Material</b>	<b>Unidades</b>
Cabo de aço 19 x 6 + 1 Ø 8mm	13 m
Perfil UPN 50 x 38 x 5	2
Desviador	2
Parafuso de olhal M12	2
Parafuso M12 classe 8.8	2
Porca de olhal M12	2
Porca M12	4

#### 4.5 COMPARATIVO ENTRE AS MODELAÇÕES

Realizada a etapa de modelação numérica, podemos comparar com base nos resultados obtidos a eficiência de cada tipo de reforço para uma madeira de classe de resistência C30, ilustrados na Tabela 4.11, sendo um parâmetro importante para prever o comportamento real das vigas reforçadas nos ensaios experimentais a serem realizados.

Tabela 4.11 – Comparativo entre resultados da modelação numérica.

<b>Tipo de reforço</b>	<b>Excentricidade (cm)</b>	<b>Força de pré-esforço (kN)</b>	<b>Carga máxima (kN)</b>
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

Como se pode observar na Figura 4.25, quanto menor a excentricidade, maior é a força de pré-esforço. Porém uma força maior de pré-esforço não implica necessariamente em 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 a força de pré-esforço, mas também a sua excentricidade. Outro fator que afeta o seu efeito é o posicionamento dos afastadores 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.

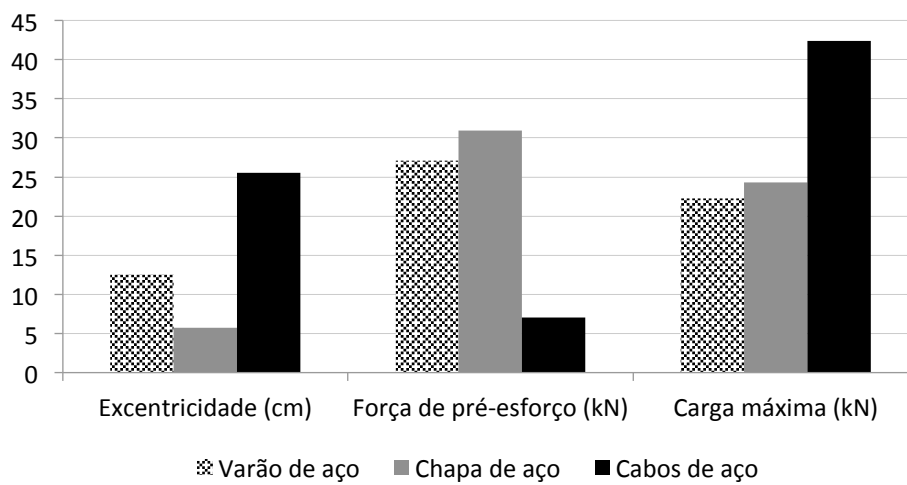


Figura 4.25 – Comparativo entre resultados da modelação numérica.



## **5 CAMPANHA EXPERIMENTAL**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

A primeira série de vigas a serem ensaiadas foram as de vigas sem reforço, para efeito de comparação com as vigas reforçadas, servindo também para validação e calibração dos modelos numéricos do Capítulo 4. As vigas da série referência (VR) não foram ensaiadas no âmbito deste trabalho, mas sim meses antes como trabalho a ser desenvolvido para a cadeira de Estruturas de Madeira desta Universidade, os ensaios foram acompanhados pelo autor desta dissertação e como as vigas são de mesma espécie e tem semelhança dimensional, foram utilizadas como referência.

Na segunda série de ensaios, foram submetidos a análise experimental, as três técnicas de reforço envolvendo pré-esforço e já apresentadas no Capítulo 4. Estas técnicas envolvem o recurso do varão de aço, chapa de aço e cabos de aço. Para cada técnica foram destinados dois modelos de vigas a serem ensaiados.

É convencionado neste trabalho que a denominação para a face da viga onde estão presentes os LVDTs seja “frontal”, e parte traseira a oposta.

A taxa de carregamento das vigas em todos os ensaios foi estabelecida em 0.1 mm/s, seguindo a mesma taxa de carregamento utilizada nas vigas não reforçadas.

### **5.2 CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS VIGAS DE MADEIRA**

Antes da atribuição do tipo de reforço a ser instalado em cada modelo, foi especialmente importante submeter as vigas a serem reforçadas a uma inspeção visual, a fim de determinar a classe de qualidade da madeira. As fichas de inspeção estão localizadas no Anexo A.

No caso deste estudo, a madeira utilizada foi da espécie Pinho Bravo, e a respectiva norma para classificação visual utilizada foi a NP 4305, que atribui 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, de acordo com correlação estabelecida na norma NP EN 1912.

É atribuída à classe de qualidade “EE” a classe de resistência C35, e a classe “E” a classe de resistência C18. Porém na norma NP EN 1912, que atribui a correlação, somente a classe “E” é reconhecida, impedindo a atribuição de classe de resistência C35 a classe “EE”, embora tenha classificação de qualidade presente na norma NP 4305.

Diante desta situação, o autor desta dissertação atribuiu valores de classe de resistência de acordo com a norma NP EN 1912 e também com base na inspeção visual e resultados de ensaios experimentais da série de vigas de referência para atribuição da classe C35. Foi levado em consideração nesta análise empírica o fato da atribuição pela norma NP 4305 a penalização por defeitos que nem sempre podem estar localizados em uma zona prejudicial ao desempenho mecânico da viga, e que assim sendo não afetam as características de resistência globais, justificando a ponderação na atribuição das penalizações e conferindo a viga em análise uma classe de resistência adequada.

De modo geral as vigas tiveram uma classificação de qualidade intermediária, com provetes acima e abaixo da média. Temos na Tabela 5.1 a classificação quanto a classe de qualidade e resistência das vigas a serem reforçadas, oferecendo maior critério de comparação para possíveis diferenças de desempenho das vigas num mesmo sistema de reforço.

Tabela 5.1 – Classificação de qualidade e resistência das vigas a serem reforçadas.

Sistema de reforço pré-esforçado	Nomeação 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

### 5.3 VIGAS DE SÉRIE REFERÊNCIA

Para validação do modelo numérico e também para efeito de comparação, previamente foram ensaiadas vigas sem reforço, denominadas de vigas de referência (VR). Foram ensaiados ao todo seis modelos de vigas da espécie Pinho Bravo, com a mesma seção transversal e comprimento das vigas a

serem reforçadas. Na Figura 5.1 é possível analisar seu desempenho, e a seguir na Tabela 5.2 são apresentados os valores máximos de carga acompanhados com o deslocamento instantâneo.

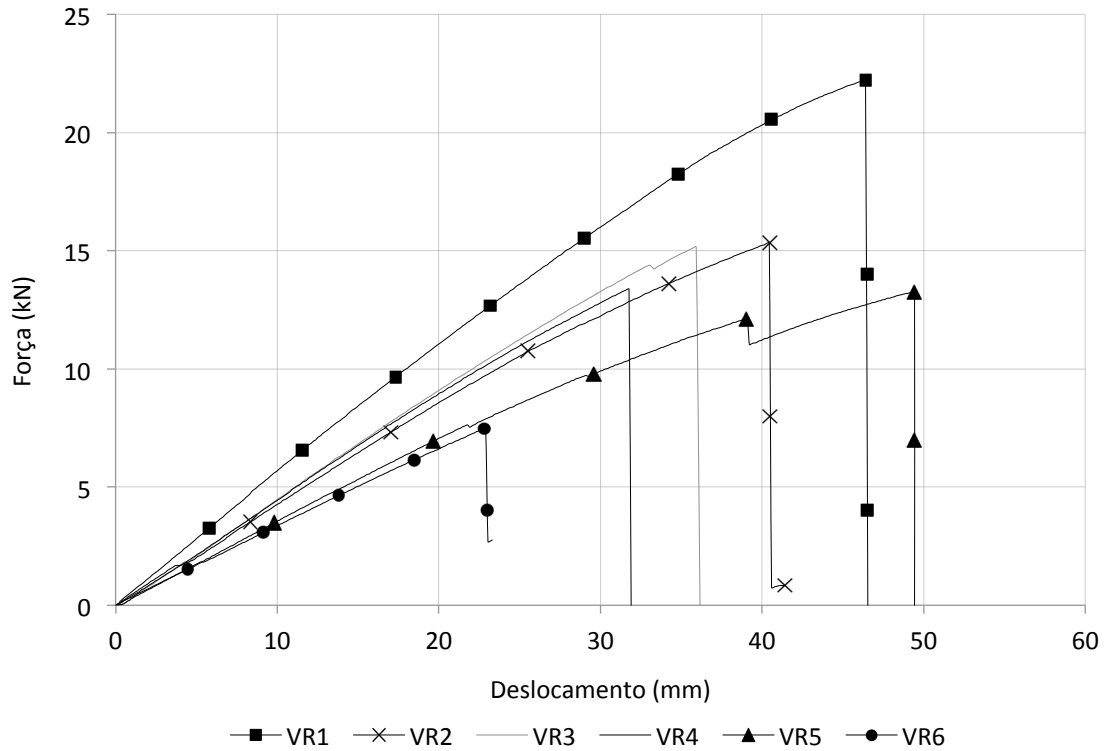


Figura 5.1 – Diagrama de força versus deslocamento da série referência.

Tabela 5.2 – Resumo de cargas e deslocamentos da série referência.

Modelo	Carga máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)
VR1	22,21	46,79
VR2	15,32	40,76
VR3	15,15	36,18
VR4	13,38	31,89
VR5	13,25	49,90
VR6	7,48	23,58
<b>Média</b>	<b>14,47</b>	<b>38,18</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>4,75</b>	<b>9,75</b>

Com os dados obtidos a partir dos ensaios experimentais é possível estabelecer uma classe de resistência média entre as vigas analisadas:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0,7 \times \frac{14,47}{2} \times 10^{-3}}{\frac{0,08 \times 0,11^2}{6}} = 31,39 \text{ MPa}$$

Temos então que a tensão na fibra exterior quando submetida ao valor de médio de carga máxima é de 31,39 MPa, correspondendo a classe de resistência C30, tendo-se utilizado este valor no Capítulo 4 para definição da resistência máxima à flexão da madeira.

## 5.4 INSTRUMENTAÇÃO

Com o objetivo de monitorizar os deslocamentos e forças atuantes nas vigas durante todo o processo de aplicação de pré-esforço e durante o ensaio a flexão, foram instalados sensores nas vigas de madeira e também nos elementos de reforço.

Três LVDTs foram instalados para monitorizar o deslocamento vertical em pontos específicos, posicionados em um espaçamento L/4, sendo designados de LVDT E (esquerda), C (centro), e D (direita). Esta terminologia segue a mesma em todos os ensaios. O campo de medição dos LVDTs E, C, e D é de 50 mm, 50 mm e 25 mm, respetivamente.

Segundo a norma EN 408:2010+A1:2012, o LVDT para a confecção dos gráficos de força x deslocamento deveria ser o central, porém com a limitação de 50 mm de campo do LVDT C foi necessário utilizar o transdutor de deslocamento vertical presente no conjunto hidráulico do atuador para a coleta completa das deformações. O uso deste transdutor ao invés do LVDT C foi validado observando-se nos gráficos de deformações colhidas durante os ensaios, tendo pouca diferença de um para o outro, e sempre apresentando o resultados dos dois, até o limite do campo de leitura do LVDT C.

Outros sensores como strain gauges foram utilizados para recolher as extensões em pontos específicos, onde sua localização será pormenorizada em cada capítulo de sistema de reforço. A representação do posicionamento dos LVDTs é dada na Figura 5.2.

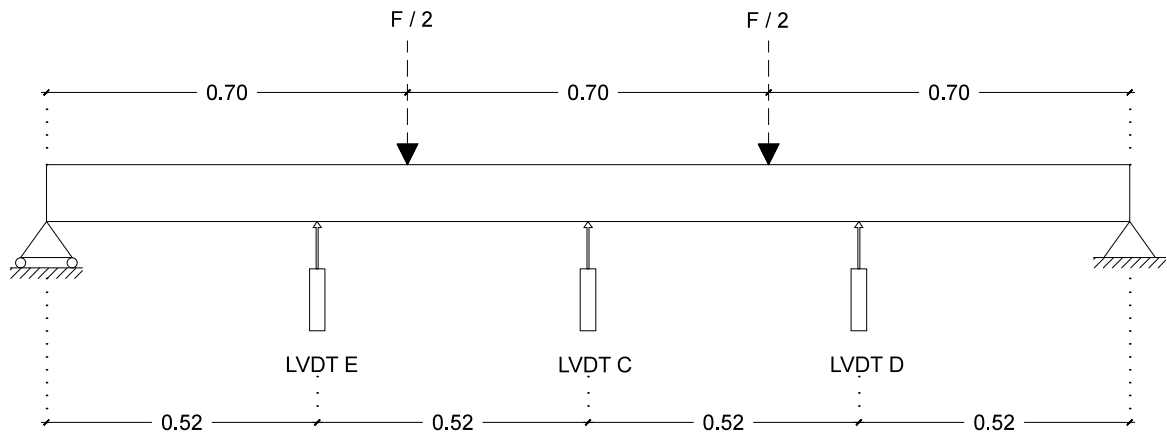


Figura 5.2 – Representação da posição dos LVDTs ao longo da viga (medidas em m).

Foi utilizada uma câmera termográfica para recolher diferenças de temperatura na superfície das vigas e dos elementos de reforço, servindo de auxílio para identificar pontos mais solicitados, que dissipam a energia em forma de calor, em caso de cedência do aço ou rotura nas fibras da madeira.

Nas imagens da câmera, as cores mais claras representam as temperaturas mais altas, enquanto as cores mais escuras representam temperaturas mais baixas, conforme exemplo na Figura 5.3, onde uma mão segura uma garrafa de água gelada.



Figura 5.3 – Imagem da câmera termográfica.

## 5.5 VIGAS REFORÇADAS COM CHAPA DE AÇO PRÉ-ESFORÇADA

Dada a metodologia de reforço abordada no Item 3.2 do Capítulo 3, o processo de reforço experimental no laboratório compreendeu o arqueamento da viga seguido da instalação da chapa, e por fim, o ensaio para testar a resistência mecânica dos modelos. As vigas reforçadas com este método foram a VCH1 e VCH2, e o processo de reforço é enunciado a seguir.

### 5.5.1 Instrumentação

Como mencionado no Item 5.4, a viga foi instrumentada com três LVDTs e, no caso deste sistema de reforço com a chapa metálica, mais três strain gauges foram instalados ao longo da chapa metálica para colher as extensões obtidas, sendo convertidas posteriormente em tensões e forças, sendo designados SG 1, 2 e 3. A representação da montagem dos sensores está ilustrada na Figura 5.4.

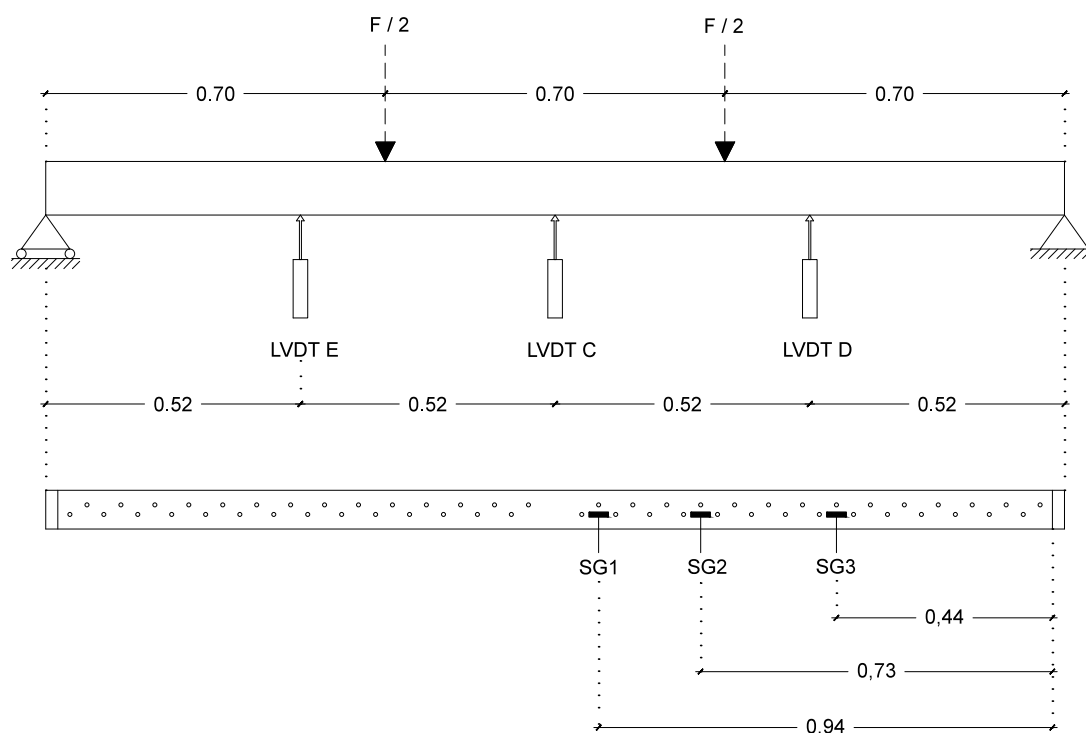
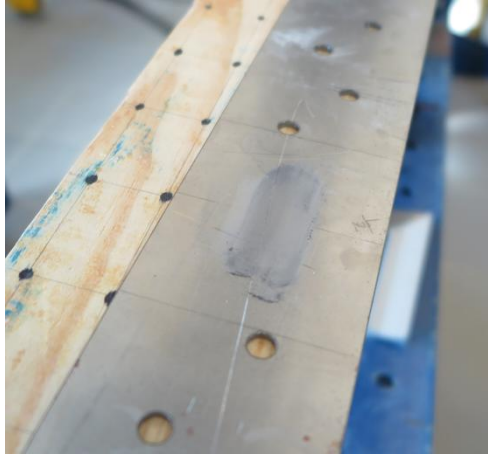


Figura 5.4 – Instrumentação do modelo reforçado com chapa de aço (medidas em m).

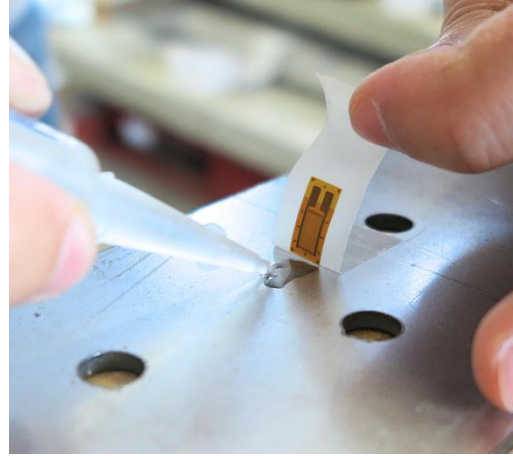
Conforme ilustrado na Figura 5.4, os strain gauges tiveram de ser realocados de sua posição original, entre dos LVDTs C e D de forma a se ajustar entre os parafusos, e no centro, fora do alcance do atuador na hora da aplicação da carga para imposição da contra-flecha.

Nas figuras abaixo (ver Figuras 5.4 e 5.5) é possível acompanhar o processo de instalação dos strain gauges na chapa metálica. Primeiramente, a superfície da chapa foi lixada a fim de remover

sujidade e outros agentes contaminantes não visíveis a olho nu, ação que também promove maior atrito entre a chapa e o adesivo para a colagem. Após aplicação da lixa foi feita a limpeza do local com acetona (Figura 5.5-a). Na sequência, com auxílio de uma fita adesiva, o strain gauge é posicionado no local correto e é efetuada a colagem com adesivo de alta resistência (Figura 5.5-b).



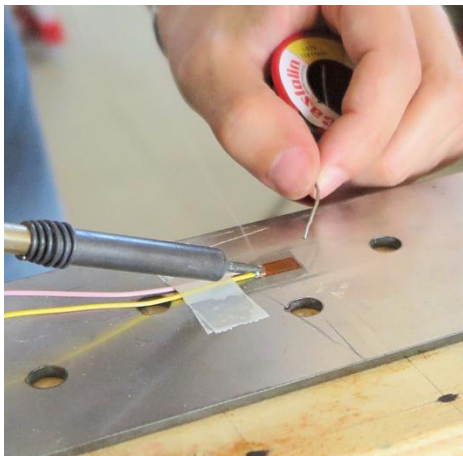
a) Aplicação de lixa para preparo da superfície



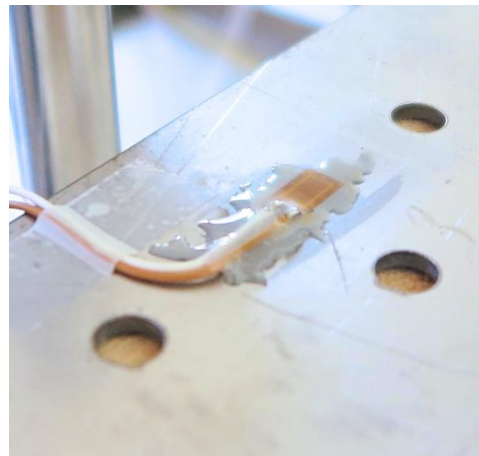
b) Colagem do strain gauge

Figura 5.5 – Preparação da superfície da chapa e colagem do strain gauge.

Após o tempo de cura do adesivo, é efetuada a união entre os terminais elétricos do sensor com os fios que realizam a ligação com a central de aquisição de dados através de solda (Figura 5.6-a). Por fim, foi utilizado um adesivo bicomponente à base de resina epóxi para envolver o strain gauge, protegendo o sensor e as soldas de quaisquer ameaça mecânica exterior (Figura 5.6-b).



a) Soldadura dos fios nos terminais do SG



b) Aplicação de resina epóxi para proteção

Figura 5.6 – Soldadura e proteção do strain gauge.

A Figura 5.7 ilustra o posicionamento dos três LVDTs ao longo do modelo.

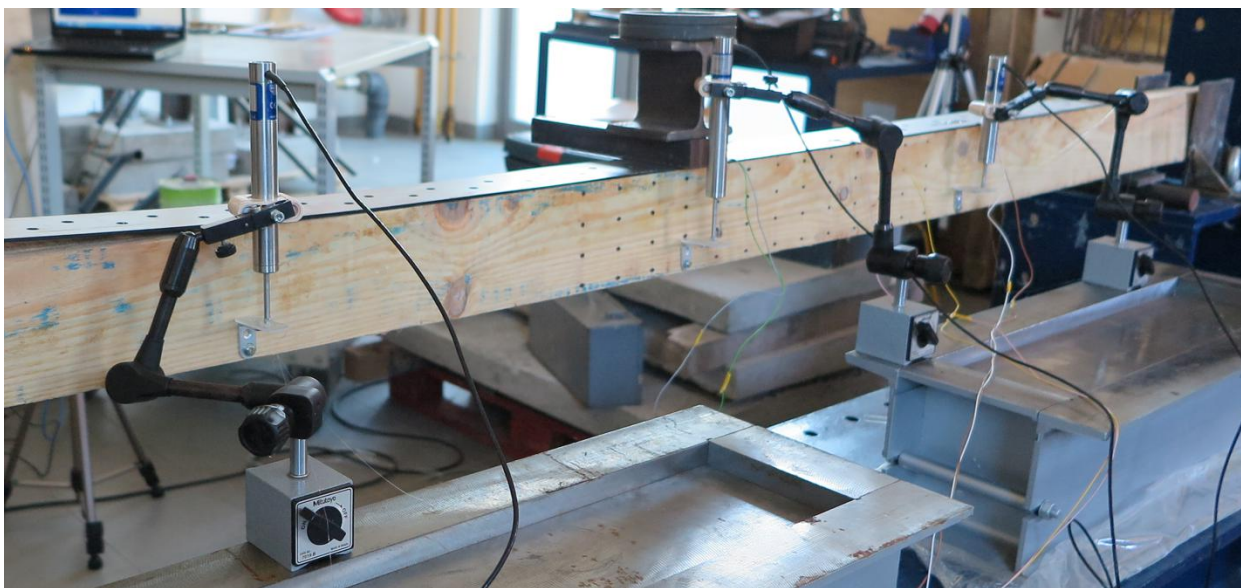


Figura 5.7 – Posicionamento dos LVDTs no modelo.

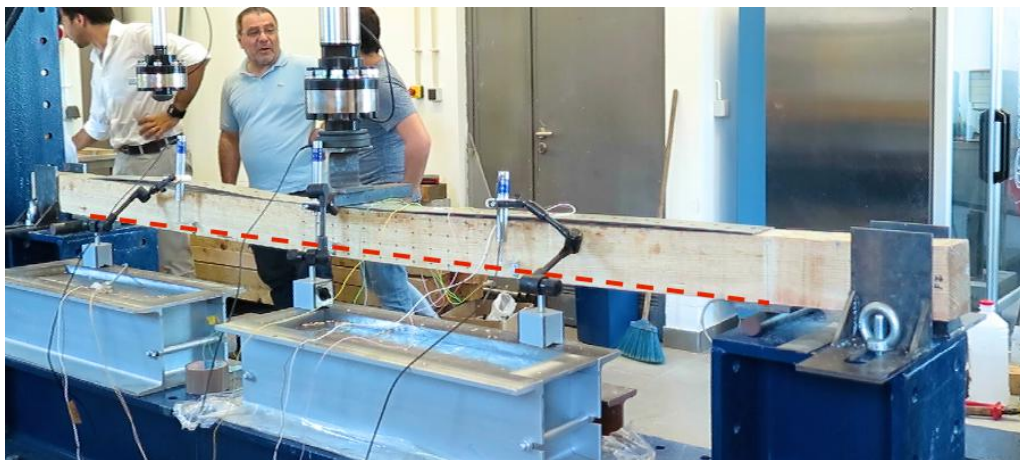
### 5.5.2 Pré-Esforço da Chapa De aço

Para iniciar o processo de pré-esforço, o primeiro passo foi a imposição de uma contra-flecha à viga. Na metodologia de reforço enunciada do Item 3.2, o arqueamento de uma viga em um caso de reforço em obra pode ser realizado com um macaco hidráulico, pois é levado em consideração que a viga tem suas extremidades fixas na estrutura existente, restringindo o deslocamento ascendente provocado pelo macaco hidráulico. Esta é uma condição diferente da situação no laboratório, onde temos uma viga sem restrição ao deslocamento ascendente. A solução encontrada foi girar a viga invertendo seu topo para baixo e fazer com que o atuador hidráulico do pórtico simulasse a ação de um macaco hidráulico, conforme ilustra a Figura 5.8.

Na primeira fase, o atuador aplicou a carga de 7,04 kN estabelecida na modelação numérica sobre a chapa metálica. A mesma não tinha qualquer tipo de ligação com a viga, fazendo com que a viga se deslocasse e a chapa não acompanhasse seu movimento.



a) Viga posicionada de topo invertido instantes antes do arqueamento



b) Imposição do arqueamento

Figura 5.8 – Imposição de força para arqueamento nos modelos VCH2 e VV2.

Todo o processo de arqueamento foi monitorizado por LVDTs e pela célula de carga do atuador, a fim que fosse garantida a segurança do processo até o nível de deformação desejado. Atingida a carga de 7,04 kN foi possível observar a partir da Figura 5.9 que o deslocamento permaneceu em 16,4 mm na viga VCH2 e 18,2 mm na viga VCH1, contra 12,8 mm do modelo numérico. Também é possível observar na Figura 5.9 que ao se travar o pistão na carga de 7,04 kN, a deformação das vigas foi mantida, porém houve um decréscimo de carga para que fosse mantido o mesmo nível de deformação, isso ocorreu devido a fluência da madeira.

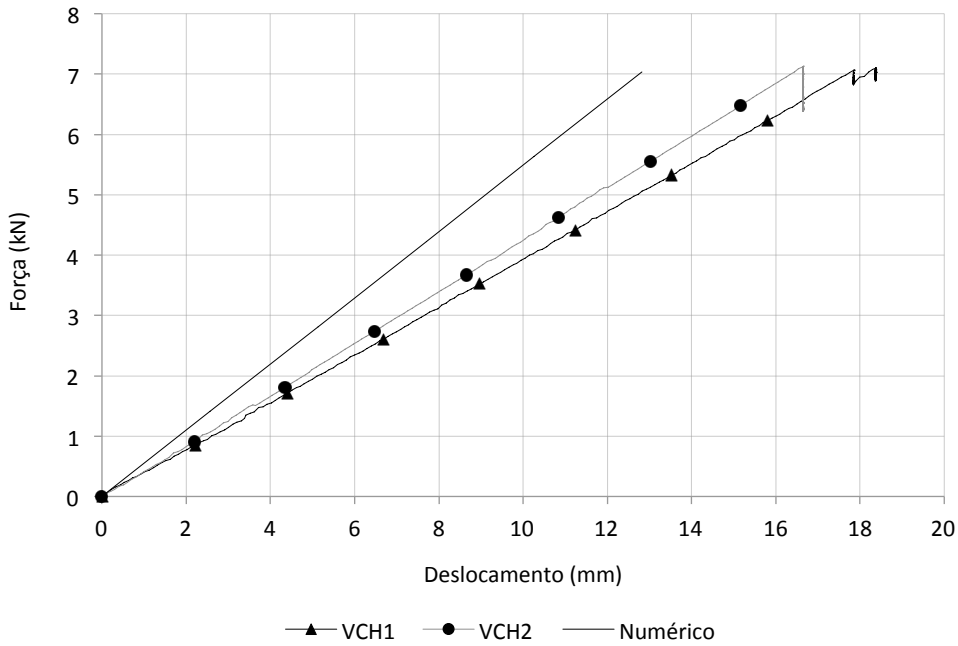


Figura 5.9 – Gráfico força vs. deslocamento na imposição do arqueamento dos modelos VCH1 e VCH2 e comparação com simulação numérica.

Na sequência o pistão do atuador foi travado e se deu início a união da chapa com a viga através de parafusos. Antes da introdução dos parafusos, foi executado um pré-furo com broca de 5 mm, conforme Figura 5.10, procedimento aconselhado pelo fabricante dos parafusos para obtenção de maior resistência mecânica ao corte dos mesmos.



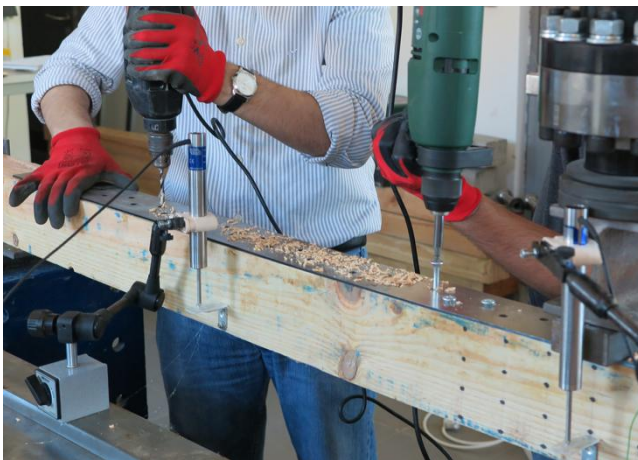
Figura 5.10 – Execução do pré-furo.

Simultaneamente com a abertura dos pré-furos, foram instalados os parafusos HBS 8 x 100, com cabeça escareada, produzido a partir de aço carbônico com zincagem galvânica branca, conforme Figura 5.11.



Figura 5.11 – Parafuso HBS com cabeça escareada (Rothoblaas, 2014).

Os parafusos foram inseridos nos furos com auxílio de uma furadeira com torque ajustado, diminuindo o tempo de instalação, conforme Figura 5.12.



a) Instalação dos parafusos no modelo em simultâneo com abertura de pré-furo



b) Pormenor da instalação do parafuso

Figura 5.12 – Instalação dos parafusos no modelo.

Com auxílio da câmera termográfica, é possível identificar na Figura 5.13 a diferença de temperatura na face da viga, onde podemos ver em cor mais clara uma temperatura superior ocasionada pelo atrito do parafuso ao perfurar da madeira, e ao centro da viga, onde não houve perfurações, uma cor mais escura representando a temperatura mais baixa.

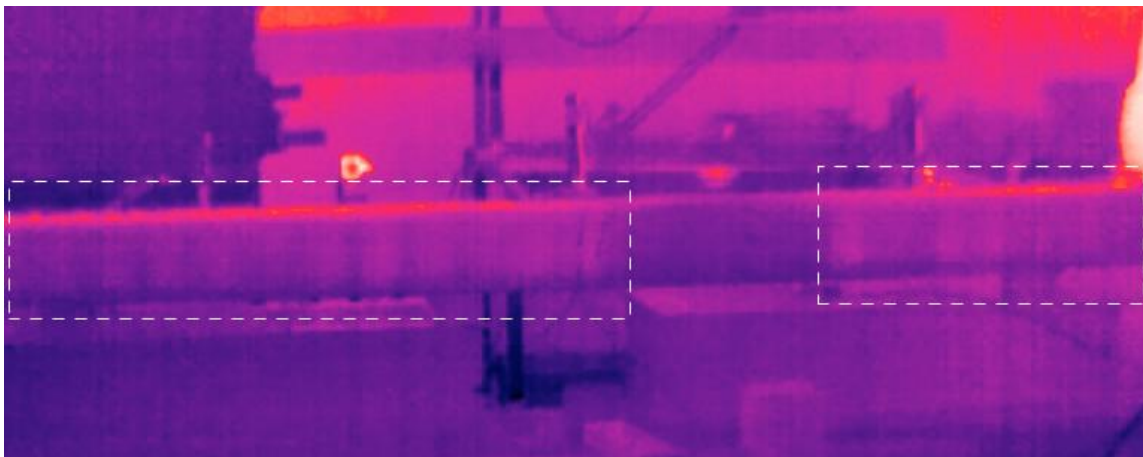


Figura 5.13 – Imagem da câmera termográfica na instalação dos parafusos.

Finalizado o processo de instalação dos parafusos e por consequência com a chapa de aço fixa a viga, procedeu-se a recolha do pistão do atuador (Figura 5.14). É justamente nessa fase em que ocorre o pré-esforço da chapa de aço, pois com a ausência da força imposta pelo atuador, a viga antes deformada tendeu a retornar ao seu estado original. Esse ato foi restringido pela chapa de aço, que passou a ser solicitada pela viga, exercendo uma força de tração na chapa.

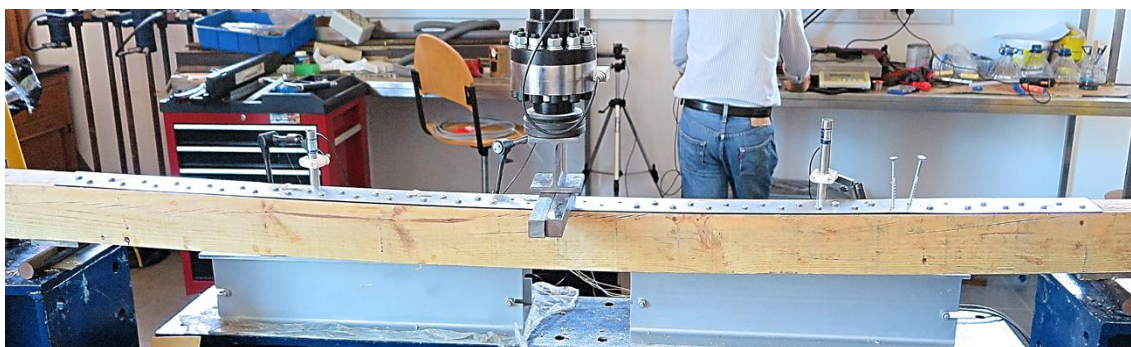


Figura 5.14 – Processo de instalação dos parafusos concluído.

O deslocamento imposto inicialmente pelo atuador não é totalmente retido pela chapa após a recolha do pistão. Isso ocorre devido a acomodação entre a chapa e os parafusos, que gera um pequeno deslizamento e acarreta a perda da deformada. Outro fator que ocorre posteriormente é o alongamento da chapa, por deformação elástica, como reação a força que a viga impõe à mesma, associada à baixa rigidez da chapa.

A contra-flecha residual, que consiste no deslocamento inicial deduzido das perdas por deslizamento e alongamento da chapa, foi previamente calculada pelo modelo numérico em 6,4 mm. Na Figura 5.15 são apresentados os valores de deslocamento vertical dos modelos VCH1 e VCH2 a partir do

instante zero, onde começa o carregamento para imposição da contra-flecha, até o fim do processo de reforço e descarregamento da viga.

Pode-se observar no Figura 5.15-a que durante todo o processo de imposição da contra-flecha até o final da etapa de reforço, o lado direito do modelo VCH1 sofreu maior deformação vertical. Já o modelo VCH2, ilustrado pelo Figura 5.15-b, teve o comportamento inverso, sofrendo um maior deslocamento vertical do lado esquerdo.

Tais informações nessa etapa preliminar são valiosas pois podem revelar o lado mais vulnerável do modelo, indicando por onde poderá se dar a rotura, devido a presença de nós ou outra fragilidade presente no lado onde há maior deformação vertical no modelo. Esta informação também deve ser analisada cuidadosamente, pois se tratando de uma viga de madeira, os nós podem estar na face solicitada à tração e que no momento do ensaio estarão na posição inversa, ou seja, na compressão, podendo resultar em um resultado inverso.

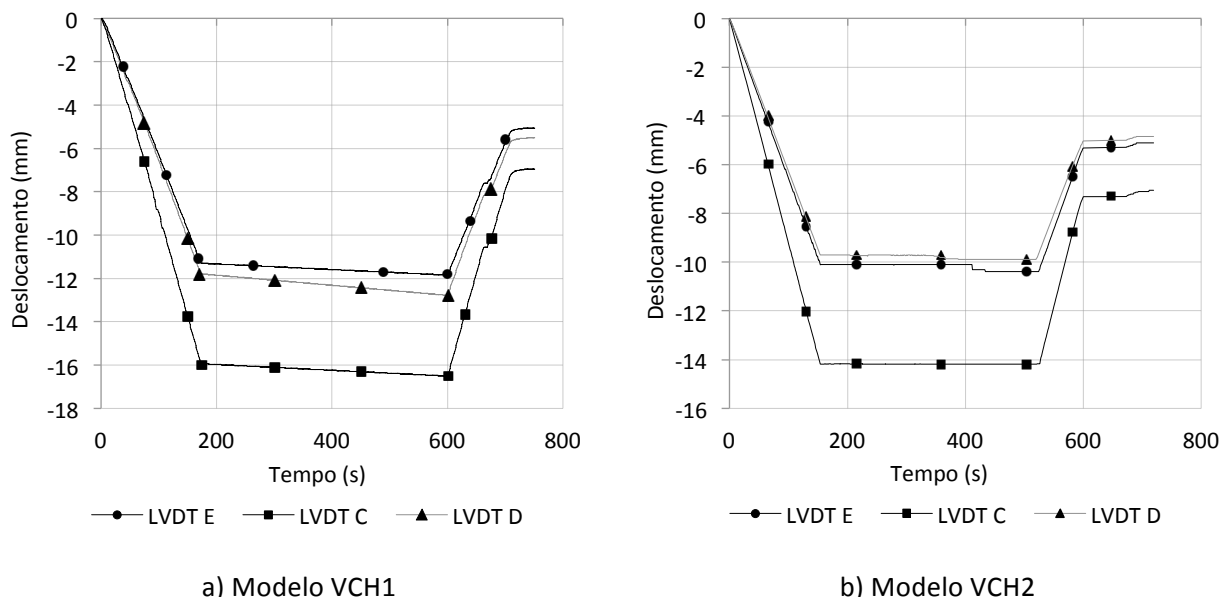


Figura 5.15 – Monitoramento do deslocamento vertical dos modelos durante imposição da contra-flecha e descarregamento.

A seguir, é apresentado na Figura 5.16 a sobreposição dos LVDTs localizados na posição central dos modelos, onde é possível notar que mesmo a deformação inicial do modelo VCH1 sendo superior que a deformação do modelo VCH2, na fase do descarregamento a contra-flecha residual tem valores muito próximos. No mesmo gráfico também se nota os patamares de deslocamento calculados pela modelação numérica, apresentados como numéricos, que especialmente na fase de descarregamento, obtiveram valores muito próximos de contra-flecha residual com os modelos experimentais.

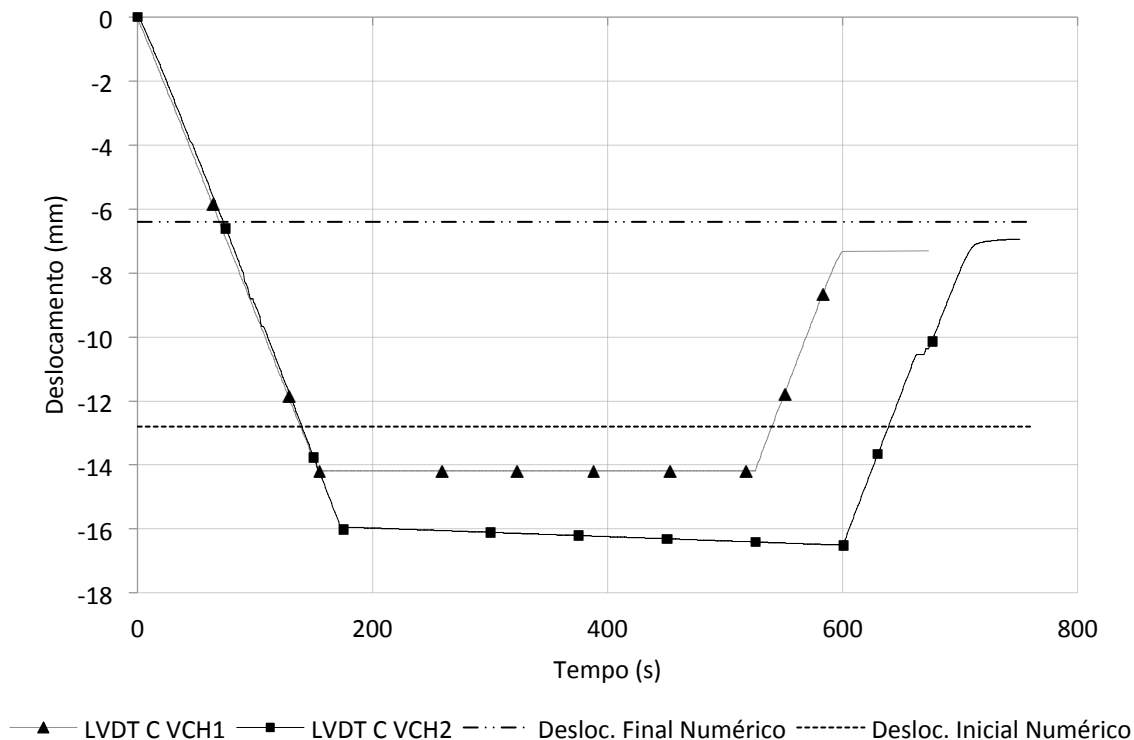


Figura 5.16 – Sobreposição dos LVDS centra na fase de carregamento e descarregamento.

Na tabela 5.3 são apresentados os valores calculados pela modelação numérica, e os experimentais, colhidos pelo LVDT C durante o ensaio, de deslocamento vertical dos modelos VCH1 e VCH2, nas fases de carregamento para imposição da contra flecha e descarregamento para processo de pré-esforço da chapa. Conforme é possível observar, apesar de alguns desvios, o modelo numérico simulou bem o comportamento da viga de madeira reforçada.

Tabela 5.3 – Comparação entre os valores de deslocamentos verticais numéricos e experimentais obtidos na fase de carregamento e descarregamento.

Vigas	Deslocamentos (mm)					
	Inicial			Final / Residual		
	Numérico	Experimental	DP (%) <sup>1</sup>	Numérico	Experimental	DP (%) <sup>1</sup>
VCH1	-12,8	-16,5	29	-6,4	-6,9	8
VCH2		-14,2	11		-7,05	10

<sup>1</sup> Diferença percentual entre valor numérico e experimental

O nível de tensão de pré-esforço instalado na chapa foi controlado por meio dos strain-gauges instalados na mesma. A Figura 5.17 representa o nível de tensão nos três pontos de monitoramento previamente estabelecidos desde o instante de tempo zero, onde o pistão do atuador começa a ser recolhido, até ao descarregamento total da viga, onde a tensão de pré-esforço já foi instalada na chapa.

Também é possível visualizar no gráfico os patamares de tensão calculados previamente pela modelação numérica para o final do processo de descarregamento da viga, evidenciando uma boa aproximação do modelo numérico ao modelo real.

Por conta de uma falha no sistema de ligação dos strain gauges da viga VCH2, houve a perda dos dados referentes a fase de pré-esforço, impossibilitando sua apresentação neste trabalho.

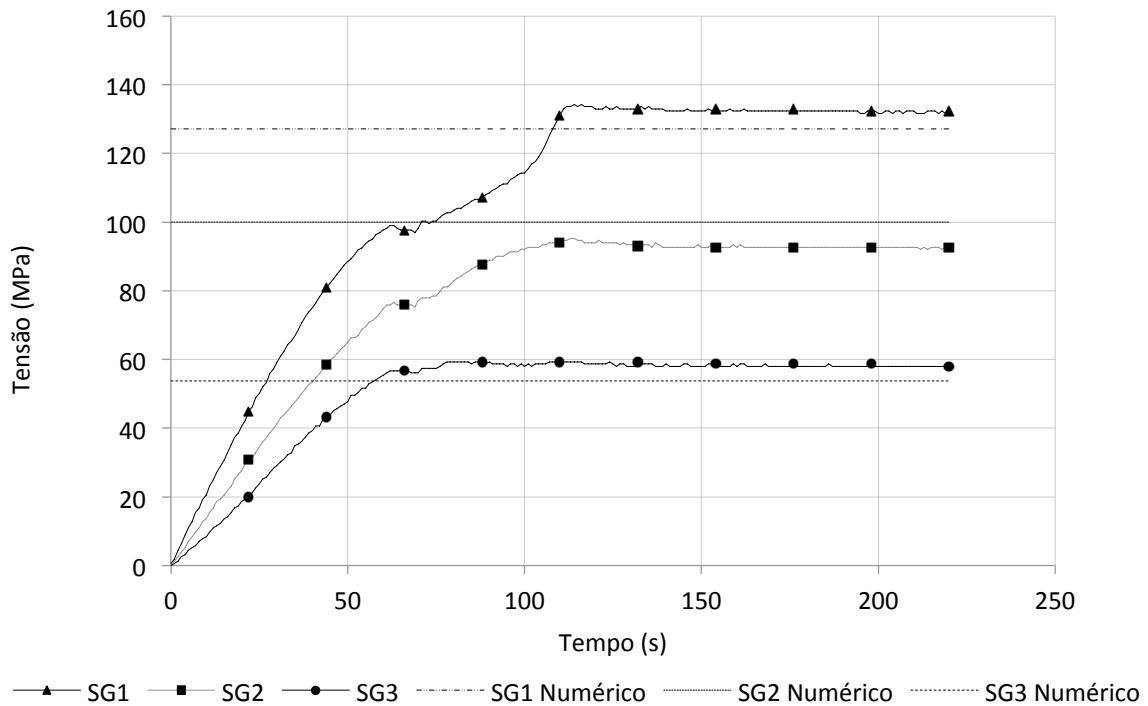


Figura 5.17 – Nível de tensão instalada na chapa pelo pré-esforço no modelo VCH1.

A Figura 5.18 apresenta o nível de tensões no decorrer do comprimento da chapa na fase de pré-esforço, calculado pela modelação numérica, e na sequência, a Tabela 5.4 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.

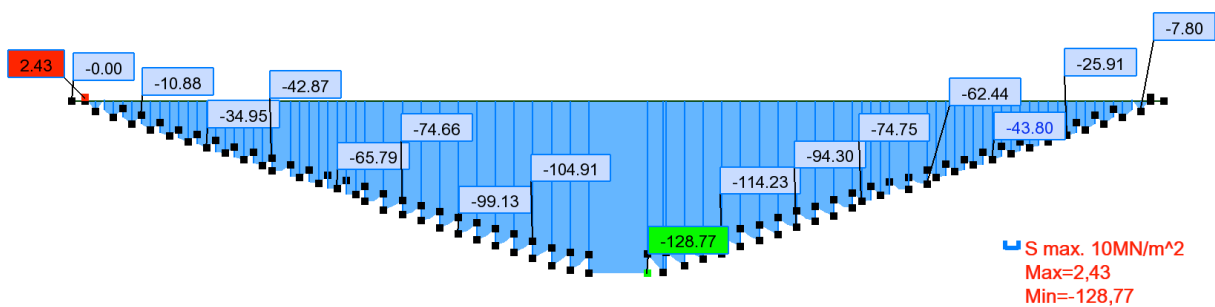


Figura 5.18 – Tensões instaladas na chapa na fase de pré-esforço obtidos por modelação numérica.

Tabela 5.4 – Comparação do nível de tensão instalado na chapa na fase de pré-esforço do modelo VCH1.

Strain Gauge	X (m)	Modelação Numérica (MPa)	Experimental (MPa)
SG1	0,94	127,07	131,68
SG2	0,73	99,99	92,68
SG3	0,44	53,75	58,00

X: Distância da borda da chapa ao strain gauge.

### 5.5.3 Ensaio à Flexão

Com o processo de pré-esforço finalizado, a viga foi invertida com a face dos parafusos para baixo e depois foi apoiada em roletes, intermediados por uma chapa de metálica para evitar esmagamento local da madeira. Na sequência a viga teve suas faces laterais restringidas a seguir dos apoios, para evitar uma possível movimentação lateral durante o ensaio.

Foi então iniciado o ensaio do modelo à flexão com uma taxa de deformação de 0.1 mm/s como descrito no Item 5.1, sendo a carga imposta por meio do atuador hidráulico e transmitida aos dois pontos de contato da viga por um perfil metálico IPN, até a rotura da viga. Abaixo, na Figura 5.19, é possível observar a curvatura da viga devido a aplicação do pré-esforço, antes do ensaio à flexão.

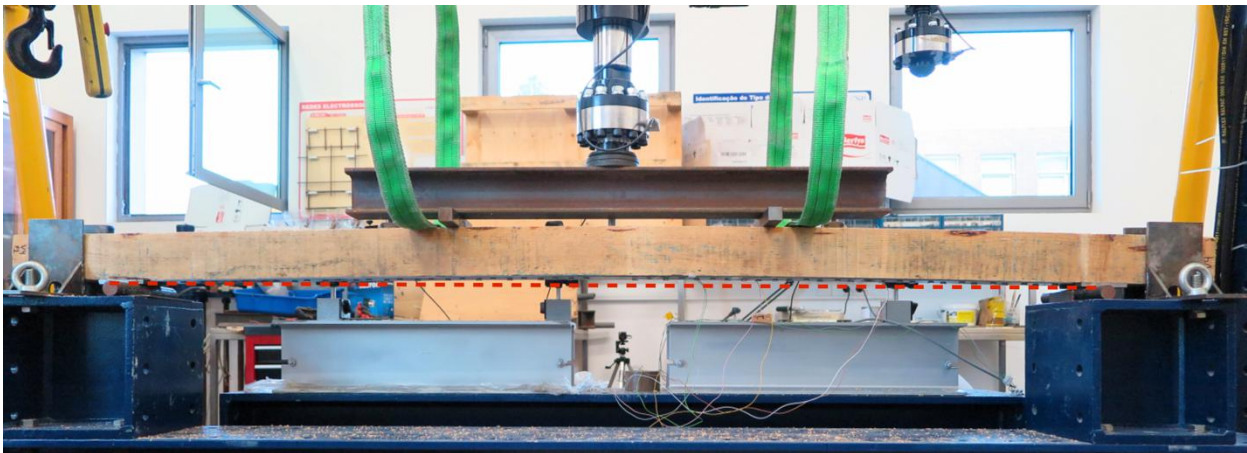


Figura 5.19 – Início do ensaio de rotura do modelo VCH2.

A Figura 5.20 ilustra o final do ensaio, onde ocorreu a rotura por conta da madeira, assunto que será tratado mais adiante.

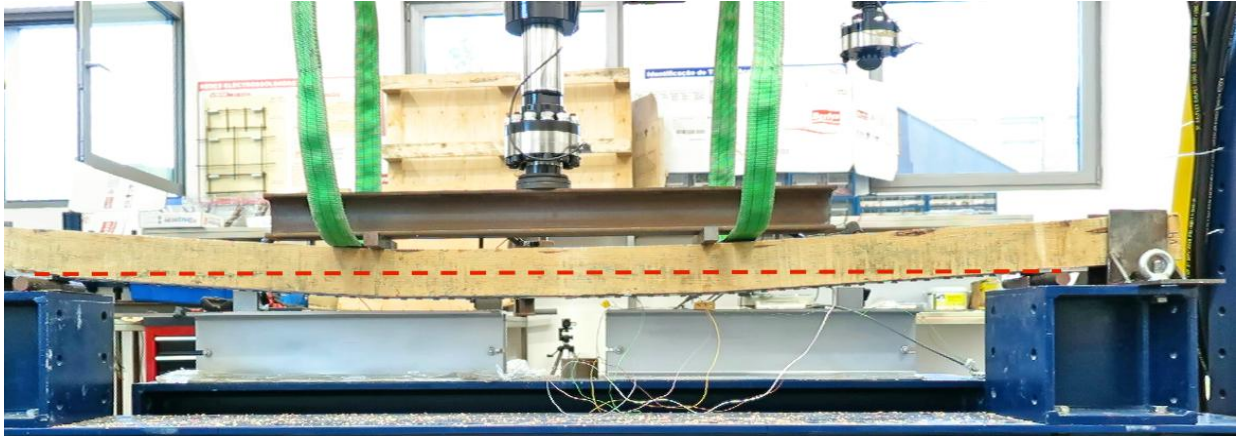


Figura 5.20 – Rotura do modelo VCH2.

A seguir são apresentadas as imagens colhidas pela câmera termográfica. Na primeira viga a ser ensaiada, a VCH1, a câmera foi posicionada ao centro do vão, focando sua imagem entre os dois pontos de aplicação da carga.

Instantes antes da rotura, foi captada pela câmera uma liberação de calor em um ponto específico, de acordo com a Figura 5.21. Esse ponto é um nó na viga, que pode ser visto nas suas cores originais na Figura 5.24 ou também na ficha de classificação visual da VCH1 como nó numero 3.

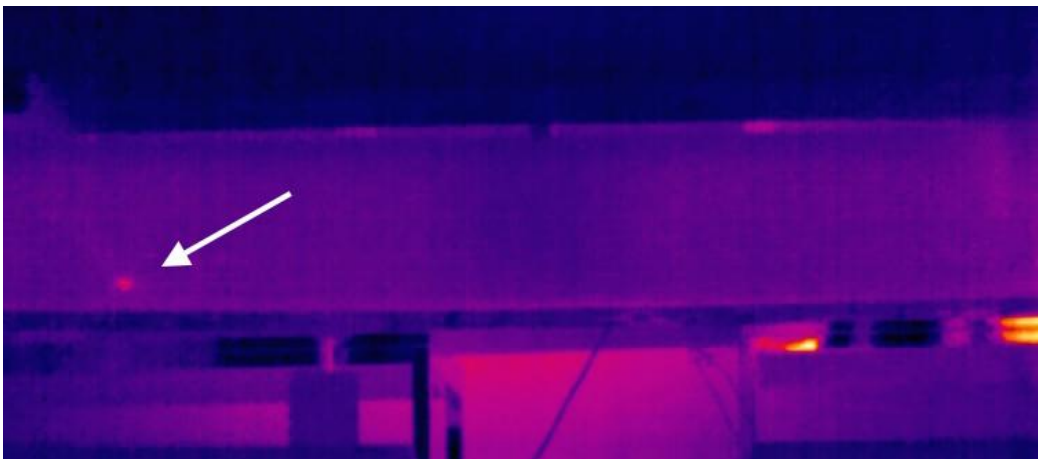


Figura 5.21 – Energia liberada no nó 3 captada pela câmera termográfica.

Instantes depois se sucedeu a rotura da viga, ilustrada na Figura 5.22.

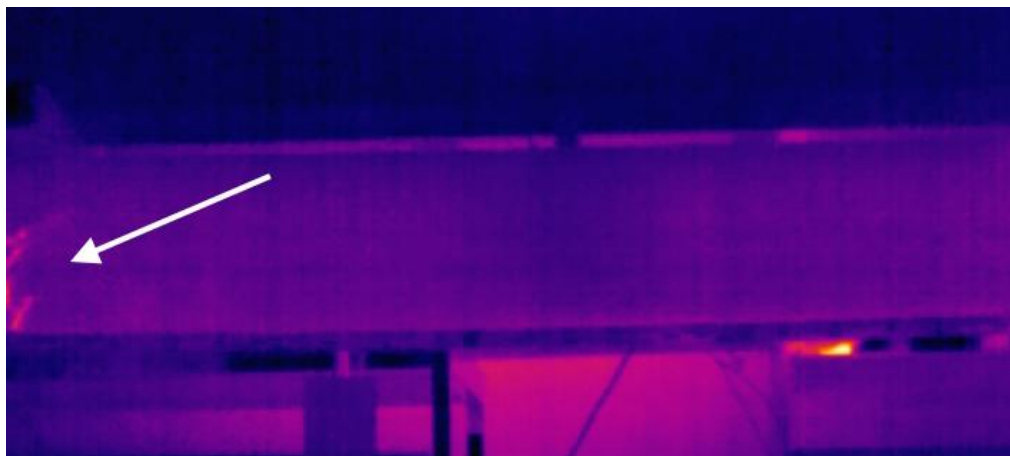


Figura 5.22 – Rotura da viga VCH1 captada por câmara termográfica.

Como visto nas imagens da termografia e em pormenores na Figura 5.23 e Figura 5.24, a rotura da viga VCH1 se deu ao redor do nó localizado logo abaixo da aplicação da carga, em uma zona com agrupamento de nós, sendo o maior ponto de fragilidade na viga.



Figura 5.23 – Rotura da viga VCH1 (vista frontal).



Figura 5.24 – Rotura da viga VCH1 (vista traseira).

Após o ensaio, os parafusos da zona de rotura foram desaparafusados cerca de 2 cm para constatar o estado dos mesmos. Como mostra a Figura 5.25, os parafusos estão visivelmente íntegros, sem quaisquer sinais de atrito ou deformação, indicando portanto que a distribuição de forças entre os mesmos foi uniforme. Um dos possíveis modos de rotura poderia estar associado à rotura da cabeça do parafuso por corte longitudinal na união com a chapa. Também é possível notar a deformação sofrida pela chapa de aço na região da rotura.

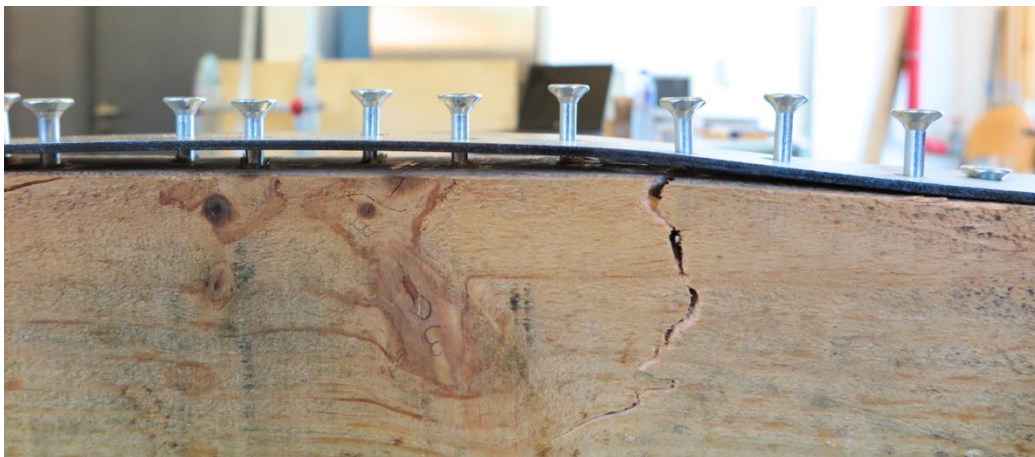


Figura 5.25 Inspeção dos parafusos após ensaio, VCH1.

A seguir é apresentada a imagem da câmera termográfica no instante da rotura da viga VCH2, pela Figura 5.26.



Figura 5.26 – Rotura simultânea em dois pontos captada pela câmera termográfica.

Conforme observado na Figura 5.27 e na imagem da câmera termográfica (ver Figura 5.26), a rotura da viga VCH2 se deu simultaneamente em dois pontos, 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.

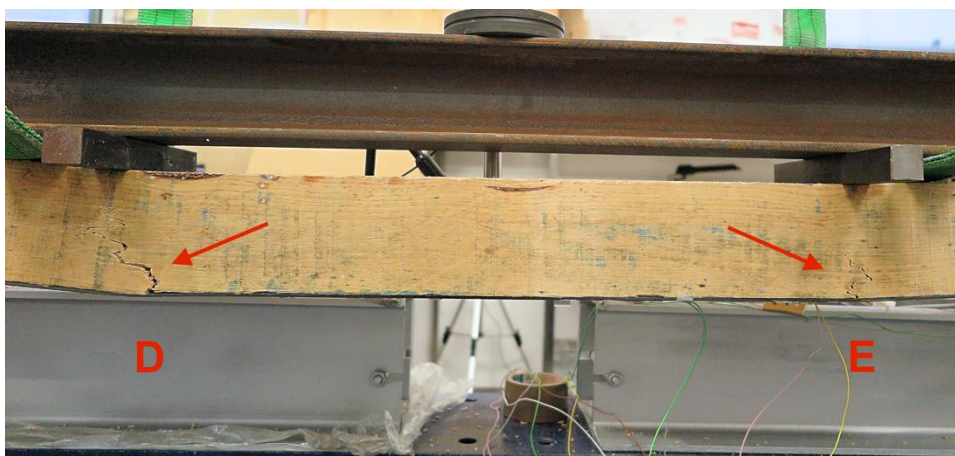
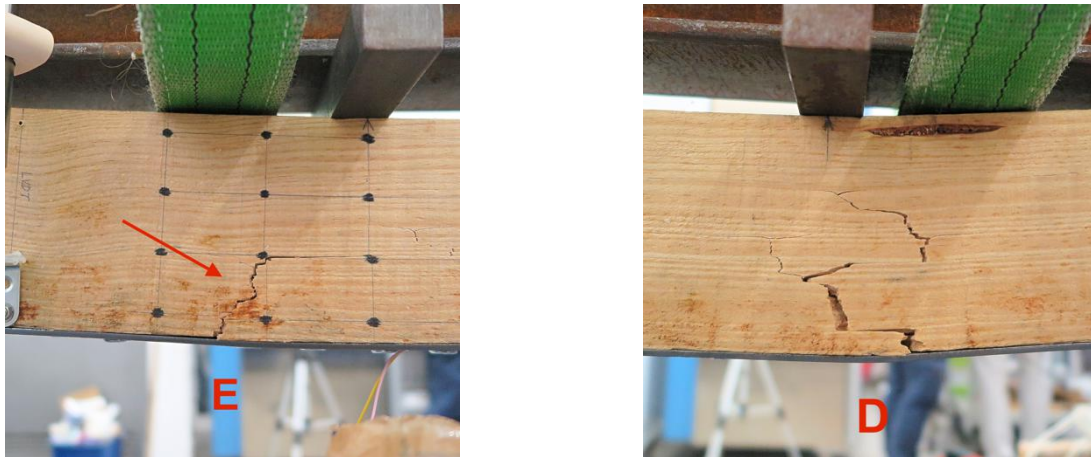


Figura 5.27 – Rotura viga VCH2 (vista traseira).



a) Lado esquerdo

b) Lado direito

Figura 5.28 – Pormenor da rotura da viga VCH2 (vista frontal).

Como na viga VCH1, os parafusos da viga VCH2 também foram desaparafusados para constatação da integridade dos parafusos. Como se pode avaliar na Figura 5.29, os mesmos se apresentaram sem quaisquer sinais de deformação ou atrito na zona da cabeça do parafuso, onde foram solicitados pela chapa de aço.



Figura 5.29 – Inspeção dos parafusos após ensaio, VCH2.

#### 5.5.4 Análise dos Resultados

A Figura 5.30 representa a relação força x deslocamento dos modelos VCH1 e VCH2. É possível observar que as duas vigas reforçadas com o mesmo sistema de reforço estrutural obtiveram resultados distintos de desempenho. Essa diferença é devida à distinta qualidade das vigas, obtidas na classificação visual.

A viga VCH1 foi classificada como classe “E” devido a vários fatores, entre eles a presença massiva de nós no decorrer da viga, e dentre eles um grupo na linha de aplicação da carga nas fibras mais solicitadas à tração, onde se deu a rotura da mesma. 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, evidenciando características de rigidez similares em ambas as vigas. Como observação global, a utilização da chapa de aço permitiu a obtenção de um comportamento menos frágil com capacidade de deformação em regime plástico das vigas de madeira, quando comparadas com as vigas não reforçadas (Figura 5.30).

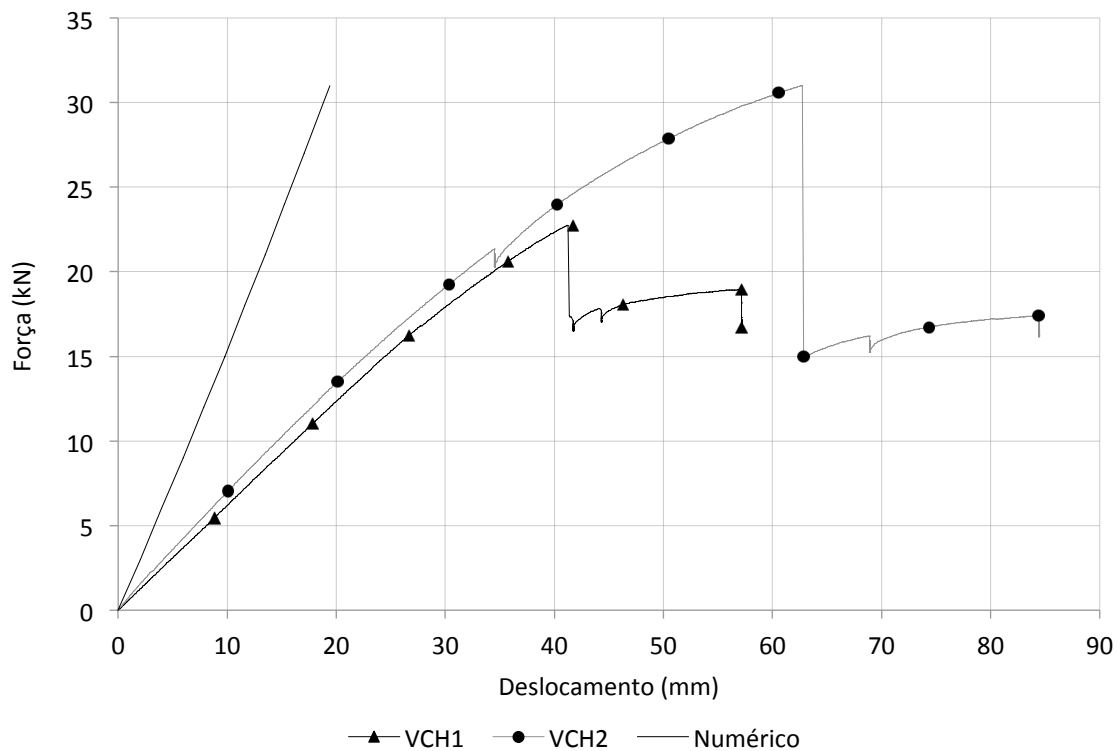


Figura 5.30 – Diagrama de força versus deslocamento da série VCH.

A seguir na Tabela 5.5, são apresentados os valores máximos de força alcançados pelas vigas reforçadas juntamente com seu deslocamento no mesmo instante.

Tabela 5.5 – Carga máxima e deformação instantânea da série VCH.

<b>Viga</b>	<b>Força máxima (kN)</b>	<b>Deslocamento na força máxima (mm)</b>
VCH1	22,75	41,15
VCH2	31,00	62,73

Na sequência é apresentado na Figura 5.31 as deformações colhidas pelos LVDTs. O LVDT C, localizado no centro da viga sofreu interferência na descida do atuador e teve sua coleta de dados comprometida. Por essa razão seus dados são interrompidos por volta dos 35 mm o que também explica o patamar de deslocamentos em 41 mm no LVDT do atuador, onde o ensaio foi pausado para realocar o LVDT C. O LVDT D teve o seu fim de curso aos 25 mm e por essa razão após atingir a cota de 25 mm permanece constante até o descarregamento da viga.

Conforme observado no gráfico, o LVDT D revela que o lado direito da viga teve um maior deslocamento que o lado esquerdo, revelando desde o início uma menor rigidez neste lado, que foi confirmada quando ocorreu a rotura.

É importante ressaltar que a posição das vigas no momento do ensaio é diferente da posição no momento de aplicação do pré-esforço, pois as mesmas foram rotacionadas 180 graus para que se pudessem ser invertidas, então o LVDT D na Figura 5.15 é o LVDT E na Figura 5.31 e na Figura 5.32, a mesma inversão serve para o LVDT E.

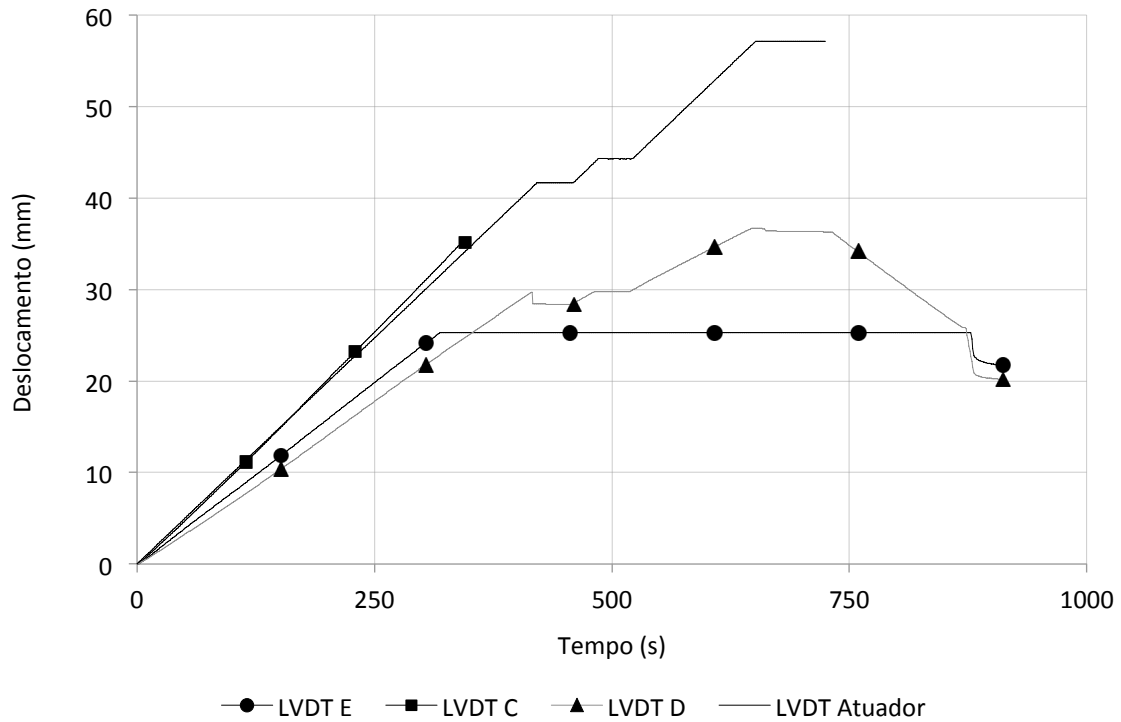


Figura 5.31 — Deformações colhidas pelos LVDTs no decorrer do ensaio da viga VCH1.

Na Figura 5.32, referente ao ensaio da viga VCH2, para que se pudesse fazer a recolha total dos deslocamentos, o ensaio foi pausado para realocar os LVDTs manualmente, com o objetivo de zerar seus campos e continuar a recolha dos dados.

Aos 615 segundos houve a rotura da viga, é possível observar tal fato nos pulsos das linhas do LVDT C e do LVDT E. Até o instante da rotura, os LVDTs da direita e esquerda registraram a mesma inclinação, indicando que a viga teve sua deformação por igual nos dois lados, convergindo para a rotura abaixo dos dois apoios simultaneamente.

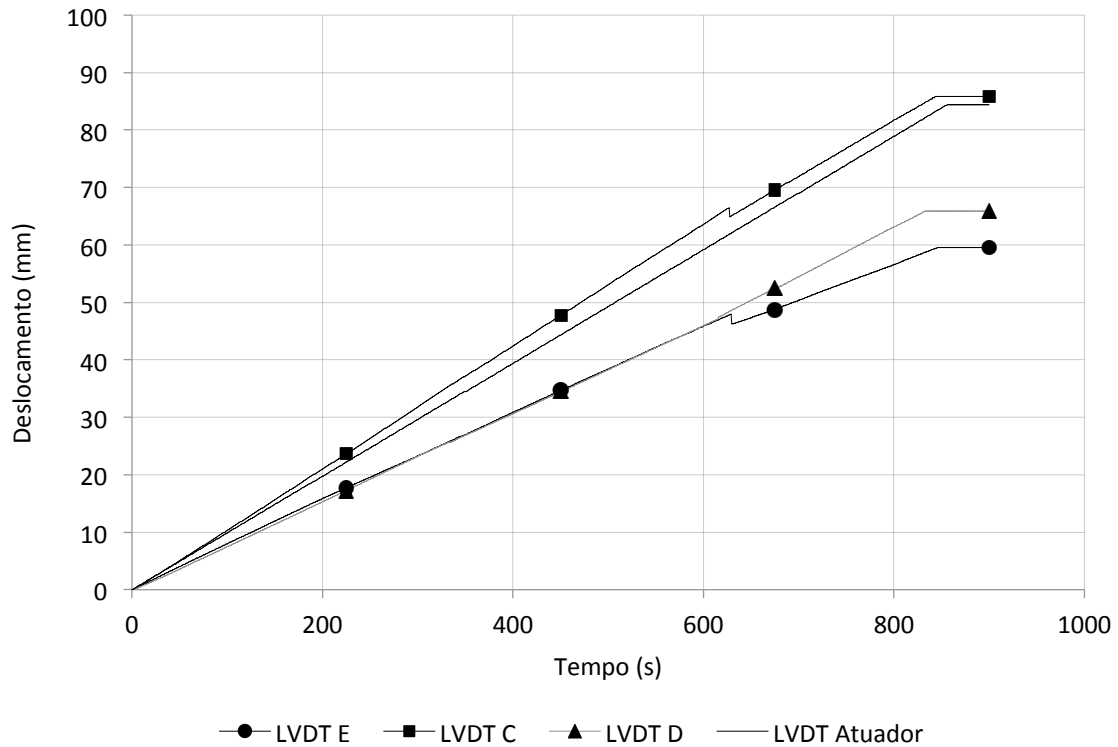


Figura 5.32 – Deformações colhidas pelos LVDTs no decorrer do ensaio da viga VCH2.

## 5.6 VIGAS REFORÇADAS COM VARÃO DE AÇO PRÉ-ESFORÇADO

Dada a metodologia de reforço abordada no Item 3.3 do Capítulo 3, o processo de reforço experimental no laboratório compreendeu o arqueamento da viga pelo pré-esforço introduzido no varão de aço, e por fim, o ensaio para testar a resistência à flexão dos modelos. As vigas reforçadas com este método foram a VCH1 e VCH2, e o processo de reforço é enunciado a seguir.

### 5.6.1 Instrumentação

Como mencionado no Item 5.4, a viga foi instrumentada com três LVDTs, que são transdutores de deslocamento vertical, e no caso deste sistema de reforço com o varão de aço pré-esforçado, outros dois strain gauges foram instalados ao longo do varão para colher as extensões obtidas, sendo convertidas posteriormente em forças e tensões, servindo como orientação para a aplicação do nível de pré-esforço, designados SG 4 e SG 5. A representação da montagem dos sensores é ilustrada na Figura 5.33.

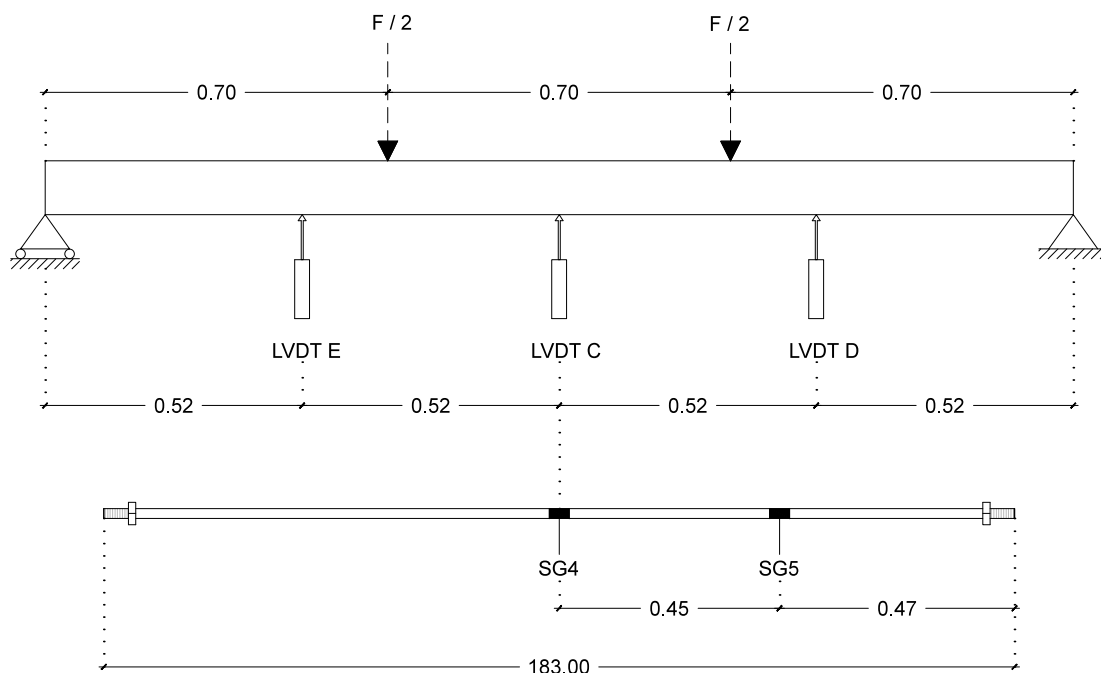
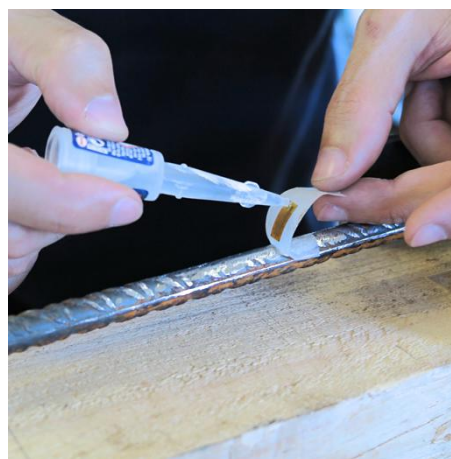


Figura 5.33 – Instrumentação do modelo reforçado com varão de aço (medidas em m).

Para instalar os sensores no varão de aço A500, foi necessário um desbaste prévio das ranhuras do varão com um esmeril, pois o strain gauge deve ser instalado em uma superfície lisa e uniforme, como é ilustrado na Figura 5.34-a. Após o desbaste foi efetuada a limpeza da superfície com acetona, e por último foi realizada a colagem do sensor, conforme Figura 5.34-b.



a) Superfície do varão A500 após desbaste



b) Colagem do strain gauge

Figura 5.34 – Preparação da superfície do varão e colagem do strain gauge.

Após o processo de colagem e solda dos fios nos elétrodos do sensor, foi aplicada uma camada de adesivo bicomponente à base de resina epóxi para envolver o strain gauge, protegendo o sensor e as

soldas de quaisquer ameaça mecânica exterior. Na Figura 5.35, é possível ver a viga VV2 instrumentada com os strain gauges para ensaio.



Figura 5.35 – Instalação concluída dos strain gauges na viga VV2.

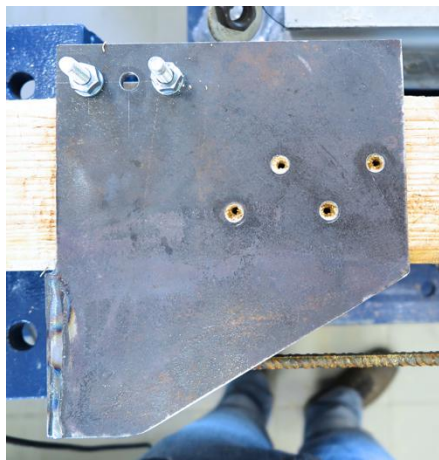
### 5.6.2 Montagem do sistema de reforço

Conforme enunciado no Item 3.3, o pré-esforço no varão foi dado através do aperto de porcas em suas extremidades. Foi estabelecido em projeto que ao invés de se rosquear o varão, seriam soldados parafusos M12 classe 8.8 em suas extremidades para atender a função de rosca, conferindo ao varão sua seção transversal total sem necessidade de abertura de rosca. Na Figura 5.36 é ilustrado o varão A500 com o parafuso soldado em sua extremidade.

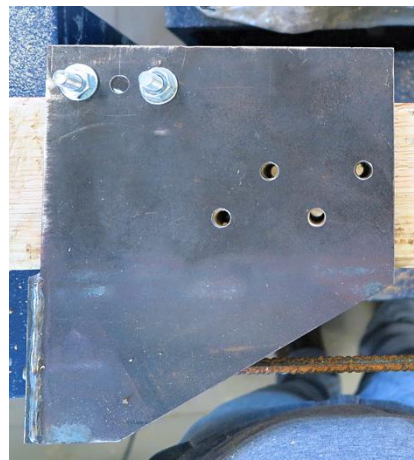


Figura 5.36 – Parafuso M12 classe 8.8 soldado na extremidade do varão A500.

O elemento responsável por ancorar o varão à viga é a peça de ancoragem modelada no Item 4.3.2. A união da peça à viga de madeira é realizada através de sete parafusos M10 classe 8.8, na Figura 5.37 é possível acompanhar a etapa de perfuração da viga para o transpasse dos parafusos.



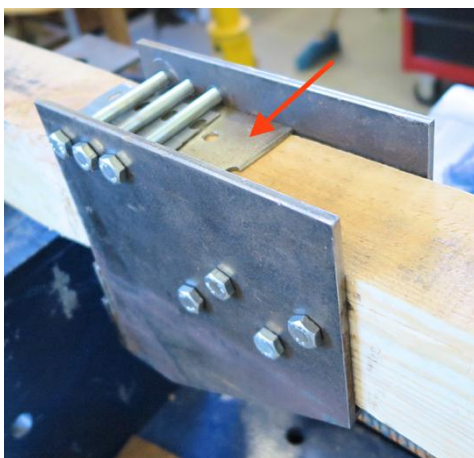
a) Início da perfuração com  $\varnothing$  5 mm



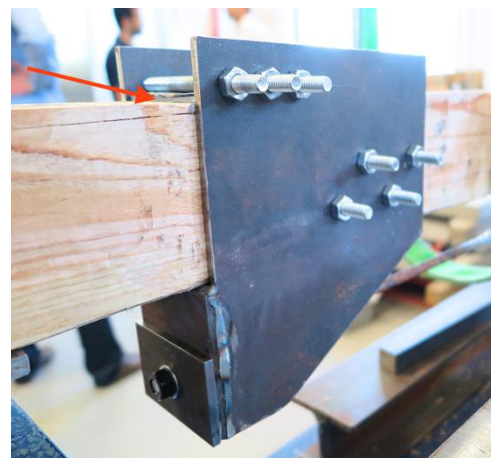
b) Fim da perfuração com  $\varnothing$  10 mm

Figura 5.37 – Perfuração da viga para a união da peça de ancoragem do varão.

Após a perfuração de cada furo, era inserido um parafuso, para que todos os parafusos fossem inseridos de forma que o furo da viga desse de encontro com o furo da peça. A seguir é visto pela Figura 5.38 a instalação completa dos parafusos e indicada pela seta, a chapa de apoio dos parafusos superiores, que foi adotada a fim de evitar o esmagamento local da madeira e diminuir os esforços de flexão no parafuso.



a) Vista superior da lateral traseira



b) Vista lateral frontal

Figura 5.38 – Peça de ancoragem fixa a viga (pormenor para a chapa de apoio dos parafusos).

### 5.6.3 Aplicação de Pré-Esforço no Varão A500

Após a preparação da viga com os elementos de reforço, foi iniciada a fase de pré-esforço no varão. Para a aplicação do pré-esforço, é necessário o aperto das porcas nas duas extremidades do varão, fazendo com que o mesmo seja tensionado, para tal, foi necessário o uso de uma chave dinamométrica. O processo é ilustrado da Figura 5.39.

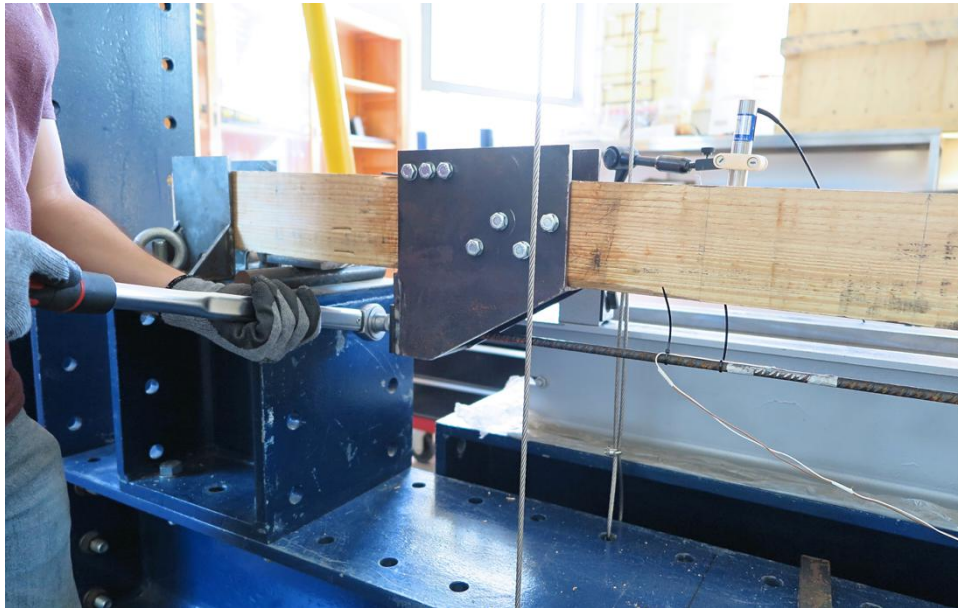
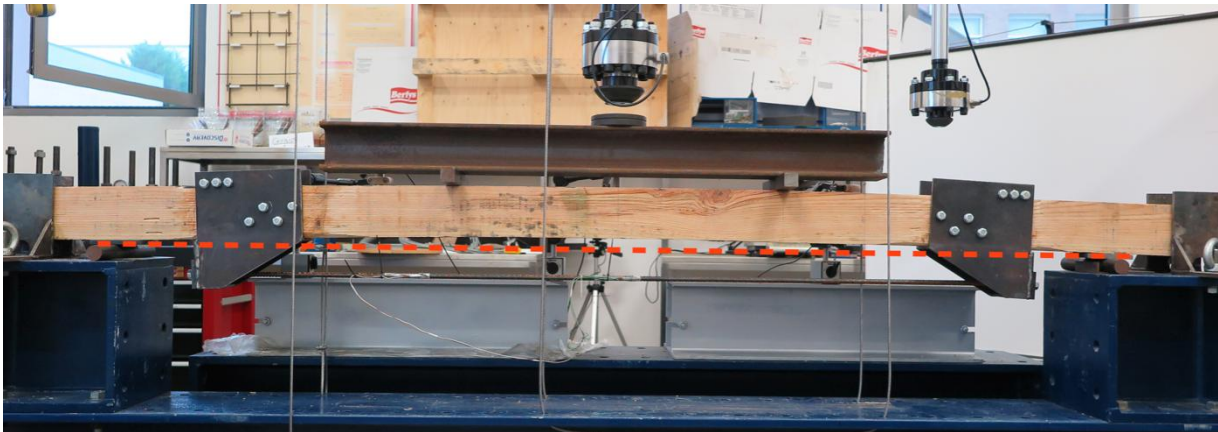


Figura 5.39 – Aperto da porca com chave dinamométrica para pré-esforço do varão.

Todo o processo de pré-esforço do varão foi monitorado, tanto pelos LVDTs, para que a operação não superasse a flecha máxima pré estabelecida em fase de modelação numérica por segurança, tanto pelos strain gauges, a fim de instalar no varão o nível de tensão correto. A seguir na Figura 5.40-a é possível ver o início do processo de reforço, sem nenhum deslocamento imposto, e o final, na Figura 5.40-b, onde é possível notar o deslocamento imposto pelo pré-esforço do varão.



a) Início do processo de pré-esforço do varão

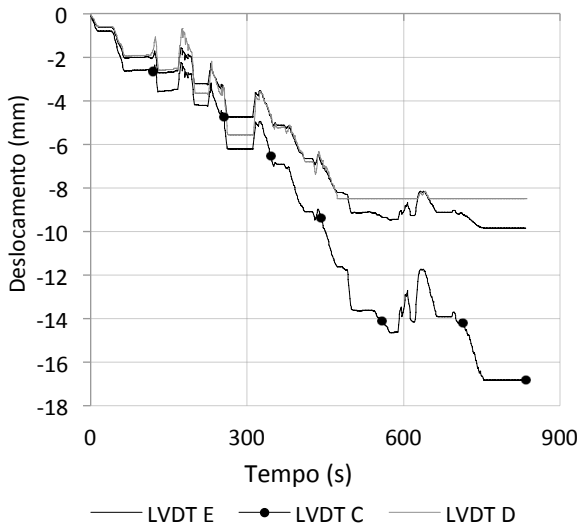


b) Fim do processo de pré-esforço

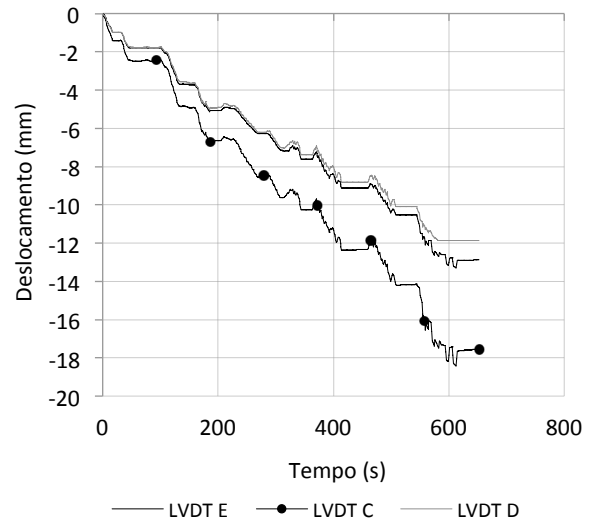
Figura 5.40 – Aplicação de pré-esforço no varão.

Na Figura 5.41 podemos acompanhar o deslocamento vertical sofrido pelos modelos. É visto que os gráficos apresentam picos e degraus em sua trajetória. Este efeito deve-se à aplicação manual do pré-esforço com a chave dinamométrica, que foi feita pausadamente para o controle dos deslocamentos. Além disso, com o efeito torsor da chave, a viga sofreu pequenas vibrações durante a aplicação, efeito visto na Figura 5.41.

Em ambos os gráficos podemos observar que o deslocamento da viga é constante nos dois lados até determinado ponto. A seguir desse ponto nas duas vigas o lado esquerdo se destaca com uma maior deformação até o final da aplicação do pré-esforço, sinalizando uma possível fragilidade das vigas neste lado. A deformação final nas duas vigas foi semelhante.



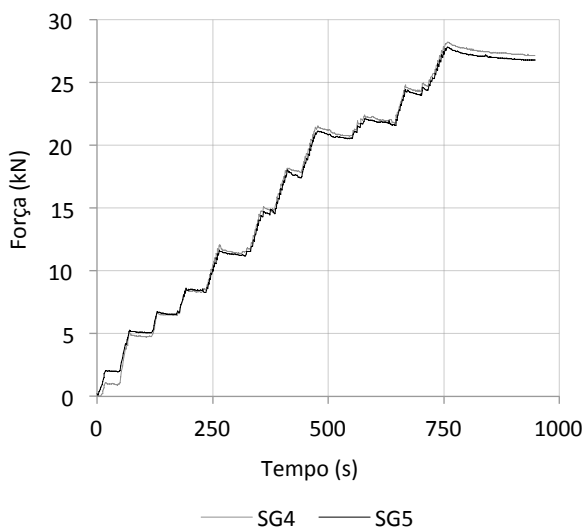
a) Viga VV1



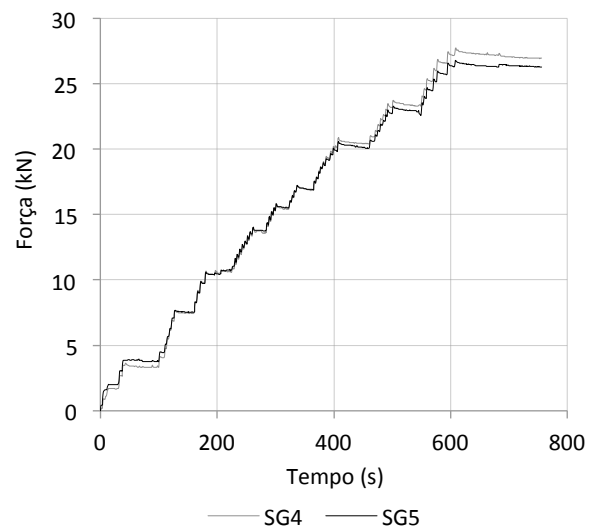
b) Viga VV2

Figura 5.41 – Deslocamento instantâneo sofrido no processo de pré-esforço.

Na sequência, a Figura 5.42 representa a força instantânea instalada no varão após o torque aplicado com a chave dinamométrica. A força foi obtida através dos deslocamentos obtidos nos strain gauges transformados em tensão e por último em força. Como na Figura 5.41 de deslocamentos, também é visto na Figura 5.42 degraus, que representam o intervalo entre uma série de apertos com a chave e outra. No intervalo de aplicação de carga entre um degrau e o próximo, é possível ver oscilações, que são exatamente o número de aplicações com a chave em uma amplitude de 180 graus.



a) Viga VV1



b) Viga VV2

Figura 5.42 – Força instantânea de pré-esforço instalada no varão.

Finalmente na Figura 5.43 é apresentada a força de pré-esforço *versus* o deslocamento vertical colhido pelo LVDT C. Também faz parte do gráfico a análise feita pela modelação numérica do processo

de pré-esforço. Como podemos ver, os gráficos experimentais apresentam forma não linear, fato devido aos gráficos de força e deformação vistos acima serem compostos por degraus e picos, e na união dos dois culmina no gráfico apresentado.

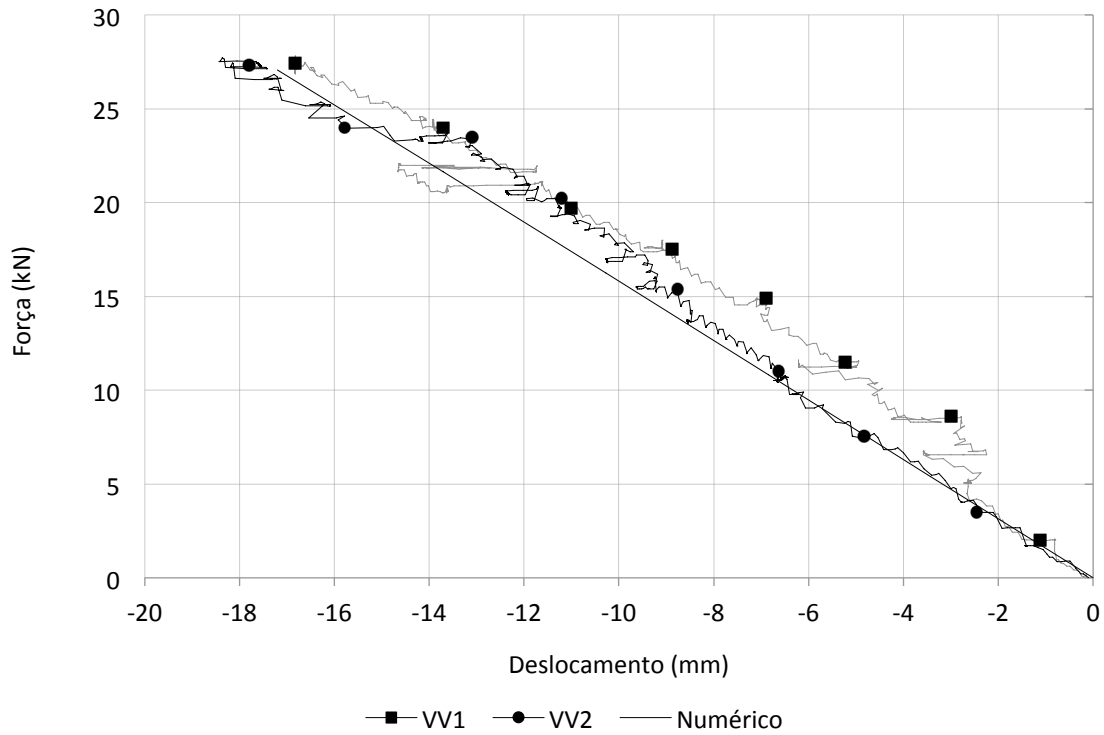


Figura 5.43 – Força de pré-esforço no varão *versus* deslocamento.

É possível observar uma boa correlação entre a rigidez do modelo analisado numericamente e do modelo experimental durante a fase de pré-esforço, apresentando ligeiras diferenças como é visto na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resumo de forças e deslocamentos na fase de pré-esforço das vigas VV1 e VV2.

Força/Deslocamento	Numérico	VV1	DP <sup>1</sup> (%)	VV2	DP <sup>1</sup> (%)
Força de pré-esforço (kN)	27,06	27,8	3	27,7	2
Deslocamento (mm)	-17,2	-16,8	2	-18,3	6

<sup>1</sup>Diferença percentual entre valor numérico e experimental

No final do processo de pré-esforço foi inserida uma segunda porca em ambos os lados dos parafusos soldados como mostra a Figura 5.44, ação tomada para aumentar a área de ancoragem na rosca, segmentando as tensões.

É também possível ver na imagem pela indicação de uma seta, a presença de uma chapa retangular, que teve sua função como anilha para auxiliar a peça de ancoragem a absorver a punção

causada pelo varão, tanto na fase de pré-esforço, como na última fase, de aplicação da carga, a mais hostil para o sistema de ancoragem.

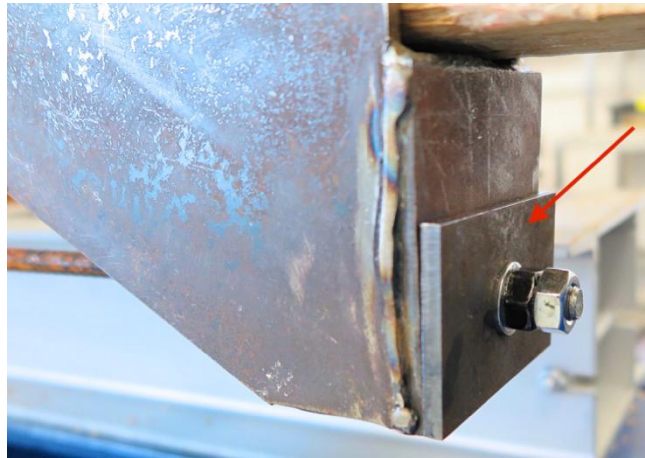


Figura 5.44 – Pormenor do sistema de ancoragem.

#### 5.6.4 Ensaio à Flexão

Com o processo de pré-esforço finalizado, foi então iniciado o ensaio da viga à flexão até a sua rotura. Abaixo a Figura 5.45 ilustra que durante o processo de carregamento da viga VV2 houve o desprendimento de fibras da madeira na parte frontal da viga (a fotografia mostra a parte traseira), indicado pela seta, porém não houve a rotura do modelo neste instante. É possível observar também a flecha avançada da viga neste momento. O pormenor do desprendimento das fibras na face frontal será ilustrado na Figura 5.49.

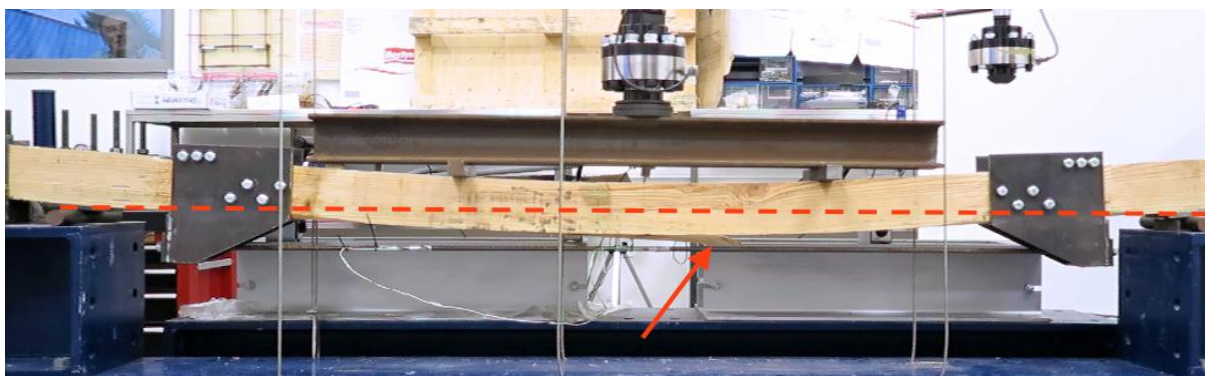


Figura 5.45 – Desprendimento de fibras de madeira na face frontal (VV2).

Mesmo com o desprendimento das fibras, a viga reforçada retomou a carga e alcançou um 1 kN a mais, com mais 20,8 mm de deformação, até que então houve a rotura da viga por tração nas fibras

inferiores no ponto logo abaixo da aplicação de carga, condizente com um nó, como é visto na Figura 5.46.



Figura 5.46 – Ruína da viga VV2.

A seguir são apresentadas as imagens captadas pela câmera termográfica no ensaio à flexão da VV2. Na primeira imagem, Figura 5.47, temos indicado pelas setas três pontos lineares onde a temperatura se distingue do resto do varão, indicando que o mesmo entrou no patamar de cedência do aço. Os dois primeiros pontos da esquerda para a direita da imagem são onde o varão fora desbastado para a colagem dos strain gauges, o ultimo ponto é próximo da solda entre o varão e o parafuso. Por conta da seção minimamente inferior as demais foram as primeiras regiões do varão a entrar no patamar de cedência

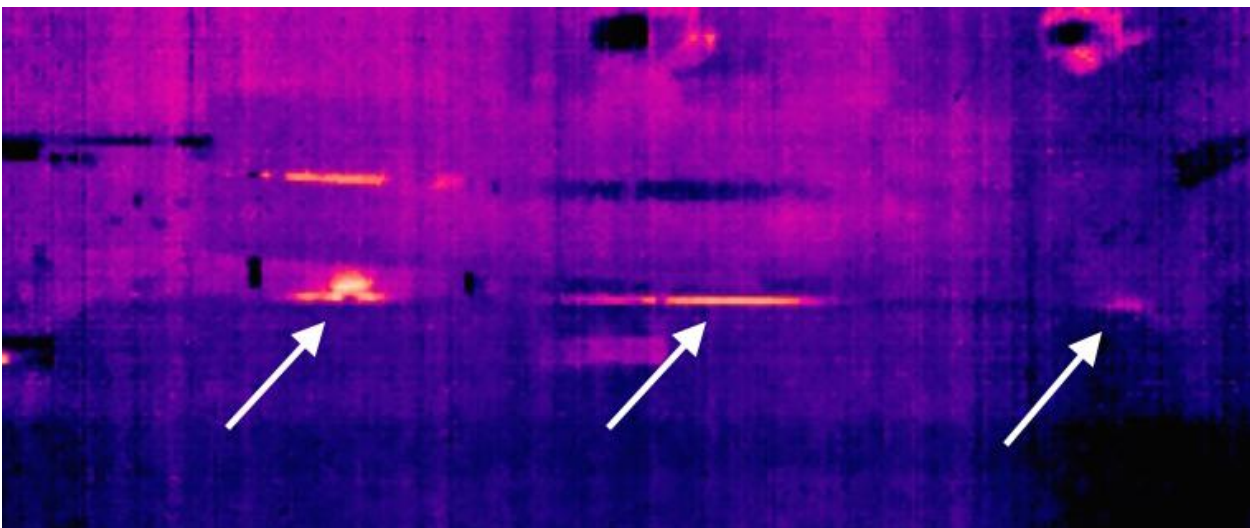


Figura 5.47 – Início da cedência do varão A500 na viga VV2.

Na Figura 5.48 temos juntamente com a cedência do varão, a rotura da viga VV2.

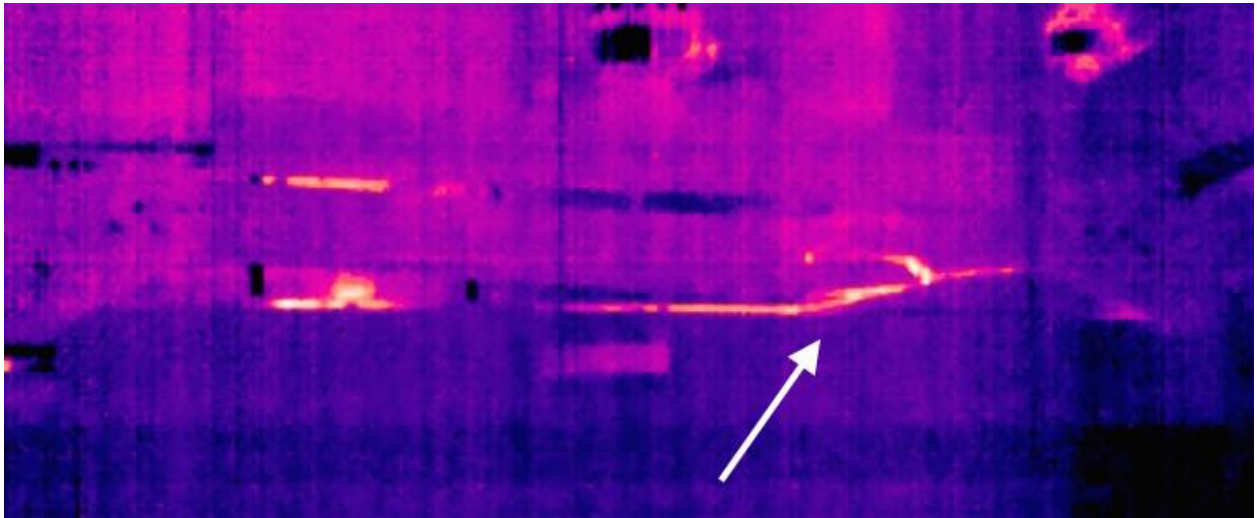


Figura 5.48 – Rotura da viga VV2 acompanhada com a cedência do varão A500.

A Figura 5.49 ilustra viga VV2 rompida, cuja rotura deu-se junto ao nó. A seta na figura indica o lado direito do nó, em que houve o desprendimento das fibras da madeira visto na Figura 5.45.

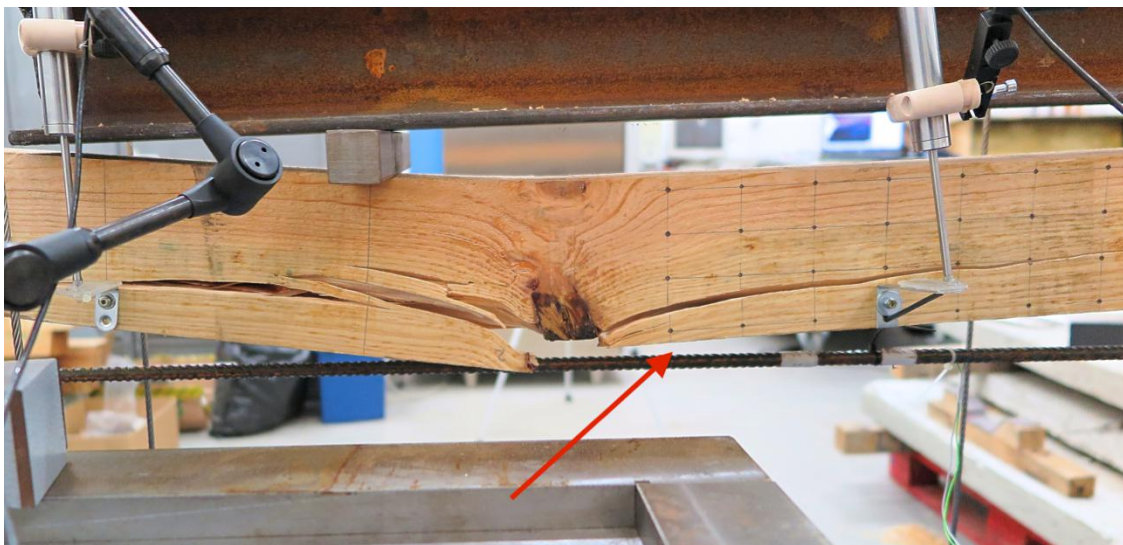


Figura 5.49 – Vista frontal da rotura da viga VV2.

A Figura 5.50 apresenta a rotura vista pela câmara termográfica na Figura 5.48, na face traseira da viga. O modo de rotura apresentado é devido as forças de tração ultrapassarem a capacidade máxima a ser resistida nas fibras inferiores, provocando o desprendimento das mesmas.



Figura 5.50 – Vista traseira da rotura da viga VV2.

Na Figura 5.51, temos a rotura da viga VV1 captada pela câmera termográfica, onde é possível observar por indicação das setas inferiores os pontos do varão já em patamar de cedência, como ocorrido na viga VV2. Na seta superior temos indicado o ponto de rotura da viga VV1, no caso um nó.

Ao lado direito da Figura 5.51, a peça de ancoragem é vista com uma coloração mais clara que a peça de ancoragem do lado esquerdo. Porém isso não indica um aumento de temperatura e sim um reflexo da luz na peça de aço na direção da câmera.

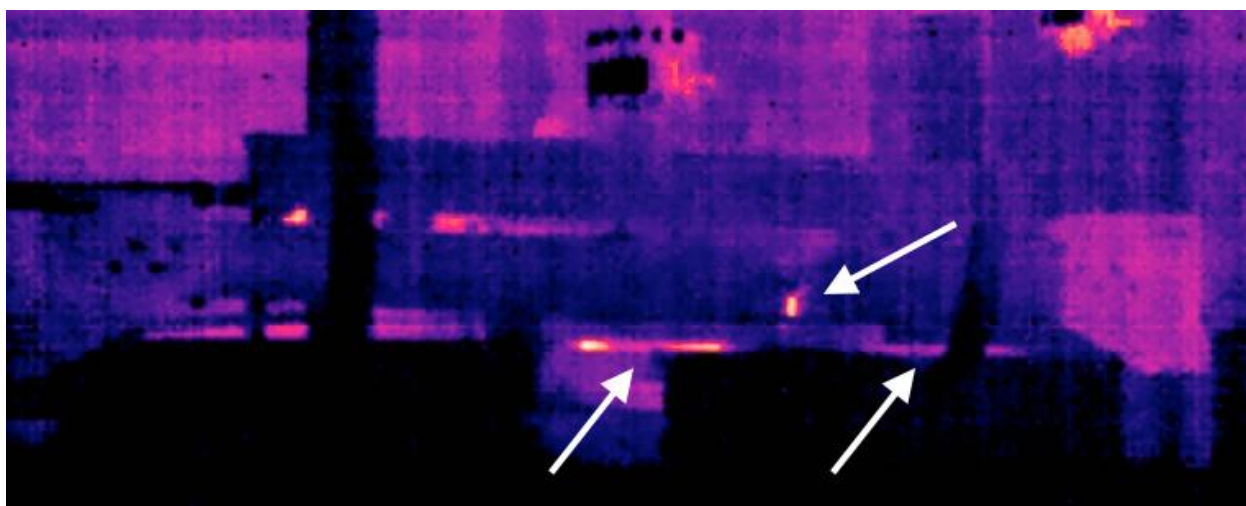


Figura 5.51 – Rotura da VV1 acompanhada da cedência do varão.

Na Figura 5.52, temos o pormenor da rotura da VV1, onde a rotura se deu especificamente no nó número 3 (Anexo A).



Figura 5.52 – Vista traseira da rotura da VV1.

Podemos observar através da Figura 5.53 que a rotura transpassou para a outra face da viga após ter rompido no nó, transversalmente às fibras.



Figura 5.53 – Vista frontal da rotura da VV1.

Analisando novamente a Figura 5.41, foi possível observar durante a aplicação do pré-esforço uma maior deformação no lado esquerdo das vigas. Foi indicado anteriormente que tal fato poderia ser o sinal de uma possível fragilidade das vigas neste lado. A suposição foi confirmada com a rotura das vigas pelo lado esquerdo, onde estava localizado o nó 3 no caso da VV1 e nó 2 no caso da VV2, que foi o maior ponto de fragilidade das vigas devido a presença dos nós na zona do meio do vão e também na face inferior, zona de tensões máximas de tração.

### 5.6.5 Análise dos Resultados

A Figura 5.54 apresenta os diagramas de força *versus* deslocamento dos modelos VV1 e VV2 e também do modelo calculado numericamente.

É possível observar através do gráfico que as duas vigas obtiveram cargas de rotura semelhantes. Devido à mesma classe das vigas na classificação visual, já se era esperado um desempenho semelhante até a rotura, também os dois modelos possuíam um nó na mesma zona, contribuindo para a semelhança.

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

Ao mesmo tempo, ocorre o aumento da força de pré-esforço na medida em que a distância entre os pontos de ancoragem do varão aumenta com o carregamento.

São dois efeitos contraditórios que ocorrem no início, sendo que o segundo efeito (aumento da força e pré-esforço) torna-se constante ao atingir o patamar de cedência do varão, sendo que o primeiro efeito citado (perda de excentricidade) se torna dominante.

Essa ação é vista no diagrama do modelo numérico, porém é mais evidente no gráfico das vigas ensaiadas. A partir da linha estabelecida na Figura 5.54, aproximadamente nos 15 mm de deformação, houve o início do paramar de cedência dos varões, captados pelos strain gauges, a partir desse instante podemos observar uma maior taxa de deformação, que aumenta até a rotura das vigas, indicando a diminuição da eficiência do pré-esforço pelo efeito dominante da perda de excentricidade.

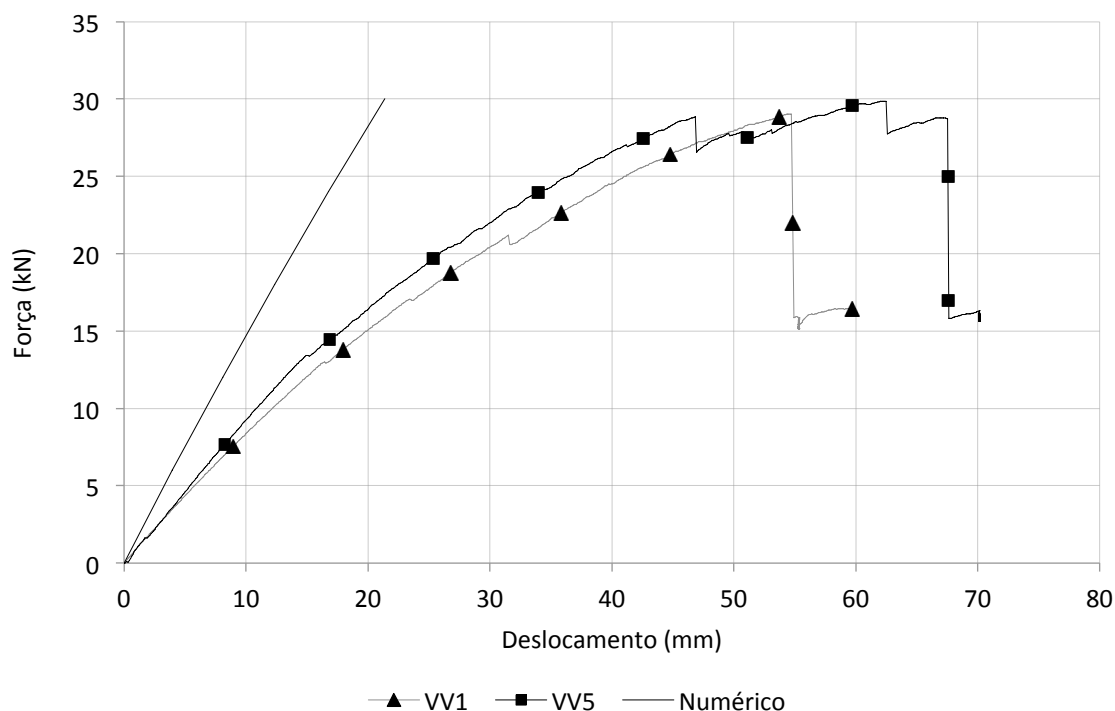


Figura 5.54 – Diagrama de força versus deslocamento da série VV.

Um fato interessante ocorrido no ensaio da VV2 mencionado anteriormente nos comentários da Figura 5.46 foi o desprendimento das fibras ao lado direito do nó 2. Podemos ver claramente o momento em que isso ocorreu em seu gráfico, com aproximadamente 28 kN de carga e 45 mm de deformação, tendo a carga caído cerca de 2 kN. Após a queda houve recuperação de carga até os 29,86 kN. Certamente a viga não se rompeu no momento do desprendimento das fibras devido ao reforço com o varão, que no caso estava absorvendo a maior parte dos esforços de tração.

A seguir na Tabela 5.7, são apresentados os valores máximos de força alcançados pelas vigas reforçadas juntamente com seu deslocamento no mesmo instante.

Tabela 5.7 – Carga máxima e deformação instantânea da série VVR.

Viga	Força máxima (kN)	Deslocamento na força máxima (mm)
VV1	29,03	54,4
VV2	29,86	62,3

A Figura 5.55 ilustra as deformações colhidas pelos LVDTs na viga VV1. Somente o LVDT E pode coletar os dados até a rotura da viga, próximo a 40 mm. O LVDT C por pouco não apanhou a rotura, por conta do seu campo de 50 mm de leitura, e o LVDT D chegou ao limite próximo aos 30 mm.

Analisando o gráfico, temos que a rigidez do lado esquerdo da viga foi maior que a do lado direito, culminando porém pela rotura do lado esquerdo pela presença do nó.

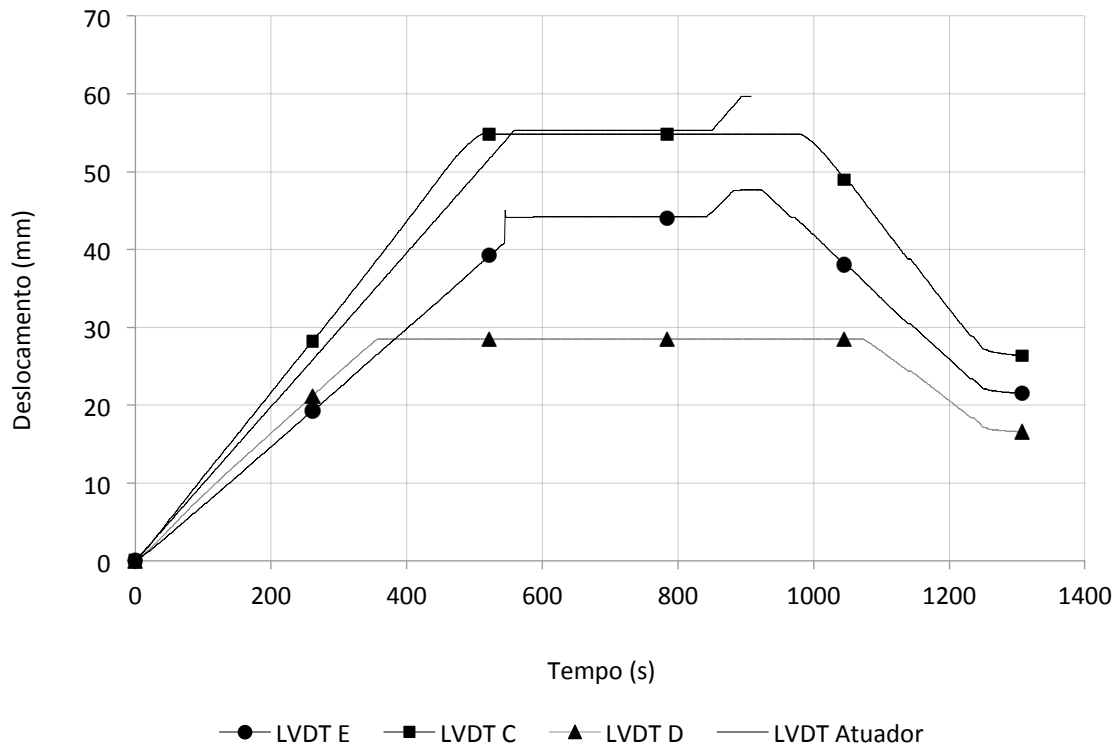


Figura 5.55 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VV1.

Na Figura 5.56, temos a leitura das deformações na viga VV2. Como as deformações dessa viga foram maiores que a anterior, nenhum LVDT pode captar dados até a rotura, pois a mesma ultrapassou o campo de leitura.

Analisando a coleta de deformações, podemos observar pela linha do LVDT C um pulso aos 50 mm, momento em que houve o desprendimento das fibras do lado direito do nó 2. Comprovamos também uma menor rigidez do lado esquerdo da viga, devido à presença do nó, que resultou na rotura da viga.

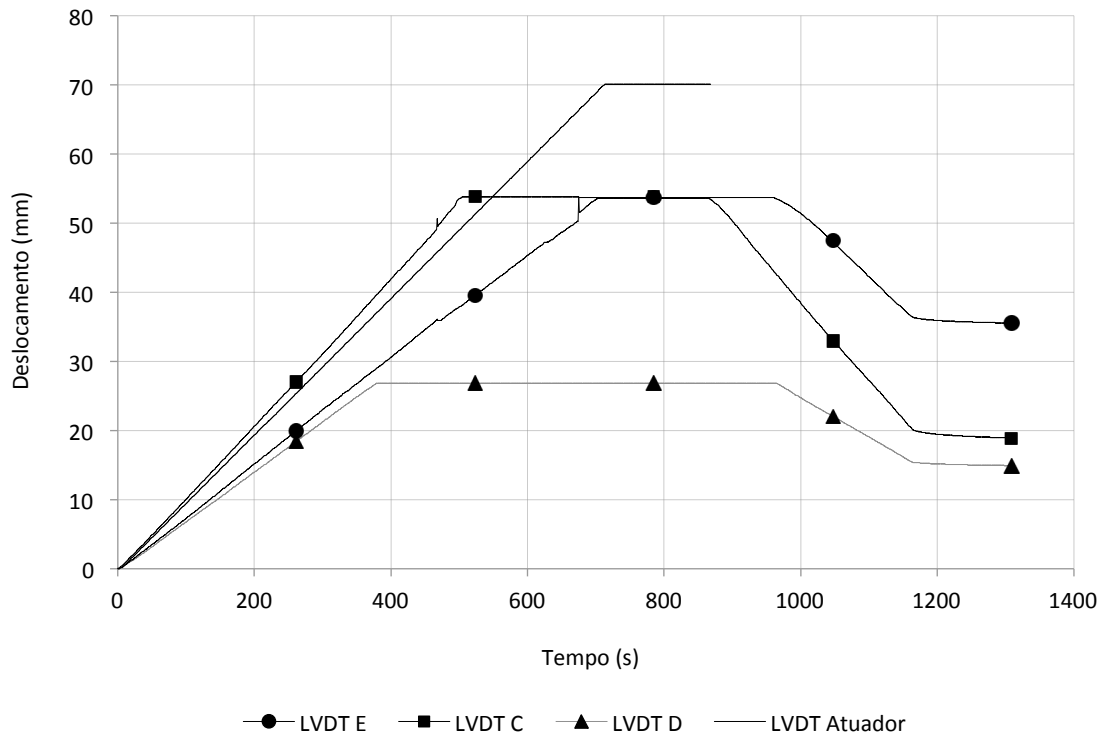


Figura 5.56 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VV2.

## 5.7 VIGAS REFORÇADAS COM CABOS DE AÇO PRÉ-ESFORÇADOS

Dada a metodologia de reforço abordada no Item 3.4 do Capítulo 3, o processo de reforço experimental no laboratório compreendeu o arqueamento da viga pelo pré-esforço introduzido nos cabos de aço, e por fim, o ensaio para obter a resistência à flexão das vigas com em conjunto com o sistema de reforço. As vigas reforçadas com este método foram a VCH1 e VCH2, e o processo de reforço é enunciado a seguir.

### 5.7.1 Instrumentação

Como mencionado no Item 5.4, a viga foi instrumentada com três LVDTs em sua face lateral como nos outros ensaios. No caso deste sistema de reforço com os cabos de aço, para a medir a tensão aplicada no sistema, cada parafuso de ancoragem dos cabos foi instrumentado com strain gauges, colhendo as extensões obtidas, sendo convertidas posteriormente em forças, sendo designados SG 6, 7 e 8. A representação da montagem dos sensores é ilustrada na Figura 5.57.

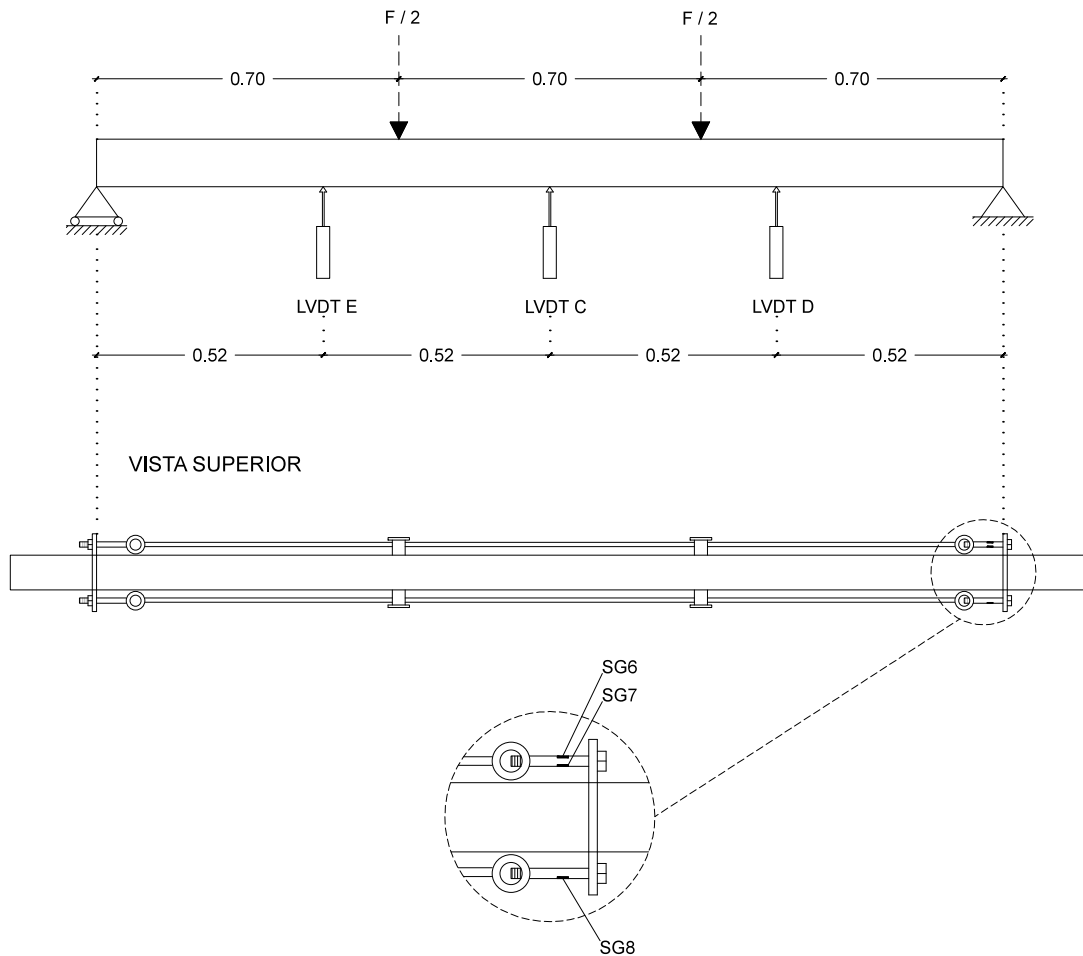
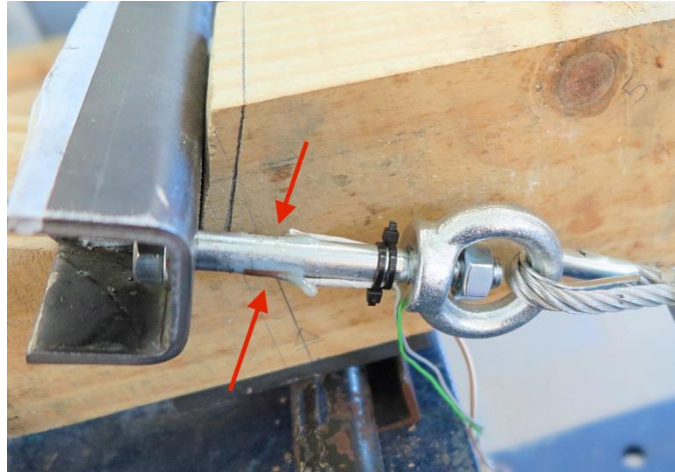


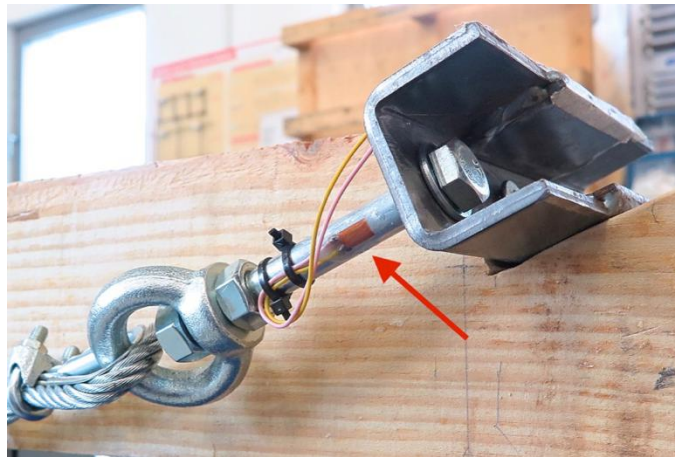
Figura 5.57 – Instrumentação do modelo reforçado com cabos de aço (medidas em m).

Como visto na representação da figura acima, em um parafuso são instalados dois strain gauges, em faces opostas do parafuso, tal ação foi tomada pois mesmo a força de tração sendo no mesmo sentido do cabo, no caso de haver um desequilíbrio do sistema esforços em outras direções podem ocorrer no parafuso, causando flexão no mesmo, e por isso a tomada de extensões nas duas faces opostas.

A Figura 5.58 ilustra os extensómetros instalados nos parafusos M12 classe 8.8 como descrito acima.



a) Instalação de dois strains gauges em faces opostas



b) Instalação do strain gauge em uma só face

Figura 5.58 – Instrumentação dos parafusos.

### 5.7.2 Montagem do Sistema de Reforço

A montagem do sistema de reforço com cabos compreendeu etapas como a execução de entalhes na madeira, fixação das peças de ancoragem do reforço e o travamento do próprio cabo de aço. Para fixação dos perfis reforçados UPN, que são os responsáveis pela ancoragem dos cabos, foram executados entalhes na viga como é apresentado na Figura 5.59. Os perfis foram fixos na viga por dois parafusos HBS 8 x 100 da Rothoblass, os mesmos utilizados para o reforço com chapa de aço, apresentados na Figura 5.11.



Figura 5.59 – Entalhe executado na madeira para ancoragem do perfil UPN.

Após a fixação dos perfis UPN foram instalados na face inferior da viga os desviadores dos cabos de aço, responsáveis por garantir excentricidade ao pré-esforço, fixos por dois parafusos HBS 8 x 100 em cada extremidade e posicionados exatamente na linha na aplicação da aplicação da carga, conforme Figura 5.60.



Figura 5.60 – Instalação dos afastadores dos cabos de aço.

Na sequência foram instalados os cabos de aço com alma de fibra 19 x 6+ 1, sendo inseridos nos olhais dos parafusos, passando sobre sapatilhas de aço para composição do raio mínimo do cabo. Por fim, o travamento dos mesmos foi realizado por meio de cinco serra-cabos em cada uma das extremidades, conforme Figura 5.61.



Figura 5.61 – Cabo de aço fixo ao sistema de ancoragem ativo.

### 5.7.3 Aplicação do Pré-esforço

Após a preparação da viga com os elementos de reforço, foi iniciada a fase de pré-esforço nos cabos de aço. Para a aplicação do pré-esforço, foi necessário o aperto das porcas nas extremidades dos parafusos de olhal, fazendo com que os cabos, ligados aos parafusos, fossem tensionados.

O aperto das porcas foi realizado somente do lado da Figura 5.61 que é o lado direito, sendo este lado com ancoragem ativa, e outro lado onde foram instalados os sensores, ancoragem passiva, para evitar ao máximo interferência na coleta de extensões pelos sensores. Para realizar o aperto das porcas foi necessário o uso de uma chave dinamométrica, como no caso do varão, sendo ilustrado na Figura 5.62.



a) Aperto do cabo da face traseira



b) Aperto do cabo da face frontal

Figura 5.62 – Aperto das porcas com chave dinamométrica.

O aperto das porcas foi dado em fases, baseado nos valores obtidos na monitorização dos strain-gauges, tendo como preocupação que os níveis de tensão nos dois cabos fossem os mais próximos possíveis, concomitantemente a isso e tão importante quanto foi o nível de deformação vertical sofrido pela ação do pré-esforço, colhido pelos LVDTs.

A preocupação da instalação de um extensómetro de cada lado do parafuso é justificada por na realidade, há a possibilidade de não acontecer a tração do parafuso a 0 ° com o esforço, por mais alinhado que esteja, e para buscar o equilíbrio do sistema pode haver algum deslocamento em torno do seu eixo, fazendo que ocorram outros esforços no parafuso, os de flexão.

Esse fenómeno ocorreu de fato, conforme visto na Figura 5.63. Os extensómetros SG 6 e SG 7 obtiveram nos mesmos instantes extensões em sentidos opostos, confirmando o efeito da flexão no parafuso. Assim sendo, considerando um comportamento linear e um campo contínuo de tensões na zona dos extensómetros, a obtenção da resultante da força seria a média entre os valores de SG 6 e SG 7. Porém a realidade se comportou de forma mais complexa, como será tratado adiante.

A seguir na Figura 5.63 temos os valores de força obtidos pelos três extensómetros e também a média obtida entre o valor do SG 6 e SG 7 na viga VC1, como mencionado anteriormente para a obtenção do valor da força axial no parafuso.

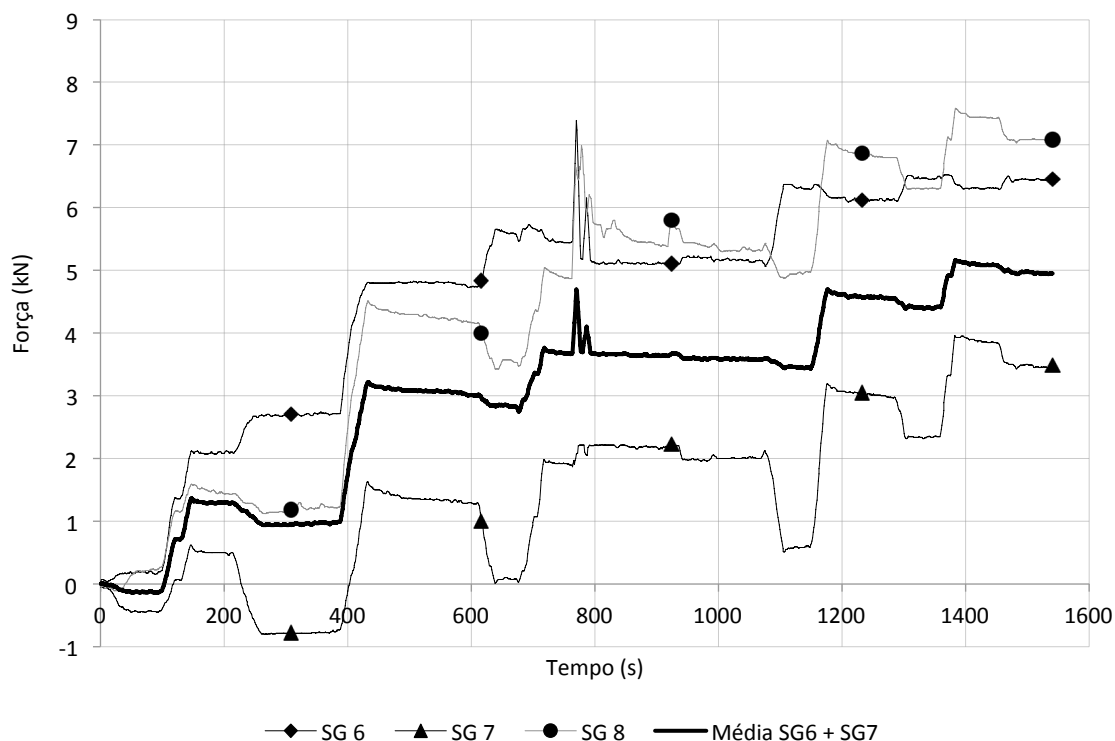


Figura 5.63 – Valores de força obtidos na fase de pré-esforço, VC1.

A Figura 5.64 representa os valores de força obtidos pelos três extensômetros e também a média obtida entre o valor do SG 6 e SG 7 na viga VC2.

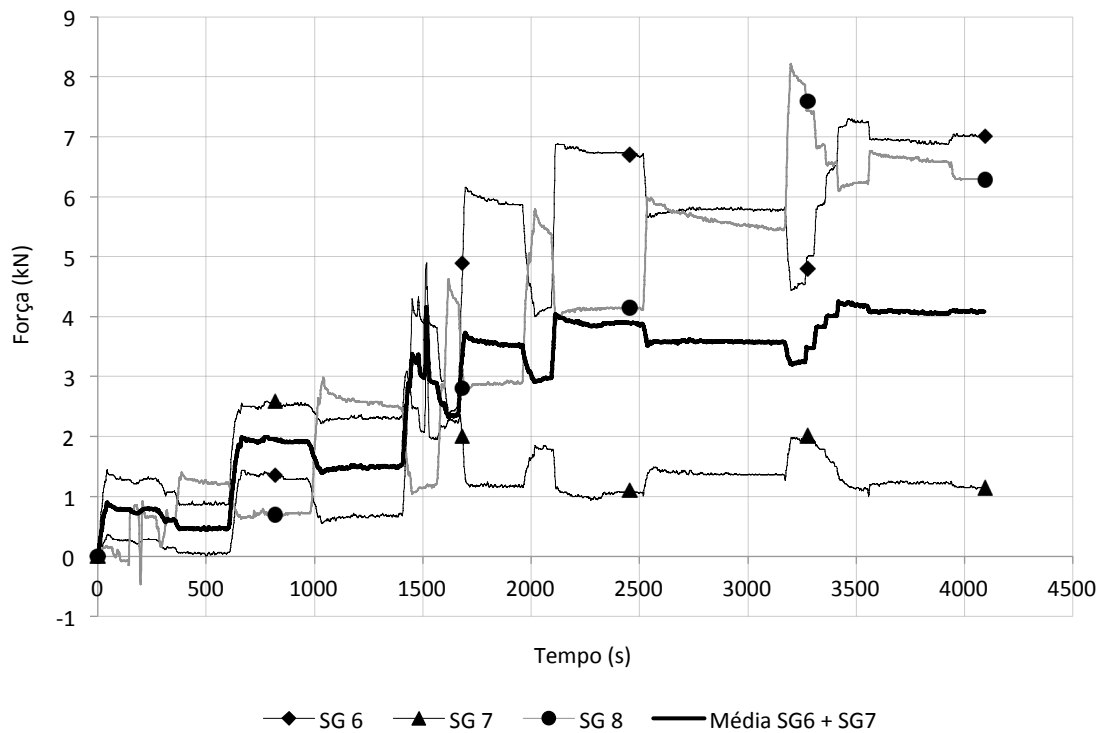


Figura 5.64 – Valores de força obtidos na fase de pré-esforço, VC2.

Durante o processo de pré-esforço, ao se apertar um cabo este permanecia estável ou decaía sua força, e o cabo do lado oposto tinha incremento de força, ora os dois cabos tinham acréscimo de força, ora o sentido da flexão no parafuso se invertia, não houve uma regra de comportamento. A explicação do aperto de um cabo influenciar no outro cabo é que os dois estavam interligados em suas extremidades pelo perfil UPN de ancoragem, como visto anteriormente na Figura 5.62.

Como mencionado anteriormente, a realidade se comportou de forma mais complexa, e os valores obtidos pela média de SG 6 e SG 7 como sendo a força axial nos parafusos tinham diferenças significativas do valor calculado no modelo numérico levando-se em consideração a força no cabo e o deslocamento vertical sofrido pela viga.

Conforme ilustrado na Figura 5.65, pelo modelo numérico, para uma deformação de 15,2 mm a força de pré-esforço deveria ser de 7,03 kN, e nas vigas, com o mesmo nível de deformação de 15,2 mm fora obtida uma força de pré-esforço de 3,60 kN na VC1 e 3,25 kN na VC2.

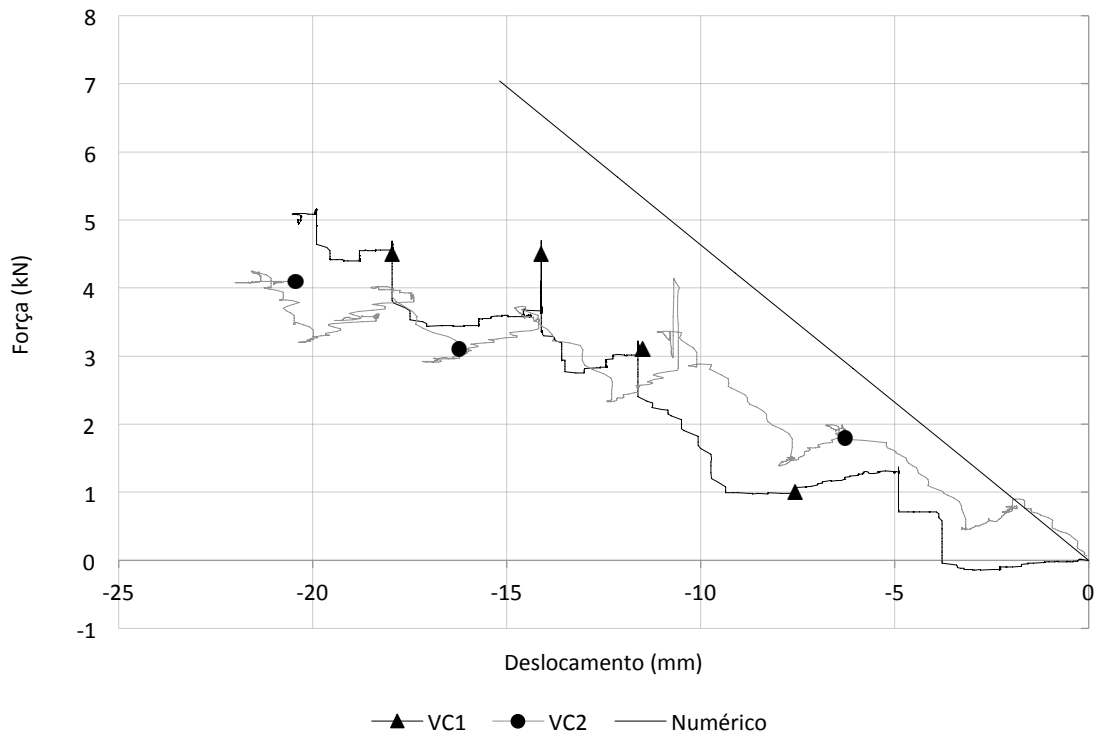


Figura 5.65 – Média dos valores SG 6 + SG 7 das vigas VC1 e VC2 versus deslocamento vertical das vigas.

O objetivo original era de se estabelecer a força de 7,03 kN nos cabos através dos valores obtidos nos strain gauges instalados nos parafusos, dado pela modelação numérica. Porém com o avanço do processo de pré-esforço, o valor médio medido pelos strain gauges ainda estava por volta dos 4 a 5 kN e a deformação já havia ultrapassado 5 mm da previsão do modelo numérico.

Foi decidido por questão de segurança para as vigas que o processo de pré-esforço fosse finalizado de acordo com a deformação vertical já avançada, tendo em conta que o valor real de força medido nos cabos por intermédio dos parafusos não fora fiável.

Em seguida temos na Figura 5.66 os deslocamentos das vigas VC1 e VC2 durante o processo de pré-esforço, e na Tabela 5.8 o resumo das forças e deslocamentos obtidos também nesta fase.

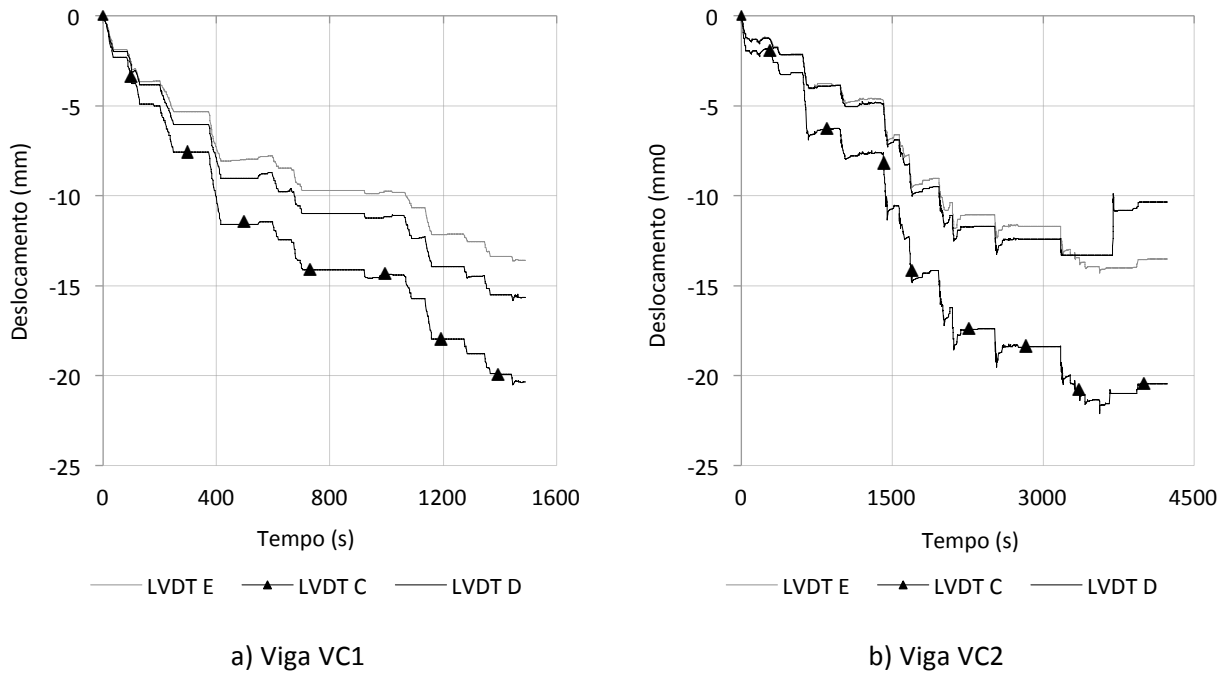


Figura 5.66 – Deformação das vigas da série VCH durante a aplicação do pré-esforço.

Tabela 5.8 – Resumo de forças e deslocamentos na fase de pré-esforço das vigas VC1 e VC2.

Força/Deslocamento	Numérico	VC1	DP <sup>1</sup> (%)	VC2	DP <sup>1</sup> (%)
Força de pré-esforço (kN)	7,03	4,95	30	4,09	42
Deslocamento (mm)	15,2	-20,3	34	-20,4	34

<sup>1</sup>Diferença percentual entre valor numérico e experimental

A Figura 5.67 ilustra o fim do processo de aperto das porcas, nota-se a entrada do parafuso para dentro do perfil se comparado com a Figura 5.62-b, indicando o alongamento dos cabos.



Figura 5.67 – Fim do processo de rosqueamento dos parafusos e pré-esforço dos cabos.

Na Figura 5.68 temos a viga VC1 preparada para o início do processo de reforço. A viga em questão possuía cerca de 15 mm de deformação vertical no centro do vão (Anexo A), desenvolvida no processo natural de secagem da madeira. Tal deformação é vista na Figura 5.68.

Tal deformação não pode ser usada a favor da viga, pois caso fosse, teria uma zona de nós na camada inferior superficial, alterando significativamente a resistência da seção à tração. Por este motivo foi decidido usar esta face comprometida para cima, trabalhando à compressão, mesmo com a deformação não sendo a favor da viga.



Figura 5.68 – Viga VC1 preparada para receber o pré-esforço.

Com o processo de pré-esforço a deformação antes positiva foi convertida para negativa, a favor da viga, conforme ilustrado na Figura 5.69.

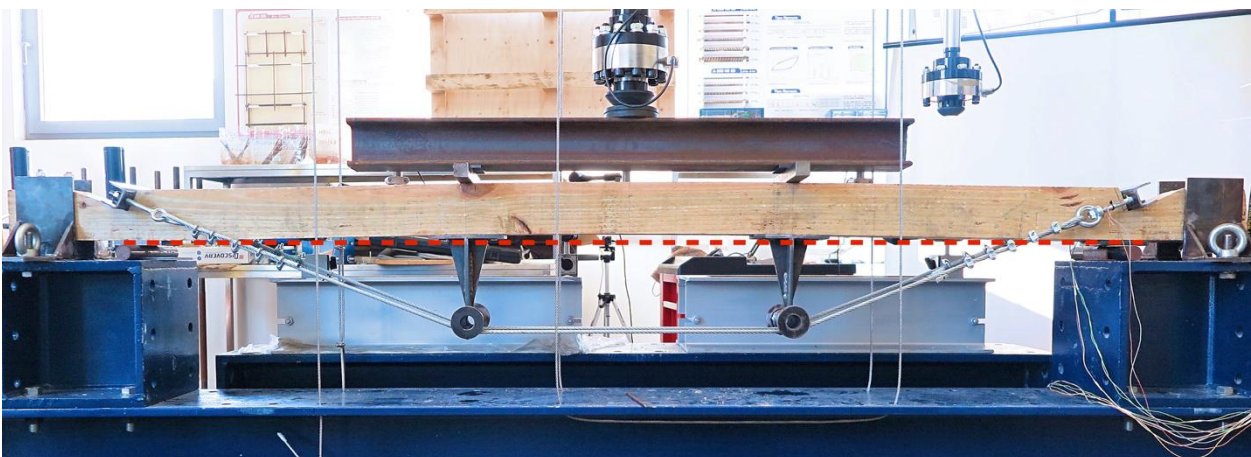


Figura 5.69 – Viga VC1 com o processo de pré-esforço finalizado.

#### 5.7.4 Ensaio à Flexão

Com o processo de pré-esforço finalizado, foi então iniciado o ensaio da viga à flexão até a sua rotura. Como neste modelo houve a presença de cabos pré-esforçados, por medida de segurança o laboratório foi evacuado e o ensaio foi acompanhado de uma sala exterior por meio de acesso remoto aos computadores, e câmera para visualização do interior do laboratório.

Na Figura 5.70 temos o local de rotura da viga VC2 indicado por uma seta, logo abaixo do ponto de aplicação de carga. A rotura da viga foi dada pelo esgotamento da capacidade à tração do parafuso de olhal, da ancoragem ativa, que quando rompeu soltou junto o cabo pré-esforçado. Com isso a carga que antes era sustentada pelo cabo foi desviada para a viga, que não suportou e rompeu imediatamente.

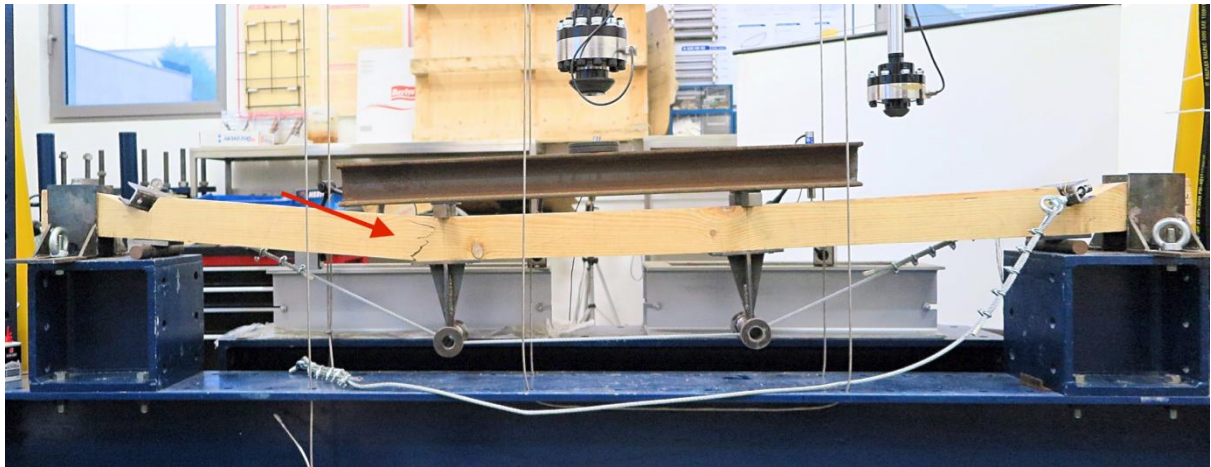


Figura 5.70 – Rotura da viga VC2.

Podemos observar na imagem captada pela termografia na Figura 5.71, a diferença de temperatura no parafuso de olhal, que nesta fase já se encontrava em patamar de cedência. É possível também notar uma tonalidade mais clara nos pontos onde é aplicada a carga, indicando a concentração de tensões na madeira.

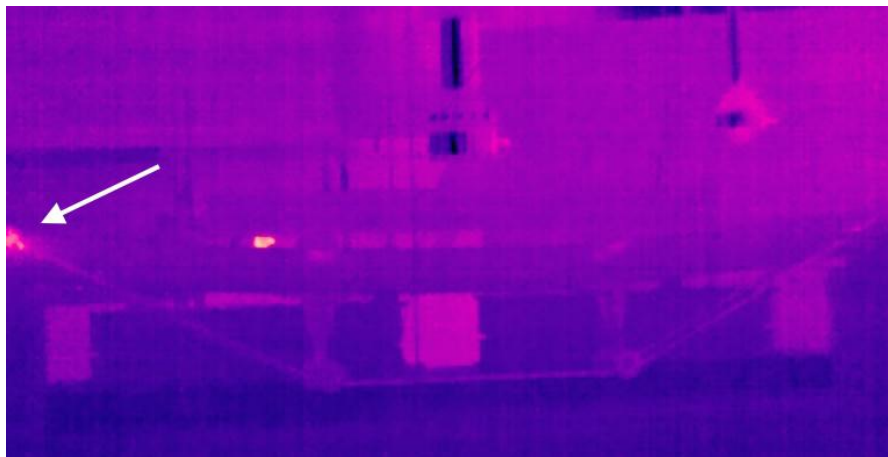


Figura 5.71 – Cedência do parafuso de olhal captada pela câmera termográfica.

Instantes após houve a rotura do parafuso, atentando a Figura 5.72 temos indicados pelas setas a alta temperatura no perfil UPN, devido a transmissão de energia dissipada na forma de calor pelo parafuso, a rotura da face inferior até a face superior da seção transversal da viga, e o cabo de aço com a extensão fixa pelos serra cabos também com uma temperatura superior, devido ao atrito entre os cabos e serra cabos.

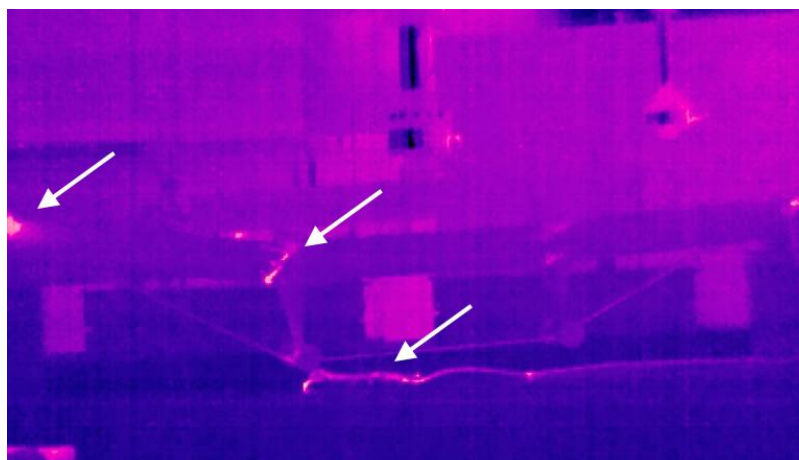


Figura 5.72 – Rotura da viga VC2 captada pela câmera termográfica.

Um fator decisivo para a viga VC2 receber o sistema de reforço por cabos de aço foi pela presença de dois grupos de nós na linha de aplicação de carga, indicados pelas setas na Figura 5.73. Pela localização dos nós, é dada a viga dois pontos importantes de fragilidade, e pelo fato do reforço com cabos contar com dois desviadores na mesma linha de aplicação de carga, os desviadores atribuíram apoio aos nós, fazendo com que as tensões ali presentes fossem facilmente suportadas pelos nós.

A confirmação assertiva dessa decisão foi dada pela rotura da viga, não sendo pelos nós e sim na seção transversal imediatamente após o limite de apoio do desviador.

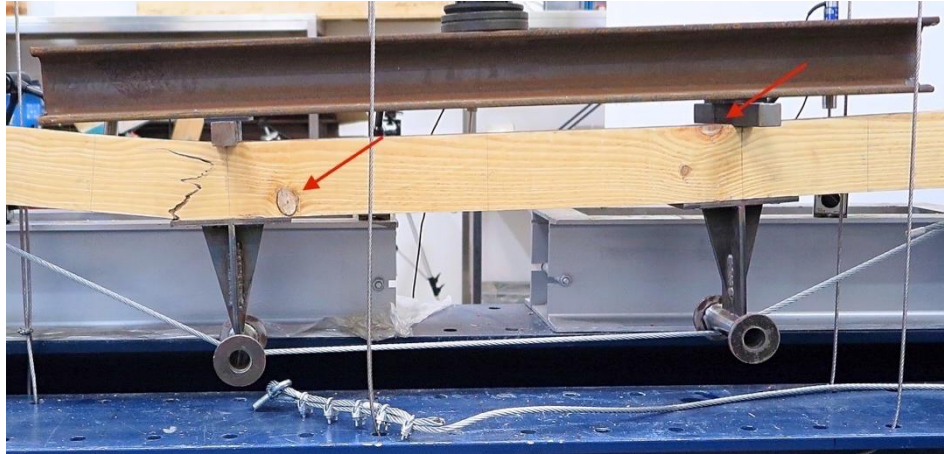
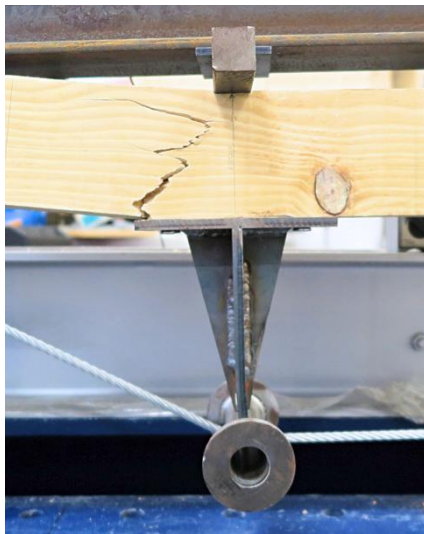
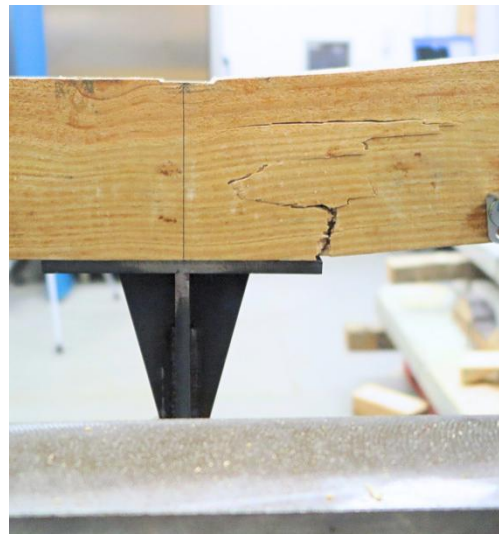


Figura 5.73 – Pormenor da localização dos nós da viga VC2 e local de rotura.

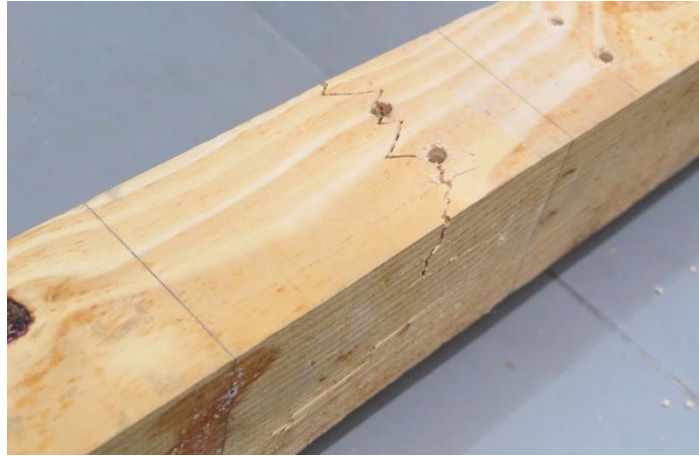
A seguir na Figura 5.74 temos os pormenores da rotura da viga VC2. Como visto na figura, a rotura se deu na maior parte da seção transversal, transpassando a viga de uma face a outra, onde por pouco não houve o total desprendimento das fibras na face superior. Tal fato ocorreu por conta da elevada carga que a viga suportava no instante da rotura.



a) Face lateral traseira da viga



b) Face lateral frontal da viga



c) Face inferior da viga

Figura 5.74 – Pormenor da rotura na seção transversal da VC2.

Na sequência temos outro efeito após a rotura do parafuso ilustrando na Figura 5.75. Ao se romper, o cabo que antes suportava parte da carga do sistema deixou de fazer parte do conjunto, fazendo com que o equilíbrio fosse alterado. Como o outro cabo não se rompeu e ainda tinha o nível de tensão elevado devido ao pré-esforço, devido a ausência da força de equilíbrio do conjunto o cabo que ainda estava íntegro deslocou o perfil UPN para buscar novamente o equilíbrio do sistema. A força ainda presente no cabo de aço era muito alta e originou a deformação do parafuso de olhal, que foi dobrado.



a) Perfil UPN deslocado



b) Parafuso de olhal deformado

Figura 5.75 – Efeitos da rotura do parafuso no sistema de ancoragem ativa.

Por fim na Figura 5.76 temos o parafuso de olhal, que alcançou o limite máximo de resistência e se rompeu após a porca de aperto do mesmo.



Figura 5.76 – Pormenor da rotura do parafuso de olhal.

A Figura 5.77 ilustra a rotura da viga VC1. O processo de rotura foi muito semelhante com a viga VC2, pois se deu novamente no parafuso de olhal.

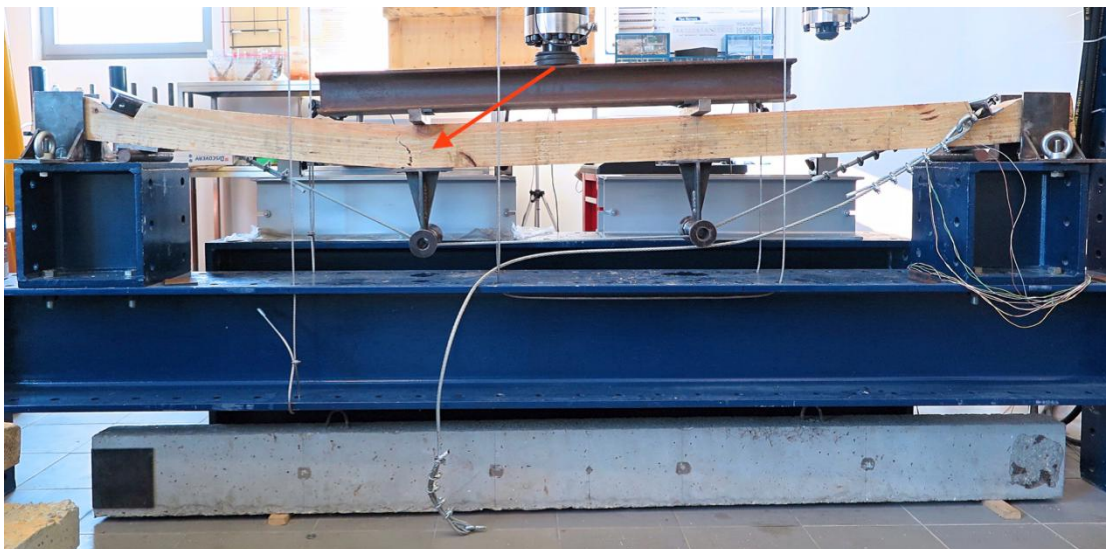


Figura 5.77 – Rotura da viga VC1.

As imagens da câmera termográfica indicam novamente a cedência do parafuso de olhal instantes antes da sua rotura indicado pela seta na parte esquerda da Figura 5.78. Porém no caso da viga em questão, instantes próximos à rotura a viga teve um desprendimento interno de fibras na zona de apoio do desviador, ocasionando perda de carga, onde é indicado pela seta acima do afastador.

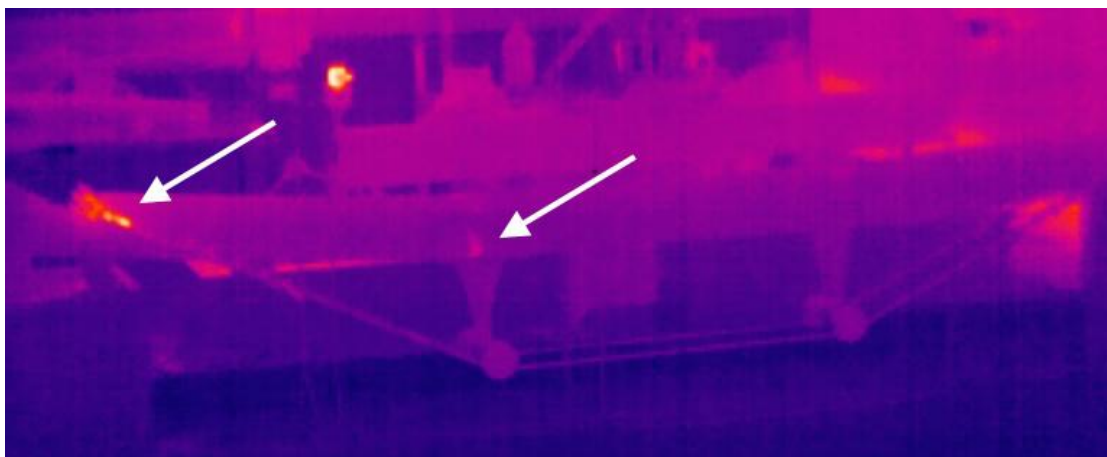


Figura 5.78 – Cedência do parafuso de olhal e desprendimento das fibras da madeira junto ao desviador.

Após este ocorrido a viga tentou uma recuperação de carga. Porém pelo estado avançado de alongamento do parafuso de olhal o mesmo rompeu, ocasionando a rotura da viga no mesmo local do desprendimento interno das fibras, como ilustra a Figura 5.79, processo semelhante ao relatado na viga VC2.

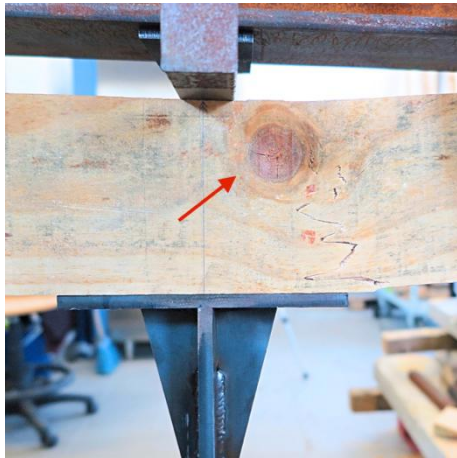


Figura 5.79 – Rotura da viga VC1 captada pela camera termográfica.

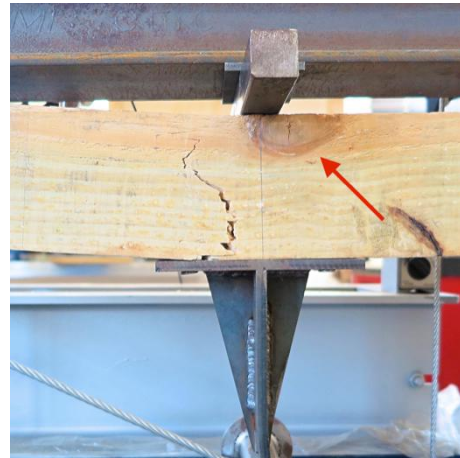
A seguir na Figura 5.80 temos o pormenor do local de rotura da viga VC1. Assim como na viga VC2, a viga VC1 também possui um nó na linha de aplicação de carga, indicado pelas setas nas imagens, cuja extensão vai desde a face inferior da viga até sua face lateral, sendo um ponto de fragilidade as tensões de tração. Por este motivo, a viga foi invertida, fazendo com que o nó trabalhasse à compressão.

Assim como ocorrido na viga VC2, a rotura se deu próximo a face limite de apoio do afastador, e não no nó 2 (Anexo A), comprovando o efeito benéfico do apoio do afastador ao nó. Como visto na

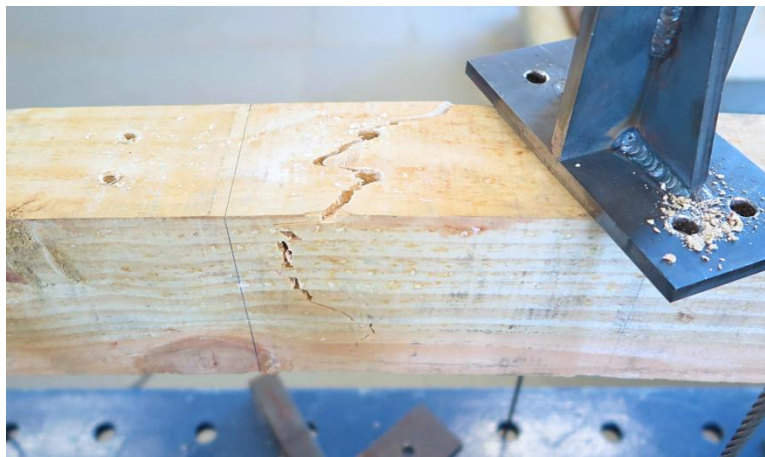
Figura 5.80, a rotura transpassou as duas faces laterais desde a face inferior até próximo ao topo da viga.



a) Face lateral frontal



b) Face lateral traseira



c) Face inferior

Figura 5.80 – Pormenor da rotura na seção transversal da VC1.

O mesmo efeito de deslocamento no perfil UPN ocorreu na viga VC1 após a rotura do parafuso de olhal do cabo da face traseira, assim como a deformação no parafuso, visto na Figura 5.81.

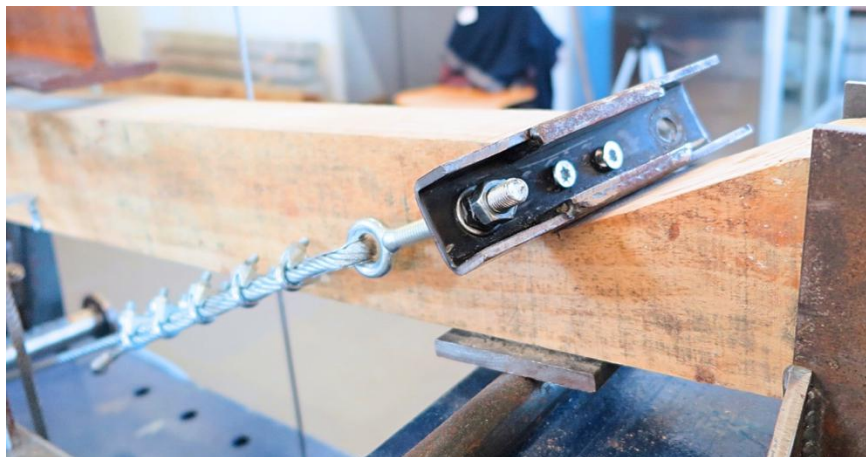


Figura 5.81 – Perfil UPN deslocado.

### 5.7.5 Análise dos Resultados

A Figura 5.82 apresenta o diagrama de força *versus* deslocamento das vigas VC1 e VC2 e também do resultado do modelo numérico. Conforme visto, as duas vigas obtiveram uma carga de rotura muito próxima, porem com deformações diferentes.

Na classificação visual, a viga VC2 obteve classificação E a viga VC1 foi reprovada para uso estrutural, devido a 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. Apesar da reprovação para uso estrutural, 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.

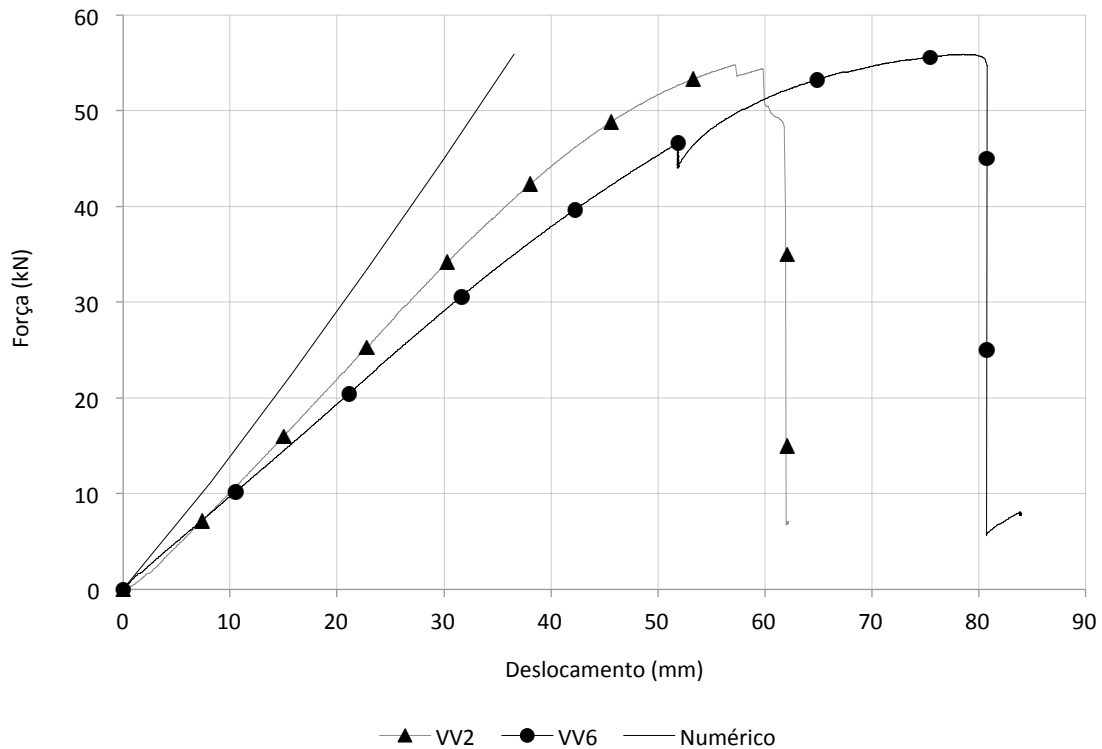


Figura 5.82 – Diagrama de força versus deslocamento da série VC.

A respeito da deformação da viga VC1, era esperado que pela baixa taxa de crescimento e por consequência conter menos lamelas na madeira, a deformação atingisse patamares superiores, o que não aconteceu. Uma hipótese para tal fato é que o cabo de aço era novo, e foi utilizado primeiro na viga VC2 e depois na viga VC1.

Segundo Cimaf (2009), cabos de aço novos possuem um módulo de elasticidade inferior se comparados a cabos usados, que tem incremento em seu módulo durante a vida em serviço, ainda segundo o autor, o módulo de um cabo usado ou pré-esticado pode ser até 20 % superior a um cabo sem uso. Assim sendo, o cabo de aço em questão teve maior deformação na viga VC2, pois foi sua primeira utilização, e depois ao utiliza-lo na VC1, seu módulo já seria superior, explicando uma menor deformação da VC1.

Outros fatores para complementar tal comportamento podem ter relação ao empeno em formas diferentes nas duas vigas, e a diferença da força de pré-esforço instalada nas vigas, por menor que tenha sido a diferença.

Na Tabela 5.9 são dados os valores de força máxima e deformação instantânea da série VC.

Tabela 5.9 – Carga máxima de deformação instantânea da série VC.

Viga	Força máxima (kN)	Deslocamento na força máxima (mm)
VC1	54,80	57,3
VC2	55,89	78,5

Em seguida são apresentados na Figura 5.83 e Figura 5.84 os deslocamentos colhidos pelos LVDTs instalados na face lateral das vigas. Todos os LVDTs colheram os deslocamentos, porém a flecha da viga foi maior que o campo de medição em todos os pontos. Em ambos os gráficos o LVDT do atuador teve similaridade com a medição do LVDT C. A explicação para o fato é que como os desviadores dos cabos de pré-esforço foram posicionados exatamente na linha de carga, toda a região central sofreu deformação em níveis muito próximos, diferente dos outros LVDTs posicionados a esquerda e a direita.

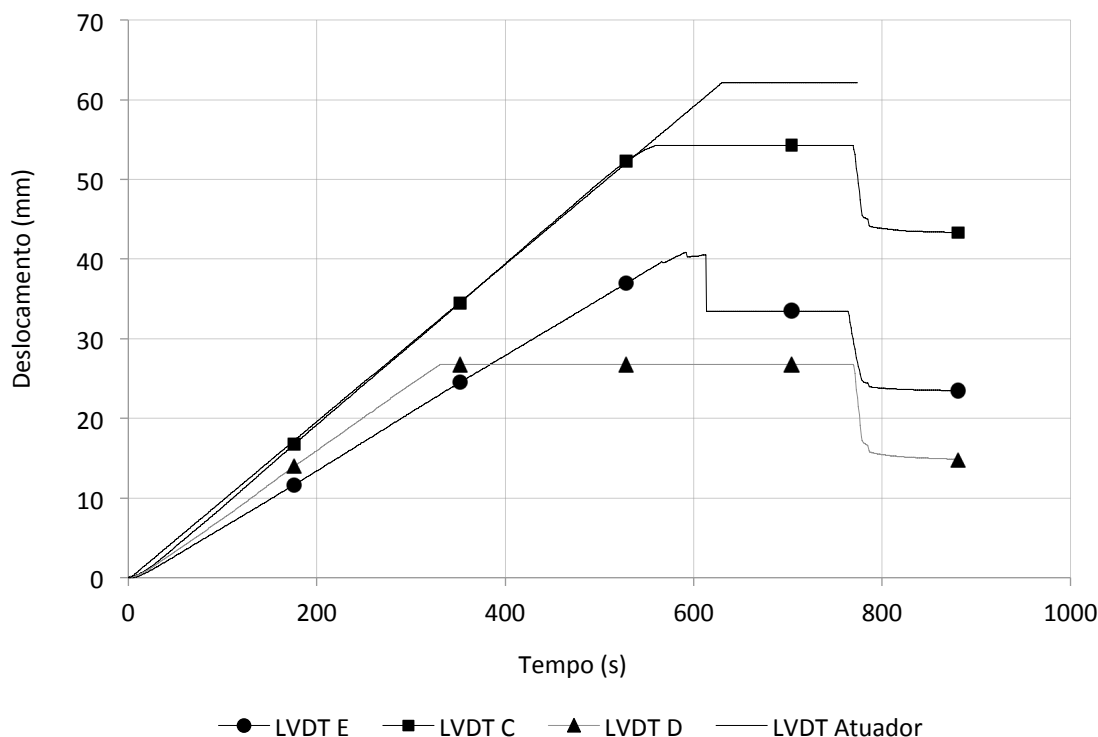


Figura 5.83 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VC1.

A seguir a Figura 5.84 apresenta os deslocamentos medidos na viga VC2, nota-se uma igualdade de deformações nos dois lados da viga até o campo de medição do LVDT D. No patamar dos 50 mm da linha do LVDT do atuador nota-se um intervalo com o mesmo nível de deformação, que foi gerado por uma pausa no ensaio para conferência do sistema de acesso remoto do sistema.

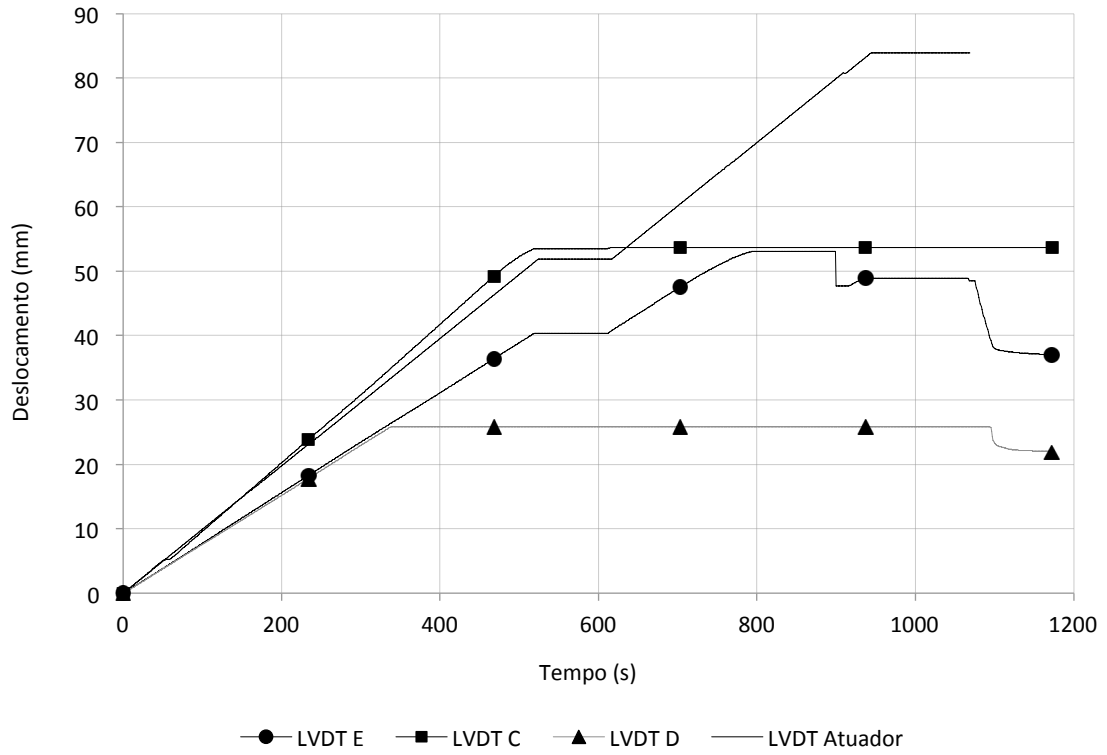


Figura 5.84 – Deformações colhidas pelos LVDTs durante ensaio da viga VC2.



## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

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. Os modos de rotura observados foram também mais dúcteis, contra o modo de rotura frágil das vigas sem reforço. Em forma de conclusão, compara-se, de seguida o desempenho das três soluções analisadas.

### **6.1 COMPARATIVOS**

Na Figura 6.1, apresenta-se a sobreposição dos resultados experimentais relativos a todas as vigas ensaiadas reforçadas. Inclui-se ainda o resultado de uma viga representativa da série de referência, para efeito de comparação.

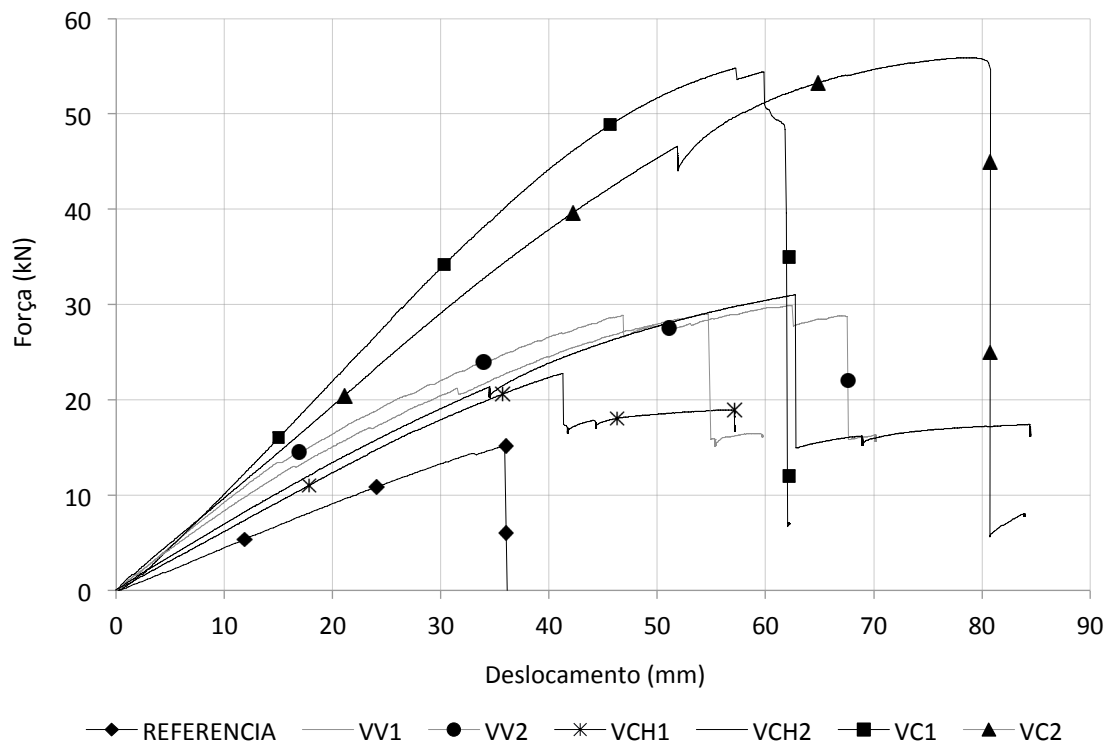


Figura 6.1 – Diagramas de força *versus* deslocamento das vigas reforçadas e referência.

No que diz respeito ao aumento da capacidade de carga, observando o gráfico, é notório que um sistema de reforço se distingue dos demais: o reforço por meio de cabos de aço. A seguir aparecem os modelos reforçados com o varão e chapa de aço, e por último, a viga VR3, sendo uma viga representativa da série referencia por estar muito próxima dos valores médios de carga máxima e deslocamentos obtidos na Tabela 5.2.

A Tabela 6.1 expressa, em números, as cargas máximas de rotura das vigas reforçadas e o respectivo acréscimo de carga proporcionado pelos sistemas de reforço. Como referência, foi adotada a média das vigas da série sem reforço, calculada no Item 5.3.

Tabela 6.1 – 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

Extraindo os valores de carga de rotura da Tabela 6.1, temos exposta na Figura 6.2 uma comparação do nível de carga máxima atingida por cada viga reforçada. É possível notar uma média de valores no patamar de 30 kN, composta pelos sistemas de reforço com a chapa e o varão, que apesar de serem sistemas com excentricidade e forças de pré-esforço diferentes, atingiram valores próximos na carga de rotura, assemelhando sua eficiência quanto ao aumento de carga.

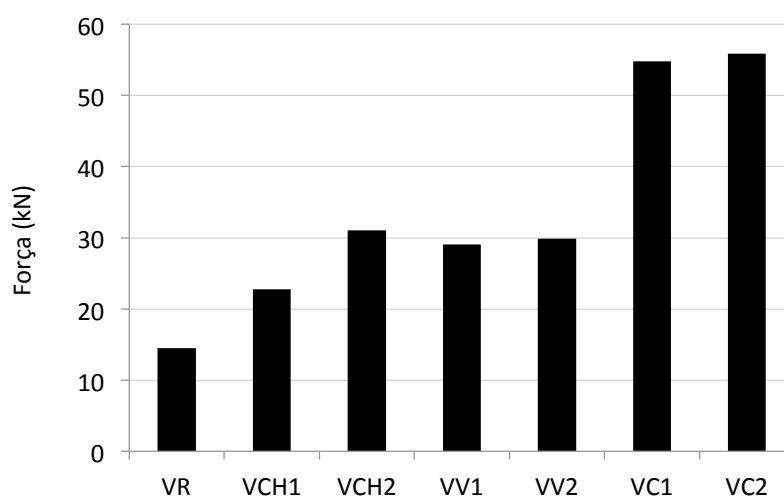


Figura 6.2 – Comparação entre os valores máximos de carga obtidos em cada sistema de reforço.

Relativamente à rigidez proporcionada por cada sistema de reforço, fora determinado um parâmetro “k”, que relaciona a força obtida pela 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 ambas os carregamentos.

Na Tabela 6.2, 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 6.2 – Acréscimo de rigidez proporcionada pelos sistemas de reforço.

<b>Vigas</b>	<b>F 40% - F 10%</b> <b>(kN)</b>	<b>D 40% - D 10%</b> <b>(mm)</b>	<b>k</b> <b>(kN/mm)</b>	<b>Aumento</b> <b>percentual</b> <b>(%)</b>
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

Verifica-se que os sistemas de reforço cresceram no mínimo 25% de rigidez às vigas, atingindo até 137% de aumento. Na Figura 6.3 procede-se à comparação dos respectivos resultados, sendo que a maior rigidez foi dada pelo sistema de reforço com cabos de aço, seguido pelo varão e por último a chapa de aço.

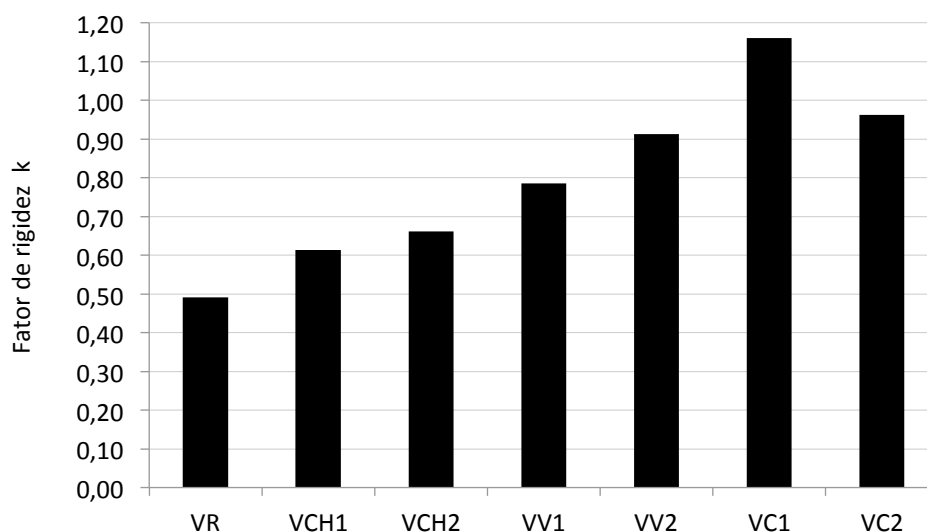


Figura 6.3 – Comparação do acréscimo de rigidez proporcionada pelos sistemas de reforço.

Complementarmente ao objetivo do acréscimo de carga, pretende-se comparar o desempenho das diferentes soluções perante o objetivo de obter o menores deslocamentos no decorrer do carregamento. Para avaliar e comparar o desempenho dos modelos reforçados, foram tomadas as cargas verificadas no instante onde se atingiu a flecha máxima correspondente ao Estado Limite de Utilização, aplicado para combinação de serviço. O Eurocódigo 5 (2008) parte 1-1, quadro 7.2, dita que uma viga apoiada sobre dois apoios deve respeitar uma flecha limite instantânea de  $\ell/300$  até  $\ell/500$ . No caso deste estudo, será utilizada para efeito de comparação a flecha de  $\ell/300$ , correspondente a 7,00 mm.

Na Tabela 6.3 tem-se o valor limite de flecha instantânea imposta ( $W_{inst}$ ) subtraído da contraflecha ( $W_c$ ), ou seja,  $W_{inst} - W_c$ , dada em cada modelo nos ensaios experimentais, em conjunto com o valor da carga instantânea. Na Figura 6.4 procede-se à comparação das respetivas cargas.

Tabela 6.3 – Carga instantânea ao atingir o valor limite de flecha instantânea.

Série	Referência	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

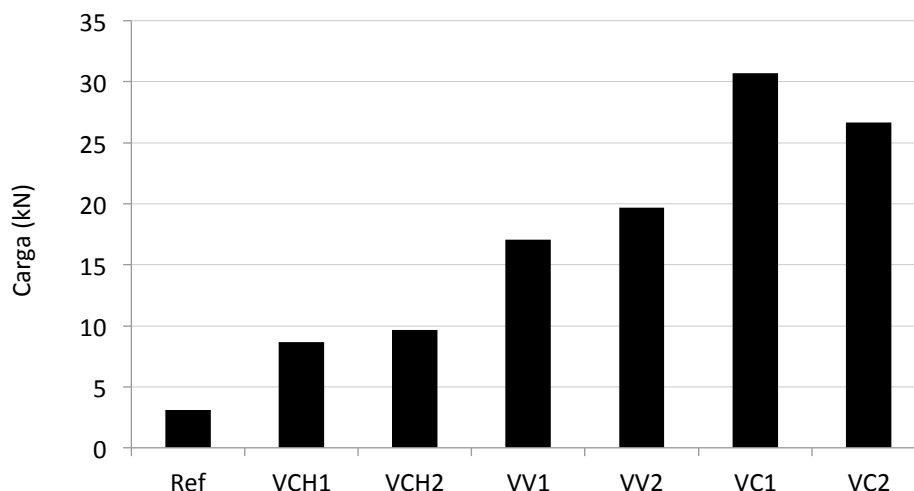


Figura 6.4 – Carga obtida ao atingir o valor limite de flecha instantânea ( $W_{inst}$ ).

Todos os sistemas de reforço diminuíram sensivelmente o deslocamento vertical até a flecha limite instantânea, o que significa em uma situação real o pré-esforço proporciona que seja aplicado um maior carregamento na viga até atingir a flecha máxima instantânea admissível. De modo geral, a carga associada à flecha limite instantânea teve um acréscimo de 170 % até 880 %, em comparação com as vigas da série referência.

## 6.2 REFORÇO POR MEIO DE CHAPA DE AÇO PRÉ-ESFORÇADA

O reforço por meio de chapa de aço pré-esforçada foi o de mais simples execução se comparado com os demais, necessitando apenas de uma chapa de aço, parafusos e um macaco hidráulico para realização do reforço.

Mesmo tendo a menor excentricidade de todos os sistemas, o acréscimo de carga ficou entre 57 % com a VCH1 e 114 % com a VCH2. Para a viga VCH1, foi considerado muito positivo um acréscimo de 57 %, relativamente às vigas de referência, pelo estado delicado que a viga se encontrava devido a massiva presença de nós, sendo que a chapa e os parafusos enrijeceram as ligações e promoveram maior resistência à viga. Certamente, esta viga com qualquer um dos outros reforços, onde não havia qualquer ligação entre a parte inferior da viga e o sistema de reforço, teria tido uma rotura muito mais breve.

Embora inferior aos demais sistemas com relação ao nível de carga quando atingido o limite de flecha instantânea, o que se justifica pelo fato deste sistema possuir a menor contra-flecha de instalação, o sistema proporcionou um incremento de carga de 178% na VCH1 e 210 % na VCH2.

Um dos pontos fortes deste reforço foi a ductilidade que a chapa de aço proporcionou ao sistema, fazendo que o modo de rotura frágil da madeira fosse transformado em sistema conjunto com rotura dúctil. Mesmo após a rotura, a chapa manteve a união da viga impedindo seu desmembramento, aspecto muito relevante para a segurança do sistema.

### **6.3 REFORÇO POR MEIO DE VARÃO DE AÇO PRÉ-ESFORÇADO**

Com relação à instalação do sistema, a solução com recurso a varões retos foi o que apresentou o nível mais elevado de dificuldade, tanto pela necessidade de fabrico de peças específicas para a ancoragem do reforço, tanto para a montagem das peças de ancoragem na viga, requerendo a furação exata da viga para o transpasse dos parafusos, que devido a localização da viga a ser reforçada em obra pode não ser tarefa fácil.

A respeito do acréscimo de carga, o sistema proporcionou um aumento de 101% a viga VV1 e 106% a viga VC2. A obtenção de valores muito próximos pode estar relacionada à semelhança física das vigas, as duas vigas obtiveram atribuição de classe de qualidade “E”. Além disso, o sistema de reforço condicionou as forças de tração para o varão, fazendo com que a viga suportasse maioritariamente os esforços de compressão, onde o desempenho guiado pela qualidade das vigas foi determinante e semelhante.

O acréscimo de carga quando atingido o limite de flecha instantânea teve um bom desempenho, pois contava com um nível de contra-flecha da ordem de 17,5 mm, acrescentando em relação a viga sem reforço 441 % com a VV1 e 529 % com a VV2, em ordem de carga para o mesmo nível de flecha.

### **6.4 REFORÇO POR MEIO DE CABOS DE AÇO PRÉ-ESFORÇADOS**

O reforço com cabos de aço pré-esforçados está associado a um nível de dificuldade de instalação intermediário entre os demais, pois também requereu peças especiais, como o perfil UPN reforçado para ancoragem e os desviadores para os cabos feitos sob medida.

Além da execução de entalhes na madeira para fixação do perfil UPN, tornando sua instalação problemática em pavimentos, por exemplo. No entanto, para peças de madeira com liberdade de intervenção na face inferior e extremidades, como linhas de asnas de madeira, ou vigas principais, pode ser implementado com certa facilidade.

Este sistema de reforço obteve um excelente acréscimo de aumento de carga, demonstrando sua eficiência para cargas concentradas, onde se não houvesse a rotura do parafuso de olhal, poderia

ter alcançado valores superiores. A excentricidade garantida pelos desviadores potencializou o efeito do pré-esforço, alcançando um acréscimo de carga de 279 % na VC1 e 286% na VC2.

Com relação ao nível de carga associado ao limite de flecha instantânea, os resultados foram bem superiores aos demais sistemas, tanto pela contra-flecha inicial quanto pela rigidez do sistema. Foi verificado um acréscimo de carga no valor da flecha limite na ordem de 886 % na viga VC1 e 755 % na VC2.

O ponto fraco do sistema foi a rotura pelo sistema de ancoragem. No caso, o parafuso de olhal tinha sido dimensionado para uma carga inferior, obtida pelo modelo numérico, o que promoveu instantaneamente a rotura da viga, de modo frágil.

## 6.5 MODELAÇÃO NUMÉRICA

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

A análise não-linear P-delta teve fundamental importância para compreender o comportamento conjunto da viga de madeira com cada sistema de reforço empregado, como também, a análise por fases, onde cada fase do reforço foi calculada separadamente com sua geometria e propriedades específicas por fase. Por exemplo na análise da chapa de aço, onde a mesma foi adicionada somente após a introdução da contra-flecha, e no final do processo de cálculo de cada fase separada foram colhidos os resultados e combinados conjuntamente.

Na fase de pré-esforço a modelação numérica teve boa correlação com os modelos experimentais, como visto pela estimativa de deslocamentos na fase de pré-esforço das vigas e também de tensão dos elementos estruturais após aplicação do pré-esforço, como a chapa e o varão, somente no modelo reforçado por cabos de aço não foi possível assumir um valor fiável para os dados obtidos na viga real como explicado no Item 5.3, ficando distantes os resultados da modelação numérica e os ensaios experimentais.

Já na fase de carregamento das vigas até a rotura, a modelação numérica não teve boa correlação, como visto nos gráficos com diagramas de força *versus* deslocamento dos ensaios experimentais, onde o deslocamento calculado pelo modelo numérico foi inferior ao experimental.

Justificativas para essa fato se devem a defeitos presentes nas vigas não considerados nos modelos numéricos, a madeira é um material heterogéneo e cada viga tem suas singularidades, como grupos de nós espalhados no comprimento da viga, taxa de crescimento que implica em maior numero

de lamelas e também pelo fato de as vigas ensaiadas estarem de maneira geral torcidas e empenadas paralelamente ao eixo de flexão.

Note-se que algumas vigas não tinham total apoio devido a esses defeitos, e só passaram a encostar totalmente nos apoios após uma carga avançada, com inerente torção. A deformação por torção devido às imperfeições não foi considerada no modelo numérico, que atribui um provete com propriedades padrão.

## 6.6 CONCLUSÕES FINAIS

Conclui-se que os três sistemas de reforço com soluções pré-esforçadas analisados cumpriram os objetivos propostos inicialmente, com um acréscimo expressivo tanto no aumento da capacidade de carga, quanto 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 máximo até a rotura.

O aço foi adotado como material base para todos os reforços pela sua resistência e principalmente, por conta de sua ductilidade, atuando ativamente no sistema de reforço e melhorando o modo frágil de rotura das vigas de madeira, fazendo com que a rotura fosse anunciada com níveis avançados de deformação. O reforço por intermédio da chapa de aço foi de todos o que revelou maior ductilidade.

Quanto à eficiência do reforço, aliada à sua instalação e ao custo com material, o sistema de reforço por meio de cabos pré-esforçados se sobressaiu aos demais, sendo indicado para casos com altas exigências quanto a capacidade de carga e nível de deformação demonstrando eficiência especialmente para cargas concentradas. Este sistema tem, no entanto, como desvantagem a necessidade de espaço por baixo da viga para instalação dos desviadores.

Na sequência, o reforço por meio da chapa de aço pré-esforçada, tem como vantagem face aos demais a possibilidade de ser camuflado, pois ocupa pouco volume abaixo da viga, carecendo apenas de acesso total a face inferior da viga para implantação do sistema, podendo implicar em cortes, como por exemplo vigas que sustentam forros de madeira.

Por último o reforço com o varão pré-esforçado, que teve desempenho quanto ao aumento de carga semelhante com o sistema da chapa, mas exigiu maior dificuldade na sua instalação, e peças sob medida, e como o reforço por cabos, necessita de espaço na parte inferior da viga.

Como visto, para cada necessidade específica pode ser aplicado um tipo de sistema de reforço pré-esforçado, conferindo a estrutura maior capacidade de carga, menor nível de deformação e também um prolongamento da vida útil da estrutura.

## 6.7 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No processo de desenvolvimento deste trabalho, dúvidas a respeito do comportamento dos materiais envolvidos e às hipóteses de futuros desenvolvimentos para complemento do tema estudado foram gerados, sendo enunciados as seguintes sugestões.

- Perda de pré-esforço com o tempo: Imediatamente após a instalação do pré-esforço, sua força iniciava um decaimento, fato devido à fluência da madeira. Um estudo da variação da força e deformação da viga em função do tempo seria de grande valia para perceber o comportamento do sistema após instalação, analisando a necessidade de novas aplicações de pré-esforço até que o sistema permaneça estável.
- Análise de tensão nos cabos de aço: A experiência de se medir a força dos cabos de aço por meio de extensômetros nos parafusos mostrou resultados mais complexos que o esperado, não tendo sido fiável para a obtenção da resultante de forças instaladas no cabo, pelos efeitos enunciados no Item 5.7.3. Outras formas de se obter a força instalada nos cabos são necessárias. Sugere-se, por exemplo, o uso de acelerômetros para obter a frequência do cabo, e depois o uso da teoria das cordas vibrantes para obtenção da força instalada.
- A modelação numérica das vigas de madeira unidas a um sistema de reforço é outro ponto a ser desenvolvido. Como visto no decorrer deste trabalho, a modelação utilizada foi indiscutivelmente necessária para o dimensionamento das peças de ancoragem e na estimativa do comportamento conjunto dos materiais com a força de pré-esforço. Porém no âmbito das deformações finais atingidas pelas vigas experimentais, obteve resultados distantes da realidade, necessitando portanto de uma análise particular da propriedade dos materiais envolvidos para calibração no software de modelação numérica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 440.2R. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded {FRP} Systems for Strengthening Concrete Structures**, 2008.

ARRIAGA, F., PERAZA, F, ESTEBAN, M., BOBADILLA, I, GARCIA, GGF. **Intervención en estructuras de madera**. AITIM, Madrid ISBN 84-87381-24-3 2002.

BALSEIRO, A. M. R. **Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP**. (2002).

BALSEIRO, A. M. R -**Reforço e Reabilitação de vigas de Madeira por pré-esforço com laminados FRP**. - Tese de Doutorado, Universidade do Porto, 2007.

BARROS, R.; MARTINS, J. – **Reforço Sísmico de Estruturas de Alvenaria com Elementos Metálicos**. Série Reabilitação. Universidade Fernando Pessoa. 2006.

BOHANNAN, B. **Prestressed Laminated Wood Beams**. Madison Wis, 1964.

BRAVO,C.G. **Recuperación de la capacidad mecánica en piezas de madera solicitadas a flexión en estructuras tradicionales operando por la cara superior mediante refuerzos y prótesis mecánicas**. 212. Retrieved from: <http://oa.upm.es/442/> (2007)

BS EN 408. Timber structures — **Structural timber and glued laminated timber** — Determination of some physical and mechanical properties (Vol. 3), 2003.

CARNEIRO, F. F. O. D. - **Reforço de vigas de madeira com elementos de aço em obras de reabilitação** p.108 - Tese de mestrado integrado. Engenharia Civil (Área de Especialização de Estruturas). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, 2012.

Cholfe, L., & Bonilha. **Concreto Protendido: Teoria e Prática** (1ª Edição). São Paulo: Editora Pini Ltda, 2014.

CIMAF, **Manual Técnico de Cabos** (p. 105). São Paulo, 2009.

DE LUCA, V.; MARANO, C. **Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars**. - Construction and Building Materials, 30, 206–217. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.016> (2012).

DIAS, S.; BRANCO, J.; CRUZ, P. **Compósitos de CFRP Unidireccionais no Reforço de Vigas De Madeira Laminada Colada**. No 11 – FEV. 2006 VOL. 4, 4, 25–33.

DIAS, T. - **Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos. Diagnóstico e Intervenção Estrutural**. Dissertação de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado. FEUP, Porto, 2008.

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).

FERNANDES, T. ; CALIL, C. J. - **Desempenho Estrutural de Ponte Protendida Transversalmente de Eucalipto Citriodora**. Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, V.8, N.33, p.148-178, 2006.

IORELLI, J.; DIAS, A. A. **Compósitos de fibra de vidro para reforço de viga laminada colada de madeira**. - São Carlos, 2005.

ILHARCO, Thiago M.P – **Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos: diagnóstico e intervenção estrutural** – Tese de Mestrado: Reabilitação do Patrimônio Edificado – Universidade do Porto, 2012.

LEHMANN, M. **Investigations of the Loadbearing Behaviour of Timber Bending Beams Reinforced Using Prestressed CFRP Lamellas**, (April), 149. Retrieved from: <https://epub.uniweimar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/2456> (2015).

MARIANI, M. – **Consolidamento delle Strutture Lignee con L’Acciaio**. - Collana Centro Studi Sisto Mastrodicasa – Itália, 2004.

Marsh, K.. **Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2013: Essentials** (1 edition). Somerville, Massachusetts: Marsh API LLC. 2013.

MAZZOLANI, F.- **L’Acciaio nel Consolidamento** - Associazione Sviluppo Strutture Acciaio. – Milão, p.49. 1991.

NP EN 1912. **Madeira para Estruturas. Classes de Resistência. Atribuição de Classes de Qualidade e Espécies**. Instituto Português da Qualidade, 2003.

NP 4305. **Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas. Classificação Visual**. Instituto Português da Qualidade, 1995.

NP EN 1993-1-1:2010. **Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-10: Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura**. Instituto Português da Qualidade, 2010.

OKIMOTO, F. S. - **Pontes protendidas de madeira: parâmetros de projeto**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1997.

PRATA, D. G. - **Pontes protendidas de madeira**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1995.

REIS, M.; BRANCO, F.; MASCARENHAS, J. – **Técnicas de Reabilitação em Estruturas de Madeira**. Materiais de Construção. p. 40-46. Portugal.

Rothoblaas. **Screws for Wood - Catalogue**. Cortaccia (BZ) - Italy, 2014.

YUSOF, A., & L. A., S. **Strengthening of dapped timber beams using glass fiber reinforced polymer bars**, 955(10), 943–955. <http://doi.org/10.1139/L04-063>, 2004.



## **ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS VIGAS DE MADEIRA**

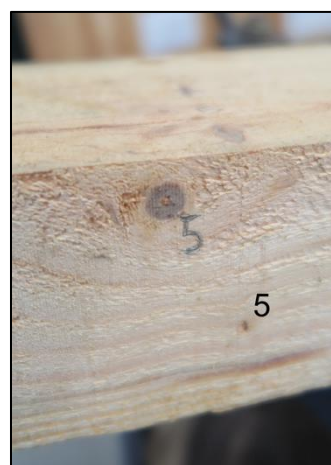
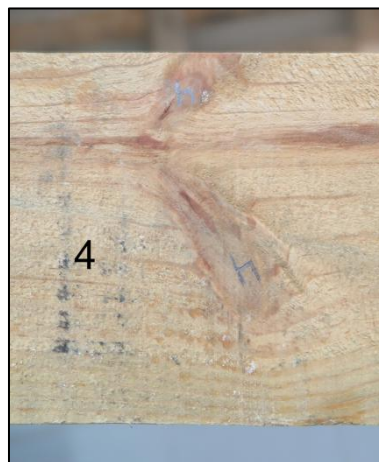
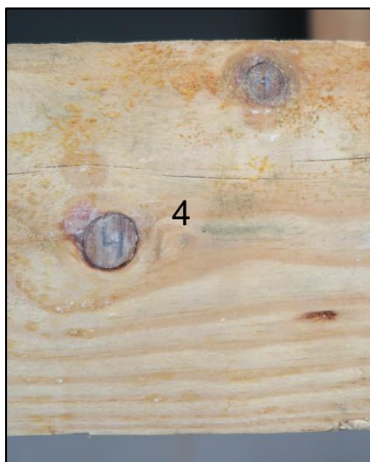
A seguir são apresentadas as fichas de classificação visual das vigas submetidas ao reforço estrutural, com base na norma NP 4305.

Quando a propriedade da massa volúmica das vigas, não foi possível avaliar o teor de água presente na madeira por falta do equipamento específico, sendo que os valores apresentados não contem correção do índice de humidade. As vigas foram pesadas no mês de Julho, tendo por base em outros ensaios realizados a mesma altura, o teor de água nas peças rondaria os 10 %.

Relativamente às vigas VV1 e VCH2, não foi possível realizar a pesagem das mesmas.

Ficha de Classificação Visual			
Amostra		VCH1	
Propriedades			
Espécie		Pinheiro Bravo	
Seção Transversal (cm)		Comprimento (cm)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
h	b		
11,2	8,0	266,5	540,7
Características e Defeitos da Madeira		Amostra	Classificação
Nós	KAR Marginal	0,39	E
	KAR Total	0,32	E
Inclinação do Fio		0,07	EE
Taxa de Crescimento		8,08	E
Fendas	Não Repassadas	Não	EE
	Repassadas	Não	EE
Descaio		Não	EE
Empenos	Arco de Face	6,2 mm	EE
	Arco de Canto	2,3 mm	EE
	Em Hélice	Não	EE
	Em Meia Cana	Não	EE
Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Não Repassadas	Não	EE
	Repassadas	Não	EE
Medula		Sim	E
Classificação Final		Aprovada, classe E	

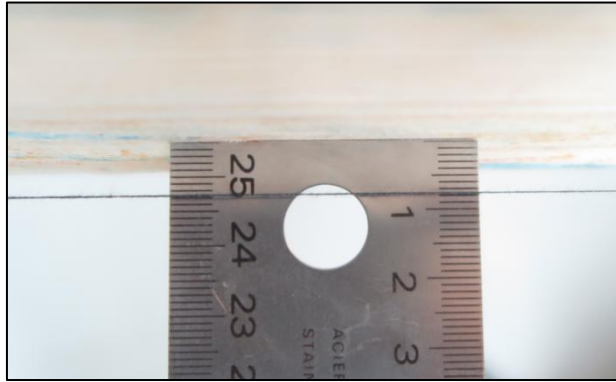
Classificação Visual – Amostra VCH1	
Nós	
	
	
	



Taxa de Crescimento



Empenos – Arco de Face



Empenos – Arco de Canto



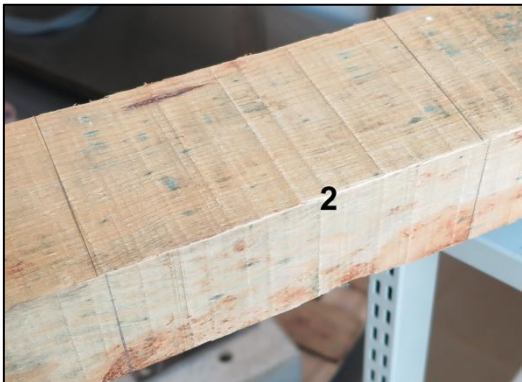
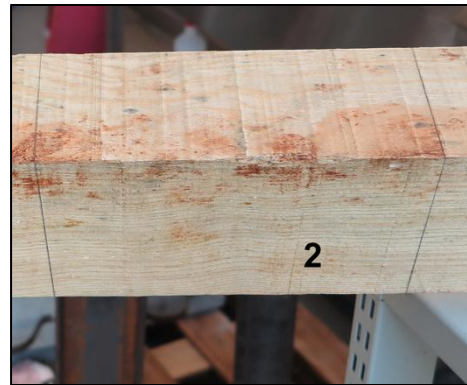
Medula



Ficha de Classificação Visual			
Amostra		VCH2	
Propriedades			
Espécie		Pinheiro Bravo	
Seção Transversal (cm)		Comprimento (cm)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
h	b		
10,5	8,1	268,0	-
Características e Defeitos da Madeira		Amostra	Classificação
Nós	KAR Marginal	0,15	EE
	KAR Total	0,04	EE
Inclinação do Fio		0,03	EE
Taxa de Crescimento		4,2	EE
Fendas	Não Repassadas	Não	EE
	Repassadas	Não	EE
Descaio		Não	EE
Empenos	Arco de Face	Não	EE
	Arco de Canto	4,4 mm	EE
	Em Hélice	Não	EE
	Em Meia Cana	Não	EE
Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Não Repassadas	Sim	EE
	Repassadas	Sim	EE
Medula		Não	EE
Classificação Final		Aprovada, Classe EE	

Classificação Visual – Amostra VCH2

Nós



Inclinação do Fio



Taxa de Crescimento



Descaio



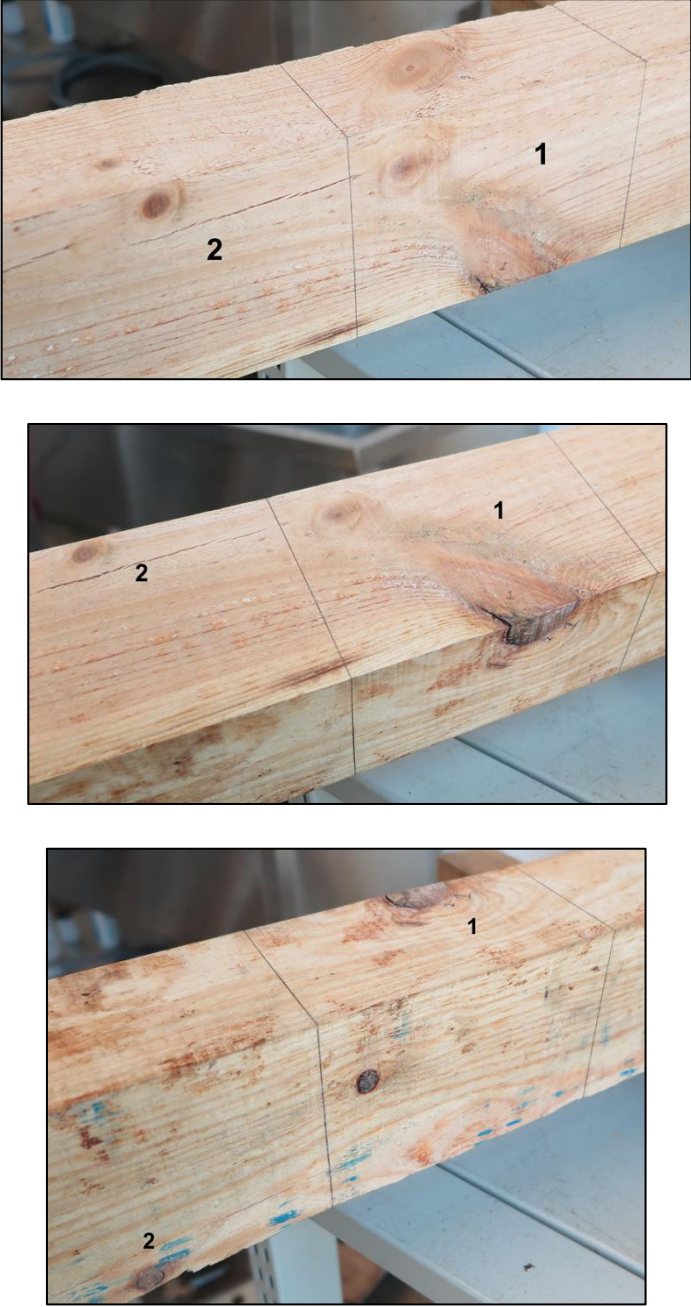
Empenos – Arco de Canto



Bolsa de Resina



Ficha de Classificação Visual			
Amostra		VV1	
Propriedades			
Espécie		Pinheiro Bravo	
Seção Transversal (cm)		Comprimento (cm)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
h	b		
11,2	8,3	264,5	-
Características e Defeitos da Madeira		Amostra	Classificação
Nós	KAR Marginal	0,39	E
	KAR Total	0,15	EE
Inclinação do Fio		0,04	EE
Taxa de Crescimento		4,4	EE
Fendas	Não Repassadas	54 cm	EE
	Repasadas	Não	EE
Descaio		Não	EE
Empenos	Arco de Face	3 mm	EE
	Arco de Canto	4,8 mm	EE
	Em Hélice	Não	EE
	Em Meia Cana	Não	EE
Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Não Repassadas	Não	EE
	Repasadas	Não	EE
Medula		Sim	E
Classificação Final		Aprovada, classe E	

Classificação Visual – Amostra VV1	
Nós	
	



Inclinação do Fio



Taxa de Crescimento



Fendas

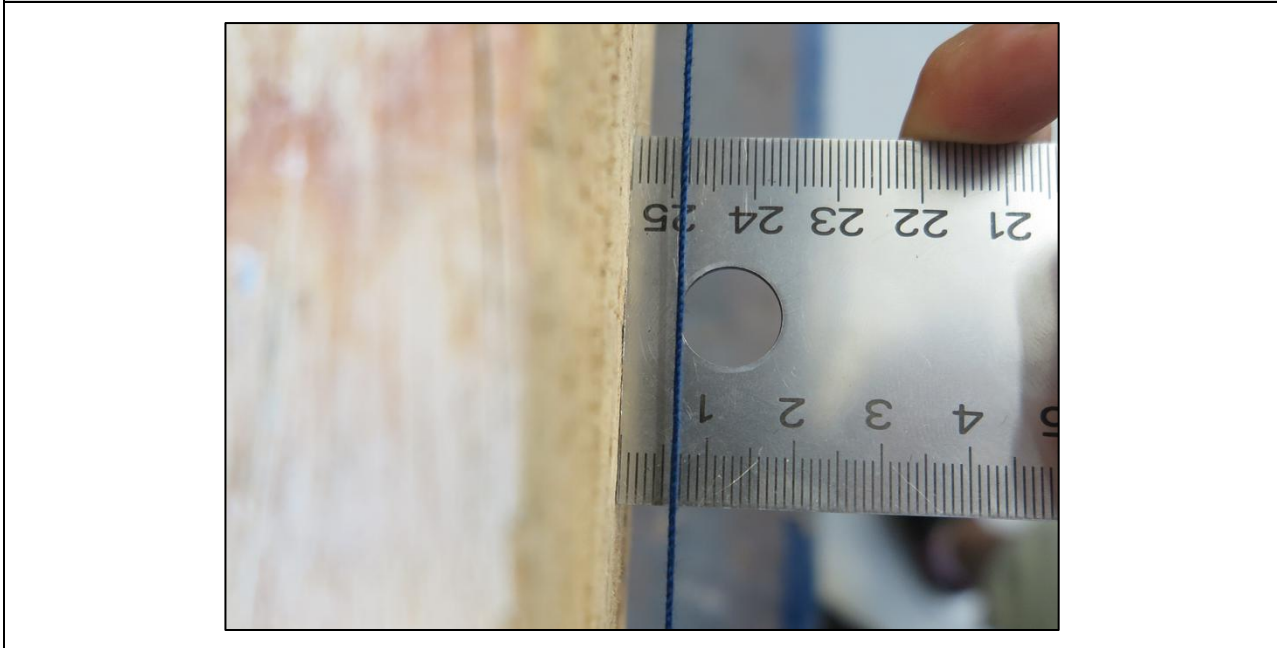


Empeno – Arco de Face





Empenos – Arco de Canto



Ficha de Classificação Visual			
Amostra		VV2	
Propriedades			
Espécie		Pinheiro Bravo	
Seção Transversal (cm)		Comprimento (cm)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
h	b		
11,3	8,0	264	631,9
Características e Defeitos da Madeira		Amostra	Classificação
Nós	KAR Marginal	0,45	E
	KAR Total	0,34	E
Inclinação do Fio		0,07	EE
Taxa de Crescimento		5,2	EE
Fendas	Não Repassadas	Não	EE
	Repasadas	Não	EE
Descaio		Não	EE
Empenos	Arco de Face	1,6 mm	EE
	Arco de Canto	4,4 mm	EE
	Em Hélice	Não	EE
	Em Meia Cana	Não	EE
Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Não Repassadas	Não	EE
	Repasadas	Não	EE
Medula		Não	EE
Classificação Final		Aprovada, classe E	

**Classificação Visual – Amostra VV2**

**Nós**



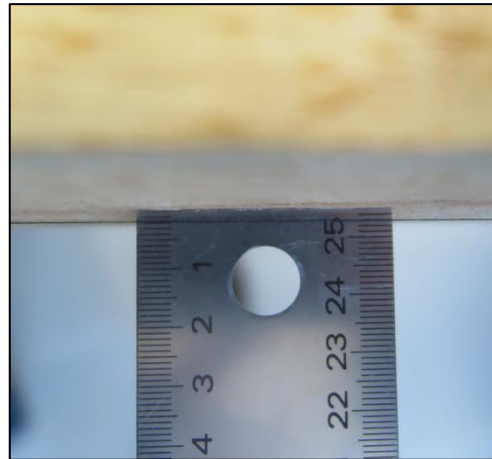
**Inclinação do Fio**



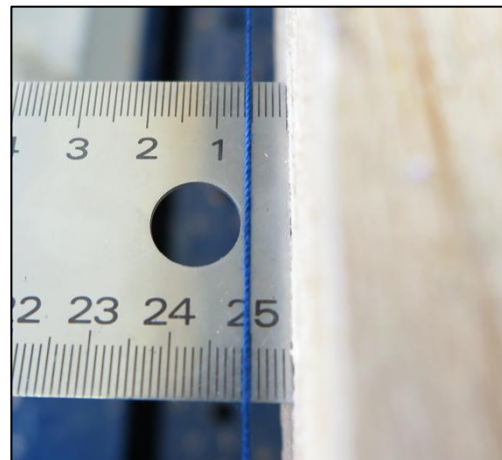
Taxa de Crescimento



Empenos – Arco de Face



Empenos – Arco de canto

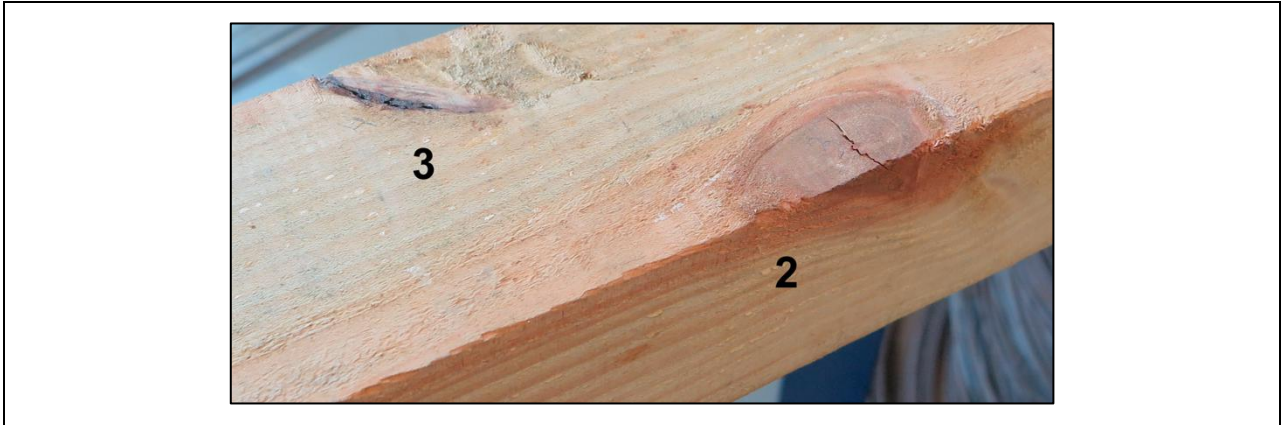


Ficha de Classificação Visual			
Amostra		VC1	
Propriedades			
Espécie		Pinheiro Bravo	
Seção Transversal (cm)		Comprimento (cm)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
h	b		
10,9	8,5	265,3	535,4
Características e Defeitos da Madeira		Amostra	Classificação
Nós	KAR Marginal	0,81	E
	KAR Total	0,27	E
Inclinação do Fio		0,04	EE
Taxa de Crescimento		13,5	Reprovada
Fendas	Não Repassadas	Não	EE
	Repasadas	Não	EE
Descaio		Não	EE
Empenos	Arco de Face	3 mm	EE
	Arco de Canto	12 mm	Reprovada
	Em Hélice	Não	EE
	Em Meia Cana	Não	EE
Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Não Repassadas	Sim	EE
	Repasadas	Não	EE
Medula		Não	EE
Classificação Final		Reprovada para uso estrutural	

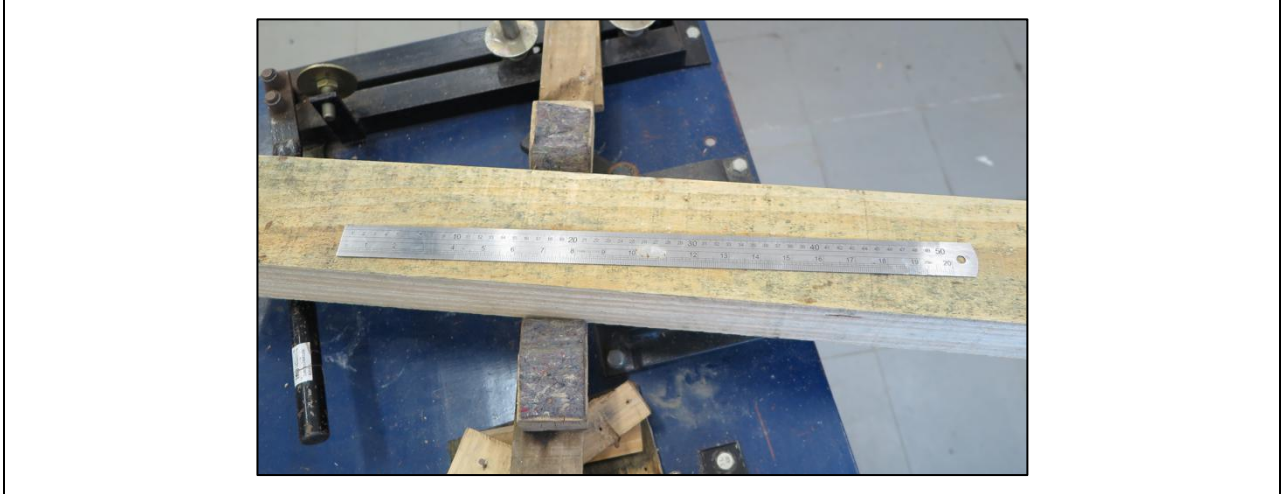
**Classificação Visual – Amostra VC1**

Nós





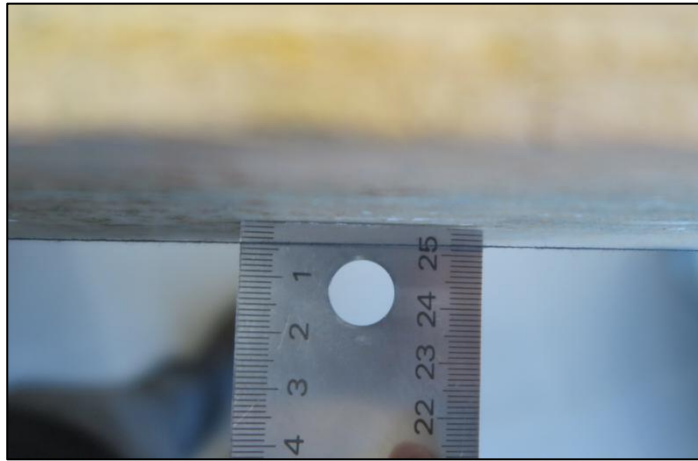
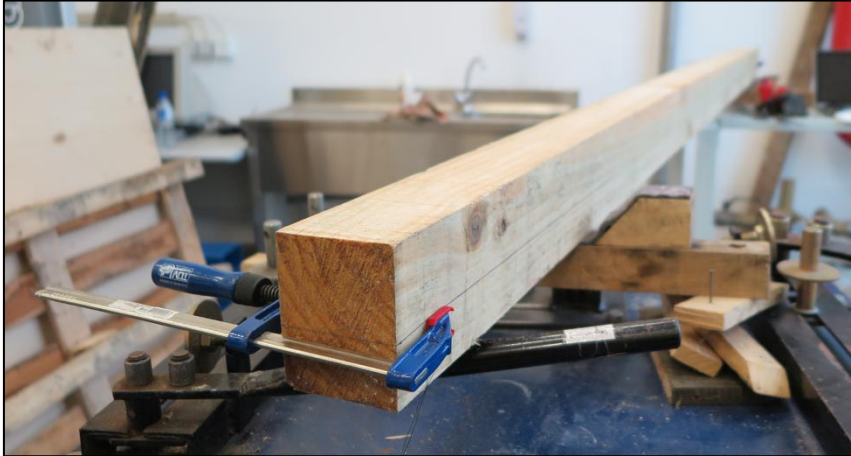
Inclinação do Fio



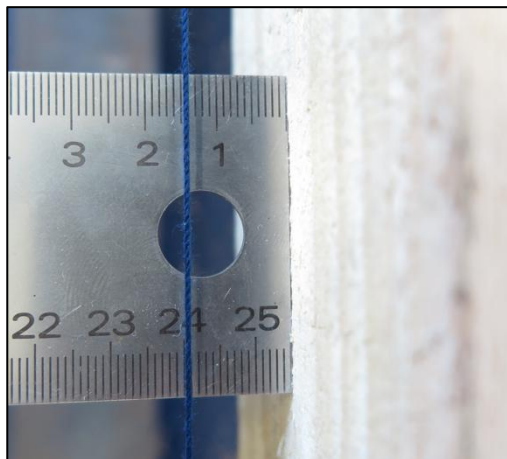
Taxa de Crescimento



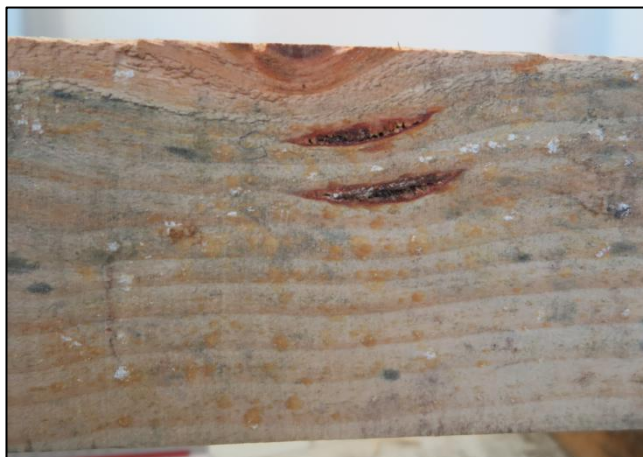
Empenos – Arco de Face



Empenos – Arco de Canto



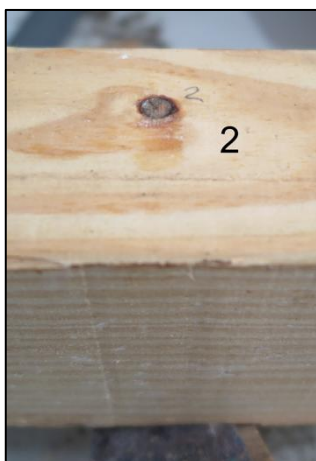
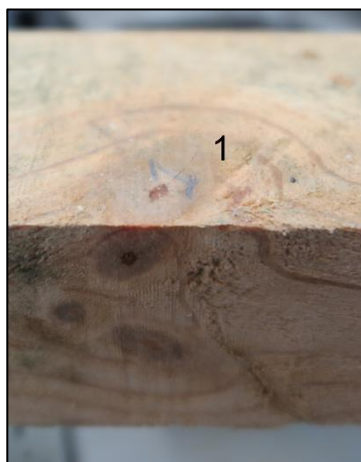
Bolsa de Resina

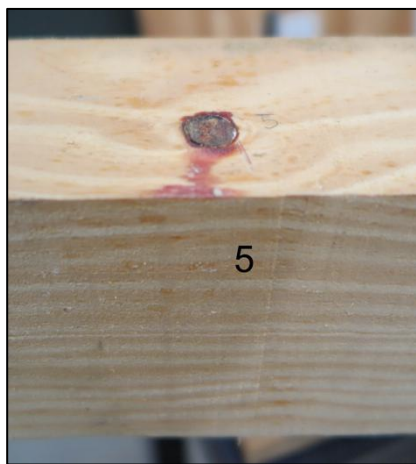
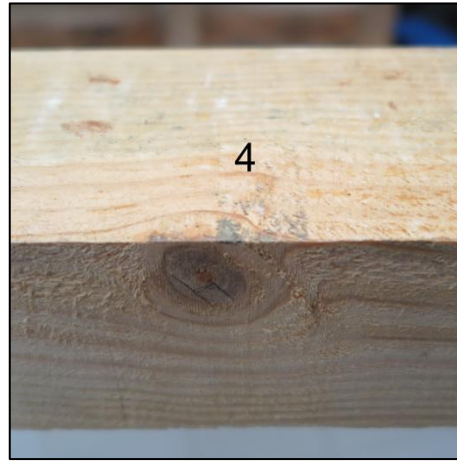


Ficha de Classificação Visual			
Amostra		VC2	
Propriedades			
Espécie		Pinheiro Bravo	
Seção Transversal (cm)		Comprimento (cm)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
h	b		
10,5	8,1	265,3	580,6
Características e Defeitos da Madeira		Amostra	Classificação
Nós	KAR Marginal	0,35	E
	KAR Total	0,39	E
Inclinação do Fio		0,06	EE
Taxa de Crescimento		5,4	EE
Fendas	Não Repassadas	Não	EE
	Repassadas	Não	EE
Descaio		Não	EE
Empenos	Arco de Face	7 mm	EE
	Arco de Canto	4 mm	EE
	Em Hélice	Não	EE
	Em Meia Cana	Não	EE
Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Não Repassadas	Não	EE
	Repassadas	Não	EE
Medula		Não	EE
Classificação Final		Aprovada, classe E	

**Classificação Visual – Amostra VC2**

Nós

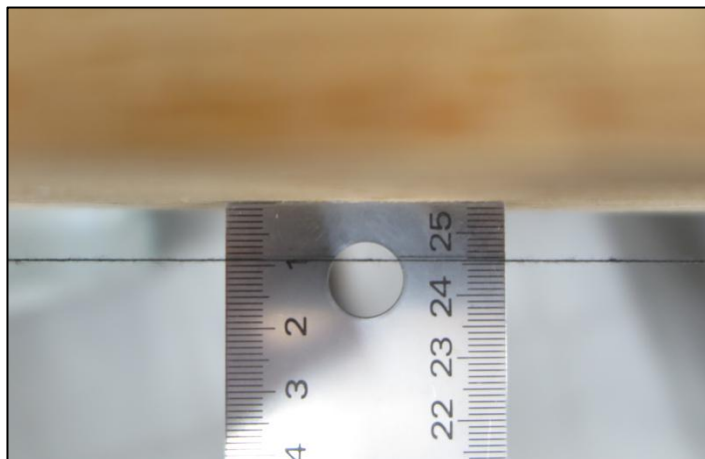




Taxa de Crescimento



Empenos – Arco de face



Empenos – Arco de canto

